

Э. М. Предтеченский,
А. И. Милгинский

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ
ЗДАНИЙ
с учетом
организации
движения
ЛЮДСКИХ
ПОТОКОВ**



МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНЖЕНЕРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ
им. В. В. КУПЬШЕВА
КАФЕДРА АРХИТЕКТУРЫ ГРАЖДАНСКИХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ
ЗДАНИЙ

В. М. ПРЕДТЕЧЕНСКИЙ, А. И. МИЛИНСКИЙ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗДАНИЙ С УЧЕТОМ ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ЛЮДСКИХ ПОТОКОВ

Издание второе,
переработанное и дополненное

Допущено Министерством высшего и среднего
специального образования СССР
в качестве учебного пособия
для студентов строительных специальностей вузов

BOOKS.PROEKTANT.ORG

**БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОННЫХ
КОПИЙ КНИГ**

для проектировщиков
и технических специалистов



МОСКВА СТРОИИЗДАТ 1979

ББК 38.712
П 71
УДК 721.052(075.8)

Рецензент проф. Л. Н. Авдоткин (Московский архитектурный институт)

Предтеченский В. М., Милинский А. И.

П 71 Проектирование зданий с учетом организации движения людских потоков: Учеб. пособие для вузов. — 2-е изд., доп. и перераб. — М.: Стройиздат, 1979. — 375 с., ил. — В надзаг.: Моск. инж.-строит. ин-т им. В. В. Куйбышева.

Рассматриваются основы теории и расчет движения людских потоков, а также методика и приемы проектирования помещений, зданий и сооружений общественного назначения и прилегающих элементов городской территории с учетом организации передвижения людей. Книга дополнена результатами новейших исследований в этой области, достигнутыми в СССР и за рубежом.

Учебное пособие предназначено для студентов вузов, обучающихся по специальностям «Архитектура», «Городское строительство», «Промышленное и гражданское строительство».

П $\frac{30204-303}{047(01)-79}$ 39—80. 4902010000

ББК 38.712

6С4.2

© Стройиздат, 1979

XXV съездом КПСС поставлена задача дальнейшего повышения качества строительства и архитектурных решений зданий и сооружений¹.

В Советском Союзе в больших масштабах ведется строительство зданий и сооружений массового назначения. К ним относятся театры, Дворцы культуры, кино-театры, клубы, концертные залы, спортивные сооружения, учебные заведения, торговые учреждения, административные здания, вокзалы и др.

Все эти здания и сооружения и прилегающие к ним городские территории являются местом периодического сосредоточения большого числа людей, достигающего подчас нескольких десятков тысяч человек. Последнее обстоятельство возлагает на проектировщиков-архитекторов и строителей ответственность за создание таких условий, при которых обеспечивались бы нормальные условия для деятельности или отдыха людей и их безопасная и быстрая эвакуация в случае возникновения пожара или других аварийных обстоятельств.

Организация надлежащих условий для передвижения людских потоков внутри и вне зданий представляет довольно сложную задачу. От ее решения зависят экономически и функционально оправданные размеры и форма как отдельных помещений, так и здания в целом, а следовательно, и его стоимость, а также рациональная планировочная организация городской территории в местах движения людских потоков.

В действующих в настоящее время Строительных нормах и правилах (СНиП) вопросы, связанные с обеспечением передвижения людей в помещениях, зданиях и на городских территориях, включая и вынужденную их эвакуацию из зданий, не нашли достаточно полного отражения.

В Советском Союзе в течение последних сорока лет ведутся экспериментальные и теоретические исследования движения людских потоков в зданиях массового назначения. Эти работы проводились б. Институтом архитектуры Всероссийской Академии художеств (ВАХ), Всесоюзным научно-исследовательским институтом

¹ Материалы XXV съезда КПСС. Политиздат, 1976, с. 211.

противопожарной обороны (ВНИИПО), Московским инженерно-строительным институтом им. В. В. Куйбышева (МИСИ). Исследования позволили раскрыть многие закономерности, которым подчиняется сложный процесс движения людских потоков, понять его сущность и обеспечить архитекторов и строителей данными для расчета, нормирования и выбора оптимальных архитектурно-планировочных решений помещений для пребывания и передвижения людей в зданиях массового назначения, а также пешеходных коммуникаций на прилегающих городских территориях.

За рубежом исследовательские работы в области движения людских потоков активизировались лишь в последнее время. Ранее в зарубежной литературе не появлялось сколько-нибудь значительных работ по этому вопросу.

Настоящее учебное пособие представляет собой второе, коренным образом переработанное и дополненное издание книги тех же авторов «Проектирование зданий с учетом организации движения людских потоков», изданной в 1969 г. в СССР и в последующие годы — в ГДР, ЧССР, ФРГ и США.

В данном издании изложены основы теории и расчет движения людских потоков, методика и приемы проектирования помещений, зданий и сооружений массового назначения, а также элементов городской застройки с учетом организации передвижения людей.

По сравнению с первым изданием в книгу внесено много новых материалов, полученных в результате научно-исследовательских работ, проведенных в последние годы в различных организациях и, главным образом, в МИСИ им. В. В. Куйбышева кафедрой архитектуры гражданских и промышленных зданий.

Несмотря на увеличение против первого издания объема книги, в ней освещены лишь основные положения данной проблемы. Тем не менее изложенный материал дает вполне законченное представление о научном проектировании зданий с учетом организации движения людских потоков.

Как и в первом издании, авторы поставили перед собой цель изложить материал так, чтобы книга могла быть одновременно и учебным пособием для студентов строительных специальностей высших учебных заведений, и руководством для специалистов, занятых прое-

ктированием зданий и сооружений, а также организацией движения людских потоков. Это обстоятельство повлияло на характер изложения материала, который насыщен примерами, сопровождаемыми пояснениями, позволяющими читателю разобраться в сложном процессе движения людских потоков и технике расчета.

Авторами учтены все ценные замечания, высказанные читателями первого издания настоящей книги. Кафедра архитектуры гражданских и промышленных зданий МИСИ будет благодарна за критику и пожелания, которые будут присланы в ее адрес.

Рукопись подготовлена к изданию канд. техн. наук М. В. Предтеченским.

*Кафедра архитектуры гражданских
и промышленных зданий
МИСИ им. В. В. Куйбышева*

§ 1. Функциональные основы проектирования

Здание или сооружение в целом, а также его отдельные объемно-планировочные и конструктивные элементы должны возможно полнее отвечать тем социальным процессам труда, быта и культуры, для осуществления которых здание или сооружение предназначено. Следовательно, основным назначением помещения, здания, сооружения или их комплексов является удовлетворение определенных функций общественной и личной жизни людей. К ним можно отнести физический и умственный труд, учебные и спортивные занятия, принятие пищи, процессы личной гигиены, различного рода зрелища, общественные собрания, передвижение, отдых, сон.

По мере развития общества возникают новые функции, отмирают старые, происходит их дифференциация. Иначе говоря, функции жизнедеятельности людей постоянно изменяются как в количественном, так и в качественном отношении.

Осуществлению каждой из перечисленных функций обычно сопутствуют одна или несколько других, имеющих вспомогательный или подсобный характер. Например, учебные занятия часто сопровождаются демонстрацией фильмов, опытов и пр., приобретение товаров — финансовыми операциями, движением и т. п. Необходимо различать главные и подсобные функции. Очевидно, что главная функция в данных условиях при изменении ситуации может стать подсобной и подсобная — главной. Во многих случаях бывает довольно трудно четко отделить главную функцию от подсобной. Некоторые так называемые многофункциональные помещения могут иметь несколько главных функций: например, Дворцы спорта используются для различных целей (спорт, зрелища, общественные собрания) и, следовательно, имеют несколько главных функций; актовый зал в высшем учебном заведении, предназначенный для торжественных собраний, студенческих вечеров, выставок и т. д., также может иметь множество главных функций.

Таким образом, разделение функций на главные и подсобные всегда несколько условно. Несмотря на это,

выявление главных и подсобных функций позволяет более правильно подойти к проектированию зданий и сооружений и получить наиболее обоснованные их решения. В помещении, имеющем определенное функциональное назначение, должны быть созданы такие условия, которые наиболее полно отвечали бы работе человеческого организма при выполнении данной функции, т. е. должна быть создана искусственная среда, отвечающая функциональному процессу, выполняемому человеком. Качество среды зависит от ряда физических факторов, к которым относятся:

пространство для размещения оборудования, используемое человеком (так называемое рабочее пространство), для перемещения оборудования или грузов и, наконец, для движения людей (проходы);

состояние воздушной среды — необходимый запас воздуха с оптимальными параметрами температуры, влажности и скорости движения, соответствующими нормальному при осуществлении данной функции тепло- и влагообмену человеческого организма и с допустимым для человека содержанием вредных примесей;

звуковой режим — условия слышимости в помещении (речи, музыки, сигналов и т. п.), соответствующие его функциональному назначению и включающие защиту от посторонних (вредных, мешающих) звуков (шума), проникающих из внешнего пространства или возникающих в самом помещении;

световой режим — условия работы органов зрения, отвечающие функциональному назначению помещения и определяемые степенью его освещенности. Со световым режимом связаны цветовые характеристики оборудования и поверхностей, ограждающих пространство, которые оказывают влияние не только на световой режим помещения, но и на психологическое состояние человека;

зрительное восприятие и видимость — условия работы в связи с наблюдением плоских или объемных объектов, расположенных в пространстве (объектов труда, оборудования, изображения на экране, записей на меловой доске и т. п.). Зрительное восприятие и видимость зависят от характера объекта, его освещенности, положения наблюдателя и других обстоятельств.

Правильный учет этих факторов может дать рациональное решение помещения по геометрическим, функ-

ционально-технологическим и физико-техническим параметрам.

Помещение является первичным и основным функциональным объемно-планировочным элементом здания. В зависимости от его назначения устанавливается главный функциональный процесс (один или несколько), протекающий в этом помещении, а также сопутствующие ему подсобные функциональные процессы. Например, в учебной аудитории основной функциональный процесс — учебные занятия, связанные с процессом письма, с наблюдением за экспериментом, записями на доске и т. п. и восприятием речи преподавателя. Подсобный (сопутствующий) функциональный процесс — движение людей по аудитории в связи с выходом к доске и при заполнении или освобождении помещения.

Зная главный и подсобные функциональные процессы, можно установить факторы, от которых зависит определение размеров помещения.

Применительно к аудитории при проектировании должны быть приняты во внимание воздушная среда, световой и звуковой режимы, зрительное восприятие и видимость, пространство для размещения учащихся и оборудования, а также для движения. При проектировании лишь сравнительно немногих помещений требуется учет всех функциональных факторов. В большинстве же помещений число учитываемых факторов обычно бывает меньше, а в таких помещениях, как, например, коридор, учитываются обычно только пространство для движения и световой режим.

Формирование плана здания должно прежде всего отвечать функциональному назначению основных помещений. Например, учебные здания состоят главным образом из аудиторий или классов, лабораторий, учебных кабинетов, в которых осуществляется основная функция, присущая зданиям этого типа, т. е. учебные занятия.

Однако в здании, как и в помещениях, кроме главной функции осуществляются и подсобные. Например, в учебном здании подсобными функциональными процессами следует считать руководство и управление, принятие пищи, процессы личной гигиены и др. Им отвечают определенные группы помещений (административные, столовые и буфеты, санитарные узлы и др.). Каждому

шинство из них влияет не только на выбор размеров помещений, но и на их конструкции. Например, состояние воздушной среды зависит от теплотехнических качеств наружных ограждений помещения, через которые происходят потери тепла в холодное время года, воздухо- и влагообмен. Защита помещений от шумов зависит от звукоизоляционных свойств ограждающих конструкций помещения; поскольку возможно проникание шума из смежных помещений, работающих по другому звуковому режиму, или из внешней среды. Слышимость в помещении зависит от акустических качеств, его формы и размеров и таких характеристик поверхностей ограждающих конструкций, как звукопоглощение или звукоотражение. Световой режим определяется размерами светопроемов, высотой и глубиной помещения.

Наконец, беспрепятственная видимость зависит от удаленности наблюдателя от объекта, от угла зрения, под которым виден объект, от профиля пола, подъем которого позволяет смотреть выше головы сидящего впереди зрителя, т. е. беспрепятственная видимость может быть обеспечена определенной длиной, шириной, высотой и конструктивным решением помещения.

В связи с развитием науки и техники ряд факторов теряет свое значение при выборе размеров помещений, например, требуемое состояние воздушной среды может быть достигнуто не только за счет объема помещения (запаса воздуха), но и путем применения систем вентиляции и кондиционирования воздуха; естественное освещение в ряде случаев заменяется искусственным с применением люминесцентных источников света, обеспечивающих как требуемую освещенность, так и необходимый по санитарно-гигиеническим условиям состав света; системы электроакустики способствуют хорошей слышимости независимо от размеров и формы помещений.

Однако применение таких систем и устройств часто ограничивается экономическими и другими соображениями.

Функциональная целесообразность зданий и сооружений находится в прямой связи с экономикой строительства.

Функциональные факторы определяют качество среды, в которой осуществляются те или иные процессы. В свою очередь от качества среды в целом и ее отдельных

параметров зависит физическое и моральное состояние человека. Известно, например, что температура воздуха в помещении, где люди заняты физическим трудом, должна быть ниже, чем в помещении, предназначенном для умственного труда. Если температура среды не соответствует условиям труда, человек быстро утомляется, и производительность его труда падает. Во многих странах с тропическим климатом в наиболее жаркие часы дня работа прекращается, поскольку ее экономическая эффективность оказывается крайне невысокой. После спадения жары работа возобновляется.

Огромное влияние на производительность труда оказывают световой и шумовой режим помещений. Исследования на предприятиях связи (телефонных станциях, сортировочных цехах почтамтов и т. п.) показали, что учет функциональных факторов позволяет существенно влиять на производительность труда (15% и более). Установлено также, что различные цветовые сочетания в окраске ограждающих конструкций и оборудования, в спектре электрического освещения по-разному влияют на эффективность труда.

Большое значение имеет правильный выбор размеров рабочего пространства и организация рабочего места. Если, например, чертежнику создать хорошие условия работы — подогнать стол и стул по его росту, удобно расположить необходимые чертежные инструменты, правильно осветить стол (чтобы свет не отражался в глаза), то производительность труда возрастает, а утомляемость уменьшится. Наоборот, если стол и стул не соответствуют росту человека, ему приходится тянуться или сгибаться, что вызывает физическое утомление; если чертежные инструменты расположены далеко, рука быстро устает, начинает дрожать, что ведет к ошибкам, исправление которых не только отнимает полезное время, но и вызывает раздражение, психологическую усталость. Если предположить, что при правильной организации труда чертежников эффективность их работы возрастет на 20%, то с объемом работы 50 человек могут справиться 40, т. е. обеспечение функциональной целесообразности помещений может дать прямой экономический эффект.

Кроме повышения производительности труда функциональная целесообразность помещений и зданий имеет огромное значение с точки зрения охраны труда, обеспечивая необходимый санитарно-гигиенический режим:

В большинстве случаев благодаря определению параметров помещений на основе функциональных факторов исключается завышение объема здания или сооружения, нередко допускаемое при проектировании вследствие недостаточного использования научных методов. Таким образом, обеспечение функциональной целесообразности зданий и сооружений может дать экономический эффект за счет предотвращения излишних единовременных и эксплуатационных затрат, вызванных необоснованно большими объемами.

Таким образом, функциональная целесообразность зданий и сооружений имеет большое значение. Вместе с тем в практике проектирования и строительства необходимо считаться с тем, что на выбор параметров помещений кроме функциональных оказывают влияние технические и архитектурно-художественные требования. Поэтому практически неизбежны отступления от тех параметров, которые диктуются функциональными условиями, и поиск компромиссного решения, с учетом технических и архитектурно-художественных требований. Влияние этих отступлений на экономические показатели проекта всегда может быть оценено путем сравнения их с показателями проекта, полностью учитывающего функциональные требования. Эти показатели являются как бы эталонными.

Правильная функциональная организация для прилегающей городской территории имеет не меньшее, если не большее значение, чем для зданий. Здесь также справедливы взаимосвязи, о которых было сказано выше, т. е. функциональный процесс — физические факторы — выявление главных и подсобных функций и формирование проектного решения, в данном случае территории. Очевидно, что для городских территорий будет свой набор характерных функциональных процессов, среди которых необходимо выделить передвижение людей как один из основных. При этом следует различать передвижение людей на транспорте и пешком, т. е. аналогично передвижению в здании при помощи механических средств (подъемников непрерывного или периодического действия) и без них.

Если внутри зданий мы имеем дело с искусственно создаваемой средой, то вне зданий среда естественная, природная, обладающая вполне определенными физическими характеристиками, которые надлежит учиты-

вать при формировании проектных решений городской территории и создаваемых на ней искусственных сооружений. Качество внешней среды может быть оценено пространством, пригодным для функциональной организации территории, показателями воздушной среды (климатическими данными), световым режимом (световым климатом), а также некоторыми другими факторами, характерными только для внешней среды, например атмосферными осадками и их последствиями. Звуковой режим, зрительное восприятие и видимость приобретают иное значение, чем в здании. Учет физических факторов, характеризующих внешнюю среду, следует осуществлять в двух основных аспектах: во-первых, в целях защиты от воздействия среды на человека и на искусственные сооружения или смягчения этого воздействия (например, защита людей, находящихся вне зданий, в районах с суровым климатом от холода и ветра путем устройства закрытых переходов между зданиями); во-вторых, защита самой среды от возможных вредных воздействий, возникающих в результате деятельности людей (выбросов в атмосферу от промышленных предприятий или средств транспорта).

§ 2. Движение людей как функциональный процесс

Движение людей в качестве подсобной функции сопутствует каждому функциональному процессу, поэтому в помещении любого назначения должно предусматриваться пространство для движения — проходы в производственных цехах между оборудованием для доступа к рабочим местам, между рядами кресел в зрительных залах и пр. Площадь, занимаемая проходами, нередко составляет значительную часть общей площади помещения.

Движение людей, сохраняя свое значение подсобной функции в масштабе здания в целом, независимо от его назначения, становится главной функцией в большинстве коммуникационных помещений. Последние, как известно, занимают в зданиях относительно большую площадь составляющую в ряде случаев около 30% рабочей площади здания. Выбор рациональных размеров проходов в помещениях и коммуникационных помещений имеет существенное значение, поскольку при этом может быть достигнут экономический эффект.

Значительная группа зданий и сооружений имеет функциональное назначение, связанное с движением людей. К ним относятся здания вокзалов различных видов транспорта, их пассажирские перроны, наземные вестибюли и подземные станции метрополитена, пешеходные тоннели и эстакады, входные павильоны парков и стадионов, проходные промышленных предприятий. Их рациональное объемно-планировочное решение зависит в основном от правильной организации движения людей — основного функционального процесса — и правильного назначения параметров помещений, в которых оно происходит.

Правильная организация движения людей в зданиях и помещениях имеет не только экономическое значение. Она предполагает также создание необходимых удобств; это относится в особенности к предупреждению переуплотнения людских потоков. Известно также, насколько неприятны бывают задержки движения в театральных зданиях после окончания спектакля, вызываемые недостаточной пропускной способностью гардероба, или толкотня в вестибюле из-за его недостаточных размеров. Можно утверждать, что плохо организованный подсобный функциональный процесс снижает эффективность основного функционального процесса, в данном случае отдыха или зрелища. Чтобы не задерживаться и избежать толкотни, некоторые зрители покидают театральный зал за несколько минут до окончания спектакля, вызывая справедливую досаду со стороны других зрителей и артистов. Можно привести много примеров, когда движение людей сопровождается серьезными неудобствами и более того — части граничит с прямой опасностью из-за чрезмерной плотности людской массы.

Таким образом, под удобствами при движении людей следует понимать обеспечение оптимальной для здания данного назначения продолжительности процесса и соблюдение определенной плотности на путях движения.

Ограничение продолжительности процесса движения определенным пределом необходимо для обеспечения безопасности людей в случае аварийной ситуации. Последняя может появиться в любом здании либо при возникновении пожара, либо при землетрясении, если здание расположено в сейсмическом районе, либо при аварии технологического оборудования. В аварийной

Ситуации проходы в помещениях и коммуникационные помещения в зданиях становятся путями эвакуации людей. От того, насколько пути движения людей при аварийной ситуации удовлетворяют условиям эвакуации, зависят время и характер движения. Если пути движения удобны, т. е. имеют достаточную ширину, ровную и нескользкую поверхность пола, простое очертание, позволяющее людям видеть ближайшие к цели движения участки пути, то движение протекает быстро, без задержек, и не сопровождается несчастными случаями. Наоборот, при неудачно решенных путях движения возникают задержки движения, давка, повышается нервное возбуждение людей, иногда перерастающее в панику, которая, как известно, часто сопровождается трагическими последствиями.

Для уяснения серьезности этого вопроса можно обратиться к некоторым статистическим сведениям. По американским данным, за период с 1897 по 1930 г. при пожарах в театрах погибло около 2,5 тыс. человек. Из общего числа жертв 49,8% погибли в связи эвакуацией людей из здания, в том числе из-за несоответствия путей эвакуации своему назначению и возникновения паники, — 46,5%.

Паника представляет собой внезапный, безотчетный, неуправляемый страх, овладевающий массой людей. В этом состоянии люди теряют способность сознательно относиться к окружающей обстановке. Причины и последствия возникновения паники иллюстрируются следующим примером. В 1924 г. в переполненном ленинградском кинотеатре «Молния» во время демонстрации фильма кто-то вскрикнул. Этого было достаточно, чтобы сотни людей мгновенно устремились к выходам. Движение, нараставшее с каждой секундой, сразу приняло панический характер. Люди рвались к выходам, шагая по стульям, напирая на идущих впереди и образуя в проходах «пробки». Когда кто-то дал свет, люди увидели, что причин для паники нет, заторы в дверях быстро рассосались.

При страхе люди почти всегда преувеличивают опасность, от которой они стремятся уйти. Более того, в большинстве случаев паники вообще отсутствовала всякая опасность для людей. Если бы последние в критический момент не теряли способности оценивать обстановку, то многих катастроф можно было бы избе-

жать. К сожалению, и те, кто в ответственный момент не утрачивал присутствия духа, нередко сами оказывались увлеченными потоком людей, охваченных паникой.

Из приведенных примеров также следует, что трагические последствия паники в общественных местах, как правило, связаны с движением людской массы от очага действительной или воображаемой опасности, задержкой движения и давкой. Если предположить, что пути движения решены таким образом, что задержка движения невозможна и не образует чрезмерного уплотнения людей, то, по-видимому, можно избежать всяких неприятных последствий.

Приведенные примеры относятся к прошлому. Но и в наше время, несмотря на развитие техники пожаротушения, обеспечение эвакуации людей при пожарах продолжает оставаться острой проблемой. Этому способствует увеличение объемов и вместимости зданий, массовое применение сгораемых, в том числе синтетических, материалов для отделки, быстро горящих и выделяющих ядовитые продукты горения. В 1972 г. в США от пожаров погибло около 12 тыс. человек*. В последние годы произошел ряд крупных пожаров, сопровождавшихся значительными человеческими жертвами: в 1967 г. в Брюсселе (Бельгия) при пожаре в универмаге погибли 350 и ранены 150 чел.; в 1970 г. в Сен-Лорандю-Пон (Франция) сгорел дансинг, где погибли 145 чел. в 1971 г. в Сеуле (Южная Корея) при пожаре в высотной гостинице погибли 154 и ранены 67 чел.; при пожаре в универмаге в Осаке (Япония) в 1972 г. погибли 119 чел.

Гибель людей в зданиях или сооружениях связана не только с пожарами, но и с нарушением организации движения людских потоков в нормальных условиях. Например, в 1971 г. в Англии на стадионе, вмещающем 80 тыс. зрителей, во время футбольного матча погибли 66 и пострадали 200 чел. Произошло это потому, что в проходе на трибуне образовался людской поток с очень высокой плотностью, под напором которого разрушилось ограждение, люди начали падать под ноги идущему ниже людскому потоку. Тяжелая катастрофа произошла в 1964 г. на стадионе в Лиме (Перу), где погибли 350 чел. Известны и другие случаи, когда на-

* Травинский В. Пожар. Литературная газета, 1975, 5 февраля.

рушался нормальный ход процесса движения, сопровождавшийся человеческими жертвами.

Таким образом, правильная организация движения людей как функционального процесса имеет очень большое значение в качестве одного из мероприятий по обеспечению безопасности.

Оценка движения людей как функционального процесса при проектировании зданий и сооружений приобретает все большее и большее значение. Это объясняется значительным развитием общественных форм жизни, особенно в социалистических странах, бурным ростом населения городов и численности населения на земном шаре вообще. Резко возросла вместимость общественных зданий и сооружений массового назначения. Открытые спортивные арены в настоящее время рассчитываются на 100 и более тысяч зрителей. Вместимость кинотеатров достигает 2 тыс. чел. и, по-видимому, будет увеличиваться в дальнейшем. Закрытые спортивные сооружения и концертные залы рассчитываются на 40—50 тыс. человек. Если сравнить эти цифры с данными пятидесятилетней давности, то вместимость общественных зданий массового назначения увеличилась в несколько раз. Все это обязывает более внимательно относиться к вопросам организации движения больших масс людей, а не ограничиваться только приближенной оценкой движения в аварийных условиях. По-видимому, расчет движения людских масс должен стать обязательным элементом при проектировании общественных зданий.

Для прилегающих к зданиям городских территорий движение людей как функциональный процесс имеет также очень большое значение. Прежде всего следует выделить городские транспортно-коммуникационные узлы, в которых движение людских потоков представляет один из основных функциональных процессов, которому может быть подчинено его архитектурно-планировочное решение. В транспортно-коммуникационных узлах можно ожидать образования людских потоков с высокими плотностями, их пересечения, слияния и расчленения. Возникновение в этих условиях аварийной ситуации или повышенной психической напряженности толпы, как и в зданиях, может быть чревато трагическими последствиями, поэтому расчет пешеходных коммуникаций в специальных сооружениях (вестибюли метрополитена,

подземные пешеходные тоннели и др.) следует считать необходимым, особенно если учитывать перспективное развитие узла и увеличение его транспортных нагрузок.

Что касается движения людских потоков по городской территории, то его значение приобретает здесь несколько другой аспект. Дело в том, что на пешеходных путях (тротуарах улиц, внутриквартальных пешеходных путях) трудно ожидать высокие плотности людских потоков. Исключение могут представить лишь пути в районах крупных общественных или торговых комплексов, где может потребоваться расчетное обоснование их ширины, поэтому параметры пешеходных путей обычно определяются не по условиям обеспечения определенного заданного времени движения людского потока, имеющего относительно высокую плотность, а по условиям удобства (комфортности) передвижения людей с учетом совершенно разнообразных видов их движения (быстро и медленно, в одиночку и группами, с вещами и без них и т. п.).

На городских территориях основное значение имеет трассировка и длина пешеходных путей, так как при деловых передвижениях пешком люди всегда стремятся сократить время движения и расход энергии, поэтому обоснованный выбор мест размещения центров тяготения людских потоков (остановок городского транспорта, пунктов бытового и коммунального обслуживания и т. п.) относительно жилья или по другим признакам представляет важную задачу для проектировщиков, особенно для местностей с особыми климатическими условиями.

BOOKS.PROEKTANT.ORG

**БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОННЫХ
КОПИЙ КНИГ**

**для проектировщиков
и технических специалистов**

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И РАСЧЕТ ДВИЖЕНИЯ ЛЮДСКИХ ПОТОКОВ

Глава I

ИССЛЕДОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ЛЮДСКИХ ПОТОКОВ

§ 1. Общие сведения о движении людей

В цикле передвижения человека различают два основных периода: «одноопорный», когда с опорой человек соприкасается одной ногой, и «двухопорный», когда вынесенная вперед нога касается опоры, а нога, находящаяся сзади, еще не отделилась от опоры. С увеличением скорости движения двухопорные периоды становятся короче и, наконец, исчезают совершенно. С этого момента ходьба переходит в бег. Следовательно, бег, в отличие от ходьбы, представляет собой движение, при котором человек поочередно либо соприкасается с опорой только одной ногой, либо летит в воздухе. Обычно движение представляет собой ходьбу.

При проектировании конструкций путей движения следует иметь в виду, что при ходьбе давление на опору за счет динамического характера процесса может превышать вес тела человека на 25%.

Скорость движения может меняться в широких пределах. Максимальная скорость человека составляет около 600 м/мин (при спортивном беге на дистанцию 100 м); скорость при ходьбе может быть около 200 м/мин (достигнута при спортивной ходьбе на 20 км). В обычных условиях скорость движения людей (не спортсменов) составляет в среднем около 60 м/мин, хотя были зарегистрированы случаи, когда скорость достигала 120—140 м/мин.

Колебания скорости зависят от многих причин, трудно поддающихся точному учету. Здесь имеют значение и возраст, и физические данные человека, и различные обстоятельства, связанные с его деятельностью, и его психическое состояние в данный момент. Поэтому при оценке скорости движения неизбежно приходится прибегать к средним значениям, которые можно считать надежными, если они установлены на основании статис-

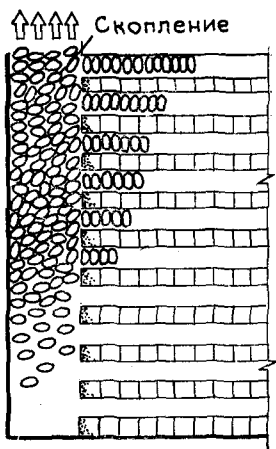


Рис. 1.1. Людской поток в проходе зрительного зала кинотеатра по окончании сеанса (схема)

тических методов. В значительной степени скорость движения зависит от плотности людской массы. Чем выше плотность, тем медленнее движение. Эта закономерность имеет важное значение, поскольку наибольший практический интерес представляет движение больших людских масс, а сосредоточения людей, как уже указывалось, могут быть очень значительными.

На рис. 1.1 показан людской поток в проходе зрительного зала кинотеатра примерно через полминуты после окончания сеанса: вблизи выходного проема образовалось скопление людей, плотность которого весьма высока.

Значительные скопления людей наблюдаются и в метро в часы пик (рис. 1.2), особенно перед эскалаторными комплексами из-за их недостаточной пропускной способности, а также в крупных универсальных магази-

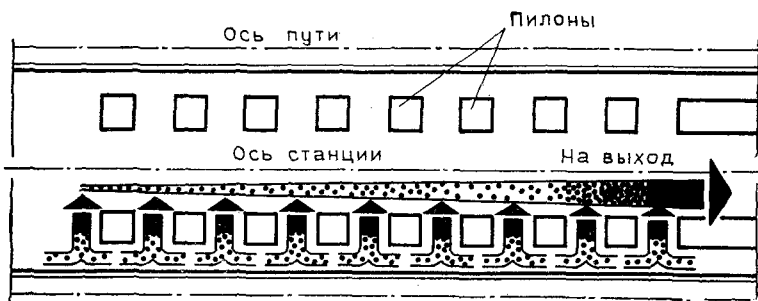


Рис. 1.2. Образование людского потока с высокой плотностью в подземном зале станции метрополитена перед эскалатором

нах, в зрелищных зданиях и сооружениях большой вместимости, в транспортных сооружениях, в транспортно-коммуникационных узлах и т. п.

На приведенных рисунках движение людских потоков носит спокойный характер. Но если предположить, что при таких скоплениях неожиданно возникнет аварийная ситуация, легко представить себе, к каким серьезным последствиям она может привести, если процесс движения по тем или иным причинам будет затруднен.

Получить параметры движения людей в аварийных условиях по понятным причинам не представляется возможным, поэтому для этих целей приходится прибегать к использованию или условий движения, близких к аварийным, или методов экстраполяции данных, полученных в нормальных условиях.

В натуре при наблюдениях (в нормальных условиях) отмечалась очень высокая плотность скопления людских масс, составляющая более 7 чел/м². Плотность также зависит от возраста, физических данных и одежды людей, поэтому ее максимальное значение может колебаться в значительных пределах. При движении людских масс, особенно в аварийных условиях, плотность может достигать 10—11 чел/м² вследствие силовых воздействий при сжатии в случае скопления людей, стремящихся выбраться из потока.

§ 2. Основные положения, понятия и величины

Вопросы организации движения больших масс людей в зданиях общественного назначения давно привлекают внимание научно-исследовательских и проектных организаций и отдельных специалистов главным образом с целью разработки методов расчета и приемов нормирования эвакуации людей из зданий на случай пожара, так называемой вынужденной эвакуации.

Известен ряд работ в этой области, послуживших основанием для расчета и нормирования вынужденной эвакуации и для решения конкретных проектных задач. Прежде чем дать характеристику этих работ, установим некоторые общие понятия и величины, характеризующие движение людей.

При массовом одновременном движении людей в одном направлении образуется так называемый людской поток длиной l и шириной δ (рис. 1.3).

Пути движения людских потоков служат проходы в помещениях различного назначения и специальные помещения: коридоры, кулуары, фойе, лестницы, пай-

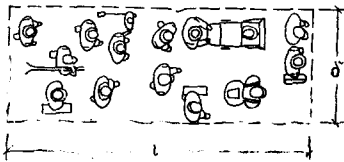


Рис. 1.3. Фрагмент людского потока

дусы (рис. 1.4). Пути движения характеризуются свободной длиной L и шириной b . Они пересекаются дверными проемами, декоративными порталами, имеют сужения за счет различных выступающих из плоскости стен элементов (пиластр, открытых трубопроводов и др.). Длина пути L в проемах или других сужениях, как правило, относительно невелика и обычно не учитывается.

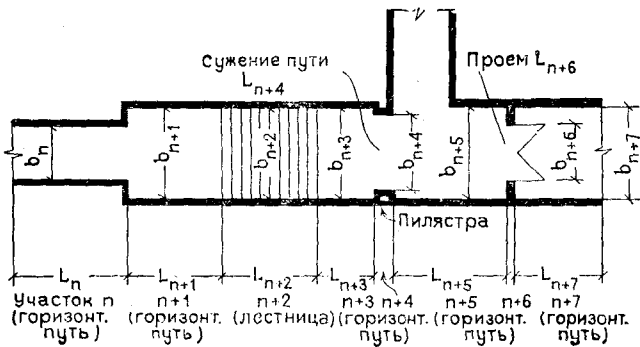


Рис. 1.4. Схема путей движения людских потоков

Пути движения делятся на участки, различающиеся по характеру (горизонтальные, наклонные и проемы) и параметрам L , b . Проемы целесообразно считать самостоятельными участками пути. Движение людей может осуществляться также при помощи механических средств: подъемников непрерывного (эскалаторов) и периодического действия (лифтов, патерностеров) и движущихся полов для передвижения по горизонтали или с небольшими уклонами. Механические средства передвижения людей считаются самостоятельными участками пути.

Людской поток характеризуется числом людей N и плотностью D , т. е. количеством людей, отнесенным к длине пути или к площади, занимаемой потоком. Он име-

ет определенную скорость движения v . Путь характеризуется пропускной способностью Q , т. е. числом людей, проходящих в единицу времени через поперечное сечение пути.

Остановимся на работах, имеющих научно-теоретическое и практическое значения.

§ 3. Исследования Института архитектуры

Всероссийской Академии художеств и Высшей школы МВД СССР

Исследования движения людских потоков впервые были поставлены на серьезную научную основу проф. С. В. Беляевым. Под его руководством в Институте архитектуры Всероссийской Академии художеств (ВАХ) в 1937 г. [3] было проведено около 200 наблюдений за движением потоков в общественных местах, при этом изучались пропускная способность и скорость движения людских потоков.

Исследования показали, что пропускная способность одного элементарного потока, представляющего собой один условно выделенный ряд людей, движущихся в затылок друг другу, колеблется от 25 до 50 чел/мин. При этом плотность потока составляла 4—5 чел/пог. м пути, т. е. соответствовала физическому пределу. На этом основании было высказано мнение, что при максимальном уплотнении пропускная способность потока составляет не менее 25 чел/мин.

Замеры скоростей движения по горизонтальным путям показали, что они не падают ниже 17 м/мин. Скорости при спуске по лестнице составляли от 11 до 16 м/мин, а при подъеме — в среднем на 20% меньше.

Было сделано заключение, что скорость движения людских потоков обратно пропорциональна, а пропускная способность — прямо пропорциональна их плотности.

Результаты замеров представлены на сводном графике (рис. 1.5). Кривые построены только по минимальным значениям наблюдавшихся параметров, так как при одних и тех же величинах плотности фиксировались различные значения скорости и пропускной способности. Пунктирные части кривых получены путем экстраполяции.

На основе результатов этих исследований был выдвинут ряд предложений по расчету и нормированию эвакуации людей из зданий. В качестве расчетных зна-

чений скорости движения и пропускной способности элементарного потока рекомендованы наименьшие значения, полученные при наблюдениях, как постоянные для любых условий движения и плотностей потока (для горизонтальных путей скорость 16 м/мин, при спуске по лестницам — 10 м/мин, при подъеме — 8 м/мин; пропускная способность проемов на один элементарный

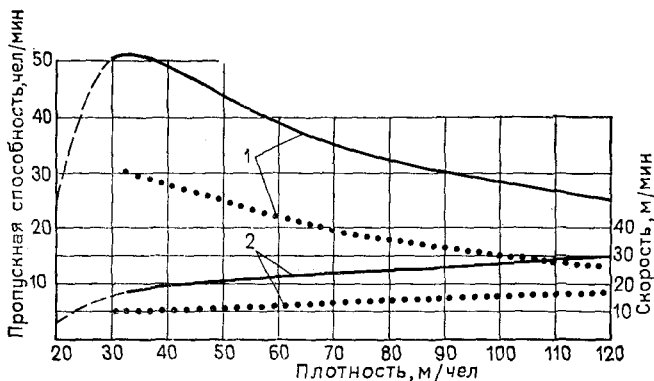


Рис. 1.5. Зависимость пропускной способности 1 и скорости движения 2 от плотности людского потока (по С. В. Беляеву)
сплошные линии — движение по горизонтальному пути; точечный пунктир — движение по лестницам

поток 25 чел./мин). Критерием безопасности вынужденной эвакуации предложено считать ее допустимую продолжительность и конкретные значения этого критерия для театров.

Исследования ВАХ в целом послужили материалом при составлении «Временных норм строительного проектирования театров» (1943 г.) и способствовали лучшему пониманию процесса движения людских потоков.

Основным научным достижением этих исследований следует считать установление зависимости

$$v = f(D).$$

Вместе с тем исследования ВАХ содержат серьезные недостатки. К ним следует отнести относительно небольшое число натуральных наблюдений, не позволяющее дать достаточно полную оценку процесса; неудачно выбранные места для наблюдений — тротуары улиц, трамвайные вагоны, где движение людей сильно отличается от движения в зданиях; изображение двигающейся массы людей в виде элементарных потоков, не отве-

чающее действительному расположению людей в потоке; неудачное выражение плотности потока в линейных единицах (длина пути, приходящаяся на одного человека в элементарном потоке); необоснованность выбранного физического предела плотности (0,2 м/чел) и нижнего предела пропускной способности проемов (25 чел/мин), противоречащие фактически наблюдаемым значениям, поскольку известны случаи почти полной остановки движения при высоких плотностях в проемах.

Главным же недостатком работы ВАХ следует считать установление постоянных значений в качестве нормативных и расчетных скоростей движения, что противоречит действительной картине движения, поэтому всякие нормативные и расчетные рекомендации, основанные на этом, должны быть решительно отвергнуты.

Исследования М. Я. Ройтмана в Высшей школе МВД СССР [25, 26] в теоретическом отношении базируются на принципах С. В. Беляева и, следовательно, не свободны от указанных выше недостатков. Однако в указанных работах были даны некоторые новые предложения, которые можно рассматривать как попытки устранить очевидные недостатки работы ВАХ. В частности, была высказана возможность принимать скорости движения потока и пропускные способности проемов в зависимости от линейной плотности по трем значениям (благоприятные условия — 75 м/мин и 75 чел/мин — при плотности 1 м/чел; 25 м/мин и 50 чел/мин — при плотности 0,5 м/чел; критические условия — 16 м/мин и 25 чел/мин — при плотности 0,33 м/чел).

Предложен так называемый «коэффициент Беляева», представляющий частное от деления ширины элементарного потока на пропускную способность проема:

$$k = \frac{0,6}{25} = 0,024 \text{ м} \cdot \text{мин} / \text{чел},$$

позволяющий более правильно оценивать пропускную способность проемов. По С. В. Беляеву, пропускная способность проема определяется путем умножения пропускной способности элементарного потока на целое число элементарных потоков, проходящих в проем данной ширины. По М. Я. Ройтману, пропускная способность проема (в чел/мин) находится делением ширины проема на коэффициент Беляева, т. е.

$$Q = \frac{\delta}{k}.$$

Иначе говоря, при этом учитывается полная ширина проема, включая и остаток, образующийся от деления ширины проема на ширину элементарного потока.

Сделана также попытка учесть возраст людей путем уменьшения ширины элементарного потока до 0,5 м для детских учреждений.

Однако в конечном итоге для расчета эвакуации людей из зданий рекомендуется использовать расчетные данные только для критических условий, не отличающиеся от данных С. В. Беляева.

В следующей работе [27] автор возвращается к оценке ширины элементарного потока, плотности, скорости движения и пропускной способности выходов. На основании проведенных исследований и обобщения литературных источников рекомендуется ширина элементарного потока 0,5 м; максимальная плотность 0,2 м/чел (10 чел/м²); скорость движения на горизонтальных путях колеблется в пределах от 70 до 16 м/мин. Для расчета эвакуации рекомендуются также постоянные значения параметров потока, предложенные С. В. Беляевым: пропускная способность выходов 50 чел/мин на 1 пог. м ширины при дверях шириной менее 1,5 м и 60 чел/мин при дверях шириной более 1,5 м, иначе говоря, те же 25 чел/мин на элементарный поток. Вместе с тем пропускная способность выходов дается в зависимости от плотности и скорости движения людских потоков (табл. 1.1).

Таблица 1.1. Пропускная способность выходов (по М. Я. Ройтману)

Линейная плотность, м/чел	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,35	0,3	0,2
Скорость движения, м/мин	70	70	70	60	50	40	30	25	20	16
Пропускная способность прохода, чел/(м·мин)	84	96	106	102	100	96	90	58	54	50

Таким образом, несмотря на новые исследования, в расчетные данные не внесено изменений.

В работе [28] раздел, посвященный процессу вынужденной эвакуации, по своему теоретическому содержанию мало отличается от данных [27], но сделана попытка связать представления о процессе движения с новыми

концепциями, полученными МИСИ им. В. В. Куйбышева и ВНИИПО МВД СССР. Несомненно, что эти работы М. Я. Ройтмана способствовали дальнейшему изучению закономерностей движения людей и, в частности, нормированию их вынужденной эвакуации из зданий.

§ 4. Исследования Всесоюзного научно-исследовательского института противопожарной обороны

Проведенные в 1946—1948 гг. А. И. Милинским во Всесоюзном научно-исследовательском институте противопожарной обороны (ВНИИПО) исследования [11] отличались от предыдущих широким масштабом и более совершенной методикой. Их главной целью было получение надежных количественных показателей, характеризующих движение людских потоков, и выяснение некоторых закономерностей, которым подчиняется этот процесс.

Было проведено более 6000 натуральных наблюдений в различных зданиях общественного назначения: театральных, промышленных, учебных, транспортных; изучались размеры людей, плотность и скорость движения людских потоков и пропускная способность дверных проемов. На основании наблюдений были установлены средний размер взрослых и подростков (на уровне груди) в зимней и летней одежде, а также площади их горизонтальных проекций.

Плотность людского потока было предложено относить к площади пола и выражать либо числом человек, приходящихся на единицу площади, либо суммой площадей их горизонтальных проекций на ту же единицу. Установлено значение максимальной плотности, оправданное теоретически и проверенное на практике.

Определены наиболее вероятные плотности потока на путях движения в зданиях различного назначения, и в том числе театральных, представляющих особый интерес с точки зрения вынужденной эвакуации. Одновременно выявлена возможность образования повышенных плотностей в дверных проемах и остановки движения.

Наблюдениями за скоростью движения людских потоков подтверждена ее зависимость от плотности $v=f(D)$ и установлены средние скорости для различных плотностей потоков. Важное значение имеет

установление амплитуды колебаний скоростей движения при разных величинах плотности, а также вероятные значения скоростей движения людских потоков в зданиях различного назначения.

В результате изучения пропускной способности дверных проемов различной ширины (от 0,5 до 2,4 м), была предложена формула для ее определения:

$$Q_d = \delta_d (Dv + K), \quad (1.1)$$

где δ_d — ширина проема, м; D — плотность потока, выраженная суммой горизонтальных проекций людей, отнесенной к площади, занимаемой потоком, $\text{м}^2/\text{м}^2$; v — скорость движения, м/мин; K — поправочное слагаемое.

Значения K при различной плотности потока приведены ниже:

D	Около 0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	$D_{\text{макс}} =$ 0,92
K	0	0,8	1,55	1,87	1,8	1,47	1,12	0,8	0,5	0,4

Впервые при определении пропускной способности проемов введено понятие удельной пропускной способности проемов $q = Dv$.

Исследованиями ВНИИПО был сделан новый шаг вперед в понимании процессов движения людских потоков. Большую ценность представляют экспериментальные данные о плотностях и скоростях движения людских потоков и о скорости как функции плотности. Они выполнены в таком объеме, что дали надежную базу для дальнейших теоретических обобщений.

Однако работами ВНИИПО не были вскрыты те объективные связи, отношения и закономерности, определяющие процесс движения людского потока, которые могли бы стать основой для построения теории движения людских потоков.

§ 5. Исследования Московского инженерно-строительного института им. В. В. Куйбышева

Основной целью исследований, проведенных В. М. Предтеченским на кафедре архитектуры Московского инженерно-строительного института им. В. В. Куйбышева, было создание теоретических основ процесса движения людских потоков и на их базе разработка более совершенного метода расчета [12, 13, 19]!

Исследования включали научное обобщение имеющихся материалов, проведение натурных исследований главным образом с целью выяснения качественных характеристик процесса и теоретические разработки с применением математических методов.

Для натурных наблюдений за движением людских потоков был предложен и впервые применен фотокинометод, позволяющий оценить не только количественные, но и качественные характеристики процесса. Наблюдения (общим числом около 800), проведенные визуальным и фотокинометодом, показали достоверность полученных ВНИИПО экспериментальных данных, а также позволили выявить некоторые важные качественные характеристики элементов процесса. Последующая обработка наблюдений и теоретические исследования дали следующие основные результаты.

Прежде всего была предложена классификация видов движения и установлены основные расчетные случаи. Результаты натурных замеров скоростей движения как функции плотности, полученные ВНИИПО и МИСИ для горизонтальных и наклонных путей, обработаны при помощи методов математической статистики, и получены средние значения $v = f(D)$ для обычных, нормальных условий движения людских потоков. Их математические зависимости позволили с необходимой степенью точности вычислить расчетные таблицы значений v для всего диапазона плотностей. На основании опытных данных о пропускной способности проемов рассчитаны скорости движения в проемах (как функции плотности).

Для всех видов путей исследована величина интенсивности движения (удельной пропускной способности) $q = Dv$, установлены закономерности ее изменения относительно плотности и выявлены экспериментальные значения.

Впервые выявлены закономерности изменения параметров людского потока на границах смежных участков пути, где меняется его ширина или вид. На основе принципа равенства масс

$$Q_n = Q_{n+1} + Q_c, \quad (1.2)$$

где Q_n и Q_{n+1} — пропускные способности предшествующего границе участка и последующего участка, м²/мин; Q_c — количество людей, скапливающихся на границе за единицу времени в случаях, когда $Q_n > Q_{n+1}$.

Получены соответствующие аналитические выражения для определения параметров потока на каждом последующем участке пути по параметрам каждого предшествующего. Это впервые позволило рассматривать движение людского потока как единое целое.

Установлены закономерности образования скопления людей и выявлено влияние экстремальных значений q как фактора, определяющего эти скопления, и, следовательно, задержки движения. Получены закономерности изменения параметров движения потоков при их слиянии или расчленении, а также при переформировании, т. е. при изменении плотности и скорости по ходу движения.

Показан ход процесса в отдельных частных случаях, например при формировании потоков, при одновременном слиянии нескольких потоков на пути ограниченной длины (в проходах между рядами мест зрелищных помещений).

На основании найденных закономерностей предложен метод, позволяющий по расчетным предельным состояниям учитывать движение не только в нормальных условиях по средним значениям v , но и при вынужденной эвакуации и в комфортных условиях (с учетом установленных коэффициентов условий движения). Предложена также графическая интерпретация процесса движения, позволяющая рекомендовать графоаналитическую методику расчета.

Таким образом, на основании исследований МИСИ созданы основы теории и метод расчета, достаточно полно характеризующий действительное движение людских потоков.

Исследования ВНИИПО и МИСИ в систематизированном виде были изложены в специальной работе [19], предназначенной в качестве пособия для высших учебных заведений и для проектных организаций при проектировании путей движения людских потоков в зданиях различного назначения. В 60-е и 70-е годы исследования движения людских потоков в МИСИ под руководством В. М. Предтеченского получили дальнейшее развитие. Следует отметить работы Ю. В. Алексева, Р. М. Дувидзона, В. А. Калининца и В. В. Холщевникова, посвященные изучению сложного процесса движения людских потоков в проходах между рядами мест в помещениях зрелищного назначения.

Ряд работ был посвящен исследованиям особых

случаев движения людских потоков, в частности закономерностей движения длительно существующих людских потоков (Р. Г. Григорьянц) и движения пересекающихся людских потоков (В. С. Гвоздяков), имеющих характерные особенности и ранее не поддававшихся расчету. Среди них особый интерес представляет выполненная совместно с ВШ МВД СССР работа В. А. Копылова по исследованию параметров движения людских потоков при вынужденной эвакуации, позволившая более надежно определять параметры движения людских потоков в аварийных условиях, получить которые на основании натуральных наблюдений по понятным причинам не представляется возможным.

Были выполнены работы по исследованию закономерностей движения людских потоков в зданиях, сооружениях и их комплексах, где движение является одним из основных функциональных процессов. В частности, П. Г. Буга и В. С. Гвоздяков рассмотрели движение людских потоков в городских транспортно-коммуникационных узлах, Р. Г. Григорьянц — в торговых зданиях, А. Г. Доценко — на вокзалах и прилегающих к ним территориях.

Выполнена работа по оптимизации путей движения в высотных зданиях (В. В. Холщевников), где эти вопросы представляют существенный научный и практический интерес.

Наконец, были проведены исследования в области нормирования вынужденной эвакуации людей из зданий, поскольку действующие общие противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений, а также нормы проектирования зданий различного назначения, где общие положения развиваются и конкретизируются, недостаточно обоснованы с научной точки зрения. К работам в области нормирования кроме сотрудников кафедры архитектуры МИСИ Ю. В. Алексеева, П. Г. Буги, Х. Фелькеля, В. В. Холщевникова были привлечены М. Я. Ройтман (ВШ МВД СССР), а также сотрудники ЦНИИЭП зрелищных и спортивных сооружений, ЦНИИПромзданий и других организаций. Среди них особое место принадлежит работам, связанным с нормированием допустимого времени эвакуации ($t_{доп}$), выполненным в ВШ МВД СССР.

Результаты исследований ВНИИПО и МИСИ, включая все последующие работы, положены в основу изла-

гаемых в настоящей книге теоретических основ и метода расчета времени и параметров путей движения людских потоков.

§ 6. Данные зарубежных исследований

Если в прошлом в зарубежных странах научно-исследовательская деятельность в области движения людских потоков была ограниченной и не дала заметных научных результатов, то в последние годы она оживилась, по-видимому, в связи с повышением актуальности проблемы организации пешеходного движения вообще и в городах в частности.

Среди зарубежных работ можно отметить работу Эдинга [35], посвященную исследованию движения людских потоков в зависимости от времени и места движения. Им предложена своеобразная и спорная с научной точки зрения классификация видов движения (смешанное движение пешеходов различных профессий; целеустремленный поток людей на промышленных предприятиях; поток пешеходов в торговых зонах; поток пешеходов после окончания рабочего дня — прогулочное движение).

Представляет интерес проведенное Управлением транспорта Лондона [36] исследование движения людских потоков в сооружениях метрополитена, в результате которого получена зависимость скорости и интенсивности движения людского потока от плотности. Следует отметить, что к экспериментам для установления указанной зависимости привлекались люди молодого возраста (студенты, школьники), что неизбежно искажало действительный ход процесса, так как людские потоки создавались искусственно и были однородными по физическим данным составлявших их людей.

Нэвин-Фрэнсисом [34] проведены исследования с целью получения данных для проектирования пешеходных переходов. Были поставлены специальные эксперименты в городке университета шт. Миссури с пешеходными потоками из людей в возрасте от 18 до 25 лет., т. е. потоки также имели искусственный характер. В результате получены зависимости скорости и интенсивности движения людских потоков от плотности.

В работах [31, 32, 33, 42] американских исследователей также приводятся методики натуральных наблюдений

и обработки результатов с целью установления указанных выше зависимостей для проектирования элементов дорожной сети, сооружений метрополитена и других градостроительных и транспортных объектов.

Ряд исследователей посвящают свои работы изучению и установлению отдельных параметров движения людских потоков. Так, Шуберт [40] подразделяет плотность потока на пять степеней от 0,3 чел/м² (свободное движение) до 1,5 чел/м² и больше (давка).

Шольц [39] исследовал пропускную способность путей движения на основе искусственно созданных людских потоков (из студентов) и получил ее максимальное значение 160 чел/(м·мин) при плотности 1,83 чел/м² и скорости 88 м/мин.

Шмитц [38] установил некоторые данные по параметрам движения на железнодорожных вокзалах, а Реймер [37] — значения скорости для различных возрастных групп и влияние уклона пути на ее величину. Последний использовал для экспериментов специально подобранных участников движения (студентов).

Оценка работ зарубежных авторов позволяет поставить под сомнение некоторые полученные ими результаты, поскольку искусственно созданные людские потоки не отражают действительной картины процесса движения, так как состоят из участников примерно одного возраста (школьников и студентов), поэтому значения скорости движения, полученные при таких искусственных условиях, существенно превышают данные, полученные советскими исследователями. Следует подчеркнуть, что искусственные людские потоки неправильно отражают влияние психического состояния и возраста людей, слагающих действительные потоки, влияние ноши и пр. В ряде работ полученные значения скорости и интенсивности движения людских потоков даются не во всем возможном диапазоне плотностей. Это не позволяет судить о характере полученных закономерностей и ставит под сомнение целесообразность их применения для расчета и проектирования. Работы, в которых установлены отдельные параметры движения людских потоков, представляют в лучшем случае частный интерес.

Основными недостатком известных зарубежных исследований движения людских потоков следует считать отсутствие теории, позволяющей описать процесс движе-

ния людского потока от момента его формирования до завершения и при помощи подбора параметров пути управлять временем и условиями движения.

Глава 2

ВИДЫ И ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЛЮДЕЙ

§ 1. Классификация видов движения

Движение людей в помещениях, зданиях и сооружениях, а также на городских территориях можно различать по ряду признаков.

Движение может быть одиночным и массовым.

В одиночном движении участвует относительно небольшое число людей, и его организация не вызывает никаких трудностей при проектировании и эксплуатации зданий (например, движение в жилых квартирах, служебных кабинетах административных зданий, в цехах промышленных предприятий с малым числом работающих). Поэтому оно представляет ограниченный интерес и для проектной практики, и для нормирования.

В противоположность одиночному, массовое движение характеризуется одновременным перемещением в одном или в разных направлениях большого числа людей, сосредоточенных на относительно ограниченной площади.

Движение может быть беспорядочным (ненаправленным) и поточным (направленным).

К беспорядочному относится такое движение, при котором люди на определенном отрезке пути двигаются в различных, часто случайных или постоянно меняющихся во времени направлениях (рыночные площади, площади массовых гуляний).

При поточном движении выделяются определенные направления перемещения всей массы людей, устойчиво сохраняющиеся в течение всего времени (движение в театрах и других зрелищных сооружениях после окончания спектакля).

Движение может быть согласованным (организованным) и несогласованным (неорганизованным).

При согласованном движении масса людей идет в ногу в одном ритме, с постоянной, равной у всех людей длиной шага и скоростью. Примером согласован-

ного движения является строевое движение воинских подразделений.

В обычных условиях характерно несогласованное движение, т. е. каждый человек, участвующий в движении, имеет свои длину шагов и их частоту в зависимости от возраста, физических данных и многих других причин. Несогласованное движение не имеет общего ритма и может протекать с переменной скоростью.

Согласованное движение, как и одиночное, не представляет интереса для проектной практики и в дальнейшем не рассматривается.

Движение бывает свободным и стесненным.

Под свободным понимается такое движение, когда каждый человек в любой момент может изменить скорость и направление движения. Свободное движение является самым распространенным и характерным для повседневной нормальной жизни людей. Таким, как правило, является движение на улицах по тротуарам, в коридорах административных зданий и т. п.

При стесненном движении плотность потока ограничивает свободу движения людей. Стесненное движение можно наблюдать в залах зрелищных учреждений и на трибунах спортивных сооружений после окончания спектакля или соревнования, на станциях метрополитена в часы пик.

Движение людей может быть длительным или кратковременным.

Длительное движение происходит в течение относительно продолжительного времени, как правило, постепенно начинается и постепенно заканчивается (заполнение трибун спортивных сооружений, движение в крупных универсальных магазинах).

Кратковременное движение происходит в короткий промежуток времени (эвакуация людей из зрелищных и спортивных сооружений, из промышленных зданий после окончания рабочего времени и др.).

Наконец, движение можно различать по условиям, которыми оно вызвано. Нормальным может быть названо любое движение, протекающее в обычных условиях при выполнении людьми привычных функций.

Аварийным, или вынужденным, называется движение, вызванное аварийными обстоятельствами (при возникновении пожара, при землетрясении или при других чрезвычайных обстоятельствах).

Сочетание перечисленных признаков образует многочисленные виды движения, из которых могут быть выделены три основных вида, охватывающие все типичные случаи (рис. 2.1), связанные с организацией движения людей в зданиях и сооружениях:

1) массовое, несогласованное, поточное, стесненное (или свободное), кратковременное движение, протекающее в нормальных условиях;

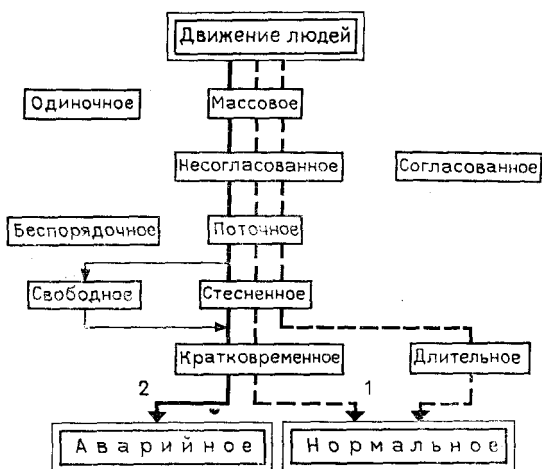


Рис. 2.1. Классификационные признаки и основные виды движения
1 — движение в нормальных условиях; 2 — вынужденная эвакуация

2) то же, в аварийных условиях;

3) массовое, несогласованное, поточное, стесненное (или свободное), длительное движение, протекающее в нормальных условиях.

Следует отметить, что беспорядочное движение может быть только свободным, так как оно возможно лишь при малых плотностях. Свободное движение может быть также и в потоке, когда последний имеет относительно небольшие плотности. Поточное свободное движение может протекать при более высоких плотностях, чем беспорядочное.

В аварийных условиях движение не должно быть длительным.

Настоящая классификация имеет некоторую неизбежную условность, но вместе с тем позволяет правильно представить и оценить все возможные виды движения и их особенности и правильно подойти к решению проектных задач.

§ 2. Психологические особенности движения людских потоков в нормальных и аварийных условиях

Нормальное движение протекает обычно равномерно, без серьезных осложнений даже в тех случаях, когда плотность значительна, так как люди почти всегда знают о времени и цели своего маршрута. Случайное нарушение движения (например, падение человека) не дезорганизует процесса в целом, так как оно является кратковременным и носит локальный характер.

Плотность потока при нормальном движении может значительно изменяться от близкой к нулю до физически предельной. Однако обычно наблюдаются относительно небольшие плотности.

Разновидностью нормального является движение в так называемых комфортных условиях. Последними считаются такие, когда масса людей настроена празднично, отсутствует необходимость спешить и окружающая обстановка благоприятствует такому настроению людей (движение людей в кулуарах театра во время антракта, прогулочное движение по улицам или в парках). Такое движение характеризуется незначительной скоростью при небольших плотностях.

Аварийное движение резко отличается от нормального. Оно, как правило, возникает внезапно под влиянием чрезвычайных обстоятельств. Иногда поводом для аварийной эвакуации оказывается какое-нибудь незначительное происшествие, еще не представляющее прямой опасности, например неожиданный тревожный возглас, появление запаха дыма, вспышка света и пр.

Аварийное движение характеризуется повышенной против обычного психической напряженностью, которая под влиянием разных причин может принять острую форму, а иногда, как показывает опыт, перерасти в панику. Чем напряженнее движение, тем вероятнее возникновение осложнений хода процесса (к числу которых прежде всего следует отнести образование скопления людей с высокой плотностью людской массы), закупор-

ка путей эвакуации, возникновение так называемых «пробок». Чем сложнее складывающаяся при движении людского потока обстановка, тем вероятнее несчастные случаи и тем труднее их предупреждение.

Очень важно иметь понятие о таких явлениях и причинах их возникновения, поскольку эти сведения дают возможность с большим знанием дела их предупреждать путем принятия еще на стадии проектирования соответствующих архитектурно-планировочных и технических решений.

К сожалению, сведений о психологии поведения людей в условиях аварийной эвакуации накоплено еще недостаточно, а имеющиеся данные характеризуют качественную сторону процесса и не затрагивают его количественных показателей. Это создает известные трудности в разработке мер предупреждения осложнений в таких условиях.

Поскольку наибольшую опасность представляет повышенная степень напряженности процесса (приближающаяся к панике), то это явление следует рассматривать с позиций психологии и физиологии.

Паника представляет собой «смятение, растерянность, страх, охватывающий человека или множество людей при действительной или мнимой опасности» (БСЭ, 2-е изд., т. 31). Акад. В. М. Бехтерев характеризует явление паники как «безотчетный оборонительный рефлекс бегства, проявляемый целым коллективом, без всякого соответствия с внешними обстоятельствами и часто даже без достаточного повода».

Паника возникает под влиянием какого-нибудь импульса и только при таком психическом состоянии людей, при котором они в какой-то мере перестают критически относиться к окружающей действительности.

Замечено, что стоящие люди в большей степени подвержены гипноидному состоянию¹, чем сидящие. Полагают, что возбудимость людей существенно выше при физическом соприкосновении, т. е. в плотной массе, например в скоплении, образовавшемся при движении людского потока.

На повышение внушаемости (т. е. способности к восприятию внушений со стороны внешних побудителей) влияет, кроме того, продолжительное сосредоточение

¹ Состояние, вызываемое внушением.

внимания людей на одном и том же предмете, приводящее к утомлению и обуславливающее однородный характер настроения людей, готовность реагировать на внешний раздражитель, особенно когда он связан с опасностью для жизни.

В коллективе индивидуальный опыт отдельных людей при известных условиях может стать предметом подражания. При этом для всей массы людей не требуется предварительного опыта в достижении определенной цели. Достаточно, чтобы он был хотя бы у одного человека, и находящаяся в гипноидном состоянии масса уже способна под его руководством к действиям, по крайней мере доступным большинству.

Условиями, усиливающими остроту реакции на внешние раздражители, являются внезапность их появления и часто неосведомленность относительно характеристики раздражителя. Следует также отметить, что сильно возбужденная масса людей почти всегда преувеличивает размеры действительной опасности.

Таким образом, можно полагать, что паника в зданиях и сооружениях массового назначения представляет собой оборонительную реакцию массы людей на один из сильнейших раздражителей — угрозу для жизни.

Следовательно, повышенная напряженность процесса возникает в результате нервного возбуждения людей, их стремления возможно скорее уйти от источника опасности. Следствием этого всегда оказывается увеличение скорости движения и нарушение его плановости за счет попыток людей обогнать идущих рядом и впереди. Это нарушает стабильность людского потока, обуславливает возникновение сильно уплотненных потоков на некоторых участках пути, особенно в местах его сужения (например, в дверях), и создает помехи движению — могут появиться пробки и связанные с ними несчастные случаи. Обычно аварийное движение протекает и заканчивается сравнительно благополучно. Но при проектировании зданий, особенно общественных сооружений, всегда следует учитывать возможность возникновения аварийных ситуаций, а также панического уровня напряженности процесса движения людских потоков, чреватого очень серьезными последствиями. В связи с этим можно полагать, что предупреждение возможности образования скоплений и задержек движения людских потоков представляет одну из радикальных мер

для обеспечения безопасной и быстрой эвакуации людей из здания и предупреждения паники.

Причина аварийного движения в значительной мере предопределяет характеристику процесса. Опыт показывает, что при пожаре скорость движения людей в сторону наружных выходов неодинакова по длине эвакуационного пути — своего максимума она достигает в зоне, близкой к очагу пожара; по мере удаления людского потока от очага темпы движения постепенно затухают, приближаясь к нормальному движению в месте, где уже нет не только опасности, но и заметных признаков происходящего в здании пожара. Иную картину эвакуационного движения следует ожидать в зданиях в момент землетрясения; в этом случае скорость движения остается высокой вплоть до выхода людей из зданий и некоторого удаления от них.

Таким образом, движение людских потоков представляет такой процесс, на который существенное влияние оказывает психологическое состояние участвующих в нем людей. Следовательно, при расчете процесса и при проектировании путей движения этот фактор должен приниматься во внимание.

Кроме психологических особенностей движения людских потоков в нормальных и аварийных условиях следует иметь в виду и некоторые другие аспекты процесса, например стремление людей идти к цели кратчайшим путем. Они всегда выбирают такие пути, даже несмотря на необходимость преодоления некоторых препятствий и связанных с этим трудностей. Одна из реальных ситуаций показана на рис. 2.2. Очень быстро после завершения благоустройства территории потоки людей проложили кратчайшие маршруты движения между центрами тяготения, которыми в данном случае являются жилые дома, места работы и остановки транспорта. Планировка территории практически оказалась нежизненной, так как не учитывала возможных кратчайших маршрутов движения людских потоков.

В связи с этим можно полагать, что люди предпочитают прямолинейные и, следовательно, кратчайшие участки пути, особенно те, в начале которых видна конечная цель данного этапа движения. То же можно сказать и в отношении городского пешеходного движения. Улица, имеющая архитектурные акценты, размещенные таким образом, чтобы они определяли этапы движения,

всегда более удобна и приятна для пешеходов, чем улица с однообразной монотонной застройкой, уходящей в далекую перспективу. Протяженные и прямолинейные улицы и магистрали, расчлененные или завершенные

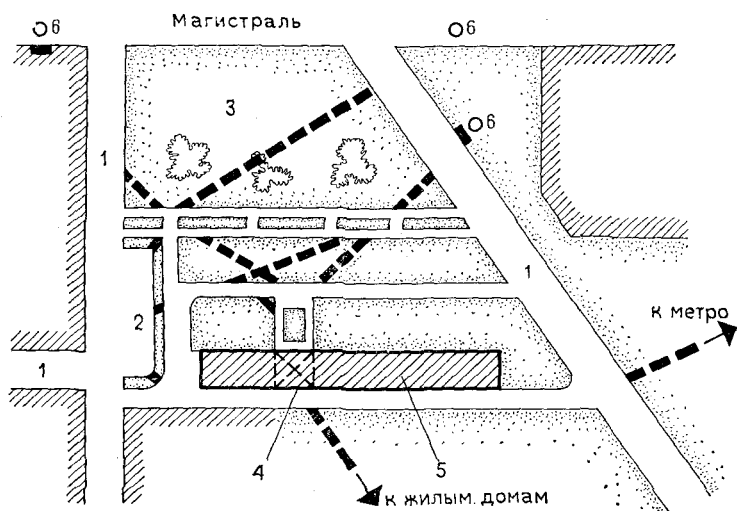


Рис. 2.2. Фрагмент городской застройки (схема). Жирным пунктиром показаны реальные пути, проложенные пешеходными потоками 1 — улица; 2 — стоянка автомобилей; 3 — зеленые насаждения; 4 — проход над домом; 5 — 17-этажный жилой дом; 6 — остановки транспорта

сооружениями, замыкающими перспективу на отдельных участках или на улице в целом, как делалось в прошлом и делается иногда в современной градостроительной практике (например, Невский и Московский проспекты в Ленинграде), всегда более благоприятны для движения.

§ 3. Структура людского потока и виды поточного движения в зданиях

При массовом несогласованном, поточном, стесненном или свободном, кратковременном или длительном движении, протекающем в нормальных или аварийных условиях в общественных зданиях, люди, двигаясь в одном направлении, образуют людской поток шириной δ и длиной l (рис. 2.3).

Наблюдения показывают, что людской поток обычно имеет вытянутую сигарообразную форму. При этом головная и замыкающая части состоят из небольшого числа людей,двигающихся соответственно с большей или меньшей скоростью, чем основная масса людей в потоке. Поскольку число людей, составляющих головную и

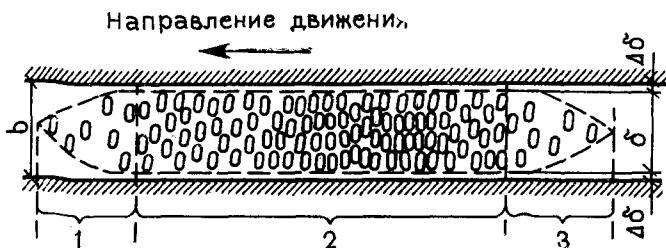


Рис. 2.3. Схема людского потока
1 — головная часть; 2 — основная; 3 — замыкающая

замыкающую части, относительно невелико по сравнению с основной массой, рекомендуется принимать поток в форме прямоугольника.

В аварийных, а также часто и в нормальных условиях движения, как показывают наблюдения, головная часть потока уходит с большей скоростью вперед и по длине и числу людей возрастает, а замыкающая часть, наоборот, уменьшается. Происходит так называемое переформирование потока за счет растекания его головной части, поэтому для аварийных условий необходимо обязательно учитывать растекание потока и, следовательно, постепенное изменение его плотности. Для нормальных условий это делается по мере необходимости.

Ширина потока δ , как правило, обуславливается свободной для движения шириной участка b , ограниченного ограждающими конструкциями. Последние также нарушают равномерность распределения людей в потоке. Дело в том, что между ограждающими конструкциями и массой людей при движении всегда образуются небольшие зазоры $\Delta\delta$, соблюдаемые людьми из-за неизбежного раскачивания при ходьбе и опасения задеть конструкцию или какую-нибудь выступающую ее деталь, поэтому движение людей в середине потока происходит при большей плотности, чем по краям.

Размещение людей в потоке (как по длине, так и по ширине) имеет всегда неравномерный и часто случайный характер. Расстояние между идущими людьми постоянно меняется, возникают местные уплотнения, которые затем рассасываются и возникают снова. Эти изменения неустойчивы во времени, а неравномерность плотности потока в поперечном направлении несущественна, поэтому эти особенности, равно как и зазоры $\Delta\delta$, могут не учитываться. Следует иметь в виду, что под плотностью людского потока по его ширине δ и длине (в пределах l) должна пониматься ее средняя величина.

При массовом несогласованном, поточном, стесненном или свободном длительном движении (в магазине или в пешеходном тоннеле) понятие длины потока l практически теряет смысл, поскольку движение здесь продолжается непрерывно, т. е. l будет равно длине всего пути L в течение длительного времени.

Движение людских потоков в зданиях общественного назначения может быть трех основных видов:

1) при заполнении здания людьми (подсобная функция большинства зданий общественного назначения);

2) в период использования здания по назначению (главная функция некоторых зданий и сооружений общественного назначения, например сооружений метрополитена, вокзалов и пр., и подсобная функция большинства общественных зданий);

3) при выходе людей из зданий (подсобная функция большинства общественных зданий и сооружений).

Вход в здания и сооружения общественного назначения и выход из них представляют собой близкие, по существу, процессы. Первый протекает, как правило, относительно длительное время, приближаясь по своим признакам к длительному движению, а второй — быстро, отвечая классификационному признаку кратковременного (одновременного) движения всей массы людей. Если выход происходит как в нормальных, так и в аварийных условиях, то вход в здание осуществляется преимущественно в нормальных условиях движения.

Движение в зданиях в период их работы, как правило, поточное, но может быть и беспорядочным, например в кулуарах театров во время антрактов и других подобных случаях.

Планировочная структура общественных зданий и сооружений обуславливает и другие особенности движе-

ния людских потоков, например движение в местах, где меняются параметры или вид пути, где поток меняет направление, где пути движения пересекаются и происходит слияние потоков или расчленение одного потока на несколько меньших, где неизбежно встречное или перекрестное движение потоков и т. п.

Эти особенности рассматриваются ниже как элементы процесса движения людских потоков.

Глава 3

ПАРАМЕТРЫ ДВИЖЕНИЯ ЛЮДСКИХ ПОТОКОВ

§ 1. Размеры людей и расчетные характеристики путей движения

Величина людского потока зависит от числа людей N , слагающих этот поток, и от их размеров.

Размеры людей изменяются в зависимости от физических данных, возраста и одежды. На основании обмера людей и обобщения литературных данных в табл. 3.1 приводятся усредненные размеры людей разного возраста и в различной одежде, принятые в качестве расчетных. Формой горизонтальной проекции человека принят эллипс, диаметры которого соответствуют ширине и толщине человека (рис. 3.1). Площадь проекции человека, m^2 :

$$f = \frac{\pi}{4} a c. \quad (3.1)$$

Таблица 3.1. Расчетные средние размеры человека

Возраст человека	Ширина a , м	Толщина c , м	Площадь горизонтальной проекции f , m^2
Взрослый в одежде:			
летней	0,46	0,28	0,100
уличной демисезонной	0,48	0,30	0,113
уличной зимней	0,50	0,32	0,125
Подросток	0,43—0,38	0,27—0,22	0,090—0,067
Ребенок	0,34—0,30	0,21—0,17	0,056—0,040

Примечание. Ширина принята в плечах, толщина — на уровне груди.

Рис. 3.1. Площадь горизонтальной проекции человека

Следует отметить, что действительная форма горизонтальной проекции человека (на уровне груди) несколько отличается от эллипса. Однако с учетом разнообразия физических данных и одежды принятое допущение несущественно искажает фактические размеры и форму горизонтальной проекции.

Натурные наблюдения людских потоков показывают, что во многих зданиях и сооружениях, например в магазинах, на вокзалах, и т. п., большинство людей, слагающих поток (до 80%), имеют при себе ручную ношу (чемоданы, рюкзаки, сумки, портфели, свертки и т. п.). Часто в потоке идут люди с детьми на руках или ведущие их за руку. Для определения площадей горизонтальных проекций людей с детьми или с ношей были проведены натурные замеры различной ноши, выявлены наиболее вероятные сочетания людей и ноши и для них вычислены средние размеры площадей горизонтальных проекций, м², по формуле

$$f_{\text{ср}} = f + f_{\text{н}} - f_{\text{общ}}, \quad (3.2)$$

где f — площадь горизонтальной проекции человека без ноши, принимаемая по табл. 3.1, м²; $f_{\text{н}}$ — площадь горизонтальной проекции ноши, м²; $f_{\text{общ}}$ — общая площадь части горизонтальной проекции человека и ноши (рис. 3.2).

Полученные таким образом значения $f_{\text{ср}}$ приведены на рис. 3.3.

Пути движения людских потоков в зданиях могут быть горизонтальными и наклонными.

К горизонтальным путям относятся проходы в помещениях различного назначения между оборудованием и различные коммуникационные помещения (коридоры, рекреационные помещения в учебных заведениях, фойе и кулуары в зрелищных зданиях и т. п.).

Свободную для движения ширину пути b следует принимать при высоких ограждающих конструкциях — на уровне плеч человека (1,3 — 1,35 м от уровня пола), но не менее 0,6 м, т. е. по наибольшей ширине человека с учетом расстояния на раскачивание при ходьбе; при

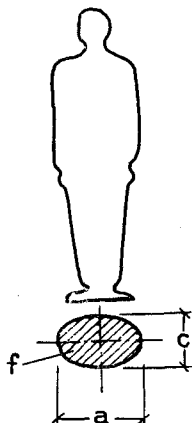


Рис. 3.2. Площадь горизонтальной проекции человека с ношей

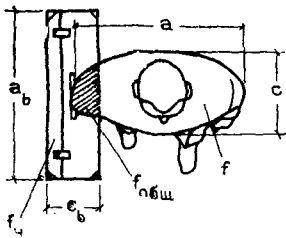


Рис. 3.3. Значения площадей горизонтальных проекций людей с детьми и различной ношей (по Р. Г. Григорьянцу)

$f_{cp} = 0,29$	$f_{cp} = 0,26$	$f_{cp} = 0,18$	$f_{cp} = 0,24$	$f_{cp} = 0,36$
$f_{cp} = 0,38$	$f_{cp} = 0,26$	$f_{cp} = 0,39$	$f_{cp} = 0,39$	$f_{cp} = 0,39$
$f_{cp} = 0,29$	$f_{cp} = 0,20$	$f_{cp} = 0,32$	$f_{cp} = 0,26$	$f_{cp} = 0,18$

низких ограждающих конструкциях (барьеры, перила, спинки рядов кресел в зрелищных помещениях и др.) — только по ширине человека, учитывая, что расстояния на раскачивание на уровне плеч будет достаточно и наибольший размер человека (на уровне груди) окажется выше ограждения (рис. 3.4).

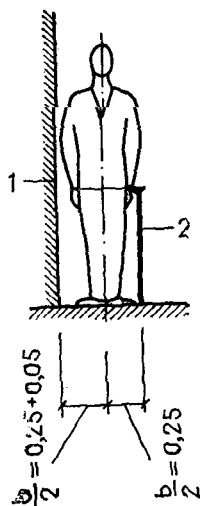
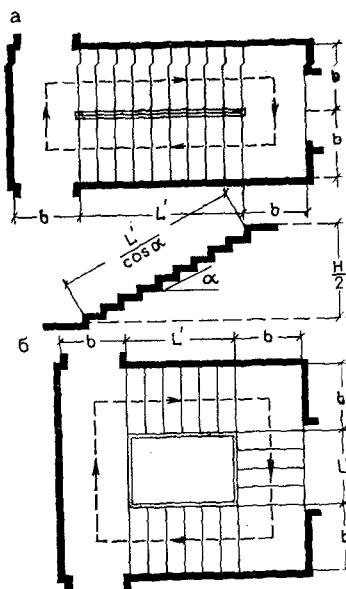


Рис. 3.4. Расчетная ширина пути движения (горизонтального) при высоких (1) и (2) ограждениях

Рис. 3.5. Расчетная длина пути по лестницам



Длина горизонтального пути определяется по его оси.

К наклонным путям относятся лестницы и пандусы. Свободная ширина b наклонного пути, например лестничного марша, принимается в свету (от перил до стены), но без учета расстояния для раскачивания выше перил, поскольку люди, как правило, избегают двигаться вплотную к низким ограждениям, если имеется значительный перепад уровней пола, в данном случае двух лестничных маршей.

Длина наклонного пути L принимается по истинному его значению:

$$L = \frac{L'}{\cos \alpha}, \quad (3.3)$$

где L' — горизонтальная проекция длины наклонного пути, м; α — угол наклона к горизонту.

Для обычных лестниц зданий наклоны составляют 1 : 1,75—1 : 2, поэтому α с необходимой для практических целей точностью можно принимать 30—32°, т. е. $\cos \alpha \approx 0,85$.

Этажные и междуэтажные площадки в целях упрощения и облегчения вычислений, учитывая их небольшие размеры и меньшую сложность движения по ним в сравнении с лестничными маршами, можно отнести к наклонным путям (рис. 3.5). Тогда средняя длина наклонного пути в пределах одного этажа, с учетом движения по площадкам, составит:

для двухмаршевых лестниц

$$L = \frac{2L'}{\cos \alpha} + 4b^*;$$

для трехмаршевых лестниц

$$L = \frac{2L'}{\cos \alpha} + \frac{L''}{\cos \alpha} + L'' + 4b.$$

Пандусы, если их наклон незначителен (меньше 1 : 8), можно относить к горизонтальным путям, при более значительных наклонах — к лестницам.

Длина наклонного пути также определяется по его оси.

Пути движения в пределах здания обычно пересекаются дверными проемами, декоративными порталами, имеют сужения за счет различных архитектурных или технологических элементов, выступающих из плоскости ограждений. Такие местные сужения независимо от их характера в дальнейшем называются проемами шириной b . Длина пути L в проеме может не учитываться, если она не превышает 0,7 м, т. е. длины одного шага, в противном случае движение в проеме следует рассматривать как движение на самостоятельном расчетном участке горизонтального пути.

Учитывая, что ширина людского потока δ практически определяется шириной пути b (см. § 1 гл. 2), в дальнейшем примем $b = \delta$.

* Не допуская серьезной погрешности, длину пути по двухмаршевой лестнице в пределах одного этажа можно принимать равной его утроенной высоте H , т. е. $L = 3H$.

§ 2. Методика натуральных наблюдений для оценки плотности и скорости движения людских потоков

Для изучения закономерностей движения людских потоков проводятся натурные наблюдения, которые позволяют получить объективные данные о процессе движения с учетом влияния многочисленных факторов, характеризующих процесс (вид пути, состав потока, психологические факторы и пр.).

Натурные наблюдения проводятся визуально или при помощи фотокиносъемки. В первом случае для качественной оценки характера движения (форма потока, изменение длины потока, скопление людей и задержки движения) наблюдатель со стороны отмечает все его изменения или включается в людской поток и, следуя с ним, производит необходимые наблюдения.

Для количественной оценки отдельных параметров (например, плотности на участке движения или в местах скоплений) наблюдатель определяет подсчетом проходящих мимо него людей общее их число на установленном участке. Для определения скорости движения наблюдатель, зная длину пути и двигаясь в потоке, отмечает время движения по данному участку пути.

Для одновременной оценки плотности и скорости выбирается участок пути движения или часть потока шириной δ и длиной l ; наблюдатель занимает место в конце участка по ходу движения (рис. 3.6); выбрав в потоке «заметного» человека, он отмечает время в момент достижения этим человеком начала участка и производит подсчет проходящих мимо него людей; при прохождении «заметного» человека наблюдатель снова отмечает время и прекращает подсчет; в результате оказывается известным число людей N на площади δl и, следовательно, плотность D , а также время движения «заметного» человека на отрезке пути l , т. е. скорость движения v людского потока.

Визуальный метод наблюдений достаточно прост и дает вполне пригодные для использования результаты. Однако качество наблюдений и точность замеров неизбежно зависят от подготовленности наблюдателей, поэтому натурные наблюдения при помощи фотокиносъемки следует считать более точными. Большая их ценность состоит в том, что процесс фиксируется на пленку и может быть подвергнут тщательному изучению, проверке, а пленка — повторному использованию.

Для натуральных наблюдений при помощи фотосъемки выбирается характерный участок пути движения и составляется его чертеж с указанием всех необходимых размеров; фотоаппарат целесообразно устанавливать

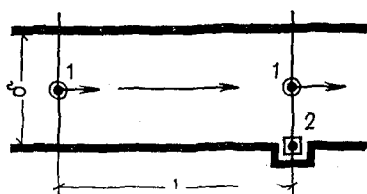


Рис. 3.6. Схема визуальных натуральных наблюдений за движением людских потоков

1 — «заметный» человек; 2 — наблюдатель

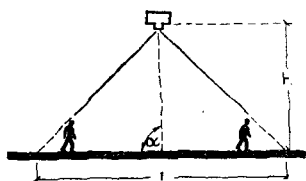


Рис. 3.7. Схема натуральных наблюдений при помощи фото- или киносъемки

α — угол наклона оптической оси съемочного аппарата к горизонту; H — высота установки съемочного аппарата

так, чтобы оптическая ось была вертикальна и находилась над центром участка (рис. 3.7); съемка производится в течение всего заданного времени через равные интервалы (3—5 с), определяемые по секундомеру. Из серии кадров на первом снимке выбирается «заметный» человек, движение которого можно проследить до конца съемки; зная величину пути и подсчитав число людей, можно установить плотность, как среднюю в течение заданного времени, так и в каждый момент времени, т. е. через каждые 3—5 с. Зная по числу кадров время, истекшее от начала съемки, и определяя на снимках положение «заметного» человека, устанавливают скорость движения потока через принятые интервалы времени, а также среднюю скорость в заданное время съемки.

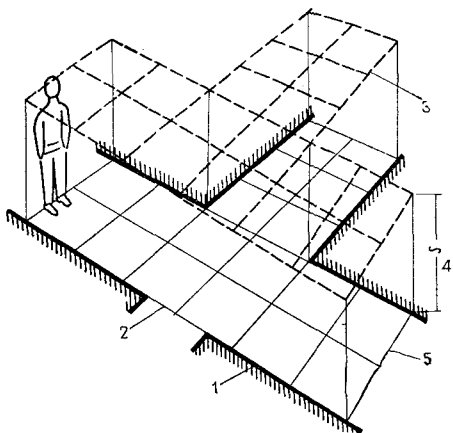
Полученные данные заносятся в таблицы или на графики, которые позволяют не только судить о конечных или средних результатах, но и раскрывают всю кинетику движения потока.

Метод натуральных наблюдений при помощи киносъемки является еще более точным, поскольку съемка ведется непрерывно в течение всего заданного промежутка времени с большой частотой кадров (24 кадра в секунду). Киносъемка позволяет установить скорость нарастания плотности в местах задержки движения, закономерности формирования потоков и т. п.

Фото- и киносъемка для исследования движения людских потоков, предложенная впервые в отечественной практике в МИСИ им. В. В. Куйбышева, в настоящее время является основным методом натуральных наблюдений. Он получил дальнейшее развитие и усовершенствование в работах Т. А. Тарасовой [21], В. А. Копылова [10] и других исследователей как в части процесса съемки, так и обработки результатов. Допускается установка фото- или киноаппарата не только с вертикальной оптической осью над центром участка, но и под углом, т. е. с наклонной оптической осью (желательно α в пределах от 60 до 120°), следовательно, аппарат

Рис. 3.8. Опорные и расчетные масштабные сетки для натуральных наблюдений при помощи фото- и киносъемки

1 — ограждения коммуникационного пути; 2 — проем; 3 — расчетная масштабная сетка; 4 — рост человека; 5 — опорная масштабная сетка



можно располагать и над центром снимаемого участка. Неизбежные при этом перспективные сокращения (в меньшей степени при $\alpha = 90^\circ$) учитываются при обработке фото- или кинокадров. В этих целях после выбора участка и места установки съемочного аппарата на пол мелом наносится опорная масштабная сетка (например, 1×1 м), которая в натуре при помощи нитей или деревянных планок повторяется на уровне роста человека как расчетная масштабная сетка (рис. 3.8). Затем производится установка съемочного аппарата и съемка участка с масштабной сеткой без людей. В результате получается так называемый контрольный масштабный кадр с масштабной сеткой и перспективными сокращениями. Далее расчетная сетка убирается и при неизменном положении съемочного аппарата произво-

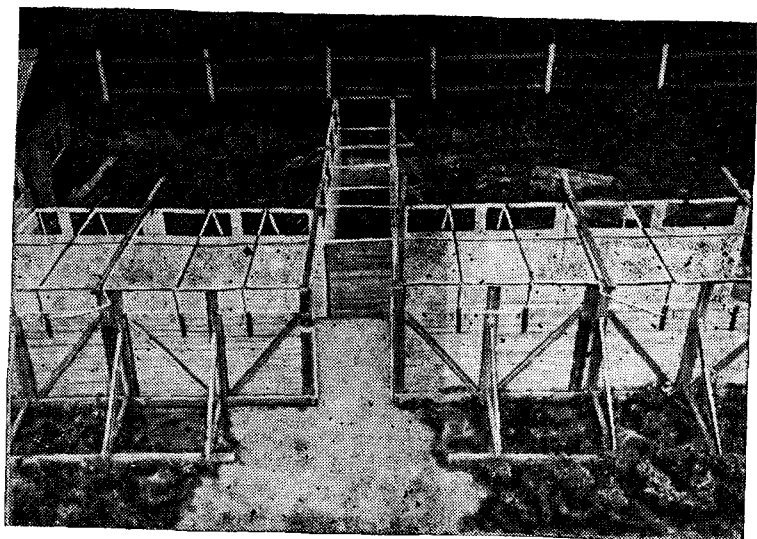


Рис. 3.9. Специальный стенд для экспериментов с искусственными людскими потоками (В. А. Копылов). Светлыми линиями показана рабочая масштабная сетка

дится съемка движения людского потока в таком количестве, которое требуется по плану эксперимента.

При обработке результатов съемки на экран проецируется контрольный масштабный кадр. На экран краской (черной или другого цвета) переносится масштабная сетка на уровне роста человека. Затем на этот же экран с нанесенной масштабной сеткой проецируются рабочие кадры с людским потоком. Так как масштабная сетка накладывается на рабочий кадр, то, несмотря на перспективные сокращения, подсчет людей, находящихся в данный момент на участке, и продвижение по нему «заметного» человека не вызывает затруднений и дает достаточно точные результаты.

Следует отметить, что масштабная сетка может быть произвольной, например соответствовать характерным деталям ограждающих конструкций коммуникационного пути (пилястрам, проемам и т. п.) или изменению ширины пути (например, от коридора к более узкому проему, как показано на рис. 3. 9). Возможны и другие варианты в зависимости от цели эксперимента.

Использование фото- и киносъемки существенно расширило возможности натуральных наблюдений, в частности

для относительно невысоких помещений (например, метрополитен), где ранее исследования проводились только визуально.

Натурные наблюдения за движением людских потоков возможны лишь в нормальных условиях, когда с их помощью можно получать вполне достоверные данные.

§ 3. Плотность людских потоков

Плотность людского потока может быть выражена:

1) числом людей, приходящихся на единицу площади коммуникационного помещения, занимаемой потоком, чел/м²:

$$D = \frac{N}{\delta l}; \quad (3.4a)$$

2) приходящейся на одного человека площадью коммуникационного помещения, занимаемого потоком, м²/чел:

$$D = \frac{\delta l}{N}; \quad (3.4б)$$

3) отношением суммы горизонтальных проекций людей к площади коммуникационного помещения, занимаемой потоком, м²/м²:

$$D = \frac{\Sigma f}{\delta l}; \quad (3.4в)$$

где N — число людей в потоке; δ и l — ширина и длина потока, м; f — площадь горизонтальной проекции одного человека, м²;

$$\Sigma f = N_i^2 f.$$

Выражения плотности (3.4а) и (3.4б) применимы только при однородном потоке, например когда он состоит только из взрослых в домашней одежде или из взрослых в уличной одежде, и т. п. Выражение (3.4в) применимо при любом составе потока. Например, если требуется определить среднюю плотность людского потока, занимающего площадь 40 м² в помещении, в котором находятся 25 взрослых в уличной зимней одежде, 10 подростков и 5 детей (значения f приведены в табл. 3.1), искомая средняя плотность составит

$$D = \frac{25 \cdot 0,125 + 10 \cdot 0,09 + 5 \cdot 0,056}{40} = 0,107 \text{ м}^2/\text{м}^2.$$

Вследствие сказанного в дальнейшем изложении и в расчетах принята безразмерная величина плотности по формуле (3.4в).

Если возникает необходимость перейти от одной размерности к другой, то это легко осуществить с помощью величины f , например применительно к людскому потоку, состоящему из взрослых в зимней одежде, для перехода от $\text{м}^2/\text{м}^2$ к чел/м² нужно плотность разделить на f :

$$D = 0,5 \text{ м}^2/\text{м}^2; \quad 0,5 : f = 0,5 : 0,125 = 4 \text{ чел}/\text{м}^2,$$

а для перехода от чел/м² к $\text{м}^2/\text{м}^2$ — умножить на f :

$$D = 4 \text{ чел}/\text{м}^2; \quad 4f = 4 \cdot 0,125 = 0,5 \text{ м}^2/\text{м}^2.$$

Для перехода от $\text{м}^2/\text{м}^2$ к $\text{м}^2/\text{чел}$ нужно площадь горизонтальной проекции человека f разделить на плотность:

$$D = 0,5 \text{ м}^2/\text{м}^2; \quad f : 0,5 = 0,125 : 0,5 = 0,25 \text{ м}^2/\text{чел},$$

а для перехода от $\text{м}^2/\text{чел}$ к $\text{м}^2/\text{м}^2$ — также f разделить на плотность, т. е. $D = 0,25 \text{ м}^2/\text{чел}$; $f : 0,25 = 0,125 : 0,25 = 0,5 \text{ м}^2/\text{м}^2$.

Максимальная плотность, установленная в натуральных условиях и проверенная на модели, оказалась равной

$$D = \frac{\Sigma f}{\delta l} = 0,92 \text{ м}^2/\text{м}^2.$$

Указанное значение максимальной плотности соответствует предположению, что эллипс, выражающий горизонтальную проекцию человека, не подвергается деформациям во время сжатия потока (рис. 3.10). Это условие в дальнейшем положено в основу методики расчета. В действительности же, поскольку человеческое тело упруго, то при значительном сжатии изменяется форма и уменьшается площадь его горизонтальной проекции, вследствие чего физический предел плотности $D_{\text{ф.п}}$ превышает 0,92.

Поскольку в аварийных условиях движения людских потоков можно ожидать не только плотностей максимальных ($D_{\text{макс}} = 0,92$), но и приближающихся к физическому пределу ($D_{\text{ф.п}}$) (когда объятые страхом люди при задержке движения

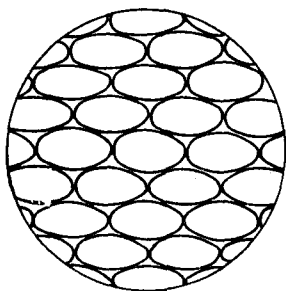


Рис. 3.10. Схематическое изображение фрагмента людского потока, движущегося с максимальной плотностью ($D_{\text{макс}} = 0,92$)

образуют скопление, в котором возникает давка), то были предприняты специальные исследования [10], чтобы установить значения $D_{ф.п.}$.

Следует отметить, что до указанных специальных исследований предлагались разные значения $D_{ф.п.}$. Так, С. В. Беляев [3] считал физически предельным уплотнением величину линейной плотности 0,2 чел/м, соответствующую 0,83 м²/м², или 8,3 чел/м², при $f=0,100$ м². Т. А. Тарасова [21] высказывала мнение, что $D_{ф.п.}$ может составлять 1,04 м²/м². М. Я. Ройтман [26] полагал, что $D_{ф.п.}$ может быть 10—12 чел/м². В МИСИ теоретическим путем получено значение $D_{ф.п.}=1,15$ м²/м², или 9 чел/м², при $f=0,125$ м² и 11,5 чел/м² при $f=0,100$ м².

Исследования, проведенные с искусственно созданными потоками из лиц от 18 до 30 лет средним значением $f=0,10$ м² в специально построенном стенде, подобном приведенному на рис. 3.9, показали, что максимально достигнутое предельное уплотнение составляет $D_{ф.п.}=1,16$ м²/м². При этом сжатие потока также создавалось людьми, подпиравшими его со всех сторон.

Исследования людских потоков с высокими плотностями в натуральных условиях показали, что во многих случаях, главным образом в проемах шириной до 1,2 м, плотности оказались больше $D=0,92$. Однако максимальное значение не превышало 1,05 м²/м².

Таким образом, можно считать доказанным, что при движении людских потоков могут образовываться плотности более 0,92 м²/м². Теоретически можно представить следующую схему: в зоне высоких плотностей ($>0,92$) наблюдаются постоянные силовые воздействия людей друг на друга, вследствие чего изменяется форма горизонтальной проекции человека, и свободное пространство между людьми (равное $1-0,92=0,08$ м²) исчезает и достигается плотность $D=1$ м²/м². Дальнейшее уплотнение людского потока происходит за счет возрастающих силовых воздействий, при которых не только деформируется горизонтальная проекция человека, но и уменьшается значение f . Очевидно, что в действительности изменение формы горизонтальной проекции и ее площади происходит одновременно, предположительно в диапазоне плотностей от 0,70 до 1,15 м²/м².

Наблюдения также показали, что при достижении плотностей 1,10—1,15 м²/м² движение потока крайне затруднено и даже приостанавливается, поскольку люди

при этих плотностях занимают случайное положение, не согласованное с направлением движения потока (боком, иногда спиной). Установлено также, что плотности, близкие к $1,15 \text{ м}^2/\text{м}^2$, даже тренированные люди, из которых были сформированы искусственные людские потоки, выдержать долго не могли из-за стеснения дыхания (асфиксии). Следовательно, в качестве физического предела плотности можно считать величину

$$D_{\text{ф.п}} = 1,15 \text{ м}^2/\text{м}^2,$$

установленную теоретически МИСИ и подтвержденную специальными исследованиями.

В нормальных условиях движения плотности людских потоков колеблются от величины, близкой к нулю, до максимальных значений. Однако частота повторения плотности далеко не одинакова. Суммарные данные об этом представлены на рис. 3.11. Из графика видно, что в дверях наиболее вероятны плотности от 0 до 0,65, тогда как на других путях лишь от 0 до 0,4. Плотности же, близкие к максимальным, маловероятны в нормальных условиях движения. Они составляют для дверей около 3,5%, а для прочих путей 1—2% общего числа замеров. Чаще всего наблюдаются плотности от 0,07 до 0,13.

На рис. 3.12 показаны вероятные плотности людских потоков в общественных зданиях различного назначения, а также на лестницах при движении потоков вниз и вверх. Из графика видно, что в промышленных предприятиях и учебных заведениях наиболее вероятны плотности от 0 до 0,25, а в зрелищных зданиях — от 0 до 0,5. На лестницах, как правило, наблюдаются невысокие плотности (от 0 до 0,25—0,35), а плотности, близкие к максимальным, очень редки.

Интересен рис. 3.13, на котором представлены плотности людских потоков в театральных зданиях. Оказывается, в магистральных проходах зрительных залов обычно наблюдаются плотности от 0,05 до 0,6, а плотности, близкие к максимальным, составляют значительную для нормальных условий движения величину — 4—4,5% общего числа наблюдений. В кулуарах преобладают плотности до 0,25. При движении по лестницам плотности потоков достигают 0,45—0,65.

Наибольшая плотность потока бывает обычно в местах, где путь резко сужается. Наблюдения за движением через двери показывают, что при прочих равных

условиях чем шире дверь, тем меньше средняя плотность потока, и наоборот, чем уже дверь, тем значение D выше. На рис. 3.14 эта закономерность показана верхней ломаной линией, а нижняя линия выражает вероятность высоких плотностей. Следовательно, безразлично, какой ширины будут двери, даже если их суммарная ширина остается без изменения. Как показывает график, предпочтительны двери большей ширины.

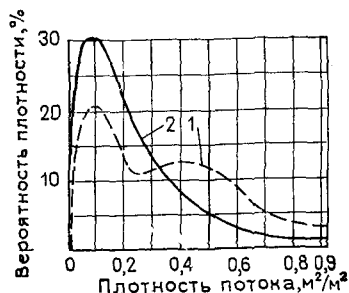


Рис. 3.11. Вероятность плотности потока
1 — в дверях; 2 — на остальных путях

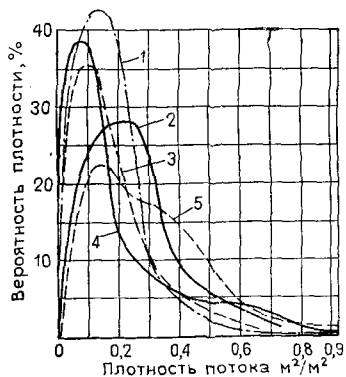


Рис. 3.12. Вероятность плотности потока в зданиях различного назначения и на лестницах

1 — лестницы вверх; 2 — лестницы вниз; 3 — промышленные предприятия; 4 — учебные заведения; 5 — театры

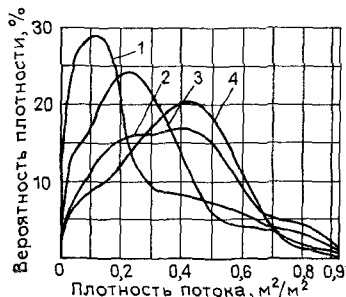


Рис. 3.13. Вероятность плотности потока в театральном здании
1 — кулуары; 2 — проходы зрительного зала; 3 — лестницы вверх; 4 — лестницы вниз

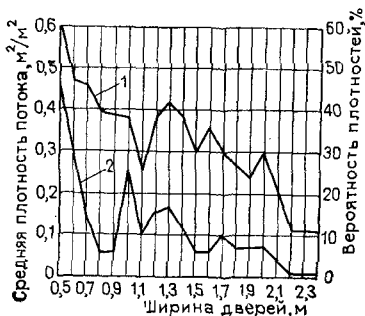


Рис. 3.14. Вероятность средних и высоких плотностей потока в дверях разной ширины
1 — средняя плотность; 2 — плотность 0,7—0,92

§ 4. Скорость движения людских потоков и коэффициенты условий движения

Исследования изменений скорости движения людских потоков в зависимости от их плотности проводились неоднократно различными исследователями и организациями. Как было указано выше, наиболее фундаментальными следует считать исследования ВНИИПО (см. § 4 гл. 1) и МИСИ им. В. В. Куйбышева (см. § 5 гл. 1), давшие достаточно надежные данные о зависимости $v=f(D)$. Последующие исследования, проведенные в МИСИ и ВШ МВД СССР, не дали существенных отклонений от ранее установленных закономерностей $v=f(D)$, подтвердив справедливость полученных данных, поэтому ниже излагаются результаты исследований ВНИИПО и МИСИ, принимаемые в качестве основных, а также данные, полученные для аварийных условий движения людских потоков с высокими плотностями.

Скорость движения и плотность людских потоков замерялись в различных условиях в общей сложности около 3600 раз (ВНИИПО). Результаты замеров показали, что скорость движения является функцией плотности и вида пути, т. е. в принципе подтвердили закономерность, вскрытую С. В. Беляевым. Замеры показали также, что при одной и той же плотности скорость движения потока может резко меняться. На рис. 3.15 приведены в качестве примера результаты 363 замеров скорости движения по лестницам при подъеме и кривая ее средних значений.

Причина колебаний скорости людского потока при одной и той же его плотности объясняется тем, что в возможных пределах люди могут по своему усмотрению изменять скорость движения.

Свободы в движении каждого человека тем меньше, чем больше плотность потока, и наоборот. Желание изменить скорость движения возникает под влиянием окружающих условий и причины, вызывающей движение потока. Именно это обстоятельство оп-

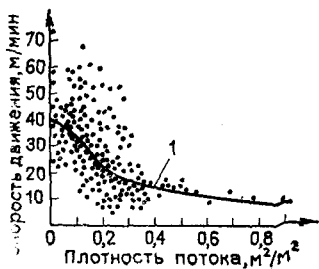


Рис. 3.15. Результаты натуральных замеров скоростей движения людских потоков по лестницам вверх
1 — средняя скорость

Рис. 3.16. Значения максимальных скоростей и средневзвешенных отклонений от средних скоростей для горизонтального пути (1) и по лестницам вверх (2), вниз (3)

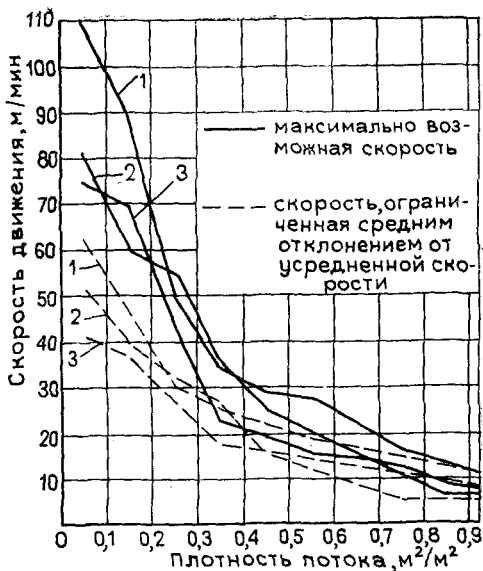
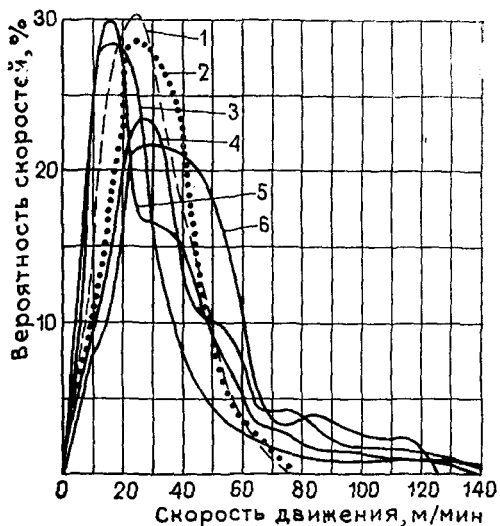


Рис. 3.17. Вероятность скоростей движения в общественных зданиях различного назначения по горизонтальным путям и по лестницам 1 — по лестнице вверх; 2 — по лестнице вниз; 3 — театры; 4 — промышленные предприятия; 5 — учебные заведения; 6 — транспортные здания



ределяет еще один фактор — психологический, от которого, как и от двух предыдущих, зависит скорость движения, т. е. ее следует считать функцией плотности, вида пути и степени напряженности процесса.

На рис. 3.16 показаны абсолютные значения максимальной скорости средневзвешенных отклонений от ее средних значений на горизонтальных и наклонных путях в зависимости от плотности потоков.

Представляет интерес вероятность скоростей движения по горизонтальным путям и лестницам в общественных зданиях разного назначения (рис. 3.17): в театрах и учебных заведениях скорость движения чаще составляет 15—20 м/мин, в промышленных зданиях — 25—30 м/мин, в зданиях транспортного назначения наиболее вероятны скорости 20—50 м/мин, на лестницах 20—25 м/мин.

Средние значения скоростей движения по горизонтальным путям и лестницам вниз и вверх были получены в результате обработки материалов натуральных наблюдений.

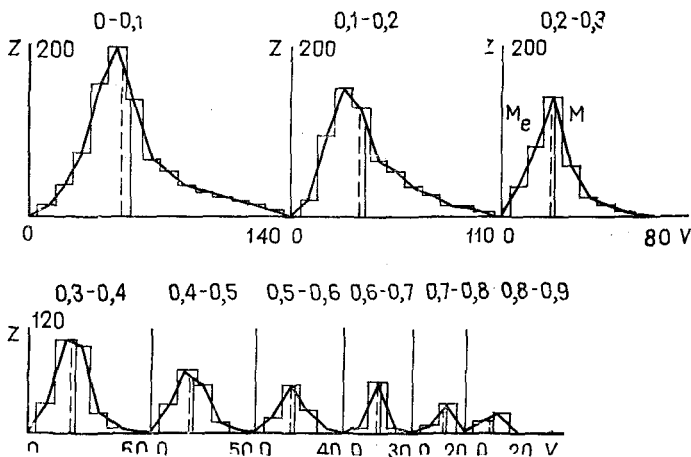


Рис. 3.18. Гистограммы и полигоны распределения значений скоростей движения по горизонтальным путям

ний методами математической статистики. В этих целях были построены вариационные ряды, гистограммы и полигоны распределения, вычисленные по принципу нагруженных ординат для всех принятых интервалов плотностей. В качестве примера вариационные ряды, гисто-

граммы и полигоны распределения для горизонтальных путей приведены в табл. 3.2 и на рис. 3.18.

Средние значения скорости движения были подсчитаны как медианы M_e и как среднеарифметические M по формулам:

$$M_e = v_e + \frac{\frac{n}{2} - S_{m-1}^0}{z_m} \Delta;$$

$$M = \frac{\sum v z}{n},$$

где v_e — середина промежутка между началом медианного интервала и концом предыдущего; m — номер медианного интервала; n — сумма вариантов; S^0 — начетная сумма; z — частота интервала; Δ — величина интервала.

Т а б л и ц а 3.2. Вариационные ряды для горизонтальных путей

Интервалы скоростей, м/мин	Средние значения скорости, м/мин	Интервалы плотностей D , м ² /м ²								
		0-0,1	0,1-0,2	0,2-0,3	0,3-0,4	0,4-0,5	0,5-0,6	0,6-0,7	0,7-0,8	0,8-0,9
140-130	135	6								
130-120	125	14								
120-110	115	19								
110-100	105	22	3							
100-90	95	28	11							
90-80	85	36	10							
80-70	75	50	24	2						
70-60	65	64	32	4						
60-50	55	134	53	13	1					
50-40	45	194	65	19	3					
40-30	35	152	124	56	22	11	4			
30-20	25	72	146	135	98	53	25	4		
20-10	15	34	92	78	104	71	54	57	51	14
10-0	5	9	18	31	29	30	16	5	6	21
Σ	—	834	578	338	257	166	98	66	57	35

Предпочтительны средние значения, вычисленные как медианы, поскольку v зависит не только от D , но и от других причин. Кроме того, как следует из рис. 3.18, распределение вариантов близко к гауссовому с положительной асимметрией (в сторону меньших значений скоростей); при этом значение M_e оказывается ближе к максимуму. Следовательно, следует ожидать уменьшения средней скорости, поэтому значения M_e более пред-

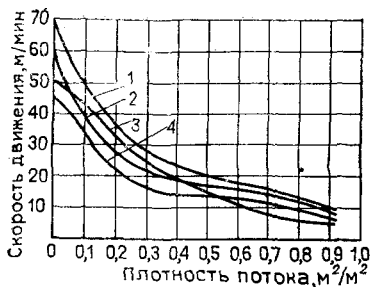


Рис. 3.19. Средние значения скоростей движения в зависимости от плотности потока

1 — проемы; 2 — горизонтальные пути; 3 — лестницы (спуск); 4 — лестницы (подъем)

почтительны, хотя различие между M_e и M невелико.

Вычисленные таким образом средние значения скорости движения людских потоков по горизонтальным путям и по лестницам вниз и вверх нанесены на график и представляют средние значения только для движения в нормальных условиях (рис. 3.19).

На этом же графике дана кривая изменения скорости движения v в проемах как функции плотности D . Поскольку скорость движения потока в проемах учесть трудно, так как длина пути в проеме мала, производились замеры (более 2300) пропускной способности Q проемов различной ширины δ . Затем методом медиан получены средние значения Q для дверей различной ширины (рис. 3.20); по ним вычислены средние значения пропускной способности 1 м ширины проемов, а затем скорости движения в проемах (см. рис. 3.20):

$$v = \frac{Q}{\delta D}.$$

Значения скорости движения, м/мин, как функции плотности для горизонтальных путей могут быть получены из следующего эмпирического выражения:

$$v = 112D^4 - 380D^3 + 434D^2 - 217D + 57. \quad (3.5)$$

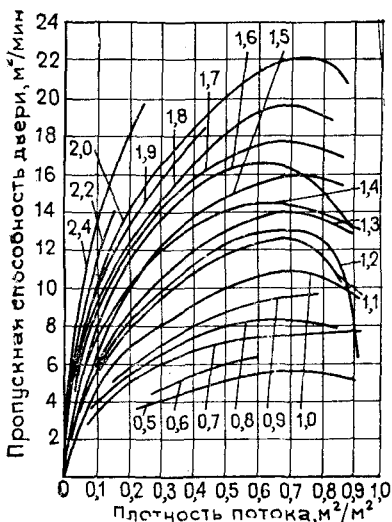


Рис. 3.20. Средние значения пропускной способности проемов разной ширины в зависимости от плотности людского потока

Цифры на кривых — ширина проемов в м

(рис. 3.20); по ним вычислены средние значения пропускной способности 1 м ширины проемов, а затем скорости движения в проемах (см. рис. 3.20):

Уравнение рассчитано для интервала плотностей от близких к нулю до $D=0,92$. Принимая его в качестве основного, выражающего зависимость скорости от плотности, и введя эмпирические коэффициенты для других видов путей, получим, м/мин:

для движения через проемы

$$v_0 = v m, \quad (3.6)$$

где

$$m = 1,17 + 0,13 \sin (6,03 D_0 - 0,12); \quad (3.6a)$$

для движения по лестницам вниз

$$v_{\downarrow} = v m, \quad (3.7)$$

$$\text{где } m = 0,775 + 0,44e^{-0,39D} \sin (5,61D + 0,224); \quad (3.7a)$$

для движения по лестницам вверх

$$v_{\uparrow} = v m, \quad (3.8)$$

$$\text{где } m = 0,785 + 0,09e^{-3,45D} \sin 15,7D \quad (3.8a)$$

(при D от 0 до 0,6);

$$m = 0,785 - 0,10 \sin (7,85D + 1,57) \quad (3.8b)$$

(при D от 0,6 до 0,92).

Графики m как функции плотности представлены на рис. 3.21. Следует отметить, что значение m для лестниц при подъеме в диапазоне плотностей от 0,1 до 0,6 должно, по-видимому, подчиняться несколько другой закономерности, как предположительно показано на рис. 3.21 пунктиром. Этот вопрос подлежит уточнению при накоплении достаточного объема экспериментальных данных.

Приведенные аналитические зависимости (3.5) — (3.8), хотя и дают результаты, близко совпадающие с экспериментальными данными, но неудобны для практического использования, поэтому вычисленные с их помощью величины для различных значений D (с градацией через 0,01) сведены в таблицу (см. прил. I, гр. 6 для нормальных условий движения).

Влияние состояния людей на скорость движения людского потока определяется с помощью так называемых коэффициентов условий движения.

Выше (см. § 2 гл. 2) указывалось, что движение людских потоков может протекать не только в нормальных, но и в аварийных условиях. В последнем случае, когда психологический фактор играет большую роль, ско-



Рис. 3.21. Графики поправочных коэффициентов m в зависимости от плотности потока
 1 — в проемах; 2 — на горизонтальном пути; 3 — на лестнице (подъем); 4 — на лестнице (спуск)

рость движения увеличивается при тех же плотностях потока. И это понятно, так как страх, овладевающий людьми, заставляет их бежать от опасности. Это общее желание, одинаковый для всей массы людей психологический импульс способствует согласованности движения, что позволяет увеличить (против нормальных условий) скорость движения при той же плотности потока. Аналогичная картина наблюдается в комфортных условиях с той лишь разницей, что общий психологический «настрой» людей обуславливает снижение скорости движения потока.

Обозначим коэффициент условий движения, учитывающий состояние людей, через μ . Следовательно, для нормальных условий движения $\mu = 1$; для аварийных $\mu_a > 1$; для комфортных $\mu_k < 1$. Численные значения коэффициента μ_a определяют путем экстраполяции параметров движения людских потоков, полученных для нормальных условий (поскольку непосредственные наблюдения за аварийным движением невозможны) или в результате натуральных наблюдений за движением искусственно созданных потоков.

При натурном изучении движения было установлено, что различия в значениях v тем больше, чем меньше плотность потока (см. табл. 3.2). Если предположить, что людские потоки, имевшие большие скорости движения по сравнению с установленными средними значениями (для нормальных условий), по тем или иным причинам двигались с повышенной напряженностью, то движение приближалось к аварийным условиям. Основываясь на этих соображениях, можно принять значения скорости для условий аварийного движения v_a как средние только от значений скоростей верхней половины поля, полученных в натуре для нормальных условий (рис. 3.19). Такие значения v_a вычислены методом медиан, как и значения v .

Отношение v_a к v дает искомую величину μ_a :

$$\mu_a = \frac{v_a}{v}. \quad (3.9)$$

Для горизонтальных путей и проемов при плотности от 0 до 0,92 значение μ_a изменяется по линейному закону:

$$\mu_a = 1,49 \div 0,36D. \quad (3.9a)$$

Таким же способом вычислены значения μ_a для лестниц: при спуске $\mu_a = 1,21$; при подъеме $\mu_a = 1,26$.

Для удобства пользования вычисленные значения $v_a = v\mu_a$, которые, однако, следует считать приближенными, сведены в таблицу (см. прил. I, гр. 4 для аварийных условий движения).

По-видимому, для аварийных условий будут иметь место разные значения v_a в зависимости от причины, вызвавшей движение. Можно предположить, например, что для эвакуации при землетрясении μ_a и v_a будут максимальными, потому что люди в этих случаях часто преувеличивают грозящую им опасность; при пожарах или при возникновении аварийной обстановки на производстве значения μ_a и v_a , по-видимому, будут меньше, так как здесь легче оценить степень опасности.

Для определения значений этих коэффициентов в комфортных условиях можно использовать ту же методику, что и для μ_a ; при этом среднее значение скорости движения v_k принимается только от нижней половины всех показателей скоростей движения, полученных при натуральных наблюдениях (см. рис. 3.19).

В итоге для горизонтальных путей и проемов $\mu_k = 0,63 + 0,25D$; для лестниц при спуске $\mu_k = 0,76$, при подъеме $\mu_k = 0,82$.

Данные скоростей движения в комфортных условиях v_k в зависимости от плотности потока сведены в таблицу (см. прил. I, гр. 8). Следует отметить, что значения v_k , вычисленные указанным способом, также являются средними и приближенными, поэтому они также нуждаются в уточнении на основании дальнейших теоретических и главным образом экспериментальных исследований, поскольку движение в комфортных условиях можно наблюдать в натуре.

На рис. 3.22 показано изменение скорости движения по горизонтальным путям для нормальных, аварийных и комфортных условий. Из графиков видно, что при вы-

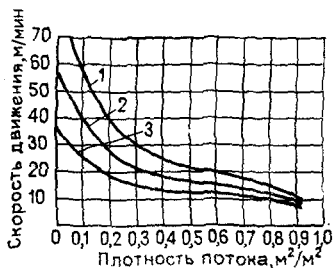


Рис. 3.22. Скорость движения по горизонтальным путям в зависимости от плотности потока для разных условий движения
1 — аварийное; 2 — нормальное; 3 — комфортное

юких плотностях людского потока абсолютные значения скоростей отличаются незначительно, поскольку свобода действий людей ограничена.

Как было указано выше (см. § 3 гл. 3), были предприняты специальные исследования для уточнения параметров движения людских потоков в аварийных условиях при плотностях, больших 0,5 м²/м². Результаты исследования скоростей движения по горизонтальным путям представлены на рис. 3.23 (кривые 3 и 4). Кривая 3 получена по натурным наблюдениям за искусственно созданными однородными людскими потоками, состоящими из молодых мужчин. Аварийные условия при этом имитировались высокими плотностями с искусственным сжатием потока специальными группами людей. Кривая 4 дает те же значения, но с учетом поправки η на состав потока, поскольку последний показывал скорости заведомо более высокие, чем поток смешанного состава. Одновременно проводились наблюдения за естественными людскими потоками в общественных зданиях в те периоды, когда, несмотря на нормальные условия, процесс достигал значительной напряженности, например в дверях при входе или выходе из зданий массового назначения. Следует подчеркнуть, что при этих исследованиях плотности потока не достигали значений $D_{ф.л.}$, а скорости оказались достаточно близкими к кривой 4. Следует подчеркнуть, что значения скоростей, описываемые кривой 4, очень близки к значениям, описываемым кривой 2. Последние представляют собой наибольшие величины скоростей, полученные при наблюдениях в нормальных условиях.

На этом же рисунке показана кривая 1 средних значений скорости, рекомендуемых для условий аварийного движения (v_a , соответствующая кривой 1 на

рис. 3.22). Сравнивая кривые 1 и 2 с кривыми 3 и 4, можно констатировать не только их достаточно близкий качественный характер, но и количественные значения скоростей (см. кривые 2 и 4). Следовательно, если при

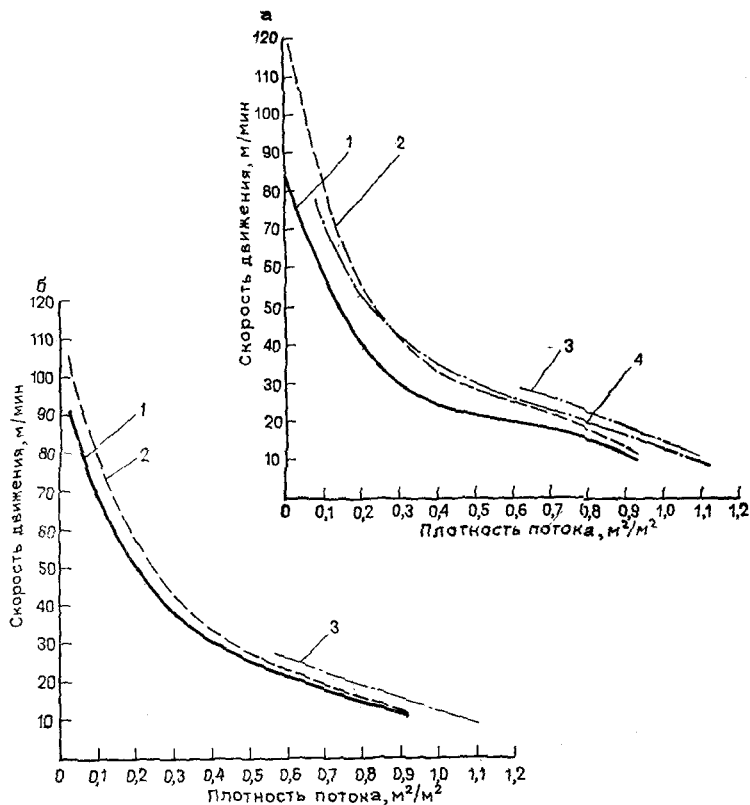


Рис. 3.23. Скорость движения по горизонтальным путям (а) и в проемах (б) в зависимости от плотности потока для аварийных условий.

1 — средние значения для аварийных условий (см. рис. 3.22). Процесс с повышенной напряженностью; 2 — наибольшие значения, полученные в нормальных условиях (по крайним значениям ряда распределения); 3 — значения, полученные в условиях, близких к аварийным; 4 — то же, с поправкой на состав потока

расчетах движения людских потоков для аварийных условий пользоваться средними значениями (кривая 1, рис. 3.23), то в зоне высоких плотностей образуется запас по времени в пределах 20—30%. Если отказаться от запаса, то можно пользоваться наибольшими значе-

ниями скоростей движения, полученными при наблюдениях в нормальных условиях (кривая 2, рис. 3.23), которые несущественно отличаются от данных указанных выше исследований (кривая 4, рис. 3.23) особенно в диапазоне высоких плотностей. Наибольшие значения скоростей приведены в прил. I.

С учетом того, что движение людского потока, особенно в аварийных условиях, может оказаться под влиянием случайных обстоятельств (непредусмотренные помехи по ходу процесса, например неровность пола, временное сужение пути и т. п.), введение запаса по времени движения можно считать оправданным.

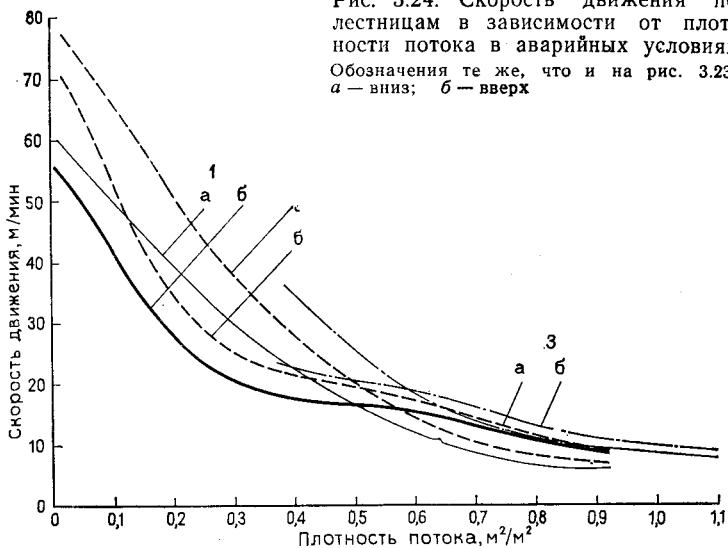
Поскольку выделить движение с высокими плотностями ($D > 0,92$) на горизонтальных путях, не связанных с проемами, оказалось трудно, рекомендовано значения скоростей движения через проемы при высоких плотностях (см. рис. 3.23, б; кривая 3) принимать такими же, как и при движении по горизонтальным путям (см. рис. 3.23, а; кривая 4).

Более высокие скорости движения в проемах, чем по равновеликим горизонтальным путям, установленные ранее, в настоящих исследованиях отмечены не были, так как, по-видимому, в зоне высоких плотностей эти различия менее ощутимы. Вместе с тем указывалось на влияние ширины проема на скорость движения, о чем уже говорилось в § 3 гл. 3 (о влиянии ширины проема см. ниже в § 5 гл. 3 и в § 4 гл. 5).

Аналогичные в качественном отношении результаты получены для движения по лестницам вниз и вверх (рис. 3.24). В количественном отношении значения скоростей при движении людских потоков по лестницам вниз и вверх в зоне высоких плотностей превышают как средние значения, предлагаемые для аварийных условий (кривые 1 и 2), так и наибольшие значения, полученные при наблюдениях в нормальных условиях (кривые 3 и 4). Это обстоятельство можно объяснить тем, что в натуре движение по лестницам, приближающееся к аварийному, встречалось довольно редко, поэтому исследования проводились только на искусственно созданных потоках.

Следовательно, при использовании для расчета данных, выраженных кривыми 1—4 (см. рис. 3.24), обеспечивается запас по времени движения, который оправдан

Рис. 3.24. Скорость движения по лестницам в зависимости от плотности потока в аварийных условиях. Обозначения те же, что и на рис. 3.23; а — вниз; б — вверх



применительно к лестницам, менее удобным при движении, чем горизонтальные пути.

На рис. 3.25 приведены результаты некоторых зарубежных исследований. Общий характер полученных закономерностей совпадает с отечественными данными. Особый интерес представляет работа, проведенная Лондонским управлением транспорта. В количественном отношении зарубежные исследования дают более высокие значения скоростей, что следует объяснить использованием искусственно созданных потоков, состоящих из людей одного возраста, преимущественно школьников и студентов.

Как отмечалось, искусственность эксперимента не позволяет учесть психологическое состояние людей, их возраста, наличия ручной клади и др. Существенным недостатком многих зарубежных работ следует считать описание зависимости скорости от плотности в узких диапазонах, что не позволяет выяснить общий характер изменений $v = f(D)$.

Кроме коэффициента условий движения μ может быть учтен также коэффициент условий движения η , характеризующий физические данные людей, слагающих поток. В зданиях и сооружениях, где более или менее однородный контингент людей молодого возраста (выс-

шие учебные заведения, промышленные предприятия и т. п.), можно ожидать повышенных значений v , т. е. $\eta > 1$; в зданиях и сооружениях со смешанным возрастным составом людей v будет равно установленным средним значениям, т. е. $\eta = 1$; в зданиях и сооружениях

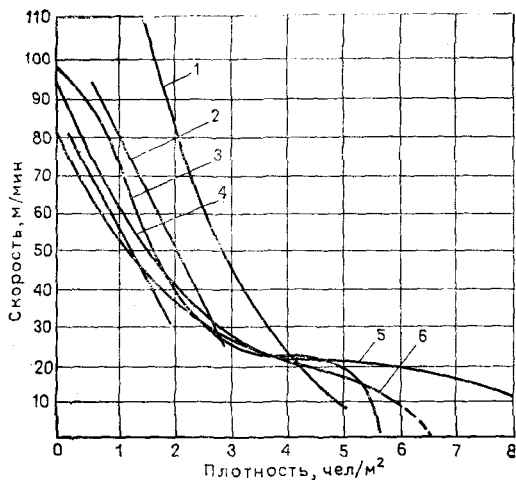


Рис. 3.25. Скорость движения людских потоков в зависимости от плотности

1 — Нэвин Фрэнсис; 2 и 4 — Эдинг; 3 — Лондонское управление транспорта; 5 — В. М. Предтеченский (движение по горизонтальным путям в аварийных условиях); 6 — МИСИ (движение вне зданий)

с контингентом людей пожилого возраста или со слабыми физическими данными (например, в больницах, детских учреждениях и т. п.) скорости движения будут меньше, т. е. $\eta < 1$.

Коэффициенты η можно найти на основании сопоставления величин $v = f(D)$ для определенного вида зданий с установленными средними значениями. Предварительные данные, например, показывают, что для промышленных зданий скорость движения людских потоков может быть на 10—15% выше средних величин, т. е. $\eta = 1,1 \div 1,15$.

В работах некоторых исследователей, проведенных в последние годы, приводятся полученные ими значения η . Так, при изучении движения людских потоков в школьных зданиях [8] для людских потоков, состоящих из детей младшей и средней возрастных групп, получены значения $\eta = 1,25 \div 1,29$, а для старшей возрастной группы $\eta = 1,19$. В. А. Копылов [10] для взрослых людей молодого возраста (служащих формирований пожарной охраны) предлагает значения η от 1,15 до 1,28, указывая на зависимость η от плотности потока. Это утверждение

представляет определенный интерес, поскольку вполне возможно, что физические данные людей будут проявляться по-разному при неодинаковых плотностях. Однако в целом следует считать, что коэффициенты η еще недостаточно изучены, и их можно пока принимать равными 1, т. е. ориентироваться на смешанные потоки.

§ 5. Пропускная способность пути и интенсивность движения людских потоков

Величиной, связывающей параметры движения, — плотность D , скорость v и ширина пути δ — является пропускная способность пути Q , т. е. количество людей, проходящих в единицу времени через сечение пути шириной δ , м²/мин*:

$$Q = D v \delta. \quad (3.10)$$

Произведение плотности и скорости, м/мин*,

$$q = D v, \quad (3.11)$$

называется интенсивностью или количеством движения, так как значения q , не зависящие от ширины пути, характеризуют кинетику процесса движения людского потока. Интенсивность движения соответствует пропускной способности пути шириной 1 м**.

При определенной плотности, разной для каждого вида пути, q достигает максимума $q_{\text{макс}}$, а затем падает (рис. 3.26). Отсюда следует важный вывод, что горизонтальные и наклонные пути движения, а также проемы имеют предел пропускной способности, определяемый плотностью при $q_{\text{макс}}$. Эта закономерность имеет важное значение, поскольку, как будет показано ниже, плотность, превышающая плотность при $q_{\text{макс}}$, вызывает задержку движения и скопление людей на тех участках пути, где этот предел превышен.

Значения q для различных плотностей и путей движения вычислены по формуле (3.11). При этом для горизонтальных путей, проемов, лестниц при движении вниз и вверх значения v определены по формулам (3.5) — (3.8), а для аварийных и комфортных условий движе-

* При размерности плотности в м²/м²; при размерности D , чел/м², пропускная способность получит размерность в чел/мин, а интенсивность движения — в чел/(м·мин).

** Ранее в работах ВНИИПО и МИСИ величина q называлась удельной пропускной способностью.

ния еще и с учетом коэффициентов условий движения μ_a и μ_k .

В цифровом выражении значения q приведены в таблице прил. 1 для всех видов и путей движения (графы 3, 5, 7 и 9).

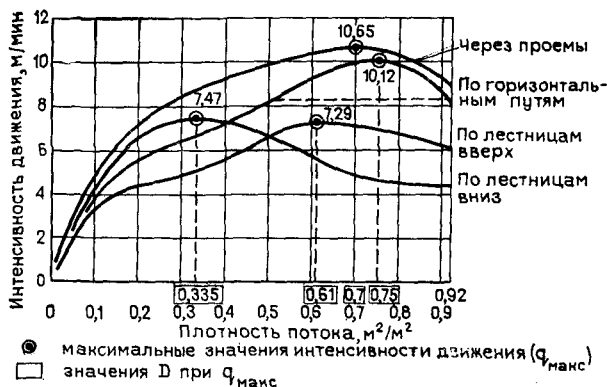


Рис. 3.26. Зависимость интенсивности (количества) движения от плотности людского потока (нормальные условия движения)

Если в выражении (3.10) заменить произведение Dv на $q_{\max} \delta$, то получим

$$Q_{\max} = q_{\max} \delta, \quad (3.12)$$

где Q_{\max} представляет пропускную способность пути, м²/мин, шириной δ (а не людского потока), т. е. максимально возможное число людей, которое может пройти в единицу времени через сечение пути шириной δ .

Иначе говоря, ширина пути δ , рассчитанная на Q_{\max} , является предельно допустимой минимальной шириной. Поэтому при проектировании путей движения людских потоков, предназначенных, например, только для вынужденной эвакуации или работающих с полной нагрузкой только в аварийных условиях, их ширину целесообразно назначать по Q_{\max} .

На рис. 3.27 представлены графики изменения интенсивности движения людских потоков в проемах для аварийных условий. Из рисунка видно, что интенсивность, полученная по крайним значениям ряда распределения в условиях, близких к аварийным, при предельных значениях плотности превышает средние показатели интенсивности, рекомендуемые для аварийных условий

(кривая 1). Таким образом, если последние принимать в качестве расчетных, то при проектировании будет создаваться некоторый обоснованный запас.

Сравнение кривых 3 и 4 показывает, что в проемах шириной $\delta < 1,6$ м интенсивность движения существенно

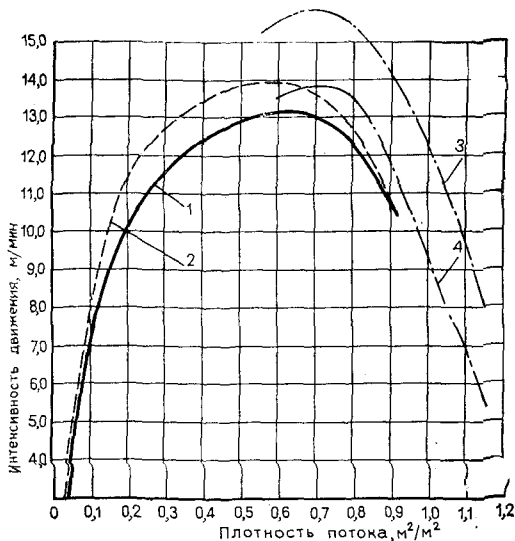


Рис. 3.27. Интенсивность движения в проемах для аварийных условий 1 — средние значения для аварийных условий; 2 — наибольшие значения, полученные в нормальных условиях (по крайним значениям ряда распределения); 3 — значения, полученные в условиях, близких к аварийным (горизонтальные пути и проемы $\delta > 1,6$ м); 4 — то же, для проемов $\delta < 1,6$ м

снижается и, следовательно, уменьшается их пропускная способность. Поэтому при расчетах движения людских потоков через проемы в аварийных условиях следует уменьшать расчетную интенсивность движения, если ширина проема менее 1,6 м (см. § 4 гл. 5).

Расчетную интенсивность движения при $D_{ф.п}$ можно принимать равной 8,50—8,20 м/мин (см. рис. 3.27, кривая 3).

§ 6. Оценка параметров движения и их расчетные значения

Выше было показано (см. § 4 гл. 3), что скорость движения потока зависит от его плотности, вида пути и степени напряженности процесса. На основании натуральных наблюдений за качественной стороной процесса движе-

ния людских потоков и анализа полученных зависимостей скорости и интенсивности движения от плотности потока для различного вида путей можно сделать следующие выводы.

Пропускная способность проемов несколько выше, чем равновеликих горизонтальных путей, хотя проемы, по существу, представляют собой те же горизонтальные пути. Как правило, проемы всегда делаются более узкими, чем прилегающие горизонтальные пути. Замечено, что движение людей у проемов становится более согласованным, благодаря чему достигается большая скорость движения при той же плотности потока. Согласованности движения, по-видимому, способствует уменьшение ширины пути, заставляющее людей как бы перестраиваться в психологическом отношении, чтобы быстрее миновать более узкий и, следовательно, менее удобный участок пути. Известно, что при согласованном движении (ходьба в ногу) при значительной плотности потока могут быть достигнуты высокие скорости движения. Этим же обстоятельством, по-видимому, можно объяснить меньшую кривизну кривой q для проемов (см. рис. 3.26) при плотностях 0,3—0,5, чем для горизонтальных путей. Поскольку пропускная способность проемов не на много превышает пропускную способность горизонтальных путей, при решении практических задач этой разницей можно пренебрегать.

При движении потока плотностью 0—0,1 и 0,4—0,9 по лестницам вниз скорость меньше, чем по горизонтальным путям, а при плотности 0,1—0,4 скорость оказывается выше (см. рис. 3.19). При движении по лестнице вниз люди затрачивают энергии меньше, чем по горизонтальному пути, поэтому можно ожидать большей скорости движения, но нужно учитывать уклон и наличие ступеней.

При нормальном движении по лестнице длина пути одной ноги равна сумме размеров проступи и двух подступенков (около 60 см), а плотность заполнения лестницы составляет не более 0,4, т. е. три человека на 1 м²; иначе говоря, следующая ступень свободна от впереди идущего человека. В этих пределах v превышает скорость по горизонтальным путям (см. рис. 3.19 и 3.26), т. е. движение протекает нормально, ритмично и в известной степени согласованно, поскольку из-за наличия ступеней длина шага у всех людей одинакова, что при

меньшей затрате энергии обуславливает повышенную скорость.

При большей плотности ступень оказывается занятой впереди идущим человеком, что нарушает ритмичность движения, поскольку нарушается нормальный шаг, и движение осуществляется постановкой на каждую нижнюю проступь сначала одной, а затем другой ноги. Кроме того, люди перестают видеть и «чувствовать» путь, поэтому двигаются осторожно, ожидая грани проступи и опасаясь падения. При плотности выше 0,4 скорость движения падает в результате не только общего увеличения плотности, но и указанных причин. Этим же объясняется и то, что значение $q_{\text{макс}}$ для лестниц при движении вниз соответствует плотности в пределах 0,3—0,4, т. е. при наиболее ритмичном и согласованном движении.

Меньшие скорости движения по лестницам вниз, чем по горизонтальным путям при плотностях 0—0,1, объясняются, по-видимому, особенностями свободного движения, при котором отсутствует общий ритм и возможны толчки, местные уплотнения, резкие остановки, что, с учетом характера пути, увеличивает опасность движения, поэтому люди двигаются медленнее, чем в аналогичных условиях по горизонтальным путям.

Скорость движения по лестницам вверх меньше, чем по горизонтальным путям, но при плотности потока 0,5—0,9 она больше, чем по лестницам вниз. При движении по лестнице вверх затрата энергии больше, чем по горизонтальным путям, поэтому меньшая скорость представляется вполне закономерной. При высоких плотностях характер движения такой же, как и при спуске, не ритмичный, но люди чувствуют себя более уверенно, не боясь оступиться и потерять равновесия, поэтому, несмотря на большую затрату энергии, скорость движения по лестнице при подъеме оказывается несколько выше, чем при спуске.

В зависимости от изменения скорости и интенсивности движения всю шкалу плотностей людского потока можно приближенно разбить на несколько зон (рис. 3.28).

При плотности не более $0,05 \text{ м}^2/\text{м}^2$ (один взрослый в уличной одежде на $2,5 \text{ м}^2$) люди, идущие в одном направлении, могут свободно обгонять друг друга, двигаться в разных совершенно случайных направлениях, как

при беспорядочном движении. Эти плотности соответствуют свободному движению.

Для свободного поточного движения в одном направлении предельная плотность может достигать 0,15 (~ 1 чел. на 0,8 м²). До такой плотности возможно движение, при котором люди в потоке не мешают друг другу. Следовательно, можно выделить зону свободного поточного движения.

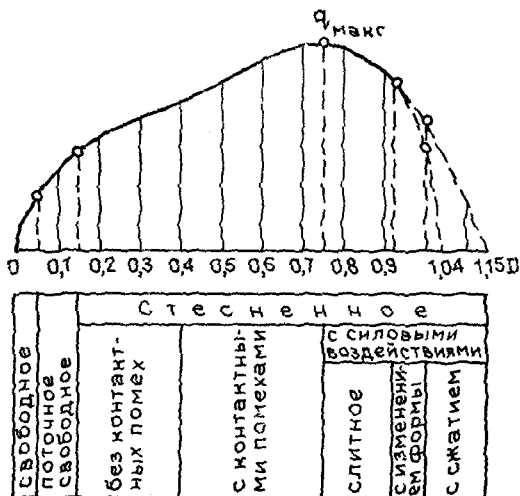


Рис. 3.28. Зоны движения людских потоков

Если плотность выше 0,15, то идущий начинает чувствовать, что ему мешают соседи. По мере нарастания плотности учащаются случайные контактные помехи, сила их увеличивается из-за несогласованности движения и раскачивания при ходьбе, и интенсивность движения уменьшается. Так продолжается, пока плотность не достигнет q_{max} , а затем помехи движению людей в потоке делаются настолько частыми, что практически масса людей начинает двигаться слитно. При движении по лестницам интенсивность движения начинает снижаться одновременно с возникновением контактных помех. Следовательно, может быть выделена зона стесненного движения (см. рис. 3.28).

Дальнейшими исследованиями установлено, что возможны плотности за пределами $D \approx 0,92$. Как было ска-

зано выше (см. § 3 гл.4), теоретически можно представить, что в зоне высоких плотностей потока (выше 0,92) присутствуют постоянные силовые воздействия людей друг на друга, вследствие чего изменяется форма горизонтальной проекции человека, и свободное пространство между людьми исчезает. При $D=1$ и возрастающих силовых воздействиях дальнейшее уплотнение потока происходит уже за счет сильного сжатия людей, при котором не только изменяется форма, но и уменьшается площадь горизонтальных проекций. Вполне вероятно, что изменение формы поперечного сечения человека и его площади происходит одновременно и при плотностях $D < 0,92$. Таким образом, в зоне стесненного движения можно выделить несколько подзон (см. рис. 3.28).

Практически невозможно провести четкую границу между подзонами стесненного движения, например выделить начало интенсивных силовых воздействий или границу между моментом заполнения свободных пространств и началом уменьшения величины f , поэтому такое разделение является условным.

Тем не менее, как установлено (см. § 3 гл. 3), существует физический предел плотности $D_{ф.п}=1,15 \text{ м}^2/\text{м}^2$, при достижении которого движение почти прекращается. Величина этого предела представляет интерес для правильного нормирования эвакуации при пожаре, поскольку должны быть обстоятельно вскрыты закономерности движения при высоких плотностях (за пределами $D=0,92$). Если предположить, что за пределами $D=0,92$ изменение скорости следует тому же закону, что и в пределах от 0 до 0,92, то при $D_{ф.п}=1,15$ (9 взрослых в уличной одежде на 1 м^2) $v=0$.

Однако, как показывают исследования [10], скорость движения потока по горизонтальным путям в условиях, близких к аварийным, при достижении $D_{ф.п}$ не равна 0, а составляет некоторую конечную величину (см. рис. 3.23 и 3.24).

Теоретически можно представить, что если на уровне плеч людской поток сжат до физического предела, то на уровне пола еще есть некоторое свободное пространство для перестановки ног. Фактически же движение в диапазоне плотностей от 0,92 до 1,15 затруднено настолько, что достаточно любой случайной причины (например, поворота человека боком или спиной к направлению потока), чтобы движение приостановилось.

На основании изложенного выше, а также в § 3—5 гл. 3 должны быть рекомендованы следующие расчетные параметры движения людских потоков.

Плотность людских потоков может изменяться от величин, близких к 0, до физического предела, который составляет около $D_{ф.п} = 1,15 \text{ м}^2/\text{м}^2$. Следует отметить, что такая плотность была достигнута только на горизонтальных путях в искусственно созданных людских потоках. На лестницах эту величину получить не удалось, поскольку размещение людей ограничивается наличием ступеней.

Скорости и интенсивности движения людских потоков являются функциями плотности. Их расчетные значения для аварийного, нормального и комфортного условий движения в диапазоне плотностей от 0 до 0,92 приведены в прил. I (графы 4—9). В графах 2 и 3 прил. I даны наибольшие значения v и q , полученные в нормальных условиях, но практически мало отличающиеся в качественном и количественном отношении от значений, зафиксированных при наблюдениях в условиях, близких к аварийным (см. рис. 3.23, а; кривые 4 и 2). Ими можно пользоваться при расчетах потоков в аварийных условиях, имея в виду, что будут получены минимальные значения времени движения (без некоторого запаса, который образуется при расчете по средним значениям, рекомендуемым для аварийного движения — графы 4 и 5 прил. I).

Значения v и q в диапазоне плотностей от 0,92 до 1,15 следует относить только к условиям аварийного движения, поскольку такие высокие плотности в нормальных, а тем более комфортных условиях маловероятны. Кроме того, указанные плотности, как правило, образуются в скоплениях людей перед границами смежных участков пути в случаях задержек движения, т. е. при $Q_n > Q_{n+1}$ (см. гл. 5, § 1—3).

Учитывая отмеченные выше некоторые условности при определении $D > 0,92$ и соответствующие им значения v и q , для расчета можно ограничиться наименее выгоднейшим значением q для людских потоков с плотностями больше 0,92. Они приводятся в прил. I в графах 3 и 5. Эти значения q для горизонтальных путей и проемов приняты, по данным исследований [10], при плотности, близкой к $D_{ф.п}$ (рис. 3.29).

Для движения по лестницам вниз и вверх значения

q приняты при $D=0,92$, поскольку на лестницах трудно ожидать больших плотностей. Кроме того, средние значения для лестниц при $D=0,92$ при движении вниз и вверх оказывались соответственно на 25 и 12% меньше, чем полученные при исследованиях в условиях, близких к аварийным. Таким образом, при расчетах будет создаваться некоторый обоснованный запас пропускной способности лестниц.

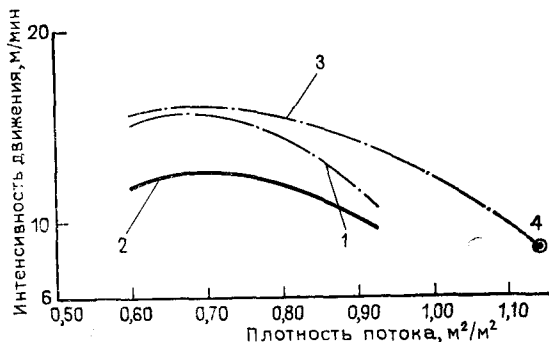


Рис. 3.29. Значения интенсивности движения в зоне высоких плотностей в аварийных условиях (горизонтальные пути)

1 — наибольшие значения, полученные при наблюдениях в нормальных условиях (по крайним значениям ряда распределения); 2 — средние значения для аварийных условий движения (процесс с повышенной напряженностью); 3 — значения, полученные при наблюдениях в условиях, близких к аварийным; 4 — расчетное значение для $D > 0,92$ (8,50 м/мин)

Для учета влияния ширины проемов при определении их пропускной способности в аварийных условиях и образовании скопления людей перед ними вводится коэффициент $k_0 < 1,0$, учитывающий особенности движения через проемы при высоких плотностях (см. § 4 гл. 5).

Глава 4

ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ СЛУЧАИ ДВИЖЕНИЯ ЛЮДСКИХ ПОТОКОВ

§ 1. Графическое изображение движения людских потоков

Графическое изображение движения людского потока позволяет наглядно проиллюстрировать весь процесс. На рис. 4.1 представлено движение людского потока по

горизонтальному или наклонному пути. Слева (рис. 4.1,а) показан в плане участок длиной L и шириной δ горизонтального пути, заканчивающийся проемом. Движение людей происходит в направлении, показанном стрелкой; расчетная схема того же участка дана в виде прямой линии (рис. 4.1,б). На рис. 4.1,в дана координатная система с осью ординат L (длина пути) и осью абсцисс t (время).

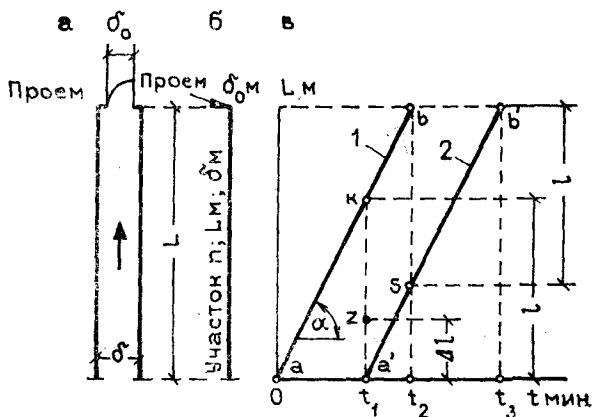


Рис. 4.1. Графическое изображение процесса движения
1 — головная часть; 2 — замыкающая часть

Пусть в начальный момент при $t=0$ на участке появляется головная часть людского потока. Через время t_1 весь поток входит в зону участка, включая его замыкающую часть. Рассматриваемый поток состоит из N человек и имеет плотность D .

Порядок построения графика движения следующий. Зная плотность потока D , из расчетной таблицы (см. прил. I) находим скорость движения v , соответствующую этой плотности и условиям движения (аварийным, нормальным, комфортным). По скорости v и длине участка L определяется время t_2 , мин, необходимое для прохождения данного участка:

$$t_2 = \frac{L}{v}.$$

Пересечение откладываемых на графике значений t_2 и L в точке b соединяется с началом координат прямой ab , так как скорость движения на этом участке постоянна

(поскольку по условию одинакова его ширина и плотность потока). Прямая ab выражает характер движения головной части потока на данном участке пути.

На основании условия, что через время t_1 весь поток входит в зону участка, и учитывая, что скорость движения остается неизменной, можно без предварительных вычислений из точки a' , соответствующей началу пути и времени t_1 , провести прямую $a'b'$, параллельную ab , до ординаты, соответствующей длине L . Прямая $a'b'$ выражает движение замыкающей части потока.

По графику легко найти местоположение потока в любой момент времени. Например, в момент t_2 головная часть потока достигла проема (точка b), а замыкающая часть находится в точке s . Тангенс угла наклона отрезков ab и $a'b'$ представляет собой скорость движения потока v , в данном случае постоянную на всей длине участка, поскольку постоянны ширина пути δ и плотность потока D . Следовательно, по наклону отрезков (линий, выражающих движение головной и замыкающей частей потока) можно судить о скорости движения людского потока.

По графику можно судить и о количестве людей, миновавших ту или иную точку на пути движения или не дошедших до нее. Общее количество людей в потоке N , m^2 , выражается ординатой (например, bs в момент t_2 или ka' в момент t_1), т. е. длиной потока l , умноженной на ширину пути δ и плотность потока:

$$N = D \delta l. \quad (4.1)$$

Тогда в точке z , отстоящей от начала пути на расстоянии Δl , искомое число людей, прошедших эту точку или не достигших ее, определяется как величина, пропорциональная отрезкам zk и $a'z$:

$$\frac{N_{zk}}{N} = \frac{zk}{a'k} = \frac{l - \Delta l}{l}$$

$$\frac{N_{a'z}}{N} = \frac{a'z}{a'k} = \frac{\Delta l}{l},$$

отсюда число людей, прошедших точку z :

$$N_{zk} = \frac{N}{l} (l - \Delta l),$$

а число людей, не достигших точки z :

$$N_{a'z} = \frac{N}{l} \Delta l.$$

Иначе говоря, при постоянных по длине потока значениях D и δ можно определить число людей относительно любых точек пути и моментов времени. Для этого необходимо найти число людей, приходящееся на единицу длины данного потока N/l .

Определить эту величину можно и другим путем. Между отрезками ab и $a'b'$ находится поток с известной плотностью D и скоростью v . Следовательно, пользуясь выражением (3.12), можно найти пропускную способность Q , а умножив найденную величину на время, например на величину отрезка bb' , — найти количество людей, m^2 , достигших к моменту t_3 конца участка, т. е. проема:

$$N = D \delta l = Q t. \quad (4.2)$$

Этот прием целесообразен как проверка найденного решения в сложных случаях, например времени прохождения людей через проем ($t_3 - t_2$). Если полученная величина N сходится с заданной (в пределах точности расчетов), то это значит, что график построен правильно.

§ 2. Движение людских потоков через границы смежных участков пути

Границей смежных участков называется такое сечение пути движения потока, где меняются ширина δ , вид пути (с горизонтального на наклонный, с наклонного на проем и т. п.) или то и другое одновременно. На рис. 4.2 приведены характерные сочетания смежных участков.

Рассмотрим движение людского потока на границе двух смежных участков, имеющих разную ширину (рис. 4.3, а).

Предположим, что к границе по участку n движется людской поток с числом людей N_n и пропускной способностью Q_n . Подойдя к границе, этот поток будет продолжать движение по участку $n+1$ с пропускной способностью Q_{n+1} . Очевидно, что число людей, которые подошли к границе по участку n , уйдут от границы по участку $n+1$:

$$N_n = N_{n+1}$$

или

$$Q_n t = Q_{n+1} t;$$

при равных значениях t пропускная способность, $m^2/\text{мин}$:

$$Q_n = Q_{n+1}, \quad (4.3)$$

п е р е х о д :

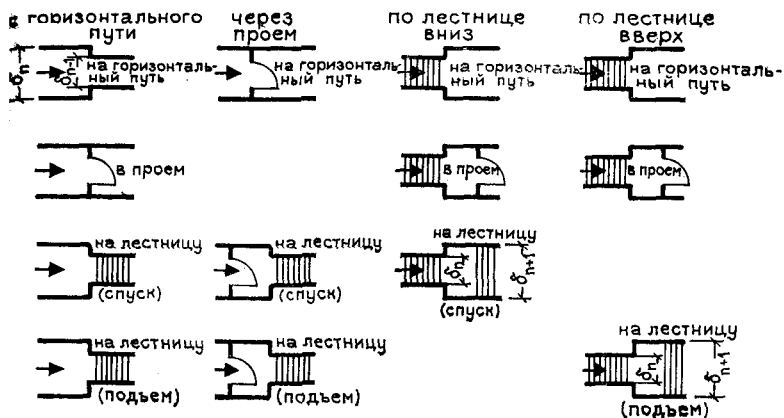
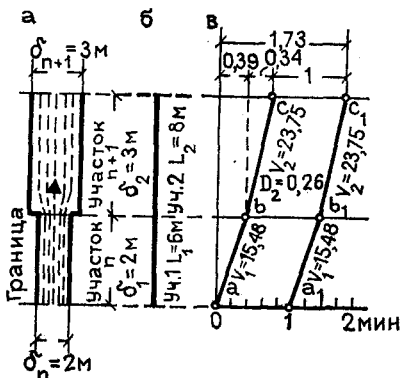


Рис. 4.2. Сочетание смежных участков пути движения

Рис. 4.3. Движение людского потока через границу смежных участков пути одного вида, но разной ширины, при $Q_n = Q_{n+1}$
 а — план пути; б — схема пути; в — расчетный график



т. е. для беспрепятственного перехода потока через границу смежных участков их пропускная способность должна быть одинаковой.

Выражение (4.3) можно представить в развернутом виде:

$$q_n \delta_n = q_{n+1} \delta_{n+1}$$

или

$$\frac{q_{n+1}}{q_n} = \frac{\delta_n}{\delta_{n+1}} \quad (4.4)$$

и определить интенсивность движения, м/мин, на участке $n+1$:

$$q_{n+1} = q_n \frac{\delta_n}{\delta_{n+1}}. \quad (4.5)$$

Так как значения q_n , δ_n и δ_{n+1} известны, то по подсчитанному q_{n+1} в прил. I находят v_{n+1} и D_{n+1} для участка $n+1$, поскольку $D_{n+1} = \frac{q_n \delta_n}{v_{n+1} \delta_{n+1}}$, а v и D связаны зависимостями (3.5) — (3.8).

Интенсивность движения на смежных участках пути, обратно пропорциональная ширине этих участков (4.4), имеет важное значение, так как позволяет рассматривать движение людского потока независимо от вида и ширины пути как единый процесс от начала и до конца.

Не менее важно отметить, что равенства (4.3) и (4.4) являются показателями правильно организованного движения. Нарушение же их свидетельствует об осложнении процесса.

Пример. Требуется определить время завершения движения людского потока по пути, состоящему из двух горизонтальных участков разной ширины (см. рис. 4.3). Движение происходит в нормальных условиях. Параметры пути указаны на плане и схеме пути. Плотность потока на первом участке составляет $D_1 = 0,6$. Замыкающая часть потока выходит на первый участок через одну минуту после начала движения.

Решение. Определяется интенсивность и скорость движения на первом участке. Для этого в таблице прил. I (графы 6 и 7) отыскиваются значения q_1 и v_1 , соответствующие $D_1 = 0,6$. Получим $q_1 = 9,29$ м/мин; $v_1 = 15,48$ м/мин.

Пользуясь выражением (4.5), определим интенсивность движения на втором участке пути:

$$q_2 = q_1 \frac{\delta_1}{\delta_2} = 9,29 \frac{2}{3} = 6,2 \text{ м/мин.}$$

Интенсивность движения 6,2 м/мин в таблице прил. I соответствует следующим параметрам: $D_2 = 0,26$ и $v_2 = 23,75$ м/мин (по таблице принимается ближайшее к найденному значение q ; в данном случае q принято 6,18).

Время движения головной части потока по первому участку

$$t_1 = \frac{L_1}{v_1} = \frac{6}{15,48} = 0,39 \text{ мин.}$$

То же, по второму

$$t_2 = \frac{L_2}{v_2} = \frac{8}{23,75} = 0,34 \text{ мин.}$$

На графике (см. рис. 4.4) движение головной части потока по первому и второму участкам изобразится соответственно отрезками ab и bc .

По условию, замыкающая часть людского потока выйдет на первый участок спустя 1 мин и ее движение изобразится отрезками

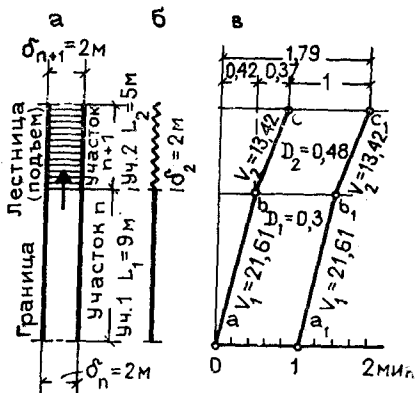


Рис. 4.4. Движение потока через границу между горизонтальным путем и лестницей при одинаковой ширине и $Q_n = Q_{n+1}$
 а — план пути; б — схема пути; в — расчетный график

a_1b_1 и b_1c_1 при тех же значениях t_1 и t_2 , что и для головной части. Общее время составит

$$\Sigma t = 1 + t_1 + t_2 = 1 + 0,39 + 0,34 = 1,73 \text{ мин.}$$

Пример. Требуется определить параметры движения людского потока на втором участке пути (лестница вверх) и общее время движения по двум участкам (рис. 4.4). Движение происходит в нормальных условиях. Параметры пути указаны на схеме. Параметры движения на первом горизонтальном участке $D_1 = 0,3$; $v_1 = 21,61$ м/мин; $q_1 = 6,48$ м/мин. Замыкающая часть потока выходит на первый участок, спустя 1 мин после начала движения.

Решение. Определим q_2 и по таблице прил. I параметры движения потока по лестнице вверх:

$$q_2 = q_1 \frac{\delta_1}{\delta_2} = 6,48 \frac{2}{2} = 6,48 \text{ м/мин.}$$

При этом $D_2 = 0,48$; $v_2 = 13,42$ м/мин.
 Определяем время движения:

$$t_1 = \frac{L_1}{v_1} = \frac{9}{21,61} = 0,42 \text{ мин;}$$

$$t_2 = \frac{L_2}{v_2} = \frac{5}{13,42} = 0,37 \text{ мин.}$$

Общее время $\Sigma t = 1 + t_1 + t_2 = 1 + 0,42 + 0,37 = 1,79$ мин.

График движения построен по тем же правилам, что и в первом примере.

Из примеров хорошо видно, что при переходе людского потока через границы смежных участков параметры движения зависят как от ширины, так и от вида пути. Для расчета принимается, что при переходе границы смежных участков плотности потока меняются скачкообразно. Однако в действительных условиях при изменении ширины пути в некоторой зоне Δl около границы плотность изменяется постепенно. Наблюдениями установлено, что при расширении пути ближайшие к стенам

траектории движения людей отклоняются приблизительно на 30° от направления оси потока, а при сужении пути — на 45° (рис. 4.5). Таким образом, поток движется как бы по пути с переменной шириной (от δ_n к δ_{n+1}). Длину этих зон (в м) можно определить из следующих выражений:

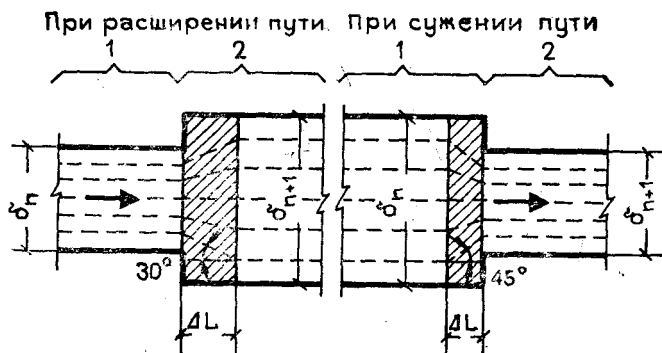


Рис. 4.5. Изменение ширины потока при расширении и сужении путей движения

1 — участок n ; 2 — участок $n+1$

при расширении пути

$$\Delta l = \frac{\delta_{n+1} - \delta_n}{2} \frac{1}{\operatorname{tg} 30^\circ} = 0,87 (\delta_{n+1} - \delta_n); \quad (4.6)$$

при сужении пути

$$\Delta l = \frac{\delta_n - \delta_{n+1}}{2} \frac{1}{\operatorname{tg} 45^\circ} = 0,5 (\delta_n - \delta_{n+1}). \quad (4.7)$$

Ширину каждой зоны можно принять как среднюю для смежных участков. Следовательно, движение потока в пределах зоны будет происходить с меньшей скоростью, чем по прилегающему широкому участку, т. е. участку δ_{n+1} при расширении пути и участку δ_n при сужении пути, поэтому при необходимости точного определения времени движения эти зоны целесообразно выделить в самостоятельный участок шириной

$$\delta_{\Delta l} = \frac{\delta_n + \delta_{n+1}}{2}. \quad (4.8)$$

Пример. Воспользуемся данными предыдущего примера (см. рис. 4.3) и определим время движения с учетом зоны расширения потока.

Ширина зоны

$$\delta_{\Delta l} = \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} = \frac{2 + 3}{2} = 2,5 \text{ м.}$$

Длина зоны по выражению (4.6)

$$\Delta l = 0,87 (\delta_1 - \delta_2) = 0,87 (3 - 2) = 0,87 \text{ м.}$$

Интенсивность движения в зоне

$$q_{\Delta l} = q_1 \frac{\delta_1}{\delta_{\Delta l}} = 9,29 \frac{2}{2,5} = 7,45 \text{ м/мин.}$$

По прил. I находим

$$D_{\Delta l} = 0,42; v_{\Delta l} = 17,76 \text{ м/мин.}$$

Время движения по зоне

$$t_{\Delta l} = \frac{\Delta l}{v_{\Delta l}} = \frac{0,87}{17,76} = 0,05 \text{ мин.}$$

Интенсивность движения на втором участке:

$$q_2 = q_{\Delta l} \frac{\delta_{\Delta l}}{\delta_2} = 7,45 \frac{2,5}{3} = 6,2 \text{ м/мин.};$$

$$D_2 = 0,26; v_2 = 23,75 \text{ м/мин.};$$

$$t_2 = \frac{L_2 - \Delta l}{v_2} = \frac{8 - 0,87}{23,75} = 0,3 \text{ мин.}$$

Общее время: $\Sigma t = 1 + t_1 + t_{\Delta l} + t_2 = 1 + 0,39 + 0,05 + 0,3 = 1,74 \text{ мин.}$

Разница расчета по времени с учетом зоны расширения потока составляет практически ничтожную величину (в пределах времени движения на втором участке пути она составляет всего 0,01 мин, или около 3%), поэтому при расчетах влиянием этих зон можно пренебречь. Но следует иметь в виду, что они вносят в расчет ошибку, несколько уменьшающую время движения против действительного.

Кроме зон расширения или сужения людского потока, на процесс движения через границы смежных участков при $\delta_n > \delta_{n+1}$ могут оказывать влияние (иногда очень сильное) условия, способствующие возникновению задержек движения вплоть до полной его остановки. Вероятность их возрастает с увеличением разности между δ_n и δ_{n+1} и с нарастанием плотности потока перед входом на участок $n+1$.

При определении q_{n+1} по выражению (4.5) и D_{n+1} (по прил. I) возникает вопрос, какое значение D_{n+1} следует принимать, поскольку в интервале от q_{\max} до q ,

отвечающей $D_{\text{макс}}$, одной и той же величине q_{n+1} соответствуют два значения D_{n+1} (см. рис. 3.26). Например, при движении по горизонтальному пути в нормальных условиях при $q_{n+1} = 9,55$ м/мин плотность D_{n+1} может быть равна 0,63 и 0,85 (см. прил. I), т. е.

$$q_{n+1} = D_{n+1} \cdot v_{n+1} = D_{n+1} \cdot v_{n+1} = 0,63 \cdot 15,16 = \\ = 0,85 \cdot 11,24 = 9,55 \text{ м/мин.}$$

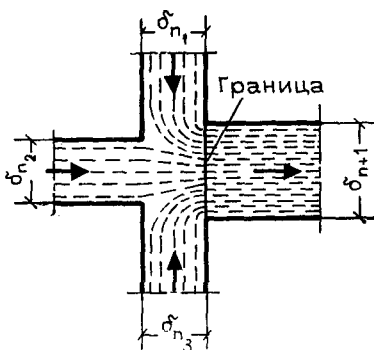
В начале движения на участке $n+1$ плотность потока близка к нулю. Затем она быстро, почти мгновенно возрастает, достигая значения, при котором величины пропускной способности смежных участков оказываются равными ($Q_n = Q_{n+1}$), и движение стабилизируется. Очевидно, что стабилизация наступает при достижении первого, меньшего значения плотности, которое и следует принимать в качестве расчетного. Однако предположим, что стабилизация наступила при втором, большем значении плотности. Это значит, что люди, вместо того чтобы идти с меньшей плотностью и большей скоростью, должны повысить плотность, но уменьшить соответственно скорость движения, поскольку должно сохраниться значение q_{n+1} . Естественно, и это подтверждено наблюдениями в природе, что люди всегда стремятся идти свободно, не мешая друг другу, если нет причин, заставляющих их увеличивать плотность потока и замедлять движение. Наконец, для достижения стабилизации при втором, большем значении плотности в предположении ее нарастания в короткий промежуток времени от 0 до D_{n+1} интенсивность движения от D_{n+1} до D_{n+2} превысит установленное значение q_{n+1} , достигнув $q_{\text{макс}}$, и затем снова уменьшится до q_{n+1} (см. рис. 3.26), что невозможно, если при движении через границу смежных участков число людей в потоке остается постоянным.

Следовательно, меньшее значение плотности отвечает установленному по выражению (4.5) значению q_{n+1} .

§ 3. Слияние и расчленение потоков

Слияние и расчленение людских потоков обычно происходит на путях движения, где сходятся несколько различных по виду и ширине путей, например около лестничной клетки, к которой подходят коридоры из различных частей здания, или в вестибюле, куда выходят лестничная клетка и коридоры первого этажа. Таким обра-

Рис. 4.6. Схема слияния людских потоков



зом, эти процессы сочетаются с процессом движения через границы смежных участков.

Закономерности, изложенные в § 2 гл. 4, сохраняются и в слиянии людских потоков.

Предположим, что на участках n_1 , n_2 и n_3 движутся три людских потока с числом людей соответственно N_{n_1} , N_{n_2} и N_{n_3} . Участки имеют пропускные способности Q_{n_1} , Q_{n_2} и Q_{n_3} . Подойдя одновременно к границе участка $n+1$, потоки сливаются в один общий, который продолжает движение по участку $n+1$ (рис. 4.6).

Из зависимости (4.3) следует, что

$$Q_{n_1} + Q_{n_2} + Q_{n_3} = Q_{n+1}$$

или

$$\begin{aligned} \Sigma Q_n &= Q_{n+1}; \\ \Sigma Q &= q_{n+1} \delta_{n+1}, \end{aligned}$$

откуда

$$q_{n+1} = \frac{\Sigma Q_n}{\delta_{n+1}}. \quad (4.9)$$

Следовательно, зная параметры потоков, подходящих к месту слияния, можно определить параметры движения объединенного потока, установив значение интенсивности движения по выражению (4.9), а плотность и скорость движения — по прил. I.

Пример. Три людских потока, двигаясь в нормальных условиях по горизонтальным путям, сливаются в один, продолжающий движение также по горизонтальному пути.

Исходные данные:

$$\begin{aligned} \delta_{n_1} &= 2 \text{ м}; D_{n_1} = 0,24; v_{n_1} = 25,04 \text{ м/мин}; q_{n_1} = 6,01 \text{ м/мин}; \\ \delta_{n_2} &= 1,5 \text{ м}; D_{n_2} = 0,33; v_{n_2} = 20,32 \text{ м/мин}; q_{n_2} = 6,71 \text{ м/мин}; \\ \delta_{n_3} &= 0,8 \text{ м}; D_{n_3} = 0,7; v_{n_3} = 14,31 \text{ м/мин}; q_{n_3} = 10,02 \text{ м/мин}; \\ \delta_{n+1} &= 3,2 \text{ м}. \end{aligned}$$

Решение. Определяем по выражению (3.12) пропускную способность сливающихся потоков:

$$Q_{n_1} = q_{n_1} \delta_{n_1} = 6,01 \cdot 2 = 12 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$Q_{n_2} = q_{n_2} \delta_{n_2} = 6,71 \cdot 1,5 = 10 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$Q_{n_3} = q_{n_3} \delta_{n_3} = 10,02 \cdot 0,8 = 8 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$\Sigma Q_n = Q_{n_1} + Q_{n_2} + Q_{n_3} = 12 + 10 + 8 = 30 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

По выражению (4.9):

$$q_{n+1} = \frac{\Sigma Q_n}{\delta_{n+1}} = \frac{30}{3,2} = 9,37 \text{ м/мин}.$$

По прил. I параметры объединенного потока (при первом, меньшем значении плотности) составляют:

$$D_{n+1} = 0,61; v_{n+1} = 15,37 \text{ м/мин}.$$

При расчленении одного потока на несколько (рис. 4.7) основным вопросом, подлежащим рассмотрению, является распределение людей между путями.

Рассмотрим основные расчетные случаи.

Первый случай. Пути движения после расчленения потока одинаковы по длине, по виду и ширине, и людям безразлично, по какому из них продолжать путь. Наблюдения, проведенные в зрелищных сооружениях, особенно на станциях метрополитена, показали, что при нескольких параллельных путях движения, например эскалаторах, работающих в одном направлении, они заполняются приблизительно с одинаковой плотностью, поскольку естественно, что люди выбирают тот путь, который свободнее. Поэтому при $Q_{n-1} = Q_{n_1} + Q_{n_2} + \dots + Q_{n_n}$ на путях, где продолжает движение расчлененный поток, будет одинаковая плотность и одинаковая пропускная способность; параметры движения определяются как обычно по значению интенсивности движения [см. выражение (4.5)]:

$$q_n = \frac{Q_{n-1}}{\Sigma \delta_n} \text{ м/мин.} \quad (4.10)$$

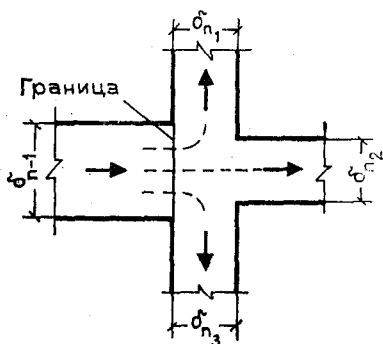


Рис. 4.7. Схема расчленения людского потока

Второй случай. Пути движения различны по ширине, но равноценны по другим признакам. В этом случае после расчленения потока интенсивность движения и плотность также будут одинаковы, но пропускные способности будут разными.

Пример. Определить пропускную способность трех потоков, образовавшихся в результате расчленения одного потока и продолжающих движение по горизонтальным путям в нормальных условиях.

Исходные данные: $Q_{n-1} = 30$ м²/мин; $\delta_{n_1} = 2$ м; $\delta_{n_2} = 1,5$ м; $\delta_{n_3} = 0,8$ м.

Решение. Определяем интенсивность движения по выражению (4.10):

$$q_n = \frac{Q_{n-1}}{\sum \delta_n} = \frac{30}{2 + 1,5 + 0,8} = 6,97 \text{ м/мин.}$$

По прил. I $D_n = 0,36$; $v_n = 19,28$ м/мин. Пропускные способности потоков:

$$Q_{n_1} = q_n \delta_{n_1} = 6,97 \cdot 2 = 13,95 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$Q_{n_2} = q_n \delta_{n_2} = 6,97 \cdot 1,5 = 10,45 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$Q_{n_3} = q_n \delta_{n_3} = 6,97 \cdot 0,8 = 5,60 \text{ м}^2/\text{мин.}$$

Сумма полученных пропускных способностей участков n_1 , n_2 и n_3 должна быть равна пропускной способности участка $n-1$. Тогда задача решена правильно:

$$Q_{n_1} + Q_{n_2} + Q_{n_3} = 13,95 + 10,45 + 5,60 = 30 = Q_{n-1} \text{ м}^2/\text{мин.}$$

Третий случай. Один людской поток расчленяется на несколько в определенных заранее заданных соотношениях по количеству людей при разных по ширине путях движения (например, в часы начала работы люди от входа направляются по коридорам в разные части здания или от проходной промышленного здания — в помещения цехов).

В этом случае по заданным значениям N_{n_1} , N_{n_2} , ..., N_{n_n} , а также δ_{n_1} , δ_{n_2} , ..., δ_{n_n} прежде всего находим пропускную способность участков пути для расчленившихся потоков Q_{n_1} , Q_{n_2} , ..., Q_{n_n} :

$$Q_{n_1} = Q_{n-1} \frac{N_{n_1}}{\sum N_n};$$

$$Q_{n_2} = Q_{n-1} \frac{N_{n_2}}{\sum N_n};$$

.....

$$Q_{n_n} = Q_{n-1} \frac{N_{n_n}}{\sum N_n}$$

а по ним — интенсивность движения $q_{n_1}, q_{n_2}, \dots, q_{n_n}$;

$$q_{n_1} = \frac{Q_{n_1}}{\delta_{n_1}}; \quad q_{n_2} = \frac{Q_{n_2}}{\delta_{n_2}}; \quad \dots; \quad q_{n_n} = \frac{Q_{n_n}}{\delta_{n_n}}$$

Далее, из прил. I берем соответствующие значения D и v для каждого потока.

Пример. Определить параметры трех потоков, образовавшихся в результате расчленения одного потока и продолжающих движение по горизонтальным путям в нормальных условиях.

Исходные данные: $Q_{n-1} = 30$ м²/мин; $\delta_{n_1} = 2$ м; $\delta_{n_2} = 1,5$ м; $\delta_{n_3} = 0,8$ м.

Число людей в каждом потоке: $N_{n-1} = 250$ чел.; $N_{n_1} = 100$ чел.; $N_{n_2} = 83$ чел.; $N_{n_3} = 67$ чел.

Решение:

$$а) \quad Q_{n_1} = 30 \frac{100}{250} = 12 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$Q_{n_2} = 30 \frac{83}{250} = 9,96 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$Q_{n_3} = 30 \frac{67}{250} = 8,04 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$\Sigma Q_n = 12 + 9,96 + 8,04 = 30 = Q_{n-1};$$

$$б) \quad q_{n_1} = \frac{12}{2} = 6 \text{ м}/\text{мин};$$

$$q_{n_2} = \frac{9,96}{1,5} = 6,65 \text{ м}/\text{мин};$$

$$q_{n_3} = \frac{8,04}{0,8} = 10,1 \text{ м}/\text{мин}.$$

Из прил. I находим:

$$v_{n_1} = 25,04 \text{ м}/\text{мин}; \quad v_{n_2} = 20,72 \text{ м}/\text{мин}; \quad v_{n_3} = 14,02 \text{ м}/\text{мин};$$

$$D_{n_1} = 0,24; \quad D_{n_2} = 0,32; \quad D_{n_3} = 0,72.$$

Четвертый случай. После расчленения потока пути движения неодинаковы, люди выбирают их по своему усмотрению. Решение вопроса о распределении людей между путями в этом случае наименее определено. Мерилом при выборе пути дальнейшего следования является совокупность соображений об их преимуществах и недостатках. На выбор дальнейшего направления дви-

BOOKS.PROEKTANT.ORG

БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОННЫХ
КОПИЙ КНИГ

ДЛЯ ПРОЕКТИРОВЩИКОВ
И ТЕХНИЧЕСКИХ СПЕЦИАЛИСТОВ

жения оказывают влияние следующие факторы: длина пути, его прямолинейность, вид пути, безопасность движения.

Если люди знакомы с расположением путей в здании (например, рабочие на своем предприятии), они всегда предпочтут тот путь, который ведет их к цели кратчайшим и более удобным маршрутом, даже если последний внешне выглядит менее выигрышно. Если основная масса людей незнакома с планировкой помещений (например, зрители в театрах), выбор обычно падает на путь, производящий на первый взгляд более благоприятное впечатление. Прямой путь всегда лучше пути с поворотами, так как открывает перспективу движения, в то время как повороты вносят элемент неопределенности, что особенно ощущается в условиях аварийного движения.

Вид пути имеет существенное значение. Люди всегда отдают предпочтение горизонтальному пути (даже если известно, что он длиннее) перед спуском по лестнице, а последний предпочитают подъему по лестнице. Иногда даже угол наклона лестницы оказывает влияние на выбор пути, так как двигаться по пологой лестнице легче, чем по крутой.

При аварийном движении, например при пожаре, выбор пути может зависеть от того, насколько безопасным представляется движение по тому или иному пути (задымление, угроза обрушения конструкций и т. п.). В таких случаях соображения о безопасности оказываются доминирующими над всеми другими.

Таким образом, большинство перечисленных мотивов, в той или иной мере оцениваемых людьми при выборе дальнейшего пути, представляют нечто реальное и поддающееся приближенному учету при проектировании.

Вероятная оценка пути людьми при расчленении потока и, следовательно, выбор ими того или иного направления движения могут быть учтены с помощью коэффициентов R , установленных приближенно на основании наблюдений (табл. 4.1).

Пользование коэффициентами поясним на следующем примере.

Пример. Определить пропускные способности трех потоков, образовавшихся в результате расчленения одного потока по прямому горизонтальному пути n_1 , открытой лестнице вниз n_2 и горизонтальному пути с поворотом n_3 .

Таблица 4.1. Значения коэффициентов R для оценки вероятного направления движения при расчленении потоков

Фактор	Характеристика пути	R
Длина	Большая длина	0,95
	Меньшая длина	1,05
	Неизвестная или одинаковая	1
Прямолинейность	Прямой	1,1
	С поворотами	0,9
Вид пути	Горизонтальный	1,2
	Лестница-спуск	0,85
	Лестница-подъем	0,7
Состояние, безопасность движения	Плохое состояние: неровности, скользкая поверхность и т. п.	0,5
	Очевидная опасность — задымление и т. п.	0
	Удовлетворительное состояние, отсутствие опасности или то и другое неизвестно	1

Исходные данные: $Q_{n-1} = 30$ м²/мин; $\delta_{n_1} = 2$ м; $\delta_{n_2} = 1,5$ м; $\delta_{n_3} = 0,8$ м.

Длина пути и их состояние людям неизвестны.

Решение. Определяем поправочные коэффициенты:

для пути n_1 : $R_I = 1$; $R_{II} = 1,1$; $R_{III} = 1,2$; $R_{IV} = 1$;

для пути n_2 : $R_I = 1$; $R_{II} = 1,1$; $R_{III} = 0,85$; $R_{IV} = 1$;

для пути n_3 : $R_I = 1$; $R_{II} = 0,9$; $R_{III} = 1,2$; $R_{IV} = 1$.

Далее находим общие значения R для каждого участка пути путем перемножения найденных в таблице значений:

$$R_{n_1} = 1,32; R_{n_2} = 0,94; R_{n_3} = 1,08.$$

Определяем среднюю интенсивность движения:

$$q_n = \frac{Q_{n-1}}{\delta_{n_1} R_{n_1} + \delta_{n_2} R_{n_2} + \delta_{n_3} R_{n_3}} = \frac{30}{2 \cdot 1,32 + 1,5 \cdot 0,94 + 0,8 \cdot 1,08} = 6,11 \text{ м/мин},$$

и далее пропускные способности

$$Q_{n_1} = q_n \delta_{n_1} R_{n_1} = 6,11 \cdot 2 \cdot 1,32 = 16,1 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$Q_{n_2} = q_n \delta_{n_2} R_{n_2} = 6,11 \cdot 1,5 \cdot 0,94 = 8,6 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$Q_{n_3} = q_n \delta_{n_3} R_{n_3} = 6,11 \cdot 0,8 \cdot 1,08 = 5,3 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

По сравнению с результатами расчета по второму случаю, увеличилась нагрузка на участок n_1 , более благоприятный для движения, и уменьшилась на участки n_2 и n_3 .

§ 4. Переформирование и растекание людских потоков

Слияние людских потоков, рассмотренное выше, предполагает одновременный подход их головных частей к месту слияния. Однако в практике такие случаи встречаются редко. Обычно к месту слияния потоки подходят в разное время, при этом один из потоков как бы вклинивается в другой. В результате на участке пути $(n+1)$, где движется объединенный поток, он приобретает разные параметры; иначе говоря, на одном пути образуется поток, состоящий как бы из нескольких, имеющих разные плотности и, следовательно, скорости движения (рис. 4.8). При дальнейшем движении образуется однородный поток с едиными параметрами. Процесс выравнивания параметров движения в различных частях потока называется переформированием людского потока.

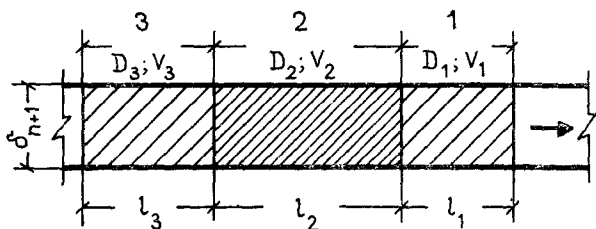


Рис. 4.8. Схема людского потока с разными плотностями
1, 2 и 3 — части потока

В результате каждая часть потока приобретает параметры впереди идущей части. Скорость переформирования v' определяется скоростью перемещения границы между частями потока с различными плотностями (см. рис. 4.8), при этом могут быть выделены два основных случая:

1) скорость движения первой части потока v_1 меньше скорости движения v_2 следующей за ней второй части, т. е. $v_1 < v_2$;

2) скорость движения первой части потока v_1 больше скорости движения v_2 следующей за ней части, т. е. $v_1 > v_2$.

Рассмотрим первый случай. Натурные наблюдения подтвердили, что при $v_1 < v_2$ вторая часть потока приобретает параметры движения первой части. Замечено, что отдельные люди из второй части потока, стремясь продолжать движение со скоростью v_2 , вклиниваются в первую, но вынуждены продолжать движение со скоростью v_1 , так как эта часть потока имеет большую плотность. Учитывая, что подобное нарушение движения наблюдается довольно редко, им можно пренебречь, не отклоняясь от истинной картины процесса.

К началу движения ($t=0$) авангард второй части потока размещен вплотную к первой (рис. 4.9, а). В течение последующего промежутка времени t люди, замыкающие первую часть потока, пройдут расстояние

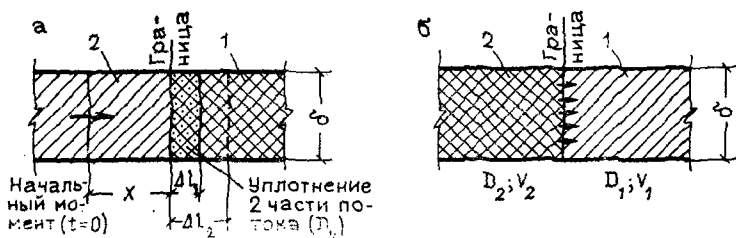


Рис. 4.9. Схемы переформирования двух частей 1 и 2 людского потока с разными плотностями, двигающихся по одному пути
 а — при $v_1 < v_2$; б — при $v_1 > v_2$

$$x + \Delta l_1 = v_1 t.$$

За это же время, если бы не было первой части потока, люди, идущие в голове потока второй части, прошли бы расстояние

$$x + \Delta l_2 = v_2 t,$$

но, догнав конец первой части потока, вторая часть уплотнится до D_1 и займет длину пути Δl_1 .

Количество людей, которое при отсутствии первой части могло бы разместиться на длине Δl_2 , составляет $D_2 \delta l_2$, м², но поскольку мешает впереди идущая часть, это же количество людей разместится с большей плотностью на длине Δl_1 и может быть записано как $D_1 \delta l_1$, м².

Следовательно, можно составить два равенства:

$$\frac{x + \Delta l_1}{v_1} = \frac{x + \Delta l_2}{v_2}; \quad D_1 \delta \Delta l_1 = D_2 \delta \Delta l_2.$$

Из последнего следует:

$$\Delta l_2 = \Delta l_1 \frac{D_1}{D_2},$$

или

$$x + \Delta l_1 = \left(x + \Delta l_1 \frac{D_1}{D_2} \right) \frac{v_1}{v_2}.$$

Раскроем скобки и произведем перегруппировку; имея в виду, что $D v = q$, получим

$$x \left(1 - \frac{v_1}{v_2} \right) = \Delta l_1 \left(\frac{q_1}{q_2} - 1 \right),$$

Как как $x = v_1 t - \Delta l_1$, то после преобразования будем иметь

$$\Delta l_1 \left(\frac{q_1}{q_2} - \frac{v_1}{v_2} \right) = t v_1 \left(1 - \frac{v_1}{v_2} \right). \quad (4.11)$$

Выражение (4.11) дает возможность определить Δl_1 в любой момент времени t с начала движения или найти конечное значение t , если Δl_1 определить из выражения

$$N_2 = D_1 \delta l, \quad (4.12)$$

имея в виду, что количество людей во второй части потока N_2 , м², и плотность первой части D_1 известны.

Таким образом, во время переформирования двух частей одного потока при $v_1 < v_2$ длина второй части непрерывно уменьшается, а длина первой — непрерывно возрастает.

Если величину x представить в виде

$$x = v' t,$$

где v' — скорость движения границы, разделяющей части потока с разными плотностями D_1 и D_2 ;

то, пользуясь исходным равенством

$$x + \Delta l_1 = v_1 t,$$

можно написать:

$$\Delta l_1 = t (v_1 - v').$$

Подставляя значения Δl_1 в уравнение (4.11), получим v_1 , м/мин:

$$v' = v_1 - \frac{v_1 \left(1 - \frac{v_1}{v_2} \right)}{\frac{q_1}{q_2} - \frac{v_1}{v_2}}.$$

После преобразований

$$v' = \frac{v_1 v_2 (q_1 - q_2)}{q_1 v_2 - q_2 v_1}.$$

Заменяв в знаменателе q на Dv , получим скорость движения границы между частями потока с разными плотностями, м/мин:

$$v' = \frac{q_1 - q_2}{D_1 - D_2}. \quad (4.13)$$

Рассмотрим второй случай. Казалось бы, при $v_1 > v_2$ первая часть потока оторвется от второй и уйдет вперед. Однако, как показали натурные наблюдения, люди отрываются от второй части потока, идущей с меньшей скоростью, и продолжают движение со скоростью первой части (рис. 4.9,б). Иначе говоря, происходит то же, что и в первом случае при $v_1 < v_2$, т. е. первая часть потока постепенно удлиняется, а вторая укорачивается за счет слияния с первой, хотя $v_1 > v_2$. Никаких разрывов между частями потока не образуется.

Опуская вывод расчетных уравнений, который аналогичен предыдущему, получим

$$\Delta l_1 \left(\frac{v_1}{v_2} - \frac{q_1}{q_2} \right) = v_1 t \left(\frac{v_1}{v_2} - 1 \right). \quad (4.14)$$

Уравнение скорости, м/мин, движения границы между смежными плотностями запишется в виде:

$$v' = \frac{q_2 - q_1}{D_2 - D_1}. \quad (4.15)$$

Практически безразлично, каким из выражений — (4.13) или (4.15) — пользоваться при определении v' , поскольку оба дают одинаковые результаты.

Пример. Определить время переформирования потока, состоящего из трех частей (см. рис. 4.8), и приращение длины его первой части. Поток следует по одному горизонтальному пути шириной $\delta = 2$ м. Условия движения нормальные. Параметры частей потока:

первой: $D_1 = 0,1$; $v_1 = 39,27$ м/мин; $q_1 = 3,93$ м/мин; $N = 2,5$ м² (25 чел. при $f = 0,1$ м²); $l_1 = 12,5$ м;

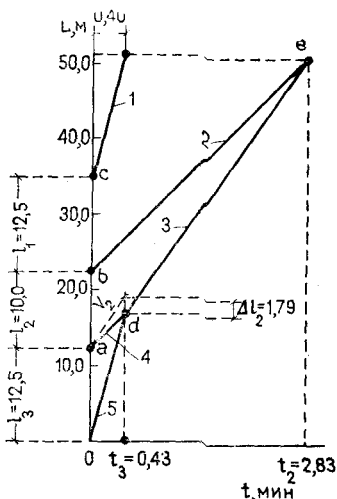
второй: $D_2 = 0,7$; $v_2 = 14,31$ м/мин; $q_2 = 10,02$ м/мин; $N = 14$ м²; $l_2 = 10$ м;

третьей: $D_3 = 0,1$; $v_3 = 39,27$ м/мин; $q_3 = 3,93$ м/мин; $N_3 = 2,5$ м²; $l_3 = 12,5$ м.

Рис. 4.10. Расчет и график переформирования людских потоков

1 — $v_1=39,27$; 2 — $v_{1-2}=10,15$; 3 — $v_2=14,31$; 4 — $v_{2-3}=10,15$; 5 — $v_3=39,27$

Для решения построим график (рис. 4.10). Отложим на оси ординат длину частей потока l_1 (отрезок cb), l_2 (отрезок ba) и l_3 (отрезок ao). Из точек c и o проведем прямые, характеризующие движение начала первой части потока v_1 и конца третьей части v_3 . Затем по формуле (4.13) определим скорость переформирования между первой и второй и между второй и третьей частями потока:



$$v_{1-2}' = \frac{q_1 - q_2}{D_1 - D_2} = \frac{3,93 - 10,02}{0,1 - 0,7} = 10,15 \text{ м/мин};$$

$$v_{2-3}' = \frac{q_2 - q_3}{D_2 - D_3} = \frac{10,02 - 3,93}{0,7 - 0,1} = 10,15 \text{ м/мин}.$$

Из точки a проведем прямую, отвечающую найденному значению v_{2-3}' , до пересечения с прямой v_3 в точке d , которая обозначает момент окончания переформирования третьей части потока, т. е. момент, когда все люди из нее примкнули ко второй части потока, приобрели ее плотность D_2 и увеличили длину на Δl_3 . Чтобы определить Δl_2 , воспользуемся формулой (4.12):

$$\Delta l_2 = \frac{N_3}{D_2 \delta} = \frac{2,5}{0,7 \cdot 2} = 1,79 \text{ м}.$$

Время переформирования третьей части потока определяется по графику и составляет $t_3=0,43$ мин.

Далее из точки d проводим прямую v_2 , характеризующую движение конца второй части потока (с учетом приращения), а из точки b — прямую v_{1-2}' до их взаимного пересечения в точке e . В этот момент прекращает существование вся вторая часть потока и возникает единый поток, состоящий из $N_1+N_2+N_3$, с параметрами движения первой части. Полное приращение длины первой части:

$$\Delta l_2 = \frac{N_2 + N_3}{D_1 \delta} = \frac{14 + 2,5}{0,1 \cdot 2} = 82,5 \text{ м}$$

(соответствующая ордината не показана, так как находится за пределами графика). Время переформирования по графику $t_2=2,83$ мин.

Для проверки найденного решения воспользуемся выражением (4.2), на основании которого можно считать, что

$$N_1 + N_2 + N_3 = Q_1 (t_2 - t_0) = 3,93 \cdot 2 (2,83 - 0,4) = 19 \text{ м}^3,$$

где t_0 — время, затраченное головной частью потока на достижение того места пути, где завершается процесс переформирования (определено по графику).

Время переформирования потока может быть определено не только графически, но и аналитически. Если уравнение (4.11) или (4.14) решить относительно t , то получим:

$$t = \frac{\Delta l (D_1 - D_2)}{D_2 (v_2 - v_1)}, \quad (4.16)$$

где Δl — приращение длины впереди идущей части потока, м, определяемое из выражения (4.12), т. е. $\Delta l = \frac{N_2}{\delta D_1}$; D_1 и D_2 — плотности соответственно впереди идущей и последующей частей потока; v_1 и v_2 — скорости соответственно впереди идущей и последующей частей потока, м/мин.

Пример. Воспользовавшись данными предыдущего примера, определим время переформирования:

третьей части потока

$$t_3 = \frac{\Delta l_2 (D_2 - D_3)}{D_3 (v_3 - v_2)} = \frac{1,79 (0,7 - 0,1)}{0,1 (39,27 - 14,3)} = 0,43 \text{ мин};$$

второй части потока

$$t_2 = \frac{\Delta l_2 (D_1 - D_2)}{D_2 (v_2 - v_1)} = \frac{8,25 (0,1 - 0,7)}{0,7 (14,3 - 39,27)} = 2,83 \text{ мин.}$$

Частный случай переформирования людских потоков представляет так называемое растекание потока, происходящее тогда, когда его головная часть, имея впереди свободный путь, увеличивает скорость движения до величины, соответствующей условиям свободного движения. Следовательно, образуются как бы две части потока, идущие с разными скоростями по одному пути при $v_1 > v_2$. При этом скорость растекания v' может быть определена по выражению (4.13) или (4.15). Значение плотности впереди идущей части потока можно принимать при нормальных условиях движения $\approx 0,15$; при аварийных $\approx 0,05$.

Растекание людских потоков наиболее отчетливо проявляется в аварийных условиях движения. Следует отметить, что учет растекания потока при проектировании протяженных путей движения дает несколько меньшее значение времени движения потока, а в некоторых случаях меньшую ширину пути движения. При относительно коротких путях движения учет растекания потока сказывается незначительно.

Пример. Требуется определить время завершения движения людского потока по пути, состоящему из двух горизонтальных участков разной ширины (рис. 4.11). Движение происходит в аварийных условиях. Параметры пути указаны на схеме. Плотность потока на участке n составляет $D_n=0,6$. Замыкающая часть потока выходит на первый участок через минуту после начала движения.

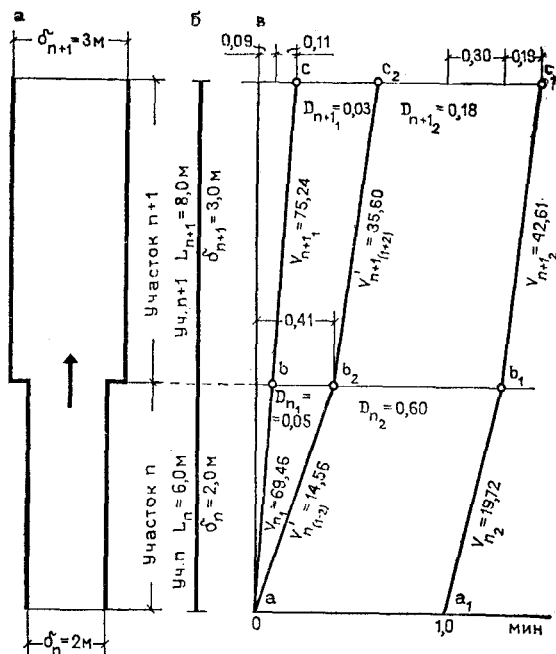


Рис. 4.11. Движение людского потока через границу смежных участков пути в аварийных условиях с учетом растекания

Решение. В момент выхода головной части потока на участок I люди, видя свободный путь, увеличивают скорость движения до величины, соответствующей плотности $0,05$, т. е. образуются две части потока: первая с плотностью $D_{n_1}=0,05$; вторая — $D_{n_2}=0,60$.

Соответственно параметры движения по прил. 1 (графы 4 и 5) составят:

$$D_{n_1} = 0,05; v_{n_1} = 69,46 \text{ м/мин}; q_{n_1} = 3,47 \text{ м/мин};$$

$$D_{n_2} = 0,60; v_{n_2} = 19,72 \text{ м/мин}; q_{n_2} = 11,48 \text{ м/мин}.$$

Скорость перестроения между ними:

$$v_{n_1-2} = \frac{q_{n_1} - q_{n_2}}{D_{n_1} - D_{n_2}} = \frac{3,47 - 11,48}{0,05 - 0,60} = 14,56 \text{ м/мин}.$$

Пользуясь выражением (4.5) и прил. I, определим параметры движения на участке $n+1$:

для первой части потока

$$q_{n+1_1} = \frac{q_{n_1} \delta_2}{\delta_{n+1}} = \frac{3,47 \cdot 2}{3} = 2,31 \text{ м/мин};$$

$$D_{n+1_1} = 0,03; v_{n+1_1} = 75,24 \text{ м/мин};$$

для второй части потока

$$q_{n+1_2} = \frac{q_{n_2} \delta_a}{\delta_{n+1}} = \frac{11,48 \cdot 2}{3} = 7,65 \text{ м/мин};$$

$$D_{n+1_2} = 0,18; v_{n+1_2} = 42,61 \text{ м/мин}.$$

Скорость переформирования между ними на участке $n+1$ составит

$$v'_{n+1_{1-2}} = \frac{q_{n+1_1} - q_{n+1_2}}{D_{n+1_1} - D_{n+1_2}} = \frac{2,31 - 7,65}{0,03 - 0,18} = \\ = 35,60 \text{ м/мин}.$$

Время движения по участку n :

$$\text{первой части потока } t_{n_1} = \frac{L_n}{v_{n_1}} = \frac{6}{69,46} = 0,09 \text{ мин};$$

$$\text{второй части потока } t_{n_2} = \frac{L_n}{v_{n_2}} = \frac{6}{19,72} = 0,30 \text{ мин}.$$

Нанесем полученные результаты на график (точки b и b_1) и построим прямую ab_2 , характеризующую процесс переформирования. Точка b_2 может быть найдена аналитически, т. е.

$$t_{n_{1-2}} = \frac{L_n}{v'_{n_{1-2}}} = \frac{6}{14,56} = 0,41 \text{ мин}.$$

Время движения по участку $n+1$:

$$\text{первой части потока (точка } c) t_{n+1_1} = \frac{L_{n+1}}{v_{n+1_1}} = \frac{8}{75,24} = \\ = 0,11 \text{ мин};$$

$$\text{второй части потока (точка } c_1) t_{n+1_2} = \frac{L_{n+1}}{v_{n+1_2}} = \frac{8}{42,61} = \\ = 0,19 \text{ мин};$$

$$t_{n+1_{1-2}} = \frac{L_{n+1}}{v'_{n+1_{1-2}}} = \frac{8}{35,6} = 0,22 \text{ мин (точка } c_2).$$

По условию, замыкающая часть потока выйдет на участок n спустя 1 мин, и ее движение изобразится отрезками a_1b_1 и b_1c_1 . Общее время составит:

$$\Sigma t = 1 + t_{n_2} + t_{n+1_2} = 1 + 0,30 + 0,19 = 1,49 \text{ мин.}$$

Сравнивая полученный результат с результатами примера, приведенного в § 2 гл. 4 (см. рис. 4.3), можно установить, что сокращение продолжительности движения потока по участкам n и $n+1$ достигнуто только за счет более высоких скоростей при аварийном движении. Растекание существенно сказалось на сокращении времени достижения головной частью потока конца участка $n+1$. Если бы не было растекания, головная часть потока достигла бы конца прохода за 0,49 мин, т. е. за то же время, что и замыкающая часть. С учетом растекания это время сократилось до 0,2 мин, т. е. в 2,5 раза. Относительно небольшая длина участков пути n и $n+1$ не позволила завершиться реформированию потока.

Глава 5

ДВИЖЕНИЕ ЛЮДСКИХ ПОТОКОВ С ВЫСОКИМИ ПЛОТНОСТЯМИ

§ 1. Возникновение скоплений при движении через границы смежных участков пути

В зданиях и сооружениях общественного назначения часто можно наблюдать движение людских потоков с образованием высоких плотностей, а также скопление людей в местах сужения пути — у проемов и лестниц. Для сохранения порядка, например, в театрах часто приходится прибегать к помощи специального персонала. На стадионах после матчей устраиваются дополнительные зрелища, которые, удерживая часть зрителей на трибунах, позволяют продлить время эвакуации и снизить плотность людских потоков.

Наблюдениями установлено, что скопление людей перед границей смежных (по ходу движения) участков пути образуется при

$$Q_n > Q_{n+1},$$

когда в единицу времени по участку пути n к границе подходит людей больше, чем способен пропустить следующий участок пути $n+1$.

Если количество людей, участвующих в движении (в потоке), обозначить через N , m^2 , то время движения всего потока (в мин) через сечение пути участка n (коридор) представляет частное от деления количества людей на пропускную способность пути Q , $m^2/\text{мин}$, т. е.

$$t_n = \frac{N}{Q_n}. \quad (5.1a)$$

Время движения потока (в мин) через сечение пути участка $n+1$ (в нашем случае через проем):

$$t_{n+1} = \frac{N}{Q_{n+1}}. \quad (5.16)$$

Поскольку имеет место неравенство $Q_n > Q_{n+1}$, то

$$\frac{N}{Q_n} < \frac{N}{Q_{n+1}}, \quad (5.2a)$$

или

$$t_n < t_{n+1}. \quad (5.26)$$

Следовательно, поток через сечение участков пути n и $n+1$ проходит в разное время: через участок n быстрее, через проем (участок $n+1$) — медленнее, т. е. движение людского потока замедляется из-за меньшей пропускной способности участка $n+1$.

На неравенство пропускных способностей указывает определяемая по выражению (4.5) интенсивность движения, которая в этих случаях оказывается больше q_{\max} для соответствующего вида пути:

$$q_{n+1} = q_n \frac{\delta_n}{\delta_{n+1}} > q_{\max}. \quad (5.3)$$

Так как интенсивность движения не может превысить q_{\max} (см. § 5 гл. 3), то на участок $n+1$ переходят только некоторые из подходящих к границе людей, а остальные скапливаются, резко замедляя скорость движения. Задержавшись у границы, люди стремятся как можно скорее перейти через нее и продолжать движение. Это стремление, особенно ошутимое в аварийных условиях, обуславливает быстрое, почти мгновенное повышение плотности перед границей и на границе до высоких

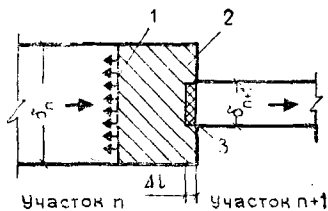


Рис. 5.1. Схема скопления людей перед границей смежных участков 1 — граница скопления; 2 — скопление людей; 3 — площадка ($\delta_{n+1} \cdot \Delta l$) на границе между участками

значений и даже до физически предельной плотности — $D_{ф.п} = 1,15$.

Насколько быстро плотность достигает значений $D_{макс}$ и больше, можно установить следующим путем. Предположим, что к границе между участками n и $n+1$ (рис. 5.1) в течение времени Δt подходит следующее число людей, m^2 :

$$Q_n dt = q_n \delta_n dt;$$

уходит через границу за то же время

$$Q_{n+1} dt = q_{n+1} \delta_{n+1} dt;$$

задерживается перед границей на участке n

$$N_c = D \delta_n \Delta l,$$

где D — плотность на элементарной площадке перед границей.

Следовательно:

$$\delta_{n+1} \Delta l dD = (q_n \delta_n - q_{n+1} \delta_{n+1}) dt,$$

или в интегральной форме

$$\int \delta_{n+1} \Delta l dD = \int (q_n \delta_n - q_{n+1} \delta_{n+1}) dt.$$

Поскольку $\int dD = (D_k - D_n)$, где D_k — конечная плотность, а D_n — начальная, то после интегрирования получим

$$\delta_{n+1} \Delta l (D_k - D_n) = (q_n \delta_n - q_{n+1} \delta_{n+1}) t + C.$$

В начальный момент при $t=0$ $D_k = D_n$, поэтому $C=0$. Тогда

$$t = \Delta l \frac{(D_k - D_n) \delta_{n+1}}{q_n \delta_n - q_{n+1} \delta_{n+1}}. \quad (5.4)$$

Из выражения (5.2) следует, что время, в течение которого плотность на границе достигает D_k , будет тем меньше, чем выше плотность подходящего к границе потока D_n и чем больше разность пропускных способностей смежных участков пути. Следовательно, при конечном значении Δl время может достигать или очень больших, или очень малых величин.

Однако поскольку значение Δl мало, можно полагать, не допуская существенной погрешности в расчетах, что при $Q_n > Q_{n+1}$ высокая плотность на границе возникает практически мгновенно (скачком) независимо от значений D_n и $Q_n - Q_{n+1}$.

Следовательно, при $Q_n > Q_{n+1}$, т. е. когда при расчете оказывается, что $q_{n+1} > q_{\text{макс}}$, плотность на последующем участке следует принимать достаточно высокой, соответствующей условиям движения.

Можно, основываясь на данных § 4 и 6 гл. 3, считать, что в нормальных условиях движения плотность потока при скоплении не будет превышать $D=0,92$, поскольку многочисленные натурные наблюдения [5, 11] не дали результатов, превышающих эту величину. В аварийных условиях движения в зависимости от степени опасности и вида пути плотность потока при скоплении людей можно ожидать более высокую, чем $D=0,92$.

Как показали натурные исследования [10], величина предельной плотности в скоплении в условиях, близких к аварийным, колеблется в пределах 1,04—1,08, приближаясь в искусственно созданных потоках к $D_{\text{ф.п.}} = 1,15$. Таким образом, в результате натурных наблюдений не было получено данных, позволяющих с уверенностью установить расчетную предельную плотность ($>D=0,92$) для всех видов путей. Учитывая, что полученные в экспериментах конечные значения скоростей движения при $D > 1$ близки к значениям при $D=0,92$ (см. рис. 3.23 и 3.24) и, следовательно, величины интенсивности движения q могут быть больше принятых для аварийных условий (по средним значениям скорости; см. кривую 1 на рис. 3.23 и кривые 1 и 3 на рис. 3.24), следует считать целесообразным следующее.

1. Для аварийных условий расчетная предельная плотность (в скоплениях) может достигать значений, больших $D=0,92$, и даже 1, а в отдельных случаях и приближаться к $D_{\text{ф.п.}}$.

2. Для аварийных условий при образовании скоплений следует установить, основываясь на исследованиях [10], только значения интенсивностей движения q , принимая их в диапазоне высоких плотностей по минимальным значениям, которые гарантируют известный запас при расчете времени и параметров путей движения.

Значения q для аварийных условий при предельной плотности приведены в прил. I в последней строке (графы 3 и 5). О значениях скорости и интенсивности движения в проемах в аварийных условиях при образовании скоплений см. ниже — § 4 гл. 5.

Плотности в скоплениях людей, образующихся в комфортных условиях, могут иметь самые разнообразные

значения (от D при q_{\max} до $D_{\max}=0,92$) и зависят от состава потока, условий его образования и других обстоятельств. Например в театрах плотность нередко из-за недостаточной пропускной способности гардероба не превышает плотности при q_{\max} ; на стадионах (в подтрибунных помещениях) плотности имеют большие значения, чем в театрах, но меньше $D=0,92$, поэтому расчетное значение предельной плотности в комфортных условиях целесообразно устанавливать всегда меньше $D=0,92$, основываясь на аналогах, предварительных наблюдениях или других данных.

Таким образом, если в расчете оказывается что

$$q_{n+1} > q_{\max},$$

то образуется скопление людей перед границей смежных участков пути с указанными выше значениями плотности. Параметры движения на границе смежных участков пути будут соответствовать значению плотности в скоплении.

Пример. Определить параметры движения на границе двух смежных участков пути (см. рис. 5.1) шириной $\delta_{n+1}=1,5$ м, если $D_n=0,7$; $q_n=10,02$ м/мин; $\delta_n=3$ м.

Решение. Определяем интенсивность движения на участке $n+1$:

$$q_{n+1} = \frac{q_n \delta_n}{\delta_{n+1}} = \frac{10,02 \cdot 3}{1,5} = 20 \text{ м/мин} > q_{\max} = 10,13 \text{ м/мин}$$

(для горизонтальных путей в нормальных условиях движения). Из этого следует, что неизбежны скопление людей перед участком $n+1$ с плотностью $D_{\max}=0,92$ и, следовательно, задержка движения.

Параметры движения людского потока на границе участка $n+1$ по таблице прил. I:

$$D_{n+1} = 0,92; v_{n+1} = 8,35 \text{ м/мин}; q_{n+1} = 9,08 \text{ м/мин}.$$

Если расчет ведется на аварийные условия, то

$$q_{n+1} = \frac{q_n \delta_n}{\delta_{n+1}} = \frac{10,02 \cdot 3}{1,5} = 20 \text{ м/мин} > q_{\max} = 12,4 \text{ м/мин}$$

(для горизонтальных путей в аварийных условиях движения).

Параметры движения на границе определяются предельной интенсивностью движения, составляющей $q_{n+1}=7,5$ м/мин.

§ 2. Разуплотнение людского потока

Во время движения людского потока через границу смежных участков пути, т. е. при $q_{n+1} > q_{\max}$, может

происходить так называемое разуплотнение потока. Оно состоит в том, что при образовании скопления людей перед границей и на границе, например с плотностью $D=0,92$, на последующем участке после границы она оказывается значительно меньше. Разуплотнение потока объясняется тем, что в определенном для каждого вида пути диапазоне плотностей одному значению интенсивности движения соответствуют два значения плотности, поскольку q , изменяясь от значений при $D=0$ до $D=0,92$, в пределах этого диапазона достигает экстремума, а затем падает (см. рис. 3.26). Например, для горизонтальных путей при нормальном движении значению $q=8,35$ м/мин соответствуют два значения плотности: $D=0,51$ и $D=0,92$. Разуплотнение достигается в тех случаях, когда головная часть потока не встречает помех. Тогда при переходе людским потоком границы между участками пути происходит как бы мгновенная перестройка его структуры, и его головная часть, попадая на участок $n+1$, занимает большую площадь по длине пути, увеличив соответственно скорость движения и сохранив прежнюю интенсивность.

Пример. Определить параметры движения людского потока в нормальных условиях в коридоре (рис. 5.2,а) шириной $\delta_{n+1}=1,5$ м, если плотность проходящего по участку n людского потока составляет $D=0,7$, а $\delta=3$ м.

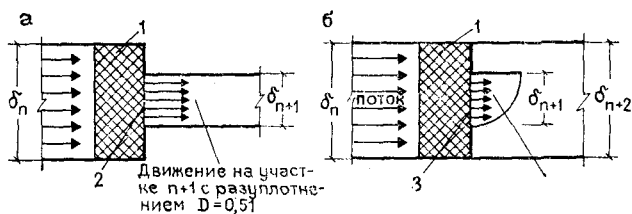


Рис. 5.2. Движение потока через границы смежных участков пути при $Q_n > Q_{n+1}$
 1 — скопление, $D=0,92$; 2 — граница между участками δ_n и δ_{n+1} ; 3 — проем и граница между участками n и $n+1$; а — схема при разуплотнении потока; б — схема с проемом

Решение. Определяем по прил. I для $D=0,7$ интенсивность движения $q_n=10,02$ м/мин и находим пропускную способность участка n :

$$Q_n = q_n \delta_n = 10,02 \cdot 3 = 30,06 \text{ м}^2/\text{мин.}$$

Определяем интенсивность движения в коридоре (участок $n+1$):

$$q_{n+1} = \frac{q_n \delta_n}{\delta_{n+1}} = \frac{10,02 \cdot 3}{1,5} = 20 \text{ м/мин} > q_{\text{макс}} = 10,13 \text{ м/мин.}$$

Следовательно, перед участком $n+1$ (коридором) в результате скопления людей с плотностью $D=0,92$ происходит задержка движения. Параметры движения на границе участков n и $n+1$, согласно § 1 гл. 5, будут также соответствовать плотности $D_{n+1}=0,92$. Тогда по прил. I $v_{n+1}=9,08$ м/мин; $q_{n+1}=8,35$ м/мин:

$$Q_{n+1} = q_{n+1} \delta_{n+1} = 8,35 \cdot 1,5 = 12,53 \text{ м}^2/\text{мин},$$

т. е. меньше Q_n , что подтверждает образование скопления.

Однако плотность $D_{n+1}=0,92$ будет сохраняться лишь в самом начале участка $n+1$, а затем за счет разуплотнения приобретет величину $D_{n+1}=0,51$ и скорость движения $v_{n+1}=16,38$ м/мин.

При этом значение q_{n+1} останется без изменения, поскольку

$$q_{n+1} = 0,92 \cdot 9,08 = 8,35 \text{ м/мин}$$

$$Q_{n+1} = 0,51 \cdot 16,38 = 8,35 \text{ м/мин.}$$

Предположим, что вместо коридора поток попадает в проем (участок $n+1$; см. рис. 5.2,б) шириной 1,5 м. Параметры движения на участке n те же, т. е. $D_n=0,7$; $q_n=10,02$; $Q_n=30,06$ м²/мин.

Определим интенсивность движения в проеме:

$$q_{n+1} = \frac{q_n \delta_n}{\delta_{n+1}} = \frac{10,02 \cdot 3}{1,5} = 20 \text{ м/мин} > q_{\text{макс}} = 10,59 \text{ м/мин}$$

для проемов в нормальных условиях движения; $q_{\text{макс}}$ соответствует плотности $D=0,72$).

Следовательно, перед проемом (границей участка $n+1$) неизбежны скопления и задержка движения. Тогда параметры движения в проеме будут: $D_{n+1}=0,92$; $v_{n+1}=9,85$ м/мин; $q_{n+1}=9,06$ м/мин;

$$Q_{n+1} = q_{n+1} \delta_{n+1} = 9,06 \cdot 1,5 = 13,59 \text{ м}^2/\text{мин} < Q_n.$$

Ввиду того, что проем имеет ничтожно малую длину, растекание потока практически проявиться не может, и поток приобретет новые параметры, соответствующие участку $n+2$ шириной $\delta_{n+2}=3$ м:

$$q_{n+2} = \frac{q_{n+1} \delta_{n+1}}{\delta_{n+2}} = \frac{9,06 \cdot 1,5}{3} = 4,53 \text{ м/мин.}$$

По прил. I находим параметры движения на участке $n+2$:

$$D_{n+2} = 0,13; v_{n+2} = 35,32 \text{ м/мин}; Q_{n+2} = q_{n+2} \delta_{n+2} = 4,53 \cdot 3 = 13,59 = Q_{n+1}.$$

На основании рассмотренного примера можно сделать следующее заключение: растекание потока, как и его переформирование, проявляется только в тех случаях, когда участок, на границе которого образовалось

скопление людей, имеет некоторую протяженность. (не меньше длины шага); в проемах, где длина пути, как правило, мала, разуплотнение потока проявиться не может.

Как показано в примере, головная часть потока, падая из проема на участок $n+2$, приобретает новые параметры не за счет разуплотнения, а благодаря изменению ширины нового участка пути, т. е. δ_{n+2} .

Разуплотнение людских потоков после скопления будет иметь место всегда, если плотность в скоплении больше соответствующей q_{\max} . В аварийных же условиях разуплотнение наиболее вероятно, так как люди всемерно стремятся ускорить движение.

Пример. Определить в аварийных условиях параметры движения людского потока в коридоре (см. рис. 5.2) шириной $\delta_{n+1} = 1,5$ м, если $D_n = 0,7$ и $\delta_n = 3$ м (см. предыдущий пример).

Решение. Определяем по таблице прил. I (для аварийных условий) при $D = 0,7$; $q_n = 12,40$ м/мин;

$$Q_n = q_n \delta_n = 12,40 \cdot 3 = 37,2 \text{ м}^2/\text{мин.}$$

Интенсивность движения в коридоре (участок $n+1$):

$$q_{n+1} = \frac{q_n \delta_n}{\delta_{n+1}} = \frac{12,40 \cdot 3}{1,5} = 24,8 \text{ м/мин} > q_{\max} = 12,42 \text{ м/мин}$$

(для горизонтальных путей в аварийных условиях движения q_{\max} соответствует плотности $D = 0,72$). Следовательно, образуется скопление людей. Примем плотность в скоплении $D = 0,92$. Тогда по прил. I для аварийных условий $D_{n+1} = 0,92$; $D_{n+1} = 10,52$ м/мин; $q_{n+1} = 9,68$ м/мин;

$$Q_{n+1} = q_{n+1} \delta_{n+1} = 9,68 \cdot 1,5 = 14,52 \text{ м}^2/\text{мин.}$$

Интенсивности движения при $D = 0,92$ соответствует интенсивность движения при $D = 0,39$ (см. таблицу прил. I, аварийные условия). Следовательно, за счет разуплотнения поток на участке $n+1$ приобретает плотность $D_{n+1} = 0,39$ с тем же значением $q_{n+1} = 9,68$ м/мин.

При этом начнется растекание потока до параметров свободного поточного движения, т. е. $D_{n+1,2} = 0,15$ и $q_{n+1,2} = 7,11$ м/мин.

Определим скорость переформирования людского потока:

$$v' = \frac{q_{n+1,1} - q_{n+1,2}}{D_{n+1,1} - D_{n+1,2}} = \frac{9,68 - 7,11}{0,39 - 0,15} = 10,71 \text{ м/мин.}$$

Значит, на участке $n+1$ образуется в этом случае поток, состоящий из двух частей с плотностями 0,39 и 0,15 и скоростью перемещения границы между ними 10,71 м/мин.

Явление разуплотнения имеет важное теоретическое значение. Его можно рассматривать как частный случай переформирования при котором $v' = 0$, поскольку интен-

сивность движения не меняется, т. е. в выражении (4.13) $q_1 = q_2$:

$$v' = \frac{q_1 - q_2}{D_1 - D_2} = 0. \quad (5.5)$$

Иначе говоря, поток по ходу движения меняет скорость и плотность при одном и том же положении границы между частями потока с разными плотностями.

Явление разуплотнения объясняет многие факты, наблюдавшиеся при исследовании движения людских потоков. Например, можно полагать, что при беспрепятственном движении плотности, соответствующие величине $q_{\text{макс}}$ и выше, как правило, не возникают из-за неизбежного разуплотнения. Величина плотностей зависит от вида движения (аварийное, нормальное, комфортное) и психологического состояния массы людей, образующих скопление (чем меньше психологическая напряженность процесса, тем меньше плотность в скоплениях). Эти соображения в известной мере подтверждаются натурными наблюдениями, проведенными в разное время [6, 9, 10]. В частности, наибольшая вероятность плотностей в пределах 0,7—0,9 зафиксирована в дверях (см. рис. 3.11), т. е. в местах образования скопления людей. Как следует из рис. 3.11, 3.12 и 3.13, вероятность образования плотностей в указанных пределах существенно ниже, чем в других диапазонах. Достаточно отчетливо выражены точки резкого снижения вероятности появления указанных плотностей, примерно соответствующие максимальному значению интенсивности движения. Однако указанные закономерности, связанные с явлением разуплотнения, нуждаются в дальнейшем изучении.

§ 3. Процесс образования и рассасывания скоплений людей

Процесс образования и рассасывания скоплений людей перед границами смежных участков пути подчиняется определенным закономерностям.

Предположим, что по участку n движется людской поток с плотностью D_n (рис. 5.3,а). Для упрощения будем считать, что поток движется в нормальных условиях и растекания не происходит. Предположим также, что определенная по выражению (4.5) интенсивность движения q_{n+1} оказалась больше $q_{\text{макс}}$, что указывает

на неизбежность образования скопления, поскольку $Q_n > Q_{n+1}$.

Образование скопления начинается сразу, как только головная часть потока достигнет границы смежного участка $n+1$ (см. рис. 5.3,б), и на участке n (перед гра-

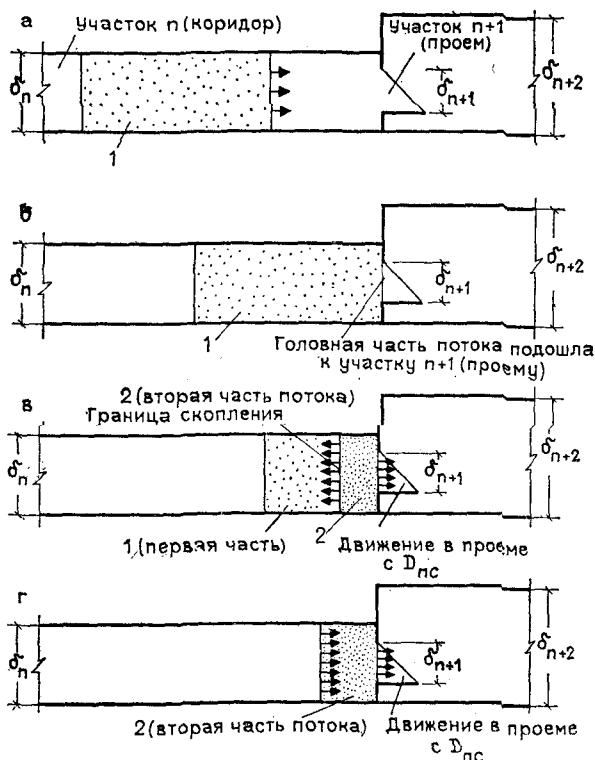


Рис. 5.3. Образование и рассасывание скопления перед границей смежных участков пути

1 — людской поток с D_n ; 2 — скопление с $D_{макс}$

ницей с участком $n+1$) образуется поток, состоящий как бы из двух частей: скопление людей с плотностью D_c за пределами плотности при $q_{макс}$ вплоть до $D_{ф.п}$ и подходящий поток с плотностью D_n . Последний постоянно пополняет скопление людей. Так как $Q_n > Q_{n+1}$, граница скопления передвигается в направлении, обратном направлению движения потока, с некоторой ско-

ростью v'_c (см. рис. 5.3,в). Когда последний человек из части потока с плотностью D_n достигнет границы скопления, т. е. эта часть потока исчезнет, скопление перестанет увеличиваться и начнется процесс рассасывания (см. рис. 5.3,г), т. е. движения части потока с плотностью D_c к участку $n+1$ (к проему).

Образование скопления можно рассматривать как частный случай переформирования людского потока при $v_1 < v_2$ (см. § 4 гл. 4). Тогда, пользуясь выражением (4.13), можно написать

$$v'_c = \frac{q_c - q_n}{D_c - D_n}, \quad (5.6)$$

где v'_c — скорость образования скопления, или скорость движения границы между скоплением и подходящим к нему людским потоком, м/мин; q_c и D_c — соответственно интенсивность движения, м/мин, и плотность в скоплении, м²/м²; q_n и D_n — соответственно интенсивность движения, м/мин, и плотность людского потока, подходящего к скоплению по участку n , м²/м².

Так как скопление образовалось из-за недостаточной пропускной способности участка $n+1$ (проема) по сравнению с пропускной способностью предыдущего участка n (коридора), то правомерно считать, что параметры движения в скоплении будут определяться пропускной способностью участка $n+1$, т. е. $Q_{n+1} = q_{n+1} \delta_{n+1}$. Тогда, используя выражение (4.3), запишем:

$$\left. \begin{aligned} q_c \delta_n &= q_{n+1} \delta_{n+1}; \\ q_c &= q_{n+1} \frac{\delta_{n+1}}{\delta_n} \end{aligned} \right\} \quad (5.7)$$

Подставив полученное значение в выражение (5.6) и считая $D_c = D_{n+1}$ (согласно § 1 гл. 5), получим

$$v'_c = \frac{q_{n+1} \frac{\delta_{n+1}}{\delta_n} - q_n}{D_{n+1} - D_n}. \quad (5.8)$$

Скорость образования скопления v'_c , м/мин, имеет отрицательное значение, поскольку очевидно, что $q_{n+1} \frac{\delta_{n+1}}{\delta_n} < q_n$.

Скорость рассасывания скопления можно определить из выражения (5.7), записав его в следующем виде:

$$v_c D_c = v_{n+1} \frac{\delta_{n+1}}{\delta_n} \cdot D_{n+1}.$$

Поскольку $D_c = D_{n+1}$,

$$\text{то } v_c = v_{n+1} \frac{\delta_{n+1}}{\delta_n}. \quad (5.9)$$

Образование скопления людей перед границей смежного участка пути всегда сопровождается задержкой движения (см. § 1 гл. 5). Время задержки τ , мин, представляет собой разность между временем прохождения потока через сечения смежных участков пути и составляет:

$$\begin{aligned} \tau &= t_{n+1} - t_n = \frac{N}{Q_{n+1}} - \frac{N}{Q_n} = \\ &= N \left(\frac{1}{Q_{n+1}} - \frac{1}{Q_n} \right). \end{aligned} \quad (5.10)$$

Таким образом, при образовании скоплений людей и задержек движения потока по участкам коммуникационного пути общая длительность движения складывается из времени, мин, затрачиваемого на собственно движение по участкам пути Σt , и на задержки $\Sigma \tau$, т. е.

$$t = \Sigma t + \Sigma \tau. \quad (5.11)$$

Если $Q_n = Q_{n+1}$, т. е. пропускные способности смежных участков пути равны (число людей, подходящих в единицу времени к границе с участком $n+1$, равно числу людей, уходящих за то же время от границы на участок $n+1$, т. е. в нашем случае через проем), то $\tau = 0$, т. е. скопления людей и задержки движения не будет.

Пример. Определить время движения людского потока в аварийных условиях на пути, состоящем из двух коридоров длиной $L_n = L_{n+2} = 20$ м, шириной $\delta_n = \delta_{n+2} = 2$ м, разделенных посередине проемом шириной $\delta_{n+1} = 1$ м (рис. 5.4). Поток плотностью $D = 0,5$ состоит из 100 взрослых в уличной одежде, т. е.

$$N = 100 f = 100 \cdot 0,125 = 12,5 \text{ м}^2.$$

Поскольку движение происходит в аварийных условиях, следует учесть растекание потока.

Поток занимает в начале участка n длину, равную

$$l = \frac{N}{\delta_n D} = \frac{12,5}{2 \cdot 0,5} = 12,5 \text{ м}.$$

В момент начала движения за счет растекания поток сразу разделяется на две части:

первая — $D_{n_1} = 0,05$; $v_{n_1} = 69,46$ м/мин; $q_{n_1} = 3,47$ м/мин;

вторая — $D_{n_2} = 0,5$; $v_{n_2} = 21,62$ м/мин; $q_{n_2} = 10,81$ м/мин (скорости и интенсивности движения определяются по прил. I).

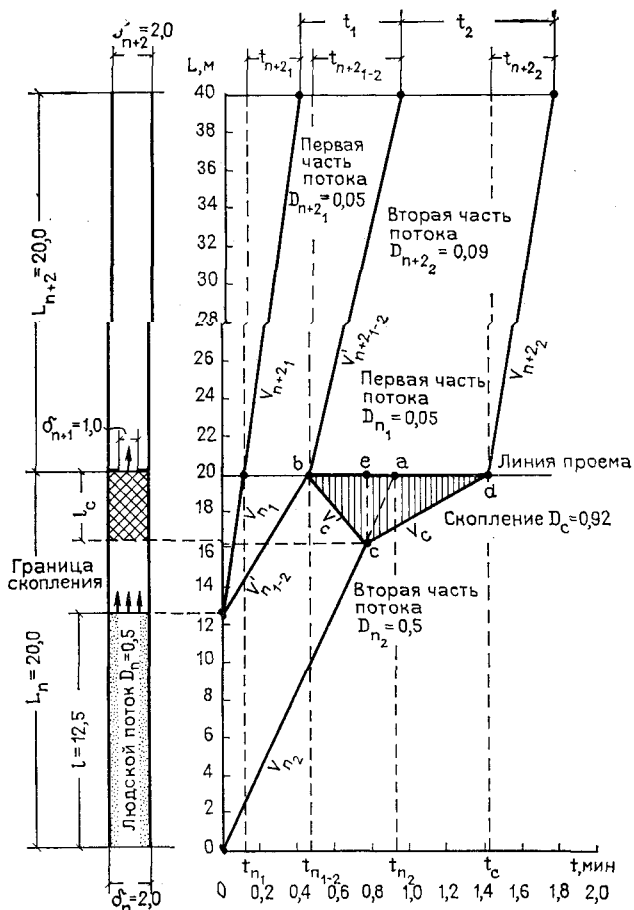


Рис. 5.4. Расчетный график образования скопления людей с учетом растекания и переформирования людского потока

Согласно выражению (4.13), скорость переформирования потока между первой и второй частями составит:

$$v'_{n1-2} = \frac{q_{n1} - q_{n2}}{D_{n1} - D_{n2}} = \frac{3,47 - 10,81}{0,05 - 0,5} = 16,35 \text{ м/мин.}$$

Первая часть потока ($D_{n1} = 0,05$) подойдет к проему за время

$$t_{n1} = \frac{L_n - l}{v_{n1}} = \frac{20 - 12,5}{69,46} = 0,11 \text{ мин.}$$

Вторая часть потока ($D_{n_2} = 0,5$) подойдет к проему за время

$$t_{n_1-2} = \frac{L_n - l}{v'_{n_1-2}} = \frac{20 - 12,5}{16,35} = 0,46 \text{ мин.}$$

Время переформирования на участке n (при отсутствии скопления людей перед проемом) составит

$$t_{n_2} = \frac{L_n}{v_{n_2}} = \frac{20}{21,62} = 0,92 \text{ мин.}$$

Полученные результаты нанесем на график (рис. 5.5).

Определим параметры движения в проеме по формуле (5.3).

Для первой части потока ($D_{n_1} = 0,05$):

$$q_{n+1_1} = \frac{q_{n1} \delta_n}{\delta_{n+1}} = \frac{3,47 \cdot 2}{1} = 6,94 \text{ м/мин} < q_{n+1_{\text{макс}}} = \\ = 13,27 \text{ м/мин}$$

(см. прил. I: $q_{n+1_{\text{макс}}} = 13,27$ м/мин соответствует плотности 0,64 в проеме при аварийном движении).

Следовательно, при прохождении через проем первой части потока скопления людей не образуется, а параметры движения при $q_{n+1} = 6,94$ м/мин по прил. I составят $D_{n+1} = 0,1$; $v_{n+1} = 70,29$ м/мин.

Для второй части потока ($D_{n_2} = 0,5$):

$$q_{n+1_2} = \frac{q_{n_2} \delta_n}{\delta_{n+1}} = \frac{10,81 \cdot 2}{2} = 10,81 \text{ м/мин} > q_{n+1_{\text{макс}}}$$

Таким образом, перед проемом образуется скопление людей плотностью D_c . Примем, что $D_c = 0,92$. Параметры движения потока в проеме, который представляет собой границу между участками n и $n+1$, будут: $D_{n+1_2} = 0,92$; $v_{n+1_2} = 11,42$ м/мин; $q_{n+1_2} = 10,50$ м/мин. Скорость образования скопления людей, согласно выражению (5.8):

$$v'_c = \frac{q_{n+1_2} \frac{\delta_{n+1}}{\delta_n} - q_{n_2}}{D_{n+1_2} - D_{n_2}} = \frac{10,50 \frac{1}{2} - 10,81}{0,92 - 0,50} = \\ = -13,24 \text{ м/мин.}$$

На графике проводим прямую из точки b до пересечения с прямой oa в точке c . В этот момент образование скопления людей прекращается и начинается процесс рассасывания потока со скоростью, определяемой по формуле (5.9):

$$v_c = v_{n+1_2} \frac{\delta_{n+1}}{\delta_n} = 11,42 \frac{1}{2} = 5,71 \text{ м/мин.}$$

Из точки c проводим прямую до пересечения в точке d с горизонталью, определяющей на графике положение проема. Из графика следует, что поток покинет участок в момент t_0 , т. е. через 1,42 мин

После начала движения. Штриховкой на графике показано скопление людей. Точка c определяет наибольшую величину скопления l_c , которое распространяется почти на 4 м по участку от проема.

Определим параметры движения на участке $n+2$ для первой части потока

$$q_{n+2_1} = \frac{q_{n+1_1} \delta_{n+1}}{\delta_{n+2}} = \frac{6,94 \cdot 1}{2} = 3,47 \text{ м/мин},$$

е. параметры движения такие же, как и на участке n , поскольку ширина пути и ширина обоих участков одинаковы, а движение через проем происходило беспрепятственно:

$$D_{n+2_1} = 0,05; v_{n+2_1} = 69,46 \text{ м/мин};$$

для второй части потока

$$q_{n+2_2} = \frac{q_{n+1_2} \delta_{n+1}}{\delta_{n+2}} = \frac{10,50 \cdot 1}{2} = 5,25 \text{ м/мин};$$

по прил. I $D_{n+2_2} = 0,09; v_{n+2_2} = 59,37 \text{ м/мин}$. На участке $n+2$ между первой и второй частями людского потока будет происходить его перестроение со скоростью

$$v_{n+2_{1-2}} = \frac{q_{n+2_1} - q_{n+2_2}}{D_{n+2_1} - D_{n+2_2}} = \frac{3,47 - 5,25}{0,05 - 0,09} = 44,5 \text{ м/мин}.$$

Время движения первой части потока по участку $n+2$:

$$t_{n+2_1} = \frac{L_{n+2}}{v_{n+2_1}} = \frac{20}{69,46} = 0,29 \text{ мин}.$$

Время движения головы второй части потока

$$t_{n+2_{1-2}} = \frac{L_{n+2}}{v_{n+2_{1-2}}} = \frac{20}{44,5} = 0,47 \text{ мин}.$$

Время движения замыкающей части потока

$$t_{n+2_2} = \frac{L_{n+2}}{v_{n+2_2}} = \frac{20}{59,37} = 0,34 \text{ мин}.$$

Искомое время движения $t_c + t_{n+2_2} = 1,42 + 0,34 = 1,76 \text{ мин}$.

Используя выражение (4.2) и данные графика (рис. 5.4), проверим полученное решение:

$$N = q_{n+2_1} \delta_{n+2} t_1 + q_{n+2_2} \delta_{n+2} t_2 = 3,47 \cdot 2 \cdot 0,53 + 5,25 \cdot 2 \cdot 0,82 = 12,5 \text{ м}^2.$$

Пример решен верно, так как количество вышедших людей равно заданному; значения t_1 и t_2 в примере определяются следующим путем:

$$t_1 = t_{n+2_1} + t_{n+2_{1-2}} - t_{n+2_2} - t_{n+2_1} = 0,46 + 0,47 - 0,11 - 0,29 = 0,53 \text{ мин};$$

$$t_2 = t_c + t_{n+2_2} - t_1 - t_{n_1} - t_{n+2_1} =$$

$$= 1,42 + 0,34 - 0,53 - 0,11 - 0,29 = 0,83 \text{ мин.}$$

Время задержки движения потока, возникшей из-за скопления людей перед проемом, определяется отрезком ad и составляет

$$\tau = t_c - t_{n_2} = 1,42 - 0,92 = 0,5 \text{ мин.}$$

Для аналитического определения времени задержки по формуле (5.10) предварительно определим количество людей во второй части потока: $N_2 = N - N_1$ м², где N_1 — количество людей в первой части потока, прошедших беспрепятственно через проем:

$$N_1 = q_{n+1_1} \delta_{n+1} (t_{n_1-2} - t_{n_1}) = 6,94 \cdot 1 (0,46 - 0,11) =$$

$$= 2,43 \text{ м}^2,$$

тогда $N_2 = 12,5 - 2,43 = 10,07 \text{ м}^2$.

По выражению (5.10) находим

$$\tau = N_2 \left(\frac{1}{q_{n+1_2} \delta_{n+1}} - \frac{1}{q_{n_2} \delta_n} \right) =$$

$$= 10,07 \left(\frac{1}{10,50 \cdot 1} - \frac{1}{10,81 \cdot 2} \right) = 0,5 \text{ мин.},$$

т. е. тот же результат, что и по графику на рис. 5.4.

Расстояние l_c , на которое распространяется скопление, с достаточной для практических целей точностью определяется по графику рис. 5.4.

Однако возможно и аналитическое определение величины l_c . Построим график образования и рассасывания скопления людей (рис. 5.5). Для упрощения чертежа растекание и переформирование на графике не учтено, т. е. головная и замыкающая части потока идут с одинаковой скоростью. Из графика следует:

$$v'_c = \frac{ce}{be}; \quad v_n = \frac{ce}{ae}.$$

Имея в виду, что $ce = l_c$; $ae = \frac{N}{Q_n} - be$, решаем уравнения и получим

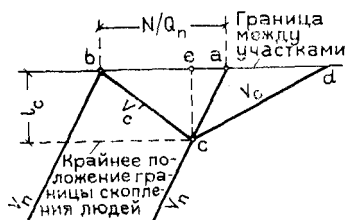


Рис. 5.5. Определение границы скопления людей

$$l_c = \frac{N}{Q_n} \frac{v_c v_n}{v_n + v'_c}. \quad (5.11)$$

Поскольку определяется абсолютная величина l_c , знак минус в значении v'_c учитывать не следует. Зная l_c , легко определить максимальное число людей в скоплении:

$$N_c = D_c \delta_n l_c. \quad (5.12)$$

Пример. Воспользуемся данными предыдущего примера и определим l_c и N_c :

$$l_c = \frac{N_2}{Q_{n_2}} \frac{v'_c v_{n_2}}{v_{n_2} + v'_c} = \frac{10,07}{21,62} \frac{13,24 \cdot 21,62}{21,62 + 13,24} = 3,82 \text{ м,}$$

а

$$N_c = D_c \delta_n l_c = 0,92 \cdot 2 \cdot 3,82 = 8,03 \text{ м}^2 \text{ или } \sim 56 \text{ чел.}$$

$$(\text{при } f = 0,125 \text{ м}^2).$$

В примере учтено количество людей второй части потока N_2 , поскольку первая проходит проем беспрепятственно.

Выше процесс образования и рассасывания скопления людей рассмотрен в ходе движения людского потока по различным участкам пути, имеющим различную пропускную способность. Такой характер процесса обычно наблюдается в действительности.

Вместе с тем можно предположить ситуацию, хотя и маловероятную, когда людской поток на участке n с момента начала движения имеет высокую плотность, равную плотности при скоплении D_c , а его головная часть находится у проема $n+1$. Иначе говоря, такой случай характерен для заключительной фазы процесса (см. рис. 5.3,з), например, когда людской поток, стремящийся покинуть помещение, оказался на некоторое время перед запертой дверью и приобрел плотность D_c .

Очевидно, скорость движения потока по участку n (v_c) определяется пропускной способностью последующего участка Q_{n+1} и может быть найдена с помощью выражения (5.9). Однако в этом случае пользоваться выражением (5.10) неправомерно, поскольку весь процесс идет с плотностями людского потока, характерными для скоплений, т. е. в режиме задержки. Поскольку на участках n и $n+1$ плотности потока соответствуют условиям скопления людей, т. е. $D_n = D_{n+1} = D_c$, то для увеличения скорости движения людского потока на

участке n до величины v_{n+1} , т. е. максимальной скорости, возможной при D_c , следует увеличить ширину участка $n+1$ до $\delta_{n+1} = \delta_n$.

§ 4. Особенности движения через проемы

Движение людского потока через проем, как и через любую резко сужающуюся часть пути, — довольно сложный процесс, знание которого имеет большое значение, поскольку с ним связано возникновение ситуаций, чреватых серьезными последствиями (от задержки движения до несчастных случаев с людьми). Известно, что движение через проем характеризуется параметрами, несколько отличающимися от параметров движения по горизонтальным путям (см. § 4—6 гл. 3 и прил. I).

Во время наблюдений отмечено, что, пока движущийся через проем людской поток имеет относительно невысокую плотность и соблюдается принцип $Q_n = Q_{n+1}$, процесс идет вполне планомерно. Но как только под влиянием каких-либо причин плотность потока в проеме и непосредственно перед ним приближается к значениям, характерным для скоплений, движение через проем становится затруднительным, его пропускная способность падает, условие $Q_n = Q_{n+1}$ нарушается и перед проемом скапливается плотная масса людей. В нормальных условиях движение через проем протекает без особых осложнений. В аварийной обстановке, когда под влиянием опасности люди стремятся скорее уйти от очага аварии, в зоне проема может возникнуть опасное положение, при котором движение через проем происходит неравномерно, с пониженной пропускной способностью, вплоть до образования так называемой пробки. Опасность состоит в том, что быстро ликвидировать пробку трудно, а иногда и невозможно. Опыт и статистика показывают, что в аварийных условиях несчастные случаи и гибель людей происходят главным образом в местах возникновения скоплений и пробок.

Закупорка происходит в том случае, когда в проеме люди образуют своего рода «арку», пята которой упираются в дверную коробку, причем выпуклость арки обращена в сторону, противоположную движению (рис. 5.6,а). Люди, ставшие звеньями такой арки, оказываются сильно сжатыми. В таких условиях человеку часто бывает трудно высвободиться, а в результате чрез-

Верного сжатия человеку могут быть нанесены серьезные повреждения. Положение людей в такой арке оказывается весьма различным, что способствует ее разрушению. Арка обычно разрушается сразу после возникновения; устойчивое ее положение — явление сравнительно редкое.

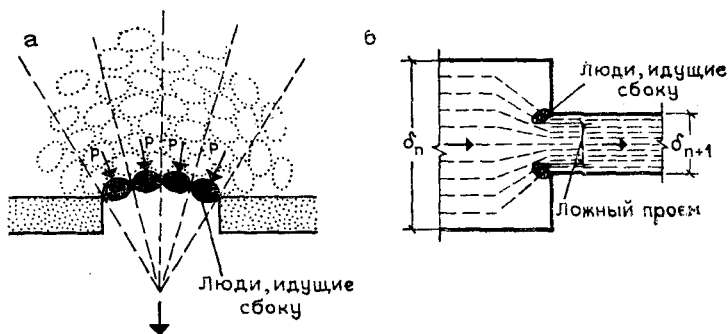


Рис. 5.6. Движение через проемы
 а — схема образования арки в проеме; б — эффект ложного проема

Существовали два мнения относительно возникновения «пробок» в проемах и образования «арок».

Одни полагали, что причиной появления арки и закупорки проема служит создание так называемого «ложного проема». Последний образуется людьми, подходящими к потоку с боков у самого входа в проем; вклинившись в него, они часто перегораживают проем, вследствие чего ширина его на некоторое время уменьшается. Это явление было названо «эффектом ложного проема» (рис. 5.6, б). После прохождения людей проем снова начинает пропускать поток на всю ширину, пока не образуется новый «ложный проем». Такие попеременно возникающие и исчезающие ложные проемы обуславливают пульсирующий характер процесса. Они и способствуют возникновению арки перед проемом, причем образующие ложный проем люди являются как бы ее основанием.

Другие полагали, что образование арки из людей перед входом потока в проем объясняется тем, что при подходе к проему люди вынуждены изменять направление движения от параллельного друг другу к радиальному в сторону центра проема. При этом поток силь-

но уплотняется. Если в этот момент люди случайно сгруппируются в виде непрерывной вогнутой цепочки, перекрывающей проем, то они окажутся заклиненными в ней и образуют таким образом арку.

Кроме того, в различных экспериментальных работах были замечены отклонения от средних значений пропускной способности проемов, особенно при высоких плотностях людского потока. С учетом необходимости разобраться в сущности процесса движения людских потоков через проемы и уточнить значения их пропускной способности при высоких плотностях, в МИСИ им В. В. Куйбышева и в Высшей школе МВД СССР были выполнены экспериментальные исследования [10], проведенные в натуральных условиях на естественных и искусственно созданных людских потоках. На основании этих экспериментов могут быть сделаны следующие заключения.

Во-первых, явления образования арки и ложного проема связаны между собой и проявляются одновременно. При высоких плотностях, особенно при аварийных обстоятельствах, люди в потоке стремятся занять большую площадь, т. е. создать для себя возможное в этих условиях более удобное положение, встать в зазор между впереди идущими и во всех случаях продвинуться как можно дальше вперед (к проему). При проходе через дверной проем люди стремятся избежать быть прижатыми к притолоке проема. Для этого люди, идущие с боков, отталкиваются руками от притолоки к центру проема. Они на короткое время уменьшают действительную ширину проема, создавая указанный выше «эффект ложного проема». Одновременно люди, идущие ближе к оси проема, оказываются в зазоре между людьми, идущими с боков, т. е. занимают всю ширину ложного проема, и при определенных условиях как бы заклинивают проем, образуя арку. В этих случаях движение на мгновение приостанавливается. Затем арка разрушается за счет прохода в проем одного из составляющих ее людей, и движение возобновляется до образования новой арки. Поэтому движение через проемы часто приобретает пульсирующий характер, отчетливо фиксированный при наблюдениях.

Во-вторых, эффект ложного проема и образования арки зависит от ширины проема. Чем уже проем, тем сильнее сказывается эффект ложного проема, тем ве-

оятнее образование арок и тем отчетливее движение приобретает пульсирующий характер.

Наконец, в-третьих, явления образования ложного роема и арок при движении через проемы возникают главным образом при плотностях, характерных для скоплений, т. е. больше плотности при $q_{\text{макс}}$, и могут существенно снижать пропускную способность проемов (от 5 до 35%) по сравнению с пропускной способностью горизонтальных путей.

Следовательно, при расчете путей движения в аварийных условиях целесообразно учитывать влияние эффекта ложного проема и образования арок, принимая несколько пониженные значения интенсивности движения при образовании скоплений перед проемами в зависимости от ширины последних с помощью коэффициента ложного проема $k_0 < 1$. По экспериментальным данным [10, 21], при проемах шириной $\delta \geq 1,6$ м эффект ложного проема практически не сказывается, а арки не образуются, т. е. при проемах шириной от 1,6 м и выше значение k_0 следует принимать равным 1. Значения k_0 при ширине проемов меньше 1,6 м приведены ниже:

Ширина проема мм,	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
k_0	0,75	0,78	0,81	0,84	0,88	0,91	0,94	0,97	1,00

Эти данные получены в результате эксперимента в специальном манеже с искусственно созданными потоками (рис. 5.7).

Следует отметить, что наблюдения на реальных людских потоках в условиях, близких к аварийным, в качественном отношении дали аналогичные результаты, но значения коэффициентов k_0 оказались примерно на 7% ниже экспериментальных. Учитывая несущественную разницу и известный запас, заложенный в значении q , для проемов можно рекомендовать приведенные значения k_0 .

Пример. Воспользуемся данными примера § 3 гл. 5 и учтем влияние ширины проема. Поскольку $\delta_{n+1} = 1,0$, значение k_0 согласно вышеприведенным данным составит 0,81.

Скорость образования скопления по (5.8):

$$v'_c = \frac{k_0 q_{n+12} \frac{\delta_{n+1}}{\delta_n} - q_{n2}}{D_{n+12} - D_{n2}} = \frac{0,81 \cdot 10,5 \frac{1}{2} - 10,81}{0,92 - 0,50} = -15,62 \text{ м/мин.}$$

По сравнению с предыдущим примером скорость образования скопления возросла, поскольку уменьшилась интенсивность движения в проеме.

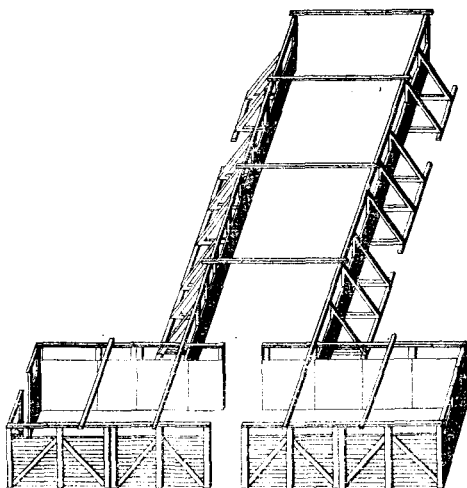


Рис. 5.7. Стенд для исследования пропускной способности проемов

Скорость рассасывания скопления по формуле (5.9):

$$v_c = k_0 v_{n+12} \frac{\delta_{n+1}}{\delta_n} = 0,81 \cdot 11,42 \frac{1}{2} = 4,63 \text{ м/мин}$$

по этой же причине соответственно уменьшилась, а время задержки по выражению (5.10) соответственно возросло:

$$\tau = N_2 \left(\frac{1}{k_0 q_{n+12} \delta_{n+1}} - \frac{1}{q_{n2} \delta_n} \right) = 10,07 \left(\frac{1}{0,81 \cdot 10,5 \cdot 1} - \frac{1}{10,81 \cdot 2} \right) = 0,75 \text{ мин.}$$

При определении параметров движения на участке $n+2$ (для второй части потока) также следует учитывать коэффициент ложного проема, т. е.

$$q_{n+22} = \frac{k_0 q_{n+12} \delta_{n+1}}{\delta_{n+2}} = \frac{0,81 \cdot 10,50 \cdot 1}{2} = 4,25 \text{ м/мин.}$$

По прил. 1 (по интерполяции): $\bar{D}_{n+2} = 0,065$; $v_{n+2} = 65,46$ м/мин.

За счет увеличения времени задержки вторая часть потока на участке $n+2$ приобретает еще меньшую плотность и соответственно большую скорость.

Повторим те же расчеты, но предположим, что процесс должен протекать остро, в результате чего плотность в скоплении можно ожидать близкую к $D_{ф.н}$ вместо $D=0,92$. Тогда в проеме

$q_{n+1} = 8,50$ м/мин при $D_{n+1} = 1,15$ и $k_0 = 0,81$:

$$v_c = \frac{k_0 q_{n+1} \frac{\delta_{n+1}}{\delta_n} - q_{n2}}{D_{n+1} - D_{n2}} =$$

$$= \frac{0,81 \cdot 8,50 \frac{1}{2} - 10,81}{1,15 - 0,50} = -11,34 \text{ м/мин.}$$

Интересно отметить, что скорость образования скопления уменьшилась за счет повышения его плотности, т. е. вместо $D_c = 0,92$ принята плотность $D_c = D_{н.ф} = 1,15$.

Имея в виду, что $q = Dv$ [см. выражение (3.13)], можно написать

$$v_c = \frac{k_0 q_{n+1} \delta_{n+1}}{D_{n+1} \delta_n}, \quad (5.13)$$

или для рассматриваемого примера:

$$v_c = \frac{k_0 q_{n+1} \delta_{n+1}}{D_{n+1} \delta_n} = \frac{0,81 \cdot 8,50 \cdot 1}{1,15 \cdot 2} = 2,99 \text{ м/мин;}$$

$$\tau = N_2 \left(\frac{1}{k_0 q_{n+1} \delta_{n+1}} - \frac{1}{q_{n2} \delta_n} \right) =$$

$$= 10,07 \left(\frac{1}{0,81 \cdot 8,50 \cdot 1} - \frac{1}{10,81 \cdot 2} \right) \approx 1 \text{ мин;}$$

$$q_{n+2} = \frac{k_0 q_{n+1} \delta_{n+1}}{\delta_{n+2}} = \frac{0,81 \cdot 8,50 \cdot 1}{2} = 3,44 \text{ м/мин,}$$

по прил. 1: $D_{n+2} = 0,05$; $v_{n+2} = 69,46$ м/мин.

Сравнивая результаты расчета при $D_c = 0,92$ и $k_0 = 1$ (см. § 3 гл. 5), при $D_c = 0,92$ и $k_0 = 0,81$ и при $D_c = 1,15$ и $k_0 = 0,81$, можно отметить, что учет коэффициента ложного проема и плотности в скоплениях, близких к $D_{ф.н}$, существенно увеличивает время задержки движения при $Q_n > Q_{n+1}$ и соответственно понижает эффек-

тивность использования последующих участков пути. В связи с этим большое значение имеет организация беспрепятственного движения.

§ 5. Условия беспрепятственного движения

Выше было установлено (см. § 2 гл. IV), что для беспрепятственного перехода через границу смежных участков пропускные способности их должны быть одинаковыми, т. е.

$$Q_n = Q_{n+1}.$$

Если окажется, что это равенство нарушено, т. е. $Q_n > Q_{n+1}$, то на границе и на участке n перед ней образуются скопление людей и, следовательно, задержка движения. В этом случае, если необходимо обеспечить беспрепятственное движение, ширину последующего участка пути δ_{n+1} следует увеличить

Пользуясь выражением (4.4), можно написать

$$\delta_{n+1} = \frac{q_n \delta_n}{q_{n+1}}.$$

Очевидно, чтобы обеспечить беспрепятственное движение людского потока и минимально необходимую ширину последующего участка, интенсивность движения на нем следует принять наибольшую, т. е. q_{n+1} должно быть равно $q_{\text{макс}}$ для того вида пути, к которому относится участок $n+1$. Тогда требуемая ширина участка, м, составит

$$\delta_{n+1}^{\text{треб}} = \frac{q_n \delta_n}{q_{\text{макс}}}. \quad (5.14)$$

Пример. Предположим, что поток плотностью $D_n = 0,5$ движется по коридору шириной $\delta_n = 2$ м. Тогда $v_n = 16,5$ м/мин; $q_n = 8,25$ м/мин; $Q_n = 16,5$ м²/мин. Коридор пересекается проемом $\delta_{n+1} = 1$ м. Параметры движения в проеме:

$$q_{n+1} = \frac{q_n \delta_n}{\delta_{n+1}} = 8,25 \frac{2}{1} = 16,5 \text{ м/мин} > q_{\text{макс}} = 10,59 \text{ м/мин},$$

следовательно, образуются скопление людей и задержка движения. Для беспрепятственного движения проем необходимо расширить до величины

$$\delta_{n+1}^{\text{треб}} = \frac{q_n \delta_n}{q_{\text{макс}}} = \frac{8,25 \cdot 2}{10,59} = 1,56 \text{ м};$$

где $q_{\text{макс}} = 10,59$ м/мин — для проемов при нормальных условиях движения; если ширину проема увеличить до $\delta_{n+1} = 1,6$ м, то

$$q_{n+1} = q_n \frac{\delta_n}{\delta_{n+1}} = 8,25 \frac{2}{1,6} = 10,3 \text{ м/мин} <$$

$$< q_{\text{макс}} = 10,59 \text{ м/мин},$$

и движение через проем будет проходить беспрепятственно.

Выражение (5.14) позволяет установить минимальную и, следовательно, экономически наиболее целесообразную ширину пути. Однако при этом должна быть известна пропускная способность предшествующего участка Q_n .

Если Q_n неизвестна, т. е. невозможно определить число людей в потоке (например, при проектировании пешеходных переходов под улицами), то ширину смежных участков пути (например, лестницы и тоннеля) можно определить, пользуясь соотношением максимальных значений интенсивности движения на этих путях.

На основании выражения (4.4) можно написать

$$\frac{\delta_{n+1}}{\delta_n} = \frac{q_{n \text{ макс}}}{q_{n+1 \text{ макс}}},$$

полагая $\delta_n = 1$;

$$\delta_{n+1} = \frac{q_{n \text{ макс}} \cdot 1}{q_{n+1 \text{ макс}}}. \quad (5.15)$$

В табл. 5.1 приведены относительные значения δ_{n+1} , обеспечивающие беспрепятственное движение в нормальных условиях при $\delta_n = 1$.

Из табл. 5.1 следует, что при переходе потока с горизонтального пути в проем ширина последнего может быть несколько меньше ширины горизонтального пути:

$$\delta_{n+1} = 0,96 \delta_n \text{ м};$$

при переходе с горизонтального пути на лестницу последняя должна быть шире, поскольку по лестницам, как правило, люди идут медленнее. Соотношениями, указанными в таблице для определения требуемой ширины пути, следует пользоваться только в особых случаях (когда невозможно установить характеристики людских потоков), поскольку экономически целесообразные решения, как указано выше, могут быть выбраны только на основании расчета по фактическому числу людей.

Пример. Требуется выбрать правильное соотношение ширины пешеходного тоннеля и лестниц (рис. 5.8).

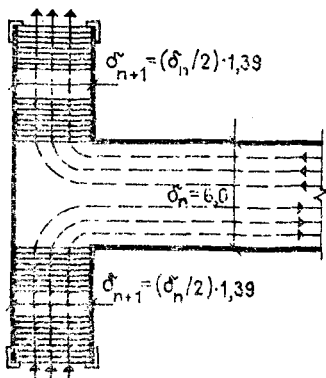


Рис. 5.8. Схема расчета пешеходного тоннеля и лестниц для беспрепятственного движения

Предположим, что ширина тоннеля 6 м, следовательно ширина лестниц не должна быть меньше $\delta_{n+1} = \delta_n \cdot 1,39 = 6 \cdot 1,39 = 8,35$ м (по табл. 5.1 принято значение $\delta_{n+1} = 1,39$, имея в виду подъем и спуск).

При таком соотношении δ_{n+1} и δ_n возможно скопление людей лишь перед входом в тоннель, но никогда не может образоваться

скопления внутри сооружения, что очень важно, поскольку в противном случае движение в тоннеле оказалось бы дезорганизованным со всеми возможными последствиями. Максимальная пропуск-

Таблица 5.1. Относительные значения ширины последующих участков пути, обеспечивающие беспрепятственное движение через границы смежных участков

При движении потока с участка n на участок $n+1$		δ_{n+1}	При движении потока с участка n на участок $n+1$		δ_{n+1}
n	$n+1$		n	$n+1$	
Горизонтальный путь	Горизонтальный путь	1	Лестница-спуск	Горизонтальный путь	0,74
То же	Проём	0,96	То же	Проём	0,71
»	Лестница-спуск	1,36	»	Лестница-спуск	1
»	Лестница-подъем	1,39			
Проём	Горизонтальный путь	1,04	Лестница-подъем	Горизонтальный путь	0,72
»	Лестница-спуск	1,42	То же	Проём	0,69
»	Лестница-подъем	1,45	»	Лестница-подъем	1

Примечание. Таблица составлена применительно к сочетаниям участков пути, изображенных на рис. 4.2.

ная способность такого тоннеля в нормальных условиях составляет

$$Q_n = q_{n \text{ макс}} \delta_n = 10,13 \cdot 6 = 60,78 \text{ м}^2/\text{мин},$$

или 3650 м²/ч (~29 200 чел./ч взрослых в уличной одежде; $f=0,125 \text{ м}^2$).

Максимальная пропускная способность лестниц при подъеме

$$Q_{n+1} = q_{n+1 \text{ макс}} \delta_{n+1} = 7,29 \cdot 8,35 = 60,78 \text{ м}^2/\text{мин},$$

т. е. выдерживается условие $Q_n = Q_{n+1}$.

§ 6. Образование скоплений при слиянии людских потоков

Как на границе смежных участков пути, так и в месте слияния нескольких потоков могут образоваться скопление людей и задержка движения, если нарушается равенство пропускных способностей (в м²/мин), т. е. когда

$$\Sigma Q_n > Q_{n+1},$$

или, м/мин:

$$q_{n+1} = \frac{\Sigma Q_n}{\delta_{n+1}} > q_{\text{макс}}.$$

Обычно в слиянии участвуют два или три потока, поскольку в зданиях, как правило, не применяются планировочные узлы с большим количеством соединяющихся в одном месте коммуникационных помещений.

Если имеется неравенство $\Sigma Q_n > Q_{n+1}$, то при слиянии потоков сразу возникает плотность, превышающая плотность при $q_{\text{макс}}$, т. е. $D=0,92$ и более (рис. 5.9), и начинается скопление людей на всех участках (n_1 , n_2 и n_3). Движение на участке $n+1$ будет происходить с интенсивностью, соответствующей плотности при скоплении D_c , но за счет разуплотнения потока плотность может приобрести второе, меньшее значение, отвечающее той же интенсивности движения.

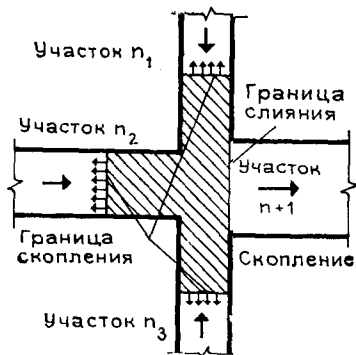


Рис. 5.9. Схема слияния потоков с образованием скопления людей

Потоки, следующие к месту слияния, в общем случае имеют разную пропускную способность из-за различной ширины путей и неодинаковой интенсивности движения. Кроме того, вследствие неравенства $\Sigma Q_n > Q_{n+1}$ не все люди, подходящие к месту слияния, одновременно участвуют в формировании объединенного потока, а только их некоторая часть; остальные же скапливаются в месте слияния.

Возникает вопрос: какова доля участия каждого из потоков в формировании объединенного потока?

Наблюдения показывают, что процесс слияния потоков с образованием скопления людей очень сложен, и устойчивая закономерность его обнаруживается не всегда. В одних случаях процесс протекает равномерно, и поток формируется за счет людей из всех сливающихся потоков; в других — преобладают люди из одного какого-нибудь потока, по-видимому, за счет их более активного поведения, хорошего физического состояния, молодого возраста и других причин; в третьих — один из участков у места слияния оказывается закупоренным, и люди на нем ждут возможности начать движение. Однако во всех случаях независимо от условий формирования характер движения на участке объединенного потока и его параметры практически остаются одинаковыми. Поэтому, а также на основании изучения результатов многих наблюдений за процессом слияния потоков оказалось возможным принять следующую расчетную гипотезу: в образовании объединенного потока и скопления в месте слияния участвуют люди из всех сливающихся потоков пропорционально величинам пропускной способности каждого из них.

Поскольку скопление людей происходит на всех участках пути, т. е. все потоки задерживаются в месте слияния, интенсивность их движения оказывается одинаковой, соответствующей плотности скопления D_c , а значения пропускных способностей определяются шириной участков. Следовательно, долю участия γ каждого из сливающихся потоков в образовании объединенного потока максимальной плотности и скопления людей можно принимать пропорционально ширине каждого участка:

$$\gamma_1 = \frac{\delta_{1n}}{\Sigma \delta_n}; \quad \gamma_2 = \frac{\delta_{2n}}{\Sigma \delta_n}; \quad \gamma_3 = \frac{\delta_{3n}}{\Sigma \delta_n} \text{ и т. д.} \quad (5.16)$$

и т. д.

Процесс слияния идет с участием всех потоков (в указанных долях участия) до того момента, когда какой-либо из потоков иссякнет, т. е. когда его замыкающая часть выйдет к месту слияния. С этого момента соответственно меняется доля участия потоков, продолжающих слияние, так как $\sum \delta_n$ становится меньше на ширину участка, поток которого закончил слияние. Процесс таким же образом продолжается до полного завершения.

Поясним сказанное на примере.

Пример. Определить время завершения процесса слияния двух потоков (рис. 5.10), состоящих из взрослых в домашней одежде ($f=0,1 \text{ м}^2$), при нормальных условиях движения. Параметры сливающихся потоков и путей их движения:

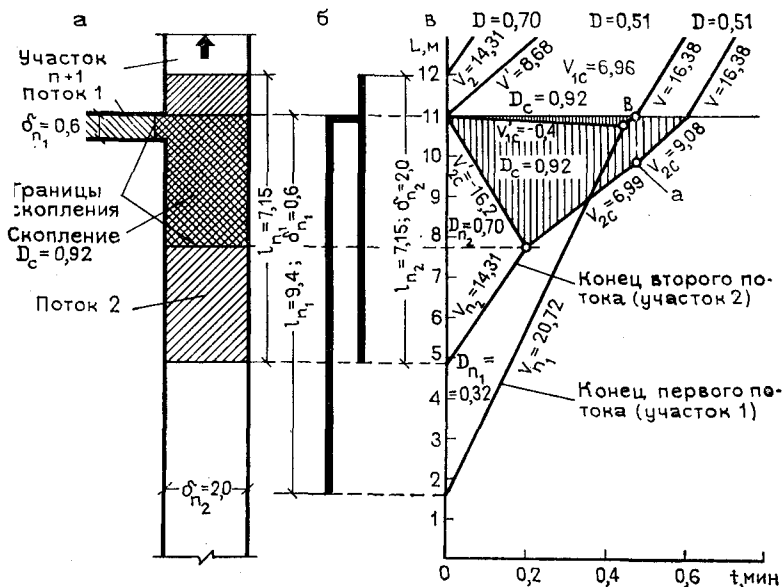


Рис. 5.10. Расчетный график образования и рассасывания скопления людей при слиянии двух потоков

а — план пути; б — схема пути; в — расчетный график

поток 1:

$N_{n_1} = 1,8 \text{ м}^2$ (18 чел.); $D_{n_1} = 0,32$; $v_{n_1} = 20,72 \text{ м/мин}$;

$q_{n_1} = 6,63 \text{ м/мин}$; $Q_{n_1} = 4 \text{ м}^2 \text{ мин}$; горизонтальный путь $\delta_{n_1} = 0,6 \text{ м}$;

поток 2:

$N_{n_2} = 10 \text{ м}^2$ (100 чел.); $D_{n_2} = 0,7$; $v_{n_2} = 14,31 \text{ м/мин}$;
 $q_{n_2} = 10,02 \text{ м/мин}$; $Q_{n_2} = 20,04 \text{ м}^2/\text{мин}$; горизонтальный путь $\delta_{n_2} = 2 \text{ м}$.

Решение. Определяем длины потоков:

$$l_{n_1} = \frac{N_{n_1}}{D_{n_1} \delta_{n_1}} = \frac{1,8}{0,32 \cdot 0,6} = 9,4 \text{ м};$$

$$l_{n_2} = \frac{N_{n_2}}{D_{n_2} \delta_{n_2}} = \frac{10}{0,7 \cdot 2} = 7,15 \text{ м}.$$

Головная часть потока 2 к моменту начала процесса миновала место слияния и продвинулась на 1 м (см. рис. 5.10).

Определяем параметры объединенного потока, воспользовавшись выражениями (4.9) и (5.3):

$$q_{n+1} = \frac{\Sigma Q}{\delta_{2n}} = \frac{24,04}{2} = 12,02 \text{ м/мин} > q_{\text{макс}} = 10,13.$$

Следовательно, слияние людских потоков сопровождается созданием высокой плотности и задержкой движения. Примем, что плотность в скоплении $D_c = 0,92$, тогда:

$$D_{n+1} = 0,92; v_{n+1} = 9,08 \text{ м/мин}; q_{n+1} = 8,35 \text{ м/мин}.$$

Дальнейшее движение объединенного потока будет происходить с разуплотнением, поскольку участок $n+1$ перед потоком свободен, т. е. при плотности $D_{n+1} = 0,51$ (интенсивность при $D = 0,51$ равна интенсивности при $D = 0,92$; см. прил. 1), $v_{n+1} = 16,38 \text{ м/мин}$; $Q_{n+1} = q \delta_{n_2} = 8,35 \cdot 2 = 16,7 \text{ м}^2/\text{мин}$.

Участие каждого потока в формировании объединенного составляет:

$$\gamma_{n_1} = \frac{\delta_{n_1}}{\Sigma \delta_n} = \frac{0,6}{2,6} = 0,23; \gamma_{n_2} = \frac{\delta_{n_2}}{\Sigma \delta_n} = \frac{2}{2,6} = 0,77.$$

Следовательно, люди из потока 1 займут 23% ширины объединенного, а люди из потока 2 — 77%, т. е.

$$\Delta \delta_{n_1} = \delta_{n_1} \gamma_{n_1} = 2 \cdot 0,23 = 0,46 \text{ м};$$

$$\Delta \delta_{n_2} = \delta_{n_2} \gamma_{n_2} = 2 \cdot 0,77 = 1,54 \text{ м}.$$

Поскольку процесс образования скопления не отличается от разобранный в § 1 гл. 5, то, пользуясь выражением (5.8), определим скорость образования скопления на обоих участках:

$$v'_{1c} = \frac{q_{n+1} \frac{\Delta \delta_{n_1}}{\delta_{n_1}} - q_{n_1}}{D_{n+1} - D_{n_1}} =$$

$$= \frac{8,35 \frac{0,46}{0,6} - 6,63}{0,92 - 0,32} = -0,4 \text{ м/мин};$$

$$v'_{2c} = \frac{q_{n+1} \frac{\Delta \delta_{n_2}}{\delta_{n_2}} - q_{n_2}}{D_{n+1} - D_{n_2}} = \frac{8,35 \frac{1,54}{2} - 10}{0,92 - 0,7} = -16,2 \text{ м/мин.}$$

Следует обратить внимание на соотношение $\frac{\Delta \delta n}{\delta n}$, в котором сохраняется та же закономерность, что и при скоплении людей перед проемом, но вместо ширины проема принимается часть ширины пути объединенного потока, приходящегося на долю сливающегося потока (рис. 5.11).

Строим расчетный график (см. рис. 5.10). Определим скорость рассасывания скоплений на обоих участках по выражению (5.9):

$$v_{1c} = v_{n+1} \frac{\Delta \delta_{n_1}}{\delta_n} = 9,08 \frac{0,46}{0,6} = 6,96 \text{ м/мин};$$

$$v_{2c} = v_{n+1} \frac{\Delta \delta_{n_2}}{\delta_n} = 9,08 \frac{1,54}{2} = 6,99 \text{ м/мин.}$$

Как видим, v_{1c} и v_{2c} оказываются практически равными.

В точке *в* (см. рис. 5.10) заканчивается слияние потока 1. Следовательно, с этого момента скопление на участке 2 будет рассасываться быстрее, так как в данном случае используется вся ширина участка, поэтому в точке *а* скорость рассасывания становится равной $v_{2c} = 9,08$, т. е. скорости движения при $D = 0,92$.

В верхней части графика показано движение головной части потока 2 ($v_2 = 14,31$ м/мин); скорость движения границы, разделяющей поток на части с плотностями 0,7 и 0,51, определяется по выражению (4.13):

$$v' = \frac{q_1 - q_2}{D_1 - D_2} = \frac{10 - 8,35}{0,7 - 0,51} = 8,68 \text{ м/мин.}$$

На этом же графике изображена линия движения замыкающих частей объединенного потока и потока 2 ($v_{n+1} = 16,38$ м/мин). Весь процесс, включая слияние и переход на участок $n+1$, завершается через 0,62 мин.

Проверяем полученное решение. Через границу участка $n+1$

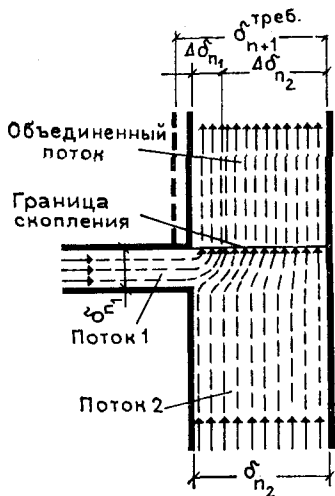


Рис. 5.11. Схема доли участка сливающихся потоков в формировании объединенного потока

должны пройти все люди обоих потоков, кроме тех, которые уже находились на участке $n+1$ из второго потока; их количество составляет

$$N'_{n_2} = L' D_{n_2} \delta_{n_2} = 1 \cdot 0,7 \cdot 2 = 1,4 \text{ м}^2.$$

Следовательно, через границу с момента слияния потоков за 0,64 мин должен пройти поток площадью: $N_{n_1} + N_{n_2} - N'_{n_2} = 1,8 + 10 - 1,4 = 10,4 \text{ м}^2$. Воспользовавшись выражением (4.2), получим

$$N = q_{n+1} \delta_{n_2} t = 8,35 \cdot 2 \cdot 0,62 = 10,4 \text{ м}^2.$$

Движение на участке $n+1$ (без учета растекания потока) будет происходить с параметрами, указанными на рис. 5.10.

Для беспрепятственного движения в тех случаях, когда при слиянии потоков образуется скопление людей, необходимо, чтобы пропускные способности сливающихся потоков и объединенного были одинаковыми:

$$\Sigma Q = Q_{n+1}.$$

Тогда, с учетом выражений (4.9) и (5.3), можно написать:

$$\delta_{n+1}^{\text{треб}} = \frac{\Sigma Q_n}{q_{\text{макс}}}. \quad (5.17)$$

Возвращаясь к предыдущему примеру, определим требуемую ширину пути для объединенного потока (после слияния):

$$\delta_{n+1}^{\text{треб}} = \frac{\Sigma Q_n}{q_{\text{макс}}} = \frac{Q_{n_1} + Q_{n_2}}{q_{\text{макс}}} = \frac{4 + 20,04}{10,13} = 2,37 \text{ м} \approx 2,4 \text{ м}.$$

Глава 6

ОСОБЫЕ СЛУЧАИ ДВИЖЕНИЯ ЛЮДСКИХ ПОТОКОВ

§ 1. Движение по путям с переменной шириной

Процесс движения людского потока по пути с переменной, постепенно убывающей шириной рассмотрим на примере, пользуясь установленными выше закономерностями.

Пример. Предположим, что горизонтальный путь шириной $\delta = 5 \text{ м}$ и длиной 3,6 м сужается до $\delta = 1,4 \text{ м}$ (рис. 6.1). По этому пути с его широкой стороны движется людской поток плотностью $D = 0,1$. Он состоит из 100 чел. в домашней одежде ($f = 0,1 \text{ м}^2$), т. е. $N = 10 \text{ м}^2$.

Решение. Чтобы проследить процесс движения, условно разделим путь по длине на несколько коротких участков, например на восемь по 0,45 м каждый. Условимся считать ширину каждого участка постоянной и примем ее по меньшему сечению (см. рис. 6.1,а). Предположим также, что движение происходит в нормальных условиях, а растекание потока для упрощения задачи не учитываем.

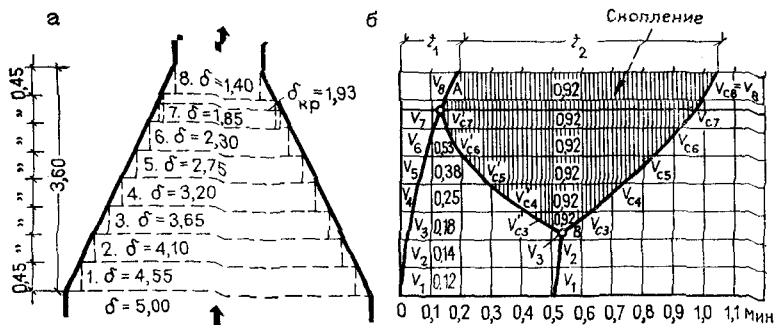


Рис. 6.1. Схема сужающегося пути (а) и расчетный график движения людского потока (б)

Определим параметры движения потока на участке с $\delta = 5$ м. Так как $D = 0,1$, по прил. I находим: $v = 39,27$ м/мин; $q = 3,93$ м/мин; $Q = q\delta = 3,93 \cdot 5 = 19,65$ м²/мин.

Из выражения (3.4,б) определим длину потока:

$$l = \frac{N}{\delta D} = \frac{10}{5 \cdot 0,1} = 20 \text{ м.}$$

Время подхода замыкающей части потока к границе участка I составит

$$t = \frac{l}{v} = \frac{20}{39,27} = 0,51 \text{ мин.}$$

Далее определим параметры движения на участке I шириной $\delta_1 = 4,55$ м:

$$q_1 \approx \frac{q\delta}{\delta_1} = \frac{3,93 \cdot 5}{4,55} = 4,31 \text{ м/мин;}$$

по прил. I определяем: $D_1 = 0,12$; $v_1 = 36,27$ м/мин; $Q_1 = 19,65$ м²/мин.

Таким же образом находим параметры движения на следующих участках:

$q_2 = 4,68$ м/мин; $D_2 = 0,14$; $v_2 = 34,13$ м/мин; $Q_2 = 19,65$ м²/мин;

$q_3 = 5,38$ м/мин; $D_3 = 0,18$; $v_3 = 29,30$ м/мин; $Q_3 = 19,65$ м²/мин;

$q_4 = 6,12$ м/мин; $D_4 = 0,25$; $v_4 = 24,38$ м/мин; $Q_4 = 19,65$ м²/мин;

$q_5 = 7,13$ м/мин; $D_5 = 0,38$; $v_5 = 18,69$ м/мин; $Q_5 = 19,65$ м²/мин;

$q_6 = 8,54$ м/мин; $D_6 = 0,53$; $v_6 = 16,17$ м/мин; $Q_6 = 19,65$ м²/мин;

Полученные данные нанесем на график (см. рис. 6.1,б).
 Определим интенсивность движения на участке 7:

$$q_7 = \frac{q \delta}{\delta_7} = \frac{19,65}{1,85} = 10,6 > q_{\max} = 10,13 \text{ м/мин};$$

следовательно, здесь возникнет скопление людей. Будем считать, что в условиях нормального движения людского потока плотность в скоплении составит $D_c = 0,92$. Определим «критическое» сечение пути, при котором достигается данное значение D_c . Для решения можно воспользоваться формулой (5.4):

$$\delta_{\text{кр}} = \frac{q \delta}{q_{\max}} = \frac{3,93 \cdot 5}{10,13} = 1,93 \text{ м.}$$

где $q_{\max} = 10,13$ м/мин для горизонтальных путей (см. прил. 1).

Принимая расчетную ширину первой части участка 7 равной $\delta_{\text{кр}}$, получим:

$$q_7 = 10,13 \text{ м/мин}; D_7 = 0,75; v_7 = 13,51 \text{ м/мин}; Q_7 = 19,65 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

Начиная с критического сечения на второй части участка 7 и на участке 8 (если не учитывать разуплотнение потока) движение будет происходить с параметрами:

$$q_7 = 8,35 \text{ м/мин}; D_7 = 0,92; v_7 = 9,08 \text{ м/мин};$$

$$Q_7 = q_7 \delta_7 = 8,35 \cdot 1,85 = 15,45 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$q_8 = 8,35 \text{ м/мин}; D_8 = 0,92; v_8 = 9,08 \text{ м/мин};$$

$$Q_8 = q_8 \delta_8 = 8,35 \cdot 1,4 = 11,7 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

В момент А (см. рис. 6.1) начнется скопление людей. Пользуясь выражением (5.8), определим скорость движения границы скопления на первой части участка 7:

$$v'_{c_7} = \frac{q_8 \frac{\delta_8}{\delta_7} - q_7}{D_8 - D_7} = \frac{8,35 \frac{1,4}{1,93} - 10,13}{0,92 - 0,75} = 24 \text{ м/мин}.$$

Граница скопления людей движется навстречу потоку, постепенно замедляя свою скорость по мере расширения пути.

Аналогичным образом определим

$$v'_{c_6} = \frac{q_8 \frac{\delta_8}{\delta_6} - q_6}{D_8 - D_6} = \frac{8,35 \frac{1,4}{2,3} - 8,54}{0,92 - 0,53} = -8,82 \text{ м/мин};$$

$$v'_{c_5} = \frac{q_8 \frac{\delta_8}{\delta_5} - q_5}{D_8 - D_5} = \frac{8,35 \frac{1,4}{2,75} - 7,13}{0,92 - 0,38} = -5,31 \text{ м/мин};$$

$$v'_{c_4} = \frac{q_8 \frac{\delta_8}{\delta_4} - q_4}{D_8 - D_4} = \frac{8,35 \frac{1,4}{3,2} - 6,12}{0,92 - 0,25} = -3,65 \text{ м/мин};$$

$$v_{c_3} = \frac{q_8 \frac{\delta_8}{\delta_3} - q_3}{D_8 - D_3} = \frac{8,35 \frac{1,4}{3,65} - 5,38}{0,92 - 0,18} = -2,93 \text{ м/мин.}$$

В точке В скопление прекращается, поскольку подход людей закончен, и начинается процесс рассасывания. Скорость рассасывания увеличивается по мере уменьшения ширины пути и, следовательно, уменьшения числа людей. Пользуясь выражением (5.9), получим:

$$v_{c_3} = v_8 \frac{\delta_8}{\delta_3} = 9,08 \frac{1,4}{3,65} = 3,48 \text{ м/мин;}$$

$$v_{c_4} = v_8 \frac{\delta_8}{\delta_4} = 9,08 \frac{1,4}{3,2} = 3,97 \text{ м/мин;}$$

$$v_{c_5} = v_8 \frac{\delta_8}{\delta_5} = 9,08 \frac{1,4}{3,75} = 4,62 \text{ м/мин;}$$

$$v_{c_6} = v_8 \frac{\delta_8}{\delta_6} = 9,08 \frac{1,4}{2,3} = 5,53 \text{ м/мин;}$$

$$v_{c_7} = v_7 \frac{\delta_8}{\delta_{кр}} = 9,08 \frac{1,4}{1,93} = 6,58 \text{ м/мин;}$$

$$v_{c_7} = v_8 \frac{\delta_8}{\delta_7} = 9,08 \frac{1,4}{1,85} = 6,87 \text{ м/мин;}$$

$$v_{c_8} = v_8 \frac{\delta_8}{\delta_8} = 9,08 \frac{1,4}{1,4} = 9,08 \text{ м/мин.}$$

По графику время выхода потока t_2 с участка составляет 0,85 мин; за это время при пропускной способности участка $Q_8 = 11 \text{ м}^2/\text{мин}$ выйдут люди в количестве

$$N = Q_8 t_2 = 11,7 \cdot 0,85 = 9,95 \text{ м}^2 \approx 10 \text{ м}^2.$$

Следовательно, графоаналитический расчет произведен верно.

Время начала выхода с участка головной части потока t_1 , мин, можно определить графически или по формуле

$$t_1 = \sum_1^n \frac{l}{v}.$$

Тогда общее время t , мин:

$$t = t_1 + t_2 = \sum_1^n \frac{l}{v} + \frac{N}{Q}, \quad (6.1)$$

где n — число расчетных участков.

Для того чтобы избежать скопления людей и задержки движения, ширина узкой части пути должна

быть не меньше $\delta_{кр} = 1,93$ м, при которой параметры движения потока соответствуют $q_{макс}$ для горизонтальных путей, т. е. для первой части участка 7. Тогда поток покинет рассматриваемый путь через

$$t'_2 \frac{N}{Q_7} = \frac{10}{19,65} = 0,51 \text{ мин};$$

причем t'_2 равно времени выхода на первый участок пути замыкающей части потока. Следовательно, при расширении части пути движение по нему будет происходить без задержки.

Подобным же образом решается задача и для пути с постепенно возрастающей шириной, когда поток входит в него с узкой стороны и выходит с широкой. В этом случае задача облегчается тем, что высокой плотности и скопления людей на таком участке возникнуть не может, так как плотность потока на ходу движения будет непрерывно уменьшаться, тогда как в первом случае она возрастала.

Процесс движения людского потока по такому пути также рассмотрим на примере.

Пример. Примем путь, аналогичный указанному в предыдущем примере, но с противоположной схемой движения. При этом сохраним его размеры, т. е. путь шириной $\delta = 1,4$ м и длиной 3,60 м расширяется до $\delta = 5$ м (рис. 6.2). По этому пути с его узкой стороны движется людской поток с плотностью $D = 0,75$. Поток состоит из 100 чел. в домашней одежде ($f = 0,1 \text{ м}^2$), т. е. $N = 10 \text{ м}^2$.

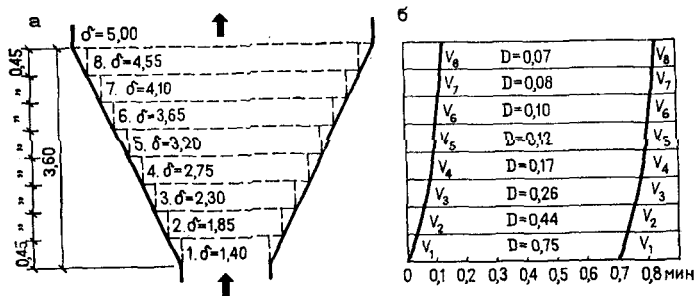


Рис. 6.2. Схема расширяющегося пути (а) и расчетный график движения людского потока (б)

Решение. Как в предыдущем примере, разделим путь на восемь участков по 0,45 м каждый. Ширину каждого примем постоянной по меньшему сечению (см. рис. 6.2,а). Будем считать, что движение происходит в нормальных условиях. Растекание не учитывается.

Параметры движения на участке $\delta_1 = 1,40$ м определяем по прил. I: $D_1 = 0,75$; $v_1 = 13,51$ м/мин; $q_1 = 10,13$ м²/мин; $Q_1 = 14,18$ м²/мин.

Длина потока

$$l = \frac{N}{\delta D} = \frac{10}{1,4 \cdot 0,75} = 9,52 \text{ м.}$$

Время выхода замыкающей части на участок 1:

$$t = \frac{l}{v_1} = \frac{9,52}{13,51} = 0,70 \text{ мин.}$$

Далее определяем параметры движения на участке 2 шириной $\delta_2 = 1,85$ м:

$$q_2 = \frac{q_1 \delta_1}{\delta_2} = \frac{10,13 \cdot 1,40}{1,85} = 7,67 \text{ м}^2/\text{мин.}$$

по прил. I $D_2 = 0,44$; $v_2 = 17,37$ м/мин; $Q_2 = 14,18$ м²/мин. Таким же путем находим параметры движения на следующих участках:

$q_3 = 6,17$ м/мин; $D_3 = 0,26$; $v_3 = 23,75$ м/мин; $Q_3 = 14,18$ м²/мин;
 $q_4 = 5,16$ м/мин; $D_4 = 0,17$; $v_4 = 30,87$ м/мин; $Q_4 = 14,18$ м²/мин;
 $q_5 = 4,43$ м/мин; $D_5 = 0,12$; $v_5 = 36,57$ м/мин; $Q_5 = 14,18$ м²/мин;
 $q_6 = 3,88$ м/мин; $D_6 = 0,10$; $v_6 = 39,27$ м/мин; $Q_6 = 14,18$ м²/мин;
 $q_7 = 3,46$ м/мин; $D_7 = 0,08$; $v_7 = 42,24$ м/мин; $Q_7 = 14,18$ м²/мин;
 $q_8 = 3,12$ м/мин; $D_8 = 0,07$; $v_8 = 43,81$ м/мин; $Q_8 = 14,18$ м²/мин.

По графику (см. рис. 6.2,б) время t_2 выхода людского потока с рассматриваемого пути составляет 0,70 мин, т. е. столько же, сколько затрачивается на выход потока на участок 1 ($\delta = 1,40$ м). Проверяем полученное решение:

$$N = Q_8 t_2 = 14,18 \cdot 0,7 = 9,93 \approx 10 \text{ м}^2.$$

Ошибка составляет 0,07 м² (< 1 чел.), что несущественно.

Пути движения людских потоков с переменной шириной, как правило, имеют небольшое распространение, так как не согласуются с планировочными принципами современных зданий. Однако такие пути целесообразны для искусственного формирования потока определенной ширины в нужном направлении (например, сужающиеся пути при входах на эскалаторы), для смягчения перехода людского потока с одного участка на другой с резко отличающейся шириной и т. п. Расширяющиеся пути целесообразны, например, в тех случаях, когда поток пополняется людьми по ходу своего движения (например, в проходах зрелищных помещений), поскольку процесс движения в них, как следует из примера, идет с постоянным снижением плотности потока. Наоборот, в сужающихся путях плотность потока постоянно возрастает

и может дойти до значений, соответствующих q_{\max} , и, следовательно, до образования скоплений и задержек движения, как это показано в первом примере.

Для расчета переменной ширины (в м) путей движения людского потока могут быть использованы выражения:

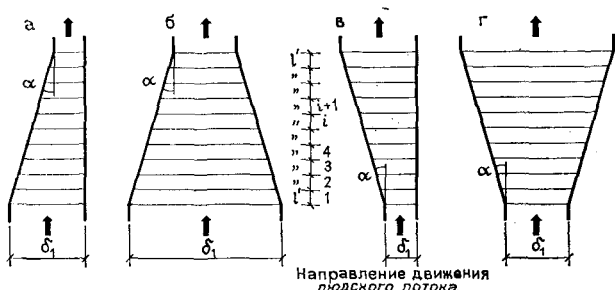


Рис. 6.3. Пути движения с переменной шириной

a — одностороннее сужение; *b* — двустороннее сужение; *v* — одностороннее расширение; *г* — двустороннее расширение

для путей сужающихся (рис. 6.3):

$$\text{с одной стороны} - \delta_i = \delta_1 - k(i-1)l'; \quad (6.2a)$$

$$\text{с двух сторон} - \delta_i = \delta_1 - 2k(i-1)l'; \quad (6.2б)$$

для путей расширяющихся:

$$\text{с одной стороны} - \delta_i = \delta_1 + k(i-1)l'; \quad (6.2в)$$

$$\text{с двух сторон} - \delta_i = \delta_2 + 2k(i-1)l', \quad (6.2г)$$

где i — порядковый номер участка пути; δ_i — ширина i -го участка, м; δ_1 — ширина участка 1 , м; k — угловой коэффициент, равный $\operatorname{tg} \alpha$; l' — длина участка, м.

Расчетную ширину участков можно назначать по наименьшему (как показано в примерах) или по среднему ее значению.

§ 2. Движение людских потоков на эскалаторах

Применение подъемного механического транспорта непрерывного действия — эскалаторов — в общественных зданиях и сооружениях обусловлено необходимостью повышения пропускной способности путей движения и создания удобств для людей.

Эскалаторы можно рассматривать как особые участки общего пути движения людских потоков. По произ-

водительности эскалаторы отечественного производства разделяются на два основных типа [4]:

с шириной ступени 1 м (2 чел. на ступень) и со скоростью движения лестничного полотна 0,75 м/с, или $v_0 = 45$ м/мин;

с шириной ступени 0,63 м (1 чел. на ступень) и со скоростью 0,5 м/с, или $v_0 = 30$ м/мин.

Теоретическая часовая максимальная производительность эскалатора Q_{τ}^* , пасс/ч, при заполнении всех ступеней и без учета движения людей по лестничному полотну составляет:

$$Q_{\tau} = 3600 \frac{1}{t_{ст}} n v, \quad (6.3)$$

где $\frac{1}{t_{ст}}$ — число ступеней на 1 пог. м лестничного полотна; $t_{ст}$ — ширина ступени, равная 0,4 м; n — число пассажиров на одной ступени; v — скорость движения лестничного полотна, м/с.

В выражении (6.3) не учтен ряд факторов, влияющих на производительность эскалатора: скорость посадки людей; влияние скорости движения полотна на посадку; наличие устройств, затрудняющих или облегчающих посадку. Эти факторы несколько уменьшают производительность эскалатора.

Тогда его расчетная производительность, чел/ч, составит

$$Q_p = 3600 \frac{1}{t_{ст}} n v \varphi, \quad (6.4)$$

где φ — коэффициент заполнения полотна, равный

$$\varphi = \frac{Q_p}{Q_{ст}} = \frac{Q_p}{3600 \frac{1}{t_{ст}} n v}. \quad (6.5)$$

Среднее значение коэффициента заполнения φ , полученное на основании опытных данных, принято равным 0,74. Тогда расчетная максимальная производительность эскалатора с шириной полотна 1 м по выражению (6.4) составит:

$$Q_p = 3600 \frac{1}{0,4} 2 \cdot 0,75 \cdot 0,74 = 10\,000 \text{ чел./ч.}$$

В дальнейшем перейдем на принятые в настоящей работе параметры и обозначения и будем иметь в виду эскалаторы с шириной полотна 1 м (рис. 6.4).

* Обозначения даны по [4].

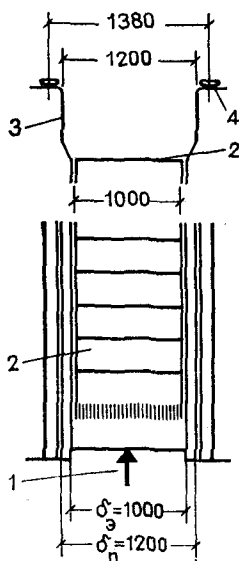


Рис. 6.4. Схема входа на эскалатор
1 — портал; 2 — ступени; 3 — балюстрада; 4 — поручень

В выражении (6.4) произведение $\frac{1}{t_{ст}} n v$ представляет расчетную плотность людского потока на эскалаторе, $м^2/м^2$, т. е.

$$D_э = \frac{1}{t_{ст}} n \varphi f, \quad (6.6)$$

где f — площадь горизонтальной проекции человека.

Пропускная способность эскалатора, $м^2/мин$:

$$Q_э = D_э v_э \delta_1. \quad (6.7)$$

Согласно [15], коэффициент заполнения полотна эскалатора рекомендуется принимать $\varphi = 0,675$.

Для определения пропускной способности эскалатора необходимо на участке пути, примыкающем к эскалатору, знать параметры движения людского потока и закономерности перехода его через границу между эскалатором и примыкающим к нему участком (в данном случае между полотном эскалатора и его порталом). Следует отметить, что закономерности перехода с неподвижного на подвижный путь, и наоборот, изучены

Таблица 6.1. Пропускная способность эскалатора (при $\delta_0 = 1$ м)

$f, м^2$	φ	$D_э$	$V_э, м/мин$	$Q_э макс, м^2/мин$	$Q_э макс, чел/ч$	$Q_{п макс}, м^2/мин$	
						при повышенной напряженности	нормальные условия
0,125	0,74	0,465	45	20,80	10 000	15,92	12,71
0,125	0,675	0,422	45	18,93	9 100	15,92	12,71
0,100	0,74	0,370	45	16,65	10 000	15,92	12,71
0,100	0,675	0,337	45	15,18	9 100	15,92	12,71

еще недостаточно, поэтому ниже следующие положения надо рассматривать как приближенные.

Определим расчетные плотности и пропускные способности эскалатора при разных значениях f и φ и сведем полученные данные в табл. 6.1.

Построим график пропускной способности эскалатора (рис. 6.5). Поскольку v_0 постоянна, пропускная способность эскалатора возрастает по линейному закону в зависимости от плотности. На этой прямой отмечены Q_0 для разных значений f и φ .

Определим пропускную способность портала, воспользовавшись выражением (3.14). Будем считать, что

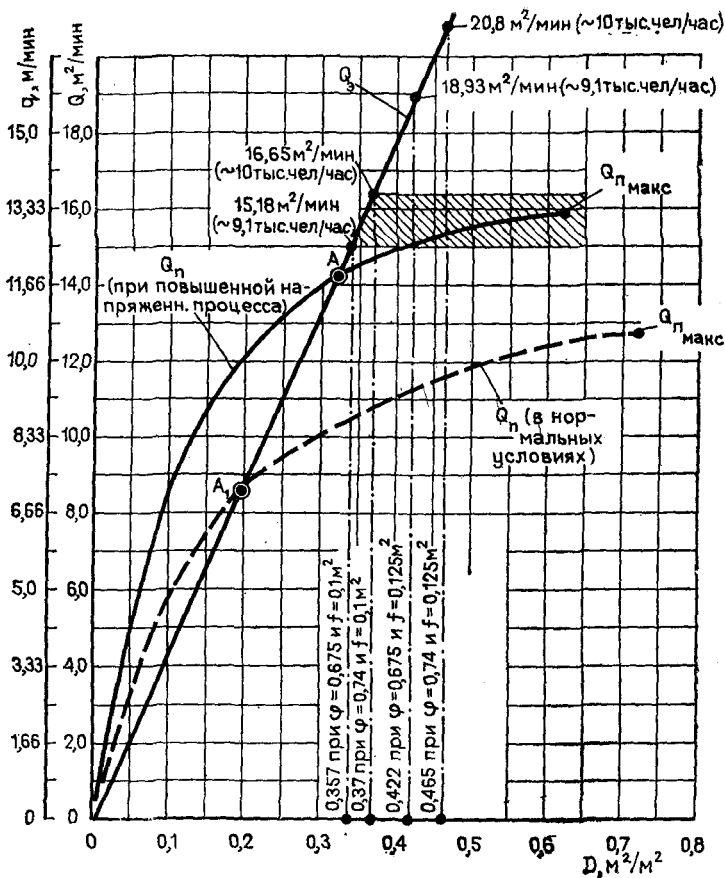


Рис. 6.5. Пропускная способность эскалатора

$d_{\text{п}} = 1,20$ м, так как люди в портале могут идти вплотную к ограждению, причем частично габариты человека выступают за пределы ширины портала (см. § 1 гл. 3). Интенсивность движения в портале примем как в проемах при повышенной напряженности процесса и в нормальных условиях (см. прил. I, графы 5 и 7). Внесем полученные значения $Q_{\text{п}}$ при $q_{\text{макс}}$ в табл. 6.1 и построим на графике кривые $Q_{\text{п}}$ (см. рис. 6.5). Ввиду того, что при натурных исследованиях [15] не фиксировалась одежда людей, установленное их количество переведено в площади горизонтальных проекций при $f = 0,125$ м² и $f = 0,10$ м² при соответственном изменении плотности. При этом число людей сохраняется неизменным.

Исходя из общего принципа (см. § 2 гл. 4) максимальная пропускная способность эскалатора $Q_{\text{э.макс}}$ должна быть равна максимальной пропускной способности портала $Q_{\text{п.макс}}$. Сравнивая значения $Q_{\text{э}}$ и $Q_{\text{п}}$, по данным таблицы и графиков можно отметить, что $Q_{\text{п.макс}}$ при повышенной напряженности процесса коррелирует со значениями $Q_{\text{э}}$ при $\varphi = 0,74$ и при $\varphi = 0,675$ и при $f = 0,10$ м² (см. заштрихованное поле рис. 6.5). При этом $D_{\text{э}} = 0,35 - 0,36$, а $\varphi = 0,70 - 0,71$.

Судя по данным обоих исследований [4,15], наблюдения за пропускной способностью эскалатора проводились в часы пик, т. е. при повышенной напряженности процесса (условия, близкие к аварийному движению) и в летнее время года, когда $f = 0,1$ м². Иначе говоря, указанная корреляция вполне правомерна. Величина $Q_{\text{п.макс}}$ при нормальных условиях дает плотность на полотне эскалатора 0,28 при $\varphi = 0,56$. Следовательно, эскалатор работает с недогрузкой.

На графике в точках A и A_1 кривые $Q_{\text{п}}$ пересекаются с прямой $Q_{\text{э}}$. Это значит, что при $Q_{\text{э}}$ от 0 до $\sim 8,7$ м²/мин (A_1) или до $\sim 14,2$ м²/мин (A) плотность на эскалаторе будет несколько выше, чем в портале, поскольку людской поток, переходя границу, движется со скоростями, близкими к скорости полотна эскалатора, или превышающими ее. Наблюдения за заполнением эскалатора подтверждают этот вывод. За пределами точек A плотность людского потока на полотне эскалатора будет меньше плотности в портале.

Таким образом, можно сделать вывод, что пропускная способность эскалатора определяется пропускной способностью портала, что также подтверждается отно-

сительно невысокими значениями коэффициента заполнения полотна эскалатора ($\varphi = 0,675-0,74$). Известно, что на некоторых станциях московского метрополитена в часы пик перед эскалаторами возникают скопление людей и задержка движения (рис. 6.6), в то время как по-

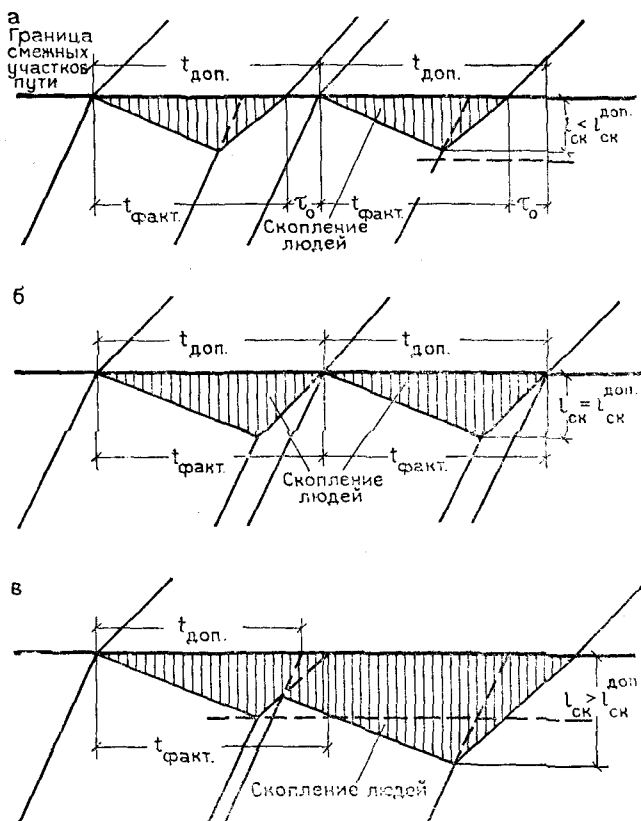


Рис. 6.6. Образование скоплений и задержек движения перед эскалаторами в метрополитене (по В. С. Гвоздякову)

a — в интервале времени между поездами скопление перед эскалатором полностью рассасывается (т. е. интервал больше времени задержки); *б* — интервал времени между поездами равен времени задержки перед эскалаторами; *в* — интервал времени между поездами меньше времени задержки

лотно эскалатора (2 чел. на ступень) полностью не заполняется. Более того, при усиленном движении поездов скопление людей перед эскалаторами в интервале между поездами не успевает ликвидироваться и начинает рас-

пространяться на значительные расстояния в центральном пролете станции (см. рис. 6.6, в). Таким образом, пути повышения производительности эскалаторов следует искать в изменении конструкции портала.

Вместе с тем φ может достигать значительно больших значений, чем указанные выше [4, 15]. Следовательно, и при существующей конструкции портала возможно повышение коэффициента заполнения φ . Не исключено, что закономерности перехода людского потока через границы смежных участков пути в данном случае другие, чем при неподвижных путях (см. § 2 гл. 4). По-видимому, сказывается «принудительное» увеличение скорости движения людского потока при переходе через границу смежных участков даже при высоких плотностях в портале ($D=0,92$) благодаря относительно большой скорости движения полотна эскалатора. Эскалатор постоянно и быстро как бы «отсасывает» людей; образующееся впереди свободное пространство позволяет людям при переходе через границу сделать широкий шаг, т. е. почти мгновенно повысить скорость движения потока, уравнив ее со скоростью полотна. Однако это предположение подлежит проверке. Вопрос о повышении коэффициента заполнения следует считать важным, поскольку его решение позволит увеличить производительность эскалатора на 25—33%.

Расчет движения людского потока по пути, одним из участков которого является эскалатор, поясняется на следующем примере.

Пример. Людской поток, состоящий из 1000 взрослых в зимней одежде ($f=0,125 \text{ м}^2$), движется по горизонтальному пути шириной $\delta_n=4 \text{ м}$ с плотностью $D_n=0,3$. Горизонтальный путь заканчивается эскалатором. Движение происходит при повышенной напряженности процесса (часы пик).

Решение. Количество людей в потоке составит $N=1000 \times 0,125=125 \text{ м}^2$. По таблице прил. I (горизонтальные пути при аварийном движении) находим для $D_n=0,3$: $v_n=29,87 \text{ м/мин}$; $q_n=8,96 \text{ м/мин}$; $Q_n=q_n \delta_n=8,96 \cdot 4=35,84 \text{ м}^2/\text{мин}$.

Интенсивность движения в портале эскалатора:

$$q_n = \frac{Q_n}{\delta_n} = \frac{35,84}{1,2} = 29,87 \text{ м/мин} > q_{\text{макс}} = 13,27 \text{ м/мин}.$$

Следовательно, перед эскалатором образуется скопление людей и происходит задержка движения.

Плотность в скоплении людей примем $D_n=0,92$; тогда: $v_n=12,42 \text{ м/мин}$; $q_n=10,50 \text{ м/мин}$; $Q_n=q_n \delta_n=10,50 \cdot 1,20=12,6 \text{ м}^2/\text{мин}$.

Время задержки движения по выражению (5.10) составит

$$\tau = N \left(\frac{1}{Q_{\Pi}} - \frac{1}{Q_{\Pi}} \right) = 125 \left(\frac{1}{12,6} - \frac{1}{35,84} \right) = 6,38 \text{ мин.}$$

Если предположить, что скорость в портале (на границе полотна эскалатора и портала) при плотности $D_{\Pi} = 0,92$ равна $v_{\Sigma} = 45$ м/мин, т. е. скорости движения полотна («отсасывание»), то:

$$q_{\Pi} = D_{\Pi} v_{\Sigma} = 0,92 \cdot 45 = 41,4 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$Q_{\Pi} = q_{\Pi} \delta_{\Pi} = 49,68 \text{ м}^2/\text{мин} > Q_{\Pi} = 35,84 \text{ м}^2/\text{мин},$$

т. е. задержки движения не произойдет.

Сравнивая оба результата, можно считать, что значение представляется преувеличенным, поскольку при высоких плотностях в портале, как показывают наблюдения, полотно заполняется лучше. При полученном расчетном значении Q_{Π} коэффициент заполнения полотна составит всего $\varphi = 0,56$ при $D_{\Sigma} = 0,28$.

В то же время будет наблюдаться задержка движения людей, так как при этом плотность потока на эскалаторе должна быть $D_{\Sigma} = 0,80$, т. е. более двух человек на ступень.

§ 3. Пересекающиеся людские потоки*

Наблюдениями установлено, что в некоторых коммуникационных помещениях (например, распределительные залы станций метрополитена, наземные и подземные вестибюли и т. д.) имеют место пересекающиеся людские потоки. Устранить их пересечение при проектировании не всегда удается, так как это обычно связано со значительными дополнительными капитальными вложениями. Проведение организационных мероприятий (если это возможно сделать) также зачастую не дает желаемых результатов так как устраненное в одном месте, пересечение возникает в другом.

Пересечения людских потоков возможны под различными углами: от 0 до 180° . Когда угол пересечения людских потоков равен 0 , их движение будет обычным односторонним поточным, при угле, равном 180° , наблюдается встречное движение людских потоков.

Пересекающиеся людские потоки возникают тогда, когда имеется несколько источников людских потоков и несколько мест их притяжения (рис. 6.7). При этом обя-

* Исследование пересекающихся людских потоков выполнено в МИСИ им. В. В. Куйбышева канд. техн. наук В. С. Гвоздяковым.

зательны следующие условия: число источников и мест притяжения должно быть больше двух (см. рис. 6.7, б); хотя бы два места притяжения должны находиться по одну сторону от прямой, проходящей через источники потоков (рис. 6.7, в); хотя бы одно из мест притяжения не находится на прямой, проходящей через другие и на отрезке прямой, заключенном между источниками (рис. 6.7, г).

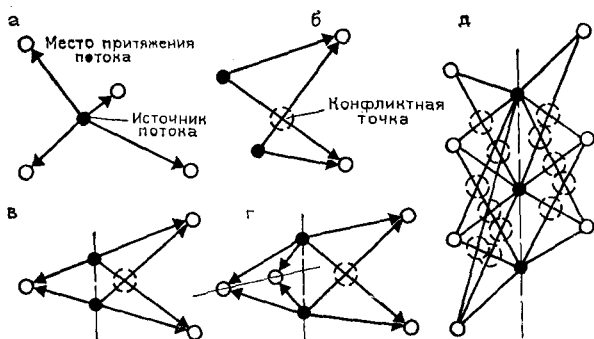


Рис. 6.7. Условия образования пересекающихся людских потоков
 а — пересечения потоков нет; б, в, г, д — пересекающиеся людские потоки

Увеличение числа источников или мест притяжения резко увеличивает количество пересечений людских потоков (рис. 6.7, д).

Натурные наблюдения пересекающихся людских потоков и обработка результатов методами математической статистики позволили установить связь между скоростью и плотностью пересекающихся потоков, а также параметры и качественную картину процесса движения. Между скоростью и плотностью пересекающихся людских потоков установлена зависимость:

$$v = -619 D^3 + 900 D^2 - 576 D + 154 \text{ м/мин.} \quad (6.8)$$

Графическая интерпретация этой зависимости представлена на рис. 6.8, а в сравнении с другими видами движения людских потоков. На рис. 6.8, б приведена зависимость интенсивности движения от плотности пересекающихся потоков.

Характерной особенностью движения пересекающихся людских потоков является то, что оно протекает при

малых плотностях. Установлено предельное значение плотности пересекающихся людских потоков $D_{н.п} = 0,357$.

Скорость движения пересекающихся людских потоков при плотностях от 0 до 0,3 оказывается выше скорости движения в нормальных условиях и близка к скорости потока в условиях, близких к аварийным, и к

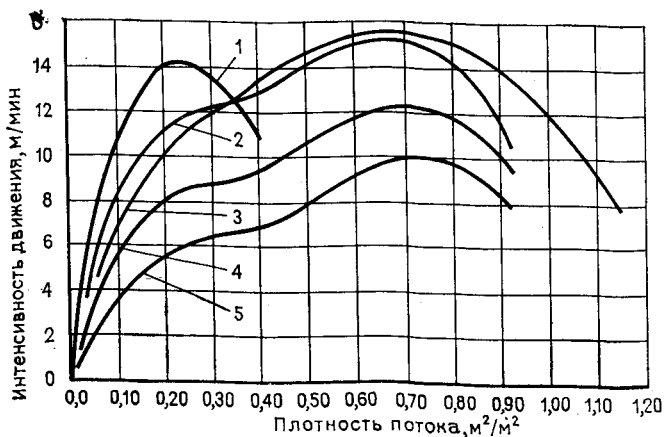
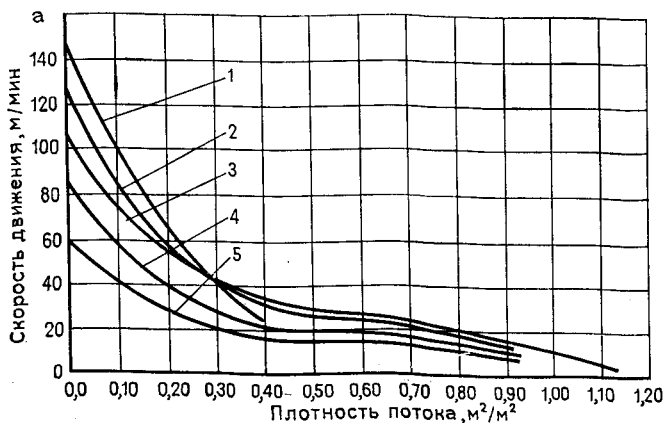


Рис. 6.8. Скорость (а) и интенсивность (б) движения пересекающихся потоков на горизонтальных путях в сравнении с другими видами движения

1 — пересекающиеся людские потоки; 2 — наибольшие значения, полученные при наблюдениях в нормальных условиях (по крайним значениям ряда расчленения); 3 — значения, полученные при наблюдениях в условиях, близких к аварийным; 4 — средние значения для аварийных условий (процесс с повышенной напряженностью); 5 — движение в нормальных условиях

скорости потока по данным МИСИ, полученным по крайним значениям ряда распределения (рис. 6.8). Кривая скорости пересекающихся людских потоков при увеличении их плотности приближается к средним значениям для аварийных условий (процесса с повышенной напряженностью), достигая тех же значений при $D = 0,4$. Наблюдениями установлено, что при плотности более 0,4 пересечение потоков невозможно.

Важной количественной оценкой зависимости (6.8) является корреляционное отношение $\eta_{Dv} = 0,744$. Его величина указывает на значительную связь между D и v . Коэффициент детерминации η^2 для пересекающихся людских потоков составляет 0,5538 (55,38%) и указывает, что скорость их движения зависит в основном от плотности.

Отличие зависимости $v = f(D)$ для пересекающихся людских потоков от аналогичной зависимости при движении по горизонтальному пути (средние значения для аварийных условий) объясняется прежде всего повышенной психологической напряженностью процесса. При пересечении потоков наблюдается явление, подобное тому, которое возникает при движении потока через проемы: люди стремятся быстрее преодолеть тяжелое для движения место, значительно увеличивая скорость. Натурные наблюдения проводились в сооружениях транспортного назначения, для которых характерны повышенные скорости движения. Время проведения наблюдений совпадает с часами «пик», во время которых психологическая напряженность процесса движения возрастает.

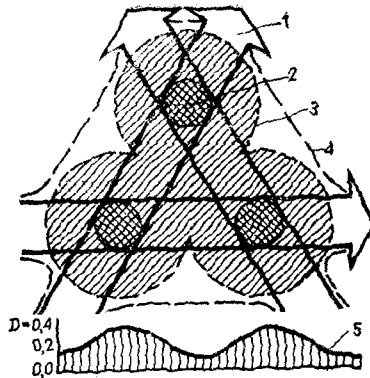
Интенсивность движения пересекающихся людских потоков достигает $q_{\text{макс}} = 14,17$ м/мин, а затем падает до величины $q = 11,19$ м/мин. Максимальное значение интенсивности соответствует $D_{q_{\text{макс}}} = 0,24$ (см. рис. 6.8, б).

Представляет интерес качественная картина движения пересекающихся людских потоков. В местах пересечения образуются так называемые «конфликтные точки» (см. рис. 6.7), которые распределяются по всей площади коммуникационного помещения.

На рис. 6.9 приведена структурная схема, наглядно отражающая процесс движения пересекающихся потоков, составленная на основе обработки кинограмм движения. Кинограммы движения показывают, что наибольшая плотность пересекающихся людских потоков достигается в зоне конфликтных точек.

Рис. 6.9. Структурная схема пересекающихся людских потоков

1 — пересекающиеся людские потоки; 2 — конфликтные точки; 3 — зона влияния конфликтных точек; 4 — граница зоны при разбухании людского потока; 5 — диаграмма распределения плотности при пересечении людских потоков



Кроме конфликтных точек (см. рис. 6.9) выделена вторая, менее уплотненная зона влияния конфликтных точек. В процессе движения пересекающихся людских потоков плотность в конфликтной точке нарастает, достигая величины $D_{пт}$. Натурными наблюдениями установлено, что в дальнейшем начинается так называемое «разбухание» потока, при котором траектории движения людей становятся криволинейными, отклоняясь от первоначального кратчайшего расстояния $L_{мин}$ между источником и местом притяжения вследствие желания людей обойти участок с высокой плотностью $D_{пт}$ (конфликтную точку). Если размеры помещения позволяют пересекающимся потокам занять большую площадь, образуются зоны влияния конфликтных точек, или зоны движения с «оптимальной» плотностью $D_{оп}$, и зоны конфликтных точек с плотностью $D_{пт}$.

Зоны движения с «оптимальной» плотностью, возникая вокруг конфликтных точек, сливаются между собой и занимают большую часть площади помещения. Однако разбухание потока имеет пределы и, поскольку при этом движение происходит по криволинейным траекториям, а люди стремятся двигаться по кратчайшему расстоянию с целью минимальных затрат времени на передвижение $t_{мин}$, то размеры зон влияния конфликтных точек также ограничены.

Так как $t \approx \varphi(L, v)$; $v = f(D)$, то

$$t_{мин} = \varphi\{L_{мин} f(D_{мин})\}. \quad (6.9)$$

Иначе говоря, t стремится к минимуму в том случае, когда к нему стремится путь движения ($L \rightarrow \min$) или плотность ($D \rightarrow \min$).

При оценке качества процесса движения пересекающихся людских потоков важно знать, какой из двух указанных факторов является определяющим.

Проведенные натурные наблюдения позволяют утверждать, что при движении потока людей по участкам пути равной длины они выбирают то направление, плотность на котором меньше (см. § 3 гл. 4), т. е. если $L_i = L_j$ и $D_i > D_j$, то движение происходит по участку j . Наиболее типичным представляется случай, когда движение происходит по участкам пути различной длины и плотности, т. е. $L_i > L_j$ и $D_i < D_j$.

При этом люди стремятся продолжить движение по кратчайшему расстоянию, которое можно считать определяющим фактором для достижения минимальных затрат времени на передвижение. Поток как бы концентрируется около преимущественного направления движения.

Таким образом, при пересечении людских потоков, с одной стороны, имеет место «разбухание» людского потока вследствие желанья людей идти с меньшей плотностью, а с другой — ограничение размеров зоны влияния конфликтных точек ввиду стремления людей к достижению цели по кратчайшему расстоянию — $L_{\text{мин}}$.

Основное значение для проектирования зданий имеет учет плотности пересекающихся людских потоков. Оптимальной плотностью пересекающихся потоков называется такая, которая наиболее вероятна в интервале от свободного движения D_n^0 до предельной плотности $D_{\text{шт}}$.

Значение оптимальной плотности потока получено методами математической статистики и в результате использования теории оптимальных статистических решений. При этом выбор $D_{\text{шт}}$ производился из множества D . Вероятное распределение значений плотности определялось уравнением кривой Пирсона VII типа (рис. 6. 10). Такое распределение вероятностей является симметричным и стремится к нормальному.

При выборе оптимальной плотности пересекающихся людских потоков поведение человека можно описать функцией полезности, которая в большинстве случаев является вогнутой. Это означает, что из двух возможных вариантов — идти с малой скоростью $v_{\text{мин}}$ при большой плотности $D_{\text{п.п}}$ и вероятности ϵ или с большой скоростью $v_{\text{макс}}$ при малой плотности D_n^0 и вероятности $(1-\epsilon)$ — большинство людей предпочитают фиксированную скорость при плотности $D_{\text{оп}}$. Оптимальное значение плотности пересекающихся потоков составило $D=0,20$.

Этот параметр можно использовать в практических расчетах размеров коммуникационных помещений, в ко-

которых пересекаются людские потоки при скорости движения $V_{оп} = 69,85$ м/мин. Тогда $q_{оп, макс} = 13,27$ м/мин.

Для этого на плане коммуникационного помещения намечаются наиболее вероятные пути движения потоков. В местах их пересечения фиксируются конфликтные точ-

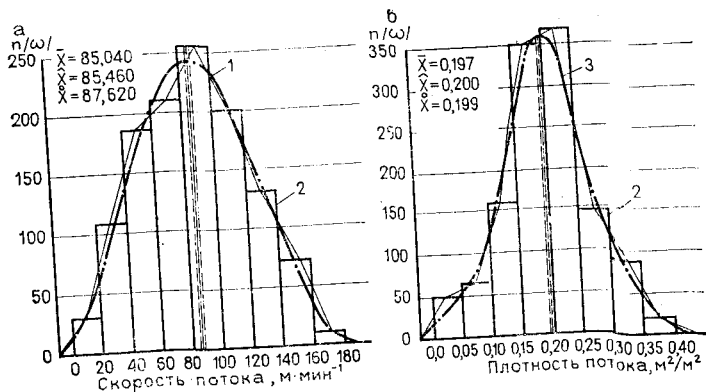


Рис. 6.10. Распределения значений скорости (а) и плотности (б) пересекающихся потоков

1 — теоретическое распределение: кривая Пирсона II типа $n_j = 245,6 \left(1 - \frac{x^2}{24,695}\right)^{2,339}$; 2 — экспериментальное распределение; 3 — теоретическое распределение: кривая Пирсона VII типа $j = 337,4 \left(1 + \frac{x^2}{11,475}\right)^{-31,912}$

ки, а вокруг них — зоны их влияния, которые соединяются траекториями движения, близкими к касательным. Площадь для движения пересекающихся людских потоков определится на основании выражения (4.10) и составит

$$F_{п.п} = \frac{N_p}{D_{оп}} \text{ м}^2, \quad (6.10)$$

где N_p — расчетное количество людей, м²; $D_{оп}$ — оптимальная плотность при пересечении людских потоков.

Следует подчеркнуть, что эта площадь помещения предназначена только для движения людского потока. Общая площадь определяется с учетом дополнительных факторов, в том числе неизбежных «мертвых» зон помещения, мест, занятых оборудованием, и пр.

Для того чтобы воспользоваться формулой (6.10), необходимо установить N_p , т. е. число людей, которое

может одновременно находиться в помещении. Поскольку пересекающиеся людские потоки характерны для зданий, где имеется непрерывное длительное движение (сооружения метрополитена, крупные магазины и т. п.), то учесть весь состав участвующих в нем невозможно.

Имея в виду выражение (4.11), расчетное количество людей (в м²) можно установить по пропускной способности Q_{n-1} путей, пересекающихся в рассматриваемом помещении, т. е.

$$N_p = \Sigma Q_{n-1} t, \quad (6.11)$$

где t — время, мин, в течение которого каждый участник движения может пройти и покинуть помещение. Время следует назначать умозрительно, и после получения планировочного решения помещения проверять расчетом, чтобы действительное время примерно соответствовало принятому (см. ниже в примере).

При проектировании помещений, где предусматривается пересечение потоков, следует иметь в виду, что сумма пропускных способностей мест притяжения потоков Q_{n+1} должна быть равна или больше суммы пропускных способностей источников потоков, т. е.

$$\Sigma Q_{n+1} \geq \Sigma Q_{n-1}.$$

Образование скопления людей при пересечении потоков нельзя считать допустимым.

Вторым обязательным условием, которое должно учитываться при проектировании, является достаточная пропускная способность каждого места притяжения, поскольку в процессе пересечения число людей может измениться.

Пример. Определить площадь помещения, необходимую для пересечения двух людских потоков, выходящих из двух проемов шириной (δ_{n-1}) по 2 м каждый. Людские потоки состоят из людей с ношей и без ноши ($f_{op} = 0,15 \text{ м}^2$).

Решение. Установим максимальную пропускную способность каждого проема — источника потока:

$$Q_{п.п} = q_{\max} \delta_{n-1} = 13,27 \cdot 2 = 26,54 \text{ м}^2/\text{мин} \text{ (177 чел/мин)},$$

где $q_{\max} = 13,27 \text{ м}^2/\text{мин}$ — максимальная интенсивность движения в проеме при процессе с повышенной напряженностью (по прил. I средние значения для аварийного движения). Тогда при $t = 0,5 \text{ мин}$ $N_p = \Sigma Q_{п.п} t = 2 \cdot 26,54 \cdot 0,5 = 26,54 \text{ м}^2$. По выражению (6.10):

$$F_{пп} = \frac{N_p}{D_{о.п}} = \frac{26,54}{0,2} = 132,7 \text{ м}^2.$$

С учетом мертвых зон, оборудования и пр. (сообразуясь с архитектурным решением), примем размер помещения $17 \times 17 \text{ м}$

(рис. 6.11). Наибольший возможный путь движения составит ~ 34 м. Тогда действительное время движения будет $t_d = \frac{34}{v_{оп}} = \frac{34}{69,85} = 0,49$ мин $\cong t$.

§ 4. Прочие случаи движения людских потоков

К прочим случаям отнесено движение людских потоков на поворотах, по широким, но коротким участкам пути, по наклонным путям с крутыми уклонами, а также движение встречных потоков.

Движение на поворотах. В месте поворота пути структура людского потока изменяется, как показано по схеме рис. 6.12.

Пусть по коридору шириной δ , делающему поворот под углом 90° , движение людей происходит с равномерной плотностью и скоростью. Ось потока показана на схеме сплошной линией. Наблюдения показывают, что каждый человек, достигнув угла, поворачивает не сразу,

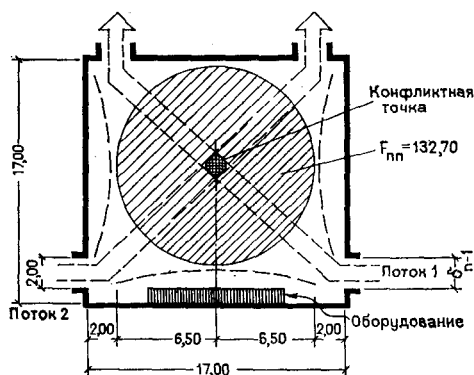


Рис. 6.11. Помещение с движением пересекающихся потоков

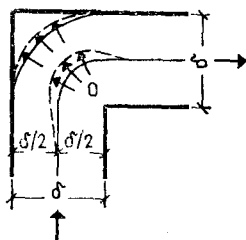


Рис. 6.12. Схема движения на поворотах

а плавно огибает угол по кривой, близкой к окружности. Чем дальше человек в зоне поворота отстоит от точки O , тем больший путь по окружности он проходит, прежде чем минует угол. При этом, несмотря на различную длину пути, время движения примерно одинаково за счет разных скоростей движения людей вокруг точки O как следствия неодинаковых плотностей на внутренней и внешней стороне потока.

Очевидно, что уменьшение плотности и увеличение скорости тем значительнее, чем больше радиус окружности, по которой движется данный поток.

В месте поворота более плотная часть людского потока оказывает давление на менее уплотненную, отодвигая последнюю в радиальном направлении (стрелки на рис. 6.12) дальше от центра O , в результате чего поток как бы смещается к периферии. И так происходит до тех пор, пока в потоке не устанавливается более или менее равномерная по ширине его плотность.

Таким образом, в зоне поворота происходят перераспределение параметров движения и деформация траекторий, по которым перемещаются люди. Эти явления отрицательно сказываются на режиме процесса, особенно в аварийных условиях, поэтому при проектировании путей движения следует избегать излишних поворотов.

Что касается пропускной способности пути в месте поворота, то, как показывают наблюдения и как это следует из предыдущего, она заметно не изменяется, поэтому повороты в расчете можно не учитывать.

Движение на широких участках пути ограниченной длины. Если длина пути значительно превышает его ширину, то людской поток обычно заполняет всю ширину участка, в противном случае — лишь его часть. Примером является движение в зрелищных зданиях после окончания спектакля, где зрительный зал окружен кулуарами или фойе, с противоположной стороны которых примыкают лестница или другие помещения, ведущие к выходу (рис. 6.13). Наблюдения показывают, что на широком участке пути поток «разбухает», т. е. несколько уменьшается его плотность, а затем он снова сужается до размеров последующего участка. Расширение проис-

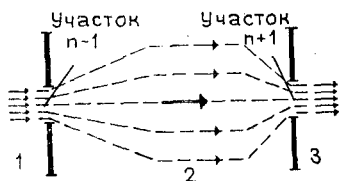


Рис. 6.13. Схема движения на широких, но коротких участках пути
1 — зал; 2 — фойе (участок n); 3 — лестница

ходит в результате обгона сбоку людьми основной массы потока, а также их стремления повысить удобства движения.

Движение потока по таким участкам пути и его параметры следует рассчитывать с учетом образования двух или трех зон: первой, где поток расширяется (см. рис. 6.13); второй, где поток, достигнув определенной плотности, сохраняет постоянную ширину, и третьей, где поток сужается до размеров выхода из помещения. При небольшой длине участка второй зоны может не быть.

Пример. Рассчитать параметры движения потока (в нормальных условиях) через большое помещение, если ширина входа в него $\delta_{n-1}=1,5$ м, а ширина выхода $\delta_{n+1}=1,5$ м. Общая длина участка $l=8$ м. Пропускная способность $Q=12$ м²/мин.

Решение. Определяем ширину второй зоны с плотностью при разбухании такой же, как при пересекающихся потоках. В этом случае, в отличие от пересекающихся потоков, повышенная напряженность процесса может не учитываться, поэтому q_2 и v_2 принимаются по таблице прил. I соответственно плотности $D=0,2$; т. е. $q_2=5,62$ м/мин; $v_2=28,10$ м/мин:

$$\delta_2 = \frac{Q}{q_2} = \frac{12}{5,62} = 2,14 \text{ м.}$$

Находим расчетную ширину первой и третьей зон:

$$\delta_1 = \frac{\delta_{n-1} + \delta_2}{2} = \frac{1,5 + 2,14}{2} = 1,82 \text{ м.}$$

Определяем длину первой и третьей зон:

$$l_1 = 0,87 (\delta_2 - \delta_{n-1}) = 0,87 (2,14 - 1,5) = 0,56 \text{ м;}$$

$$l_3 = 0,5 (\delta_2 - \delta_{n+2}) = 0,5 (2,14 - 1,5) = 0,32 \text{ м,}$$

где 0,87 и 0,5 соответственно $\text{tg } 30^\circ$ и $\text{tg } 45^\circ$ (см. § 3 гл. 4).
Длина второй зоны составит:

$$l_2 = l - (l_1 + l_3) = 8 - (0,56 + 0,32) = 7,12 \text{ м.}$$

Параметры движения в первой и третьей зонах:

$$q_1 = q_3 = \frac{Q}{\delta_1} = \frac{12}{1,82} = 6,59 \text{ м/мин; } v_1 = 21,15 \text{ м/мин;}$$

$$D = 0,31.$$

Продолжительность движения по всему участку:

$$t = \frac{l_1}{v_1} + \frac{l_2}{v_2} + \frac{l_3}{v_3} = \frac{0,56}{21,75} + \frac{7,12}{28,10} + \frac{0,32}{21,15} = 0,30 \text{ мин.}$$

Движение по наклонным путям с крутыми уклонами.
Установленные выше закономерности движения по лестницам при спуске и подъеме (см. § 4 гл. 3) относятся к распространенным в строительстве уклонам, близким к 1 : 2. Как известно, чем круче уклон, тем меньше скорость

движения при той же плотности потока, и наоборот, чем положе уклон, тем скорость движения выше, приближаясь к скорости по горизонтальным путям. Следовательно, если лестница крутая, то необходимо ввести поправку, учитывающую снижение скорости движения. Если лестница пологая, то такой поправки можно не делать, поскольку образуется запас во времени движения.

К сожалению, данных о величинах скорости как функции плотности и уклона путей еще недостаточно. МИСИ им. В. В. Куйбышева изучалась скорость движения на трибунах спортивных сооружений в связи с уточнением норм их проектирования. При этом было установлено, что с увеличением уклона до 1:1,75 в условиях нормального движения скорость при тех же плотностях падает: при движении вниз на 30%¹ и вверх на 18%¹.

Следовательно, для таких условий движения должны вводиться «коэффициенты уклона» ψ , составляющие соответственно 0,7 и 0,82. Следует отметить, что предлагаемый учет влияния уклонов является приближенным.

Встречное движение людских потоков¹. В практике проектирования зданий достаточно часто встречаются

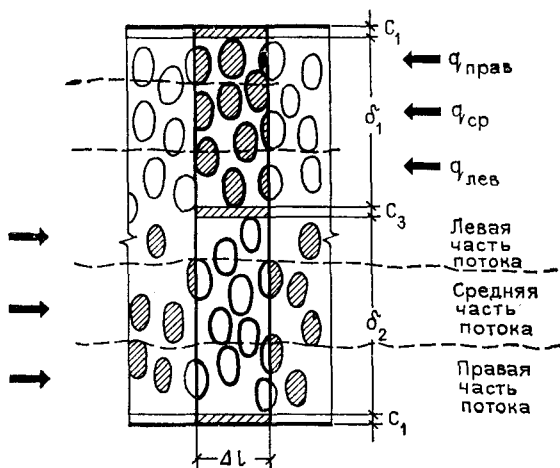


Рис. 6.14. Встречное движение людских потоков

c — зазоры между ограждениями и потоками; δ — ширина потока; Δl — условное сечение потока при определении интенсивности движения

¹ Исследование встречного движения выполнено в МИСИ им. В. В. Куйбышева канд. техн. наук Р. Г. Григорьянцем.

случаи, когда по одному коммуникационному пути предусматривается встречное движение людских потоков (рис. 6.14). Встречное движение бывает, как правило, долговременным и только в нормальных условиях. Оно характерно, например, для сооружений метрополитена, крупных торговых зданий, вокзалов и т. п.

Исследования закономерностей встречного движения показали, что в каждом потоке, идущем в одном направлении, скорости и плотности в зависимости от положения человека в потоке по ширине пути несколько отличаются друг от друга. На основании натуральных наблюдений замечено значительное снижение скорости в левых частях встречных потоков, которое объясняется боязнью людей столкнуться с людьми из встречного потока. Поэтому в расчете должна приниматься некоторая средняя скорость движения потока (см. рис. 6.14). Статистическая обработка данных натуральных наблюдений (всего более 300 замеров) позволила вывести так называемый «коэффициент потери интенсивности» μ_q , при встречном движении равный отношению интенсивностей встречного одностороннего движения. При расчете путей в зданиях рекомендуется $\mu_q = 0,85$.

Следовательно, при расчетах пропускную способность пути при встречном движении следует уменьшать на 15% или соответственно увеличивать ширину пути.

Глава 7.

ФОРМИРОВАНИЕ И ДВИЖЕНИЕ ЛЮДСКИХ ПОТОКОВ В ПРОХОДАХ ЗРЕЛИЩНЫХ ПОМЕЩЕНИЙ

§ 1. Общие положения

Процесс формирования и движения людских потоков в проходах зрелищных помещений (рис. 7.1), как показали наблюдения, проведенные в театрах, кинотеатрах и на трибунах стадионов, отличается большой сложностью. После окончания спектакля, киносеанса, футбольного матча люди почти одновременно начинают выходить из рядов и двигаться к выходу. В проходе образуется людской поток, плотность которого, как правило, увеличивается. При достижении некоторого значения плотности D_i движение как бы стабилизируется. Замечено, что при длинных переходах с большим числом

выходящих в них рядов, плотность D_i достигает высоких значений, превышающих D при $q_{\text{макс}}$, которые не наблюдаются при коротких проходах и коротких рядах. При стабилизации процесса в ряде случаев выход людей из рядов и движение в проходе замедлялись, а иногда и совсем прекращались. По мере движения объединенного потока к выходу из прохода плотность то уменьшалась, то увеличивалась.

Установлено, что при формировании и движении людских потоков в проходах зрелищных помещений процесс складывается из следующих элементов (рис. 7.2): собственно движения в рядах и в проходах; изменения параметров движения потока при переходе границ смежных участков (из ряда в проход и при изменении ширины последнего); одновременного слияния нескольких людских потоков (из рядов) на ограниченном по длине участке пути (прохода); многократного переформирования потока при его движении по проходу; растекания и разуплотнения; образования и рассасывания скоплений (в рядах и в проходе).

Кроме того, формирование объединенного потока в проходе и его движение зависят от многих переменных величин. К ним относятся система выхода людей из рядов (одно- или двусторонняя); вид пути (горизон-

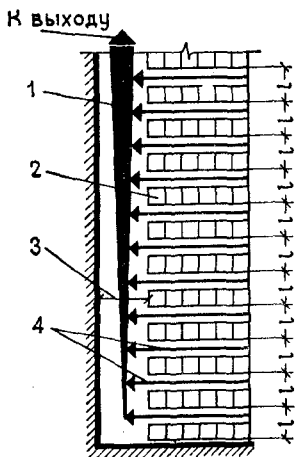


Рис. 7.1. Формирование и движение людского потока в поперечном проходе зрелищного помещения

1 — объединенный людской поток; 2 — места для зрителей; 3 — поперечный проход; 4 — людские потоки из рядов кресел

тая); вид пути (горизон-

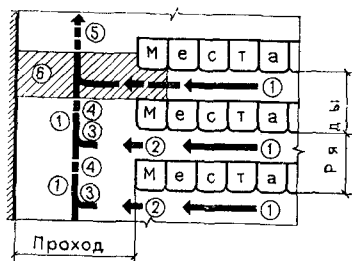


Рис. 7.2. Элементы процесса формирования и движения людских потоков в проходах зрелищных помещений

1 — движение; 2 — переход через границы; 3 — слияние; 4 — переформирование; 5 — растекание и разуплотнение; 6 — скопление

тальный, наклонный, смешанный); число мест n (т. е. людей) в ряду; количество рядов m , выходящих в проход; ширина ряда и прохода.

Движение потока также зависит от физического и психического состояния людей.

С учетом сложности процесса и его зависимости от множества переменных величин, для расчета целесообразно несколько упростить условия. Прежде всего можно не учитывать растекания потока, поскольку на коротких расстояниях (ширина ряда) оно фактически не проявляется. Разуплотнение при скоплении может быть лишь в последнем ряду на выходе из прохода, поэтому увеличение скорости может сказаться на длине прохода, равной длине ряда, что несущественно.

Система выхода людей из рядов не имеет значения для расчета, поскольку при слиянии потоков параметры объединенного потока определяются или по сумме пропускных способностей путей (т. е. при одностороннем размещении рядов относительно прохода, как на рис. 7.1, учитывается пропускная способность одного ряда — Q_p , при двустороннем — $2Q_p$), или в расчет принимается одностороннее размещение рядов при половинной ширине прохода $\left(\frac{\delta}{2}\right)$.

Ширина рядов l может быть принята трех основных размеров — 0,8; 0,9 и 1 м, поскольку промежуточные их значения не окажут существенного влияния на результаты расчетов.

Ширина пути каждого потока в ряду кресел также может быть принята постоянной и равной $\delta_p = 0,6$ м, поскольку она учитывается на уровне плеч человека (см. § 1 гл. III), а меньшая ширина на уровне пола (0,4—0,5 м) позволяет свободно двигаться прямо. Ширина каждого кресла обычно составляет 0,5 м. Тогда площадь в ряду, занимаемая одним человеком, будет равна 0,3 м². Отсюда можно установить постоянные усредненные параметры движения потоков в рядах (табл. 7.1).

Число мест в рядах n также обычно бывает одинаковым (в залах прямоугольной формы). Если число мест в рядах разное, то целесообразно усреднить эту величину, сохранив расчетное число людей.

Перечисленные допущения, несущественно влияя на точность результатов, позволяют значительно упростить решение задачи.

Таблица 7.1. Параметры движения людских потоков в рядах зрелищных помещений

Параметры движения	Площадь горизонтальной проекции человека f , м ² , и условия движения					
	0,125		0,113		0,1	
	нормальные	аварийные	нормальные	аварийные	нормальные	аварийные
Плотность D_p	0,42	0,42	0,38	0,38	0,33	0,33
Скорость v_p , м/мин	17,76	23,78	18,69	25,29	20,32	27,86
Интенсивность движения q_p , м/мин	7,46	9,99	7,1	9,61	6,71	9,20
Пропускная способность ряда Q_p , м ² /мин	4,48	6,0	4,26	5,77	4,03	5,52

§ 2. Примеры формирования и движения людских потоков в проходах постоянной ширины без образования скоплений и задержек движения

Пользуясь ранее установленными закономерностями, рассмотрим ход процесса на двух элементарных примерах расчета с построением графиков движения.

Пример. Определить время движения людского потока в проходе зрительного зала. Ширина прохода $\delta = 2$ м; длина 8 м; количество мест в ряду $n = 12$; количество рядов $m = 8$; ширина ряда $l = 1$ м (рис. 7.3). Относительно прохода ряды расположены с одной стороны. При $f = 0,1$ м² число людей $N = mnf = 8 \cdot 12 \cdot 0,1 = 9,6$ м². Условия движения нормальные.

Решение. По табл. 7.1 параметры движения в рядах составляют: $D_p = 0,33$; $v_p = 20,32$ м/мин; $q_p = 6,71$ м/мин; $Q_p = 4,03$ м²/мин. Длина ряда $L_p = 6$ м (12 мест по 0,5 м). Время выхода каждого потока из ряда составляет

$$t_p = \frac{L_p}{v_p} = \frac{6}{20,32} = 0,29 \text{ мин.}$$

В первый момент люди из каждого ряда выходят в проход, движение в котором, согласно формуле (21.1), происходит со следующими параметрами:

$$q_1 = \frac{Q_p}{\delta} = \frac{4,03}{2} = 2 \text{ м/мин.}$$

По прил. I находим $D_1 = 0,04$; $v_1 = 48,99$ м/мин. Время движения каждого потока по участку прохода длиной, равной ширине ряда l , составляет

$$t_1 = \frac{l}{v_1} = \frac{1}{48,99} = 0,02 \text{ мин.}$$

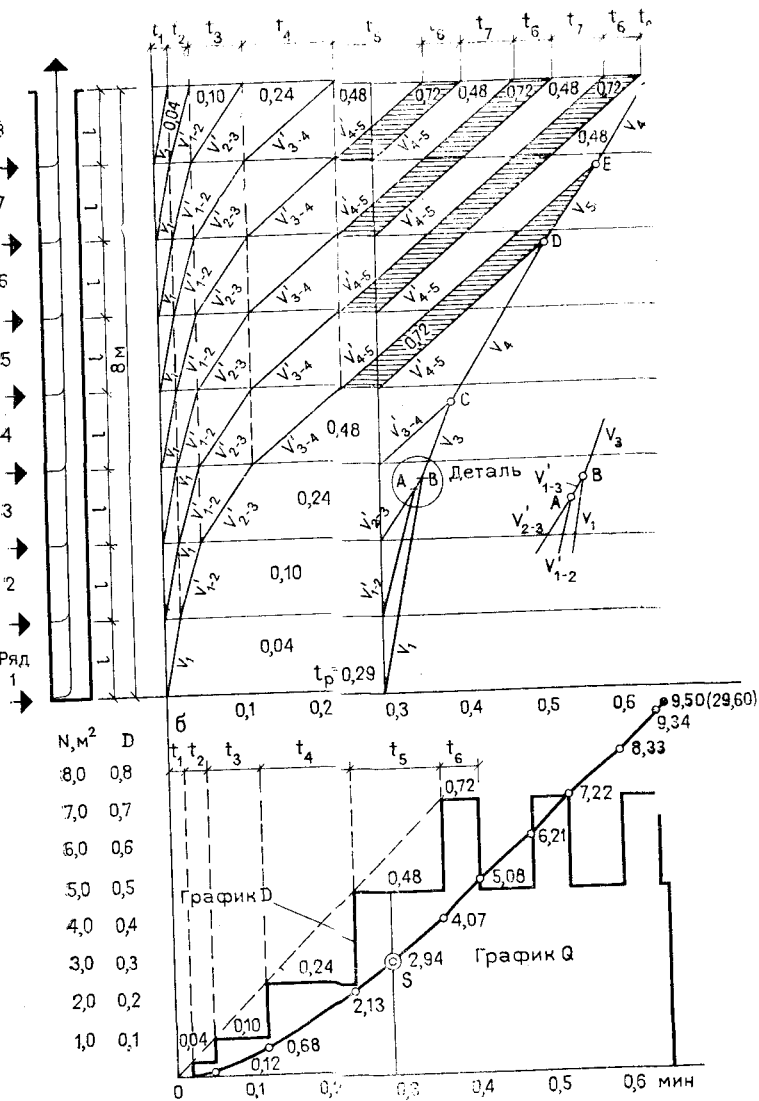


Рис. 7.3. Расчетный график процесса формирования и движения людского потока в проходах постоянной ширины (пример 1)
 а — время движения; б — плотность и интенсивность движения потока

В момент, когда каждый поток в проходе достигнет следующего ряда, начнется формирование объединенного потока в проходе, т. е. слияние и дальнейшее его переформирование на основе закономерностей (4.10) и (4.15). Тогда параметры движения на всех участках прохода (кроме участка у 1-го ряда):

$$q_2 = \frac{2 Q_p}{\delta} = \frac{2 \cdot 4,03}{2} = 4,03 \text{ м/мин};$$

соответственно $D_2 = 0,10$; $v_2 = 39,27$ м/мин, а скорость движения границы между частями потока с разными плотностями (скорость переформирования) составит:

$$v'_{1-2} = \frac{q_2 - q_1}{D_2 - D_1} = \frac{4,03 - 2}{0,10 - 0,04} = 33,83 \text{ м/мин};$$

$$t_2 = \frac{l}{v'_{1-2}} = \frac{1}{33,83} = 0,03 \text{ мин.}$$

Полученные значения нанесем на расчетный график (см. рис. 7.3).. Спустя t_2 процесс повторится снова:

$$q_3 = \frac{3 Q_p}{\delta} = \frac{3 \cdot 4,03}{2} = 6,05 \text{ м/мин};$$

$$D_3 = 0,24; v_3 = 25,04 \text{ м/мин};$$

$$v'_{1-3} = \frac{q_3 - q_2}{D_3 - D_2} = \frac{6,05 - 4,03}{0,24 - 0,10} = 14,43 \text{ м/мин};$$

$$t_3 = \frac{l}{v'_{2-3}} = \frac{1}{14,43} = 0,07 \text{ мин.}$$

Спустя t_3 :

$$q_4 = \frac{4 Q_p}{\delta} = \frac{4 \cdot 4,03}{2} = 8,06 \text{ м/мин}; D_4 = 0,48;$$

$$v_4 = 16,76 \text{ м/мин}; v'_{3-4} = \frac{q_4 - q_3}{D_4 - D_3} = \frac{8,06 - 6,05}{0,48 - 0,24} = 8,38 \text{ м/мин};$$

$$t_4 = \frac{l}{v'_{3-4}} = \frac{1}{8,38} = 0,12 \text{ мин.}$$

Спустя t_4 :

$$q_5 = \frac{5 Q_p}{\delta} = \frac{5 \cdot 4,03}{2} = 10,08 \text{ м/мин};$$

$$D_5 = 0,72;$$

$$v_5 = 14,02 \text{ м/мин}; v'_{4-5} = \frac{q_5 - q_4}{D_5 - D_4} = \frac{10,08 - 8,06}{0,72 - 0,48} = 8,42 \text{ м/мин};$$

16,76 м/мин. Последний человек из объединенного потока покинет проход через $t=0,66$ мин после начала процесса.

Как было показано выше (см. § 1 гл. 4), результаты графоаналитического расчета можно проверить по сумме произведений пропускных способностей и соответствующих отрезков времени. Полученная сумма должна быть равна общему количеству людей, участвующих в движении, $N=9,6$ м²:

$$\begin{aligned} N &= t_2 Q_1 + t_3 Q_2 + t_4 Q_3 + t_5 Q_4 + 3 t_6 Q_5 + 2 t_7 Q_4 + t_8 Q_4 = \\ &= 0,03 \cdot 4,03 + 0,07 \cdot 8,06 + 0,12 \cdot 12,09 + 0,12 \cdot 16,12 + \\ &+ 3 \cdot 0,05 \cdot 20,15 + 2,07 \cdot 16,12 + 0,01 \cdot 16,12 = 9,50 \text{ м}^2 \approx 9,6 \text{ м}^2, \end{aligned}$$

где Q_1, Q_2 и т. д. соответствуют Q_p , умноженному на номер ряда. Несущественная ошибка на $0,1$ м² (1 чел.) образовалась за счет принятия усредненных значений параметров движения в рядах, а также округлений и неизбежных погрешностей при построении графика.

Рассмотрим второй пример.

Пример. Предположим, что количество рядов $m=4$ и $L=4$ м, а все остальные данные такие же, как в предыдущем примере.

Решение.

Тогда $N=48 \cdot 0,1=4,8$ м²; $t_p=0,29$ мин; $q_1=2$ м/мин; $D_1=0,04$; $v_1=48,99$ м/мин; $t_1=0,02$ мин;

$q_2=4,03$ м/мин; $D_2=0,1$; $v_2=39,27$ м/мин; $v_2'=33,83$ м/мин; $t_2=0,03$ мин;

$q_3=6,05$ м/мин; $D_3=0,24$; $v_3=25,04$ м/мин; $v_3^*=14,43$ м/мин; $t_3=$
 $=0,07$ мин; $q_4=8,06$ м/мин; $D_4=0,48$; $v_4=16,76$ м/мин; $v_4' =$
 $=8,38$ м/мин; $t_4=0,12$ мин.

Дальнейшего увеличения плотности объединенного потока быть не может, так как его сформировали людские потоки из всех четырех рядов. Изображение процесса движения на рис. 7.5 представляет собой нижнюю часть графика, относящегося к предыдущему примеру (см. рис. 7.3). Следовательно, пополнение потока прекратилось в момент

$$t_1 + t_2 + t_3 + t_4 = 0,02 + 0,03 + 0,07 + 0,12 = 0,24 \text{ мин},$$

т. е. раньше окончания выхода людей из рядов в проход ($t_p=0,29$ мин), и дальнейшее движение должно происходить при плотности объединенного потока в конце прохода, равной $D=0,48$.

Люди, замыкающие поток, выйдут из каждого ряда в проход в момент t_p . Далее переформирование конечной части объединенного потока происходит так же, как в предыдущем примере, но до момента $t=0,4$ (около точки С), когда последний человек покинет проход (см. рис. 7.5).

Проверка дает следующий результат:

$$\begin{aligned} N &= t_2 Q_1 + t_3 Q_2 + t_4 Q_3 + t_5 Q_4 = 0,03 \cdot 4,03 + 0,07 \cdot 8,06 + \\ &+ 0,12 \cdot 12,09 + 0,16 \cdot 16,12 = 4,72 \text{ м}^2 \approx 4,8 \text{ м}^2. \end{aligned}$$

Из приведенных примеров следует, что, применяя известные закономерности движения людских потоков с одновременным построением графика движения, т. е.

графоаналитический метод расчета, можно получить вполне четкую картину хода процесса формирования и движения людского потока в проходах зрелищных помещений и определить его продолжительность.

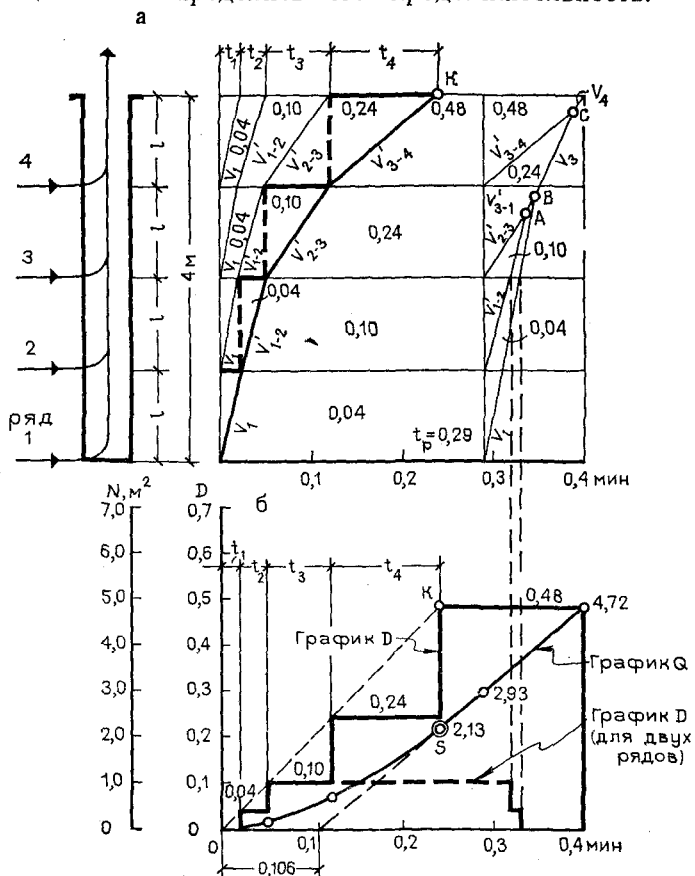


Рис. 7.5. Расчетный график процесса формирования и движения людского потока в проходах постоянной ширины (пример 2)

Однако расчет графоаналитическим методом, хотя и достаточно элементарен по своему существу, но трудоемок.

Следует также учитывать, что при расчете графоаналитическим методом, как показывают примеры, допускаются известные погрешности за счет степени точности графических построений.

§ 3. Закономерности формирования людских потоков в проходах зрелищных помещений и определение времени движения

На рис. 7.3,б и 7.5,б приведены графики изменения пропускной способности Q и график нарастания плотности на выходе из прохода в зависимости от времени. Из графиков следует, что до точки S пропускная способность плавно нарастает, а затем как бы стабилизируется. При этом в первом примере стабилизация имеет относительный характер, поскольку после точки S плотность потока периодически меняется (от 0,48 до 0,72). Такое периодическое изменение плотности и, следовательно, пропускной способности вызвано тем, что в момент t_p (завершения выхода потоков из рядов) плотность $D=0,72$ образуется не на всей длине участков l , а лишь с 5-го до 8-го ряда (см. рис. 6.7,а).

Во втором примере, где всего 4 ряда, после точки S движение происходит с постоянной плотностью и пропускной способностью, т. е. для этого случая стабилизация движения на выходе имеет устойчивый характер.

В первом примере точка S совпадает с моментом t_p , т. е. прекращением пополнения потока в проходе людьми; во втором — точка S совпадает с моментом K достижения головной частью потока из первого, наиболее удаленного ряда конца прохода, т. е. наступает такое состояние потока, при котором число людей на выходе из прохода перестает увеличиваться.

Следовательно, в обоих случаях стабилизация движения связана с прекращением увеличения числа людей, покидающих проход (на выходе).

Следует отметить, что достижение головной частью потока выхода из прохода не является достаточным признаком устойчивой стабилизации, поскольку возможно постепенное уменьшение пропускной способности, а значит, и плотности к концу процесса. Это может быть или при небольшом количестве рядов (см. рис. 7.5,б; график D для двух рядов) или при очень широких проходах, когда переформирование замыкающих частей потоков из рядов не успеет завершиться из-за значительных скоростей их движения.

Второй существенной закономерностью формирования и движения людских потоков в проходах зрелищных сооружений следует считать скорость нарастания плотности в проходе.

Проследим движение головной части потока из первого ряда до выхода из прохода (см. рис. 7.5,а).

На участке прохода на уровне 1-го ряда:

$$q_1 = \frac{Q_p}{\delta_1}; \quad q_1 = D_1 v_1; \quad t_1 = \frac{l}{v_1} = l \frac{D_1}{q_1}.$$

На уровне 2-го ряда сливаются потоки из двух рядов, т. е.

$$q_2 = \frac{2Q_p}{\delta_2} \text{ при } D_2 \text{ и } v_2,$$

а скорость движения на участке 2 прохода определяется скоростью (в м/мин) переформирования между потоками из 1-го и 2-го рядов, т. е.

$$v'_{1-2} = \frac{q_2 - q_1}{D_2 - D_1}; \quad t_2 = \frac{l}{v'_{1-2}} = l \frac{D_2 - D_1}{q_2 - q_1}.$$

На уровне 3-го ряда сливаются потоки из трех рядов:

$$q_3 = \frac{3Q_p}{\delta_3} \text{ при } D_3 \text{ и } v_3.$$

Скорость движения на участке 3 прохода определяется скоростью переформирования между потоками, образованными людьми из 2-го и 3-го рядов:

$$v'_{2-3} = \frac{q_3 - q_2}{D_3 - D_2}; \quad t_3 = \frac{l}{v'_{2-3}} = l \frac{D_3 - D_2}{q_3 - q_2}$$

и т. д. на уровне i -го ряда:

$$q_i = \frac{i Q_p}{\delta_i} \text{ при } D_i \text{ и } v_i; \quad v'_{(i-1)-i} = \frac{q_i - q_{i-1}}{D_i - D_{i-1}};$$

$$t_i = \frac{l}{v'_{(i-1)-i}} = l \frac{D_i - D_{i-1}}{q_i - q_{i-1}}.$$

Ввиду того, что в начальный момент (t_0) $D=0$, для 1-го ряда скорость v_1 можно записать в общем виде, т. е.:

$$v_1 = \frac{q_1 - q_0}{D_1 - D_0}; \quad t_1 = l \frac{D_1 - D_0}{q_1 - q_0}.$$

Поскольку разности интенсивностей движения на уровне каждого ряда равны, можно записать

$$t_i = l \delta_i \frac{D_i - D_{i-1}}{Q_p}; \quad (7.1)$$

или

$$\frac{Q_p}{l} = \frac{(D_i - D_{i-1}) \delta_i}{t_i} = \text{const.}$$

Так как Q_p и l — величины постоянные, то отношение произведения разности плотностей на ширину прохода ко времени на каждом участке прохода также величина постоянная.

Суммарное время движения потока (в мин) из первого до i -го ряда составит:

$$\Sigma t = t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_i = l \frac{D_1 - D_0}{q_1 - q_0} + l \frac{D_2 - D_1}{q_2 - q_1} +$$

$$+ l \frac{D_3 - D_2}{q_3 - q_2} + \dots + l \frac{D_i - D_{i-1}}{q_i - q_{i-1}},$$

или

$$\frac{\Sigma t}{l} = \frac{(D_1 - D_0) \delta_1}{Q_p} + \frac{(D_2 - D_1) \delta_2}{Q_p} +$$

$$+ \frac{(D_3 - D_2) \delta_3}{Q_p} + \dots + \frac{(D_i - D_{i-1}) \delta_i}{Q_p};$$

$$\frac{Q_p}{l} = \frac{\sum_1^i (\Delta D \delta)}{\Sigma t} = \text{const} = \omega. \quad (7.2)$$

Таким образом, отношение произведения суммы разностей плотностей на ширину прохода на i участках прохода к суммарному времени движения также величина постоянная. Условимся называть это отношение **коэффициентом плотности**.

Для проходов постоянной ширины, т. е. при $\delta = \text{const}$, выражение (7.2) примет вид

$$\frac{Q_p}{l \delta} = \frac{D_i}{\Sigma t} = \omega. \quad (7.3)$$

Пример. Проверим полученную закономерность, воспользовавшись данными второго примера, приведенного в § 1 гл. 7.

Во втором примере, где $m=4$, т. е. 4 ряда ($i=m=4$), по выражению (7.3):

$$\omega = \frac{D_4}{\Sigma t} = \frac{0,48}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4} = \frac{0,48}{0,24} = 2;$$

по выражению (7.2) для 4-го ряда

$$\omega = \frac{D_4 - D_3}{t_4} = \frac{[0,48 - 0,24]}{0,12} = 2;$$

для 3-го ряда

$$\omega = \frac{D_3 - D_2}{t_3} = \frac{0,24 - 0,10}{0,07} = 2;$$

для 2-го ряда

$$\omega = \frac{D_2 - D_1}{t_2} = \frac{0,10 - 0,04}{0,03} = 2,$$

т. е. значение коэффициента плотности остается постоянным и каждого участка, и для всего процесса в целом.

Одновременно, как следует из вывода формулы (7.1), разности интенсивностей движения смежных участков прохода при $\delta = \text{const}$, т. е. $q_i - q_{i-1}$, также имеют постоянное значение:

$$q_i = q_{i-1} \frac{Q_p}{\delta} = \text{const}. \quad (7.4)$$

Расчет времени движения людского потока в проходе разбивается на два этапа: определение времени движения t_x до момента стабилизации (устойчивой или относительной) и времени движения t_y от момента стабилизации до завершения процесса.

Определим t_x , воспользовавшись сделанными ранее выводами. Из выражения, предшествующего выводу формулы (7.2), следует

$$t_x = t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_i = l \left(\frac{D_1 - D_0}{q_1 - q_0} + \frac{D_2 - D_1}{q_2 - q_1} + \frac{D_3 - D_2}{q_3 - q_2} + \dots + \frac{D_i - D_{i-1}}{q_i - q_{i-1}} \right).$$

Согласно (7.4), можно написать

$$q_i - q_{i-1} = \Delta q,$$

где Δq — прирост интенсивности на каждом участке прохода.

Отсюда получим время (в мин) начала устойчивой или относительной стабилизации процесса:

$$t_x = l \frac{D_i}{\Delta q}. \quad (7.5)$$

Количество людей, m^2 , которые за время t_x , покинут проход, составляет

$$N = q_0 \delta t_1 + q_1 \delta t_2 + q_2 \delta t_3 + \dots + q_{i-1} \delta t_i.$$

Подставляя в это выражение значения $t_1, t_2, t_3, \dots, t_i$,

т. е. $t_i = l \frac{D_i - D_{i-1}}{q_i - q_{i-1}}$ после преобразования получим:

$$N_x = \frac{\delta l}{\Delta q} \left(q_{i-1} D_i - \Delta q \sum_1^{i-1} D \right). \quad (7.6)$$

Так как движение потока в дальнейшем стабилизируется, время на завершение процесса (в мин) может быть определено из условия

$$t_y = \frac{N - N_x}{Q_{\text{ср}}},$$

где N — количество людей, участвующих в движении, м²; $Q_{\text{ср}}$ — средняя пропускная способность прохода с момента стабилизации до конца процесса, м²/мин.

Преобразуя это выражение, получим

$$t_y = \frac{N}{Q_{\text{ср}}} - \frac{\delta l}{\Delta q Q_{\text{ср}}} \left(q_{i-1} D_i - \Delta q \sum_1^{i-1} D \right).$$

Общее время $t = t_x + t_y$, или

$$t = l \frac{D_i}{\Delta q} = \frac{\delta l}{\Delta q Q_{\text{ср}}} \left(q_{i-1} D_i - \Delta q \sum_1^{i-1} D \right) + \frac{N}{Q_{\text{ср}}}.$$

Заменив $Q_{\text{ср}}$ на $q_{\text{ср}} \delta$ и раскрыв скобки, получим

$$t = l \frac{D_i}{\Delta q} - \frac{l q_{i-1} D_i}{\Delta q \cdot q_{\text{ср}}} + \frac{l \sum_1^{i-1} D}{q_{\text{ср}}} + \frac{N}{q_{\text{ср}} \delta};$$

после дальнейших преобразований

$$t = \frac{l}{q_{\text{ср}}} \left[\frac{D_i}{\Delta q} (q_{\text{ср}} - q_{i-1}) + \sum_1^{i-1} D \right] + \frac{N}{q_{\text{ср}} \delta}. \quad (7.7)$$

В формуле (7.7) величина $q_{\text{ср}} \delta$, м²/мин, определяется по выражению

$$q_{\text{ср}} \delta = Q_{\text{ср}} = Q_i - \frac{Q_p \left(\sum_1^i t - t_p \right)}{l \left(\frac{D_i - D_{i-1}}{\Delta q} \right)}, \quad (7.8)$$

откуда при относительной стабилизации, наступающей в момент t_p , пользуясь закономерностью (7.3), находим

$$\omega = \frac{D_{\text{ср}}}{t_p} \quad \text{или} \quad D_{\text{ср}} = \omega t_p. \quad (7.9)$$

По полученному значению $D_{\text{ср}}$ по прил. I определяется $q_{\text{ср}}$.

Выражение (7.8) следует считать приближенным, поскольку последний промежуток времени t_8 (см. рис. 6.7.)

учитывается по $Q_{\text{ср}}$, хотя действительная пропускная способность в этот промежуток времени будет меньше или больше $Q_{\text{ср}}$.

Для определения численных значений, а также сумм плотности и времени, входящих в выражения (7.7) и (7.8), и вида стабилизации удобно пользоваться расчетом в табличной форме, как показано в нижеследующих примерах.

Пример. Возьмем данные первого примера предыдущего параграфа, т. е.:

$\delta = 2 \text{ м}; n = 12 \text{ мест}; m = 8 \text{ рядов}; l = 1 \text{ м}; L = 8 \text{ м}; N = 9,6 \text{ м}^2;$

$D_p = 0,33; v_p = 20,32 \text{ м/мин}; q_p = 6,71 \text{ м/мин}; Q_p = 4,03 \text{ м}^2/\text{мин}.$

$L_p = 6 \text{ м}; t_p = 0,29 \text{ мин}.$

Опуская вычисления, которые аналогичны первому примеру предыдущего параграфа, составим табл. 7.2.

Таблица 7.2. Расчетные данные

Ряды	Q_l	q_l	D_l	Начетная сумма D	$\frac{l}{v(t-1)}$	t	Начетная сумма t	Примечание
1	4,03	2,01	0,04	0,04	48,99	0,02	0,02	На участке 1 вместо v' принимается v_1
2	8,06	4,03	0,10	0,14	33,83	0,03	0,05	—
3	12,09	6,05	0,24	0,38	14,43	0,07	0,12	—
4	16,12	8,06	0,48	0,86	8,38	0,12	0,24	—
5	20,15	10,08	0,72	1,58	8,42	0,12	0,36	$\Sigma t > t_p =$ $= 0,29 \text{ мин}$

Из табл. 7.2. следует, что относительная стабилизация наступает в момент $t_p = 0,29$ мин с плотностью потока на выходе из прохода $D_{\text{ср}}$, определяемой по выражению (7.9).

Определим:

$$\omega = \frac{D_b}{\Sigma t} = \frac{0,72}{0,36} = 2;$$

$$D_{\text{ср}} = \omega t_p = 2 \cdot 0,29 = 0,58.$$

Отсюда

$$q_{\text{ср}} = D_{\text{ср}} v_{\text{ср}} = 0,58 \cdot 15,67 = 9,08 \text{ м/мин}.$$

По формуле (7.7)

$$t = \frac{1}{q_{\text{ср}}} \left[\frac{D_b}{\Delta q} (q_{\text{ср}} - q_4) + \sum_1^4 D \right] + \frac{N}{q_{\text{ср}} \delta} =$$

$$= \frac{1}{9,08} \left[\frac{0,72}{2,02} (9,08 - 8,06) + 0,86 \right] + \frac{9,6}{9,02} = 0,66 \text{ мин,}$$

т. е. тот же результат, что и при расчете графоаналитическим методом. Если для определения $Q_{\text{ср}}$ воспользуемся выражением (7.8), получим:

$$Q_{\text{ср}} = Q_5 - \frac{Q_p \left(\sum_1^5 t - t_p \right)}{t \left(\frac{D_5 - D_4}{\Delta q} \right)} = 20,15 - \frac{4,03 (0,36 - 0,29)}{1 \left(\frac{0,72 - 0,48}{2,02} \right)} =$$

$$= 17,82 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$q_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{ср}}}{\delta} = \frac{17,82}{2} = 8,92 \text{ м/мин.}$$

При этом t по выражению (7.7) будет равно 0,64 мин, т. е. несущественная ошибка составляет 0,02 мин, или 3%.

Пример. Примем количество рядов $m=4$, т. е. $L=4$ м и $N=4,8$ м². Все остальные данные как в предыдущем примере (см. табл. 7.2, первые четыре графы).

Стабилизация наступает в момент достижения головной частью потока конца прохода, так как $\sum t=0,24$ мин $< t_p=0,29$ мин. Следовательно, движение на выходе из прохода от момента стабилизации до конца процесса происходит с плотностью $D_{\text{ср}}=D_i=D_4=0,48$.

По формуле (7.7):

$$t = \frac{1}{q_4} \left[\frac{D_4}{\Delta q} (q_4 - q_3) + \sum_1^3 D \right] + \frac{N}{q_4 \delta} =$$

$$= \frac{1}{8,06} \left[\frac{0,48}{2,02} (8,06 - 6,05) + 0,38 \right] + \frac{4,8}{8,06 \cdot 2} = 0,40 \text{ мин,}$$

т. е. тот же результат, что и при расчете графоаналитическим методом. Выражение (7.8) в этом случае не применяется.

Следует отметить, что в формуле (7.7) первый член определяет значение времени, на которое увеличивается продолжительность процесса за счет постепенного увеличения пропускной способности на выходе из прохода. Для второго примера эта величина составляет 0,106 мин (см. рис. 6.9, б).

С достаточной степенью достоверности тот или иной вид стабилизации процесса движения людей в проходах зрелищных помещений можно устанавливать не по таблице расчетных данных, как показано в примерах, а по значению интенсивности движения. Для этого необходимо установить интенсивность движения q_m , м/мин, в кон-

це прохода с учетом потоков из всех рядов. На основании выражения (4.9):

$$q_m = \frac{Q_p m}{\delta}, \quad (7.10)$$

где m — число рядов; δ — ширина прохода, м.

Если $q_m < q_{\max}$ (для горизонтального и наклонного прохода) то стабилизация движения в проходе соответствует случаю, когда головная часть потока из наиболее удаленного ряда достигает конца прохода до момента t_p .

Если $q_m > q_{\max}$, то наступает относительная стабилизация (в момент t_p) или стабилизация при образовании скопления (см. § 3 гл. 7). При этом, если $D_{\text{ср}} < D_c$ (при скоплении), то наступает относительная стабилизация, если же $D_{\text{ср}} > D_c$, то процесс стабилизируется при скоплении на выходе из прохода. $D_{\text{ср}}$ определяется по выражению (7.9).

Пример. При $m=8$; $Q_p=4,03$ м²/мин; $\delta=2$, $\omega=2$; $t_p=0,29$ мин,

$$q_m = \frac{Q_p m}{\delta} = \frac{4,03 \cdot 8}{2} = 16,12 > q_{\max} = 10,13 \text{ м/мин.}$$

Наступает относительная стабилизация, или стабилизация при скоплении:

$$D_{\text{ср}} = \omega t_p = 2 \cdot 0,29 = 0,58 < D_c.$$

Следовательно, наступает относительная стабилизация.

При $m=4$ и одинаковых с предыдущим примером других параметров

$$q_m = \frac{Q_p m}{\delta} = \frac{4,03 \cdot 4}{2} = 8,06 < q_{\max} = 10,13 \text{ м/мин,}$$

т. е. наступает стабилизация в момент достижения головной частью потока из наиболее удаленного ряда выхода из прохода.

§ 4. Формирование и движение людских потоков в проходах зрительных залов с образованием скопления и задержки движения

Движение потока с образованием скопления людей рассмотрим на конкретном примере с одновременным построением графика движения (рис. 7.6).

Пример. Предположим, что число рядов $m=8$. Ряды расположены по одну сторону от прохода. В каждом ряду 25 мест. Следовательно, $N=8 \cdot 25 \cdot 0,1=20$ м². Движение происходит в нормальных условиях. Пол прохода горизонтальный.

Решение. Параметры движения людей в рядах определяются по таблице прил. I и составляют $D_p=0,33$; $v_p=20,32$ м/мин; $q_p=6,73$ м/мин; $Q_p=4,03$ м²/мин. Длина ряда $L_p=12,5$ м;

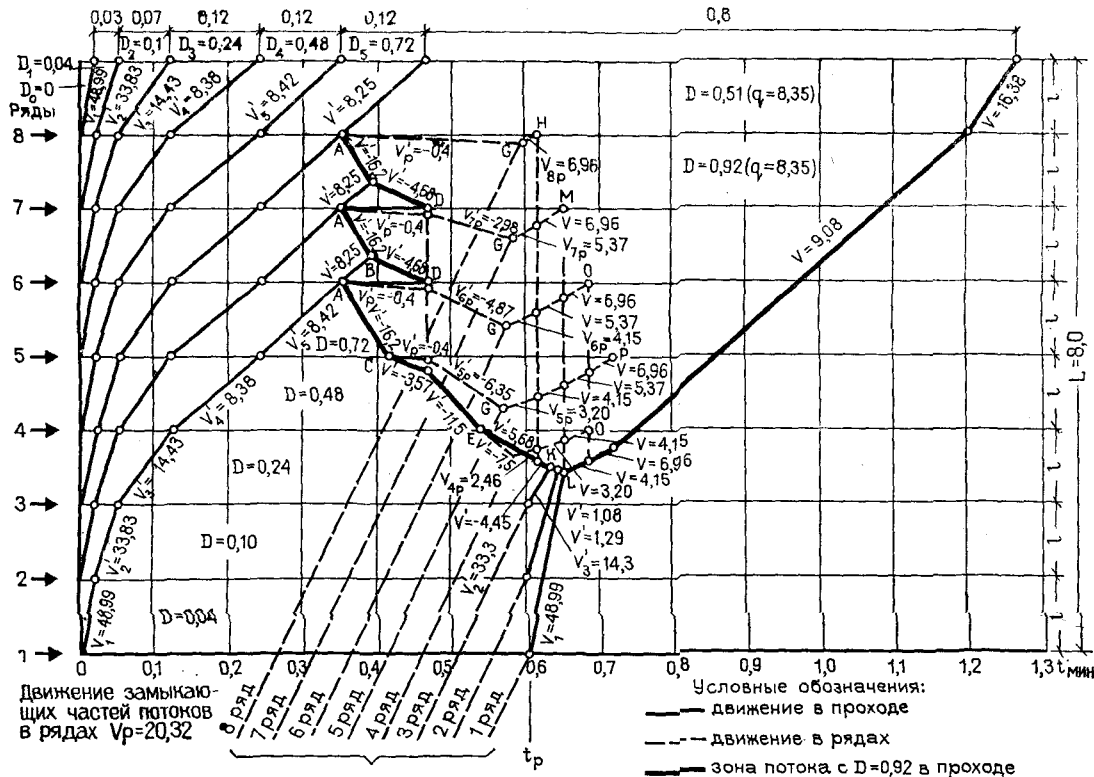


Рис. 7.6. Расчетный график движения людского потока в проходе зрелищного помещения при образовании скопления

$$t_p = \frac{L_p}{v_p} = \frac{12,5}{20,32} = 0,6 \text{ мин.}$$

Ширина поперечного прохода $\delta = 2$ м; расстояние между рядами $l = 1$ м.

Условия настоящего примера отличаются от условий первого примера в § 2 только числом мест в рядах и участвующих в движении людей. Следовательно, начало движения будет проходить одинаково. Тогда:

$$q_1 = 2,01 \text{ м/мин}; D_1 = 0,04; v_1 = 48,99 \text{ м/мин}; t_1 = 0,02 \text{ мин};$$

$$q_2 = 4,03 \text{ м/мин}; D_2 = 0,1; v_2 = 39,27 \text{ м/мин}; v_2' = 33,83 \text{ м/мин};$$

$$t_2 = 0,03 \text{ мин};$$

$$q_3 = 6,05 \text{ м/мин}; D_3 = 0,24; v_3 = 25,04 \text{ м/мин}; v_3' = 14,43 \text{ м/мин};$$

$$t_3 = 0,07 \text{ мин};$$

$$q_4 = 8,06 \text{ м/мин}; D_4 = 0,48; v_4 = 16,76 \text{ м/мин}; v_4' = 8,38 \text{ м/мин};$$

$$t_4 = 0,12 \text{ мин};$$

$$q_5 = 10,08 \text{ м/мин}; D_5 = 0,72; v_5 = 12,02 \text{ м/мин}; v_5' = 8,42 \text{ м/мин};$$

$$t_5 = 0,12 \text{ мин.}$$

На участке после 6-го ряда

$$q_6 = \frac{6 Q_p}{\delta} = \frac{6 \cdot 4,03}{2} = 12,09 > q_{\text{макс}}.$$

Далее образуется скопление людей в проходе перед 6-м рядом. Примем плотность скопления $D_c = 0,92$; $q = 8,35$ м/мин. То же самое произойдет на участках после 7-го и 8-го рядов. При этом скопление образуется как в проходе, так и в рядах (см. § 6 гл. 5).

С момента образования D_c и скопления (точка А на графике рис. 7.6) поток в проходе после рядов 6, 7 и 8 будет двигаться с $q = 8,35$ м/мин, соответствующей $D_c = 0,92$. Однако в силу разуплотнения (см. § 2 гл. 5) установится плотность $D = 0,51$, также соответствующая $q = 8,35$ м/мин. Тогда части потока с плотностями 0,7 и 0,51 начнут переформировываться, и скорость составит:

$$v' = \frac{q_6 - q}{D_6 - D} = \frac{10,08 - 8,35}{0,72 - 0,51} = 8,25 \text{ м/мин.}$$

Скопление людей происходит одновременно в проходе и в рядах. Для определения его скорости необходимо установить долю участия сливающихся людских потоков в образовании максимальной плотности (см. § 6 гл. 5).

Согласно выражению (5.16), участие каждого потока из рядов 8—6 составляет

$$\gamma_p = \frac{\delta_p}{\Sigma \delta} = \frac{0,6}{2,6} = 0,23;$$

доля участия потока в проходе в формировании максимальной плотности

$$\gamma = \frac{\delta}{\Sigma \delta} = \frac{2}{2,6} = 0,77$$

($\Sigma \delta$ — сумма ширины прохода и ряда).

Иначе говоря, поток из ряда займет часть ширины прохода, равную

$$\Delta \delta_p = \delta \gamma_p = 2 \cdot 0,23 = 0,46 \text{ м,}$$

а на долю потока,двигающегося в проходе, останется

$$\Delta \delta = \delta \gamma = 2 \cdot 0,77 = 1,54 \text{ м,}$$

следовательно, скорость скопления людей в 8, 7 и 6-м рядах (переформирование частей потоков плотностью 0,92 и 0,33), в соответствии с выражением (5.8), составит

$$v'_p = \frac{q \frac{\Delta \delta_p}{\delta} - q_p}{D_c - D_p} = \frac{8,35 \frac{0,46}{0,6} - 6,71}{0,92 - 0,33} = -0,4 \text{ м/мин}$$

(на графике она нанесена пунктирными линиями из точек А).

Скорость скопления людей в проходе на участках между 8-м и 7-м, 7-м и 6-м, 6-м и 5-м рядами будет

$$v' = \frac{q \frac{\Delta \delta}{\delta} - q_5}{D_c - D_5} = \frac{8,35 \frac{1,54}{2} - 10,08}{0,92 - 0,72} = -16,2 \text{ м/мин.}$$

На рис. 7.6 показан момент переформирования частей потока с плотностью 0,92 и 0,51 и одинаковой интенсивностью движения. С учетом того, что часть потока плотностью 0,92 движется не через полное сечение прохода, скорость переформирования составит

$$v' = \frac{q \frac{\Delta \delta}{\delta} - q}{D_c - D} = \frac{8,35 \frac{1,54}{2} - 8,35}{0,92 - 0,51} = -4,68 \text{ м/мин.}$$

В точке С граница скопления, образовавшегося у 6-го ряда, достигнет 5-го ряда, где также начнется скопление людей, которое будет происходить со скоростью $v'_p = -0,4$ м/мин. В проходе люди будут скапливаться с меньшей скоростью, чем раньше, поскольку плотность на участке между 4-м и 5-м рядами составляет $D_4 = 0,48 < D_5$:

$$v' = \frac{q \frac{\Delta \delta}{\delta} - q_4}{D_c - D_4} = \frac{8,35 \frac{1,54}{2} - 8,06}{0,92 - 0,48} = -3,57 \text{ м/мин.}$$

В точках D границы скоплений у 8-го и 7-го рядов достигнут соответственно 7-го и 6-го рядов. Следовательно, проход от 8-го до 5-го ряда и даже несколько дальше окажется заполненным людьми; Плотность потока составит $D_c = 0,92$.

Если движение потока из 8-го ряда и в проходе на уровне 8-го ряда будет происходить по-прежнему, то в 7, 6 и 5-м рядах и в

проходе на уровне 5-го ряда в момент образования D_c изменятся параметры движения.

На участке прохода между 8-м и 7-м рядами, поскольку ширина пути ограничена величиной $\Delta\delta = 1,54$ м, пропускная способность потока составит

$$Q_{7-8} = q\delta \frac{\Delta\delta}{\delta} = 8,35 \cdot 2 \frac{1,54}{2} = 12,9 \text{ м}^2/\text{мин.}$$

Следовательно, интенсивность движения будет не 8,35 м/мин, а

$$q_{7-8} = \frac{Q_{7-8}}{\delta} = 6,45 \text{ м/мин, или } q_{7-8} = \frac{\Delta\delta}{\delta} = 8,35 \frac{1,54}{2} = 6,45 \text{ м/мин.}$$

Ввиду того, что пополнение объединенного потока в проходе продолжается, несмотря на высокую плотность, интенсивность движения на участке прохода между 7-м и 6-м рядами окажется еще меньше, что обуславливается пропускной способностью участка между 8-м и 7-м рядами:

$$q_{6-7} = q_{7-8} \frac{\Delta\delta}{\delta} = 6,45 \frac{1,54}{2} = 4,95 \text{ м/мин.}$$

И таким же образом дальше:

$$q_{5-6} = q_{6-7} \frac{\Delta\delta}{\delta} = 4,95 \frac{1,54}{2} = 3,82 \text{ м/мин;}$$

$$q_{4-5} = q_{5-6} \frac{\Delta\delta}{\delta} = 3,82 \frac{1,54}{2} = 2,94 \text{ м/мин.}$$

Зная q_{4-5} , определим скорость скопления людей в проходе на участке между 4-м и 5-м рядами с момента образования D_c .

$$v' = \frac{q_{4-5} - q_4}{D_c - D_4} = \frac{2,95 - 8,06}{0,92 - 0,48} = -11,5 \text{ м/мин.}$$

В момент D_c скорость образования скопления в рядах возрастет, поскольку при заполнении прохода людьми выход в него замедляется.

Далее определим пропускную способность потока 7-го ряда после наступления момента D_c . Поток 7-го ряда пополняет поток в проходе между 7-м и 8-м рядами, который имеет $Q_{7-8} = 12,9 \text{ м}^2/\text{мин}$, следовательно:

$$Q_{7p} = Q_{7-8} \frac{\Delta\delta_p}{\delta} = 12,9 \frac{0,46}{2} = 2,97 \text{ м}^2/\text{мин;}$$

$$q_{7p} = \frac{Q_{7p}}{\delta} = \frac{2,97}{0,6} = 4,95 \text{ м/мин.}$$

Оказывается, что $q_{7p} = q_{6-7} = 4,95 \text{ м/мин}$. Это означает, что на уровне 7-го ряда слияние двух потоков плотностью $D_c = 0,92$ происходит с одинаковой интенсивностью движения. Следовательно:

$$q_{6p} = q_{5-6} = 3,82 \text{ м/мин; } q_{5p} = q_{4-5} = 2,94 \text{ м/мин.}$$

Определим скорость скопления людей в рядах с момента наступления D_c и нанесем ее на график:

$$v'_{7p} = \frac{q_{7p} - q_p}{D_c - D_p} = \frac{4,95 - 6,71}{0,92 - 0,33} = -2,98 \text{ м/мин};$$

$$v'_{6p} = \frac{q_{6p} - q_p}{D_c - D_p} = \frac{3,82 - 6,71}{0,92 - 0,33} = -4,87 \text{ м/мин};$$

$$v'_5 = \frac{q_{5p} - q_p}{D_c - D_p} = \frac{2,94 - 6,71}{0,92 - 0,33} = -6,35 \text{ м/мин}.$$

В точке E скопление людей в проходе распространится до 4-го ряда и скорость его снова изменится:

$$q_{3-4} = q_{4-5} \frac{\Delta \delta}{\delta} = 2,94 \frac{1,54}{2} = 2,26 \text{ м/мин};$$

$$v' = \frac{q_{3-4} - q_3}{D_c - D_3} = \frac{2,26 - 6,05}{0,92 - 0,24} = -5,68 \text{ м/мин}.$$

В этот же момент E начнется скопление людей в 4-м ряду:

$$q_{4p} = q_{3-4} = 2,26 \text{ м/мин};$$

$$v'_{4p} = \frac{q_{4p} - q_p}{D_c - D_p} = \frac{2,26 - 6,71}{0,92 - 0,33} = -7,50 \text{ м/мин}.$$

На рис. 7.6 пунктирными линиями (выходящими за нижнюю границу графика) показано движение замыкающих частей потоков в рядах со скоростью $v_p = 20,32$ м/мин. В точках G они пересекаются с линиями движения границ скопления в каждом ряду. Следовательно, в эти моменты в рядах 8, 7, 6, 5 и 4 скопление людей прекращается и начинается его рассасывание.

Скорость рассасывания определяется по выражению (5.9), с учетом доли участия каждого потока из ряда в движении по проходу:

$$v_{8p} = v \frac{\Delta \delta_p}{\delta} = 9,08 \frac{0,46}{0,6} = 6,96 \text{ м/мин};$$

где v — скорость, соответствующая плотности $D_c = 0,92$.

Поскольку для потока из остальных рядов установлена интенсивность движения, то для определения v_p , м/мин, можно воспользоваться выражением $v_p = \frac{q_p}{D_c}$.

Тогда:

$$v_{7p} = \frac{q_{7p}}{D_c} = \frac{4,95}{0,92} = 5,37 \text{ м/мин};$$

$$v_{6p} = \frac{q_{6p}}{D_c} = \frac{3,82}{0,92} = 4,15 \text{ м/мин};$$

$$v_{5p} = \frac{q_{5p}}{D_c} = \frac{2,94}{0,92} = 3,2 \text{ м/мин};$$

$$v_{4p} = \frac{q_{4p}}{D_c} = \frac{2,26}{0,92} = 2,46 \text{ м/мин.}$$

По найденным значениям скоростей наносим на график линии движения людских потоков.

В момент H , когда все зрители выйдут из ряда 8 в проход, сюда начнет двигаться поток с участка между 7-м и 8-м рядами. При плотности $D_c = 0,92$ скорость потока достигнет $v = 9,08$ м/мин. Это скажется и на параметрах движения в остальных рядах, и в проходе. Поскольку на уровне 8-го ряда людской поток в проходе идет по всей его ширине, то в 7-м ряду с момента H скорость повысится и станет равной скорости, которая была в 8-м ряду, т. е. $v_{7p} = 6,96$ м/мин. Аналогично на одну ступень возрастут скорости рассасывания скоплений людей в 6, 5 и 4-м рядах (они нанесены на график). В момент H уменьшится и скорость движения границы скопления людей на участке между 3-м и 4-м рядами. В проходе интенсивность движения потока плотностью $D_c = 0,92$:

$$q_{3-4} = q_{4-5} = 2,94 \text{ м/мин.}$$

Тогда

$$v' = \frac{q_{3-4} - q_3}{D_c - D_3} = \frac{2,94 - 6,05}{0,92 - 0,24} = -4,45 \text{ м/мин.}$$

В точке K замыкающая часть потока из 3-го ряда достигнет границы скопления, скорость ее движения снова изменится и составит

$$v' = \frac{q_{4-5} - q_2}{D_c - D_2} = \frac{2,94 - 4,03}{0,92 - 0,1} = -1,29 \text{ м/мин.}$$

Аналогичное явление произойдет в точке L :

$$v' = \frac{q_{4-5} - q_1}{D_c - D_1} = \frac{2,94 - 2}{0,92 - 0,04} = 1,08 \text{ м/мин.}$$

В точке L , как видно из соотношений скоростей, начинается рассасывание скопления людей в проходе.

В точке M заканчивается выход в проход всего потока из 7-го ряда. На дальнейший ход движения это влияет так же, как и при завершении процесса в 8-м ряду, т. е. скорость рассасывания скоплений в 6, 5 и 4-м рядах возрастет еще на одну ступень.

С моментом M совпадает время подхода замыкающей части потока 1-го ряда к границе скопления в проходе. В связи с завершением выхода людей из 7-го ряда интенсивность движения потока в проходе на участке между 3-м и 4-м рядами возросла еще на одну ступень и составила

$$q_{3-4} = q_{5-6} = 3,82 \text{ м/мин.}$$

Так как пополнение скопления людей в проходе закончилось, скорость их движения будет

$$v = \frac{q_{3-4}}{D_c} = \frac{3,82}{0,92} = 4,15 \text{ м/мин,}$$

т. е. равна скорости выхода потока из 4-го ряда,

В момент O завершится выход в проход потоков из 4-го и 6-го рядов. Следовательно, скорость выхода потока из 5-го ряда возрастет до $v_{5p} = 6,96$ м/мин. Соответственно скорость движения потока в проходе возрастет на две ступени и также составит $v = 6,96$ м/мин.

В момент P закончится выход людей из 5-го ряда и движение потока в проходе до конца будет иметь постоянную плотность $D_c = 0,92$ и скорость $v = 9,08$ м/мин. После 8-го ряда возможно уплотнение потока. Общее время движения составляет 1,27 мин.

Проверка расчета по количеству людей дает $19,58 \text{ м}^2 < 20 \text{ м}^2$, ошибка составляет 0,42 м^2 , или 2%, что можно считать допустимым.

Как следует из примера, расчет максимальной плотности, образовавшейся в результате одновременного слияния нескольких людских потоков в проходах зрительных залов, несложен, но он требует навыка, большой внимательности и значительного времени. Результаты расчета близки к наблюдаемым в натуре. Например, из расчета следует, что по мере удаления от выхода из прохода величина скопления в рядах увеличивается (см. рис. 7.6, точки G). Аналогичная картина наблюдается в натуре.

Из рассмотренного примера можно сделать вывод: движение людского потока высокой плотности происходит со скоростями ниже средних (прил. I), если процесс сопровождается слиянием потоков. Следовательно, в этих случаях, поскольку движение происходит при постоянной плотности, меняется интенсивность движения.

Применительно к проходам зрительных залов изменение q , м/мин, подчиняется следующей закономерности:

$$q_i = q \left(\frac{\delta}{\delta + \delta_p} \right)^{i-1}, \quad (7.11)$$

где q — интенсивность движения, м/мин, соответствующая D_c для данного вида пути; δ — ширина прохода, м; δ_p — ширина ряда, м (обычно 0,6 м); i — число, соответствующее порядковому номеру участка прохода (считая от выхода), для которого отыскивается интенсивность движения.

Выражение (7.11) можно представить в виде

$$v_i = \frac{q}{D_{\text{макс}}} \left(\frac{\delta}{\delta + \delta_p} \right)^{i-1} \quad (7.12)$$

и таким образом определить искомую скорость в м/мин.

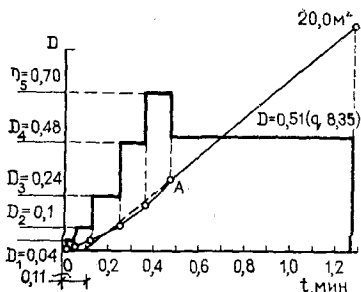
Например, необходимо для рассмотренной выше задачи определить скорость движения потока в проходе между 5-м и 6-м рядами в момент t_p :

$$v_{5-6} = \frac{q}{D_{\text{макс}}} \left(\frac{\delta}{\delta + \delta_p} \right)^{i-1} = \frac{8,35}{0,92} \left(\frac{2}{2 + 0,6} \right)^3 = 4,15 \text{ м/мин.}$$

Эта скорость отвечает $q_{5-6} = v_{5-6} D_c = 3,82$ м/мин.

На рис. 7.7 показано изменение плотности и пропускной способности на выходе из прохода.

Рис. 7.7. Изменение плотности потока и пропускной способности прохода при скоплении людей



В точке *A* имеется характерный перелом, которого не было при движении без скопления людей (см. рис. 7.3 и 7.5). Он вызван тем, что при достижении максимальной плотности пропускная способность прохода падает; в данном случае она ниже, чем при $D=0,72$.

Следует отметить, что нарастание плотности по линейному закону справедливо лишь до q_{\max} , поскольку расчетная интенсивность $q > q_{\max}$ и плотность скачком достигает максимальной величины.

Закономерности слияния и переформирования людского потока в проходе при максимальной плотности значительно сложнее, чем в случаях, приведенных в § 3 гл. 7. Однако основная закономерность сохраняется. Процесс также четко расчленяется на два этапа: период до начала стабилизации, когда плотность потока при выходе из прохода переменная, и стабилизация, наступающая в этом случае при D_c или другой плотности, при которой q имеет такое же значение, как при D_c .

Следовательно, время процесса может быть определено аналитически по выражению (7.7), минуя кропотливую работу, связанную с построением графика.

Пример. Используем данные предыдущего примера: $\delta=2$ м; длина прохода 8 м; $n=25$; $m=8$; $N=20$ м²; Параметры движения в рядах: $D_p=0,33$; $v_p=20,32$ м/мин; $q_p=6,71$ м/мин; $Q_p=4,03$ м²/мин; $t_p=0,60$ мин. Опуская вычисления, так как они приведены в ранее рассмотренном примере (табл. 7.2), дополняем ее данными для 6-го ряда: $Q_i=24,18$; $q_i=12,09(8,35)$; $D_i=0,92(0,51)$; начетная сумма $D=2,50$; $v'_{(i-1)-i}=8,25$; $t=0,12$; начетная сумма $t=0,48$. При этом следует учесть, что $q_i=12,09 > q_{\max}=10,13$ м/мин — скопление людей в проходе на уровне 6-го ряда.

Ввиду того, что в проходе на уровне 6-го ряда и выше q_i больше q_{\max} , скопление людей образуется в проходе и в 6, 7 и 8-м рядах. Этот же вывод может быть получен следующим путем. Определим q_m :

$$q_m = \frac{Q_p m}{2} = \frac{4,03 \cdot 8}{2} = 16,12 > q_{\max} = 10,13 \text{ м/мин.}$$

Наступает относительная стабилизация или стабилизация при скоплении. Поскольку, как получено ранее, $\omega = 2$, имеем

$$D_{\text{ср}} = \omega t_p = 2 \cdot 0,6 = 1,20 > D_{\text{с}}.$$

Для определения общего времени движения людского потока по проходу воспользуемся формулой (7.7):

$$t = \frac{l}{q_{\text{ср}}} \left[\frac{D_l}{\Delta q} (q_{\text{ср}} - q_{l-1}) + \sum_1^{l-1} D \right] + \frac{N}{q_{\text{ср}} \delta} =$$

$$= \frac{1}{8,35} \left[\frac{0,92}{2,02} (8,35 - 10,08) + 1,58 \right] + \frac{20}{8,35 \cdot 2} = 1,32 \text{ мин.}$$

Время окончания движения, полученное графоаналитическим методом, оказалось равным $1,27 \sim 1,32$ мин.

§ 5. Приближенные формулы для определения времени движения в проходах зрительных залов

Формула (7.7) для расчета продолжительности слияния любого числа однородных по своим характеристикам потоков в проходах зрелищных помещений дает вполне правильное решение и во много раз уменьшает трудоемкость расчетов по сравнению с графоаналитическим способом. Это хорошо видно на примере расчета (в § 4 гл. 7), выполненного графоаналитическим методом (см. рис. 7.6) и того же расчета, произведенного по формуле (7.7). Однако пользование ею требует отчетливого понимания как самого процесса, происходящего в рассчитываемом участке, так и механизма взаимодействия параметров, определяющих этот процесс.

Для дальнейшего упрощения расчета разработаны две приближенные эмпирические формулы, сущность и способ пользования которыми приводятся ниже. Степень их точности вполне удовлетворяет требования практики.

Основой для разработки первой эмпирической формулы послужила однотипность процессов и, следовательно,

графиков, получающихся при расчете слияния потоков графоаналитическим способом. Внешние контуры таких графиков во всех случаях имеют вид, показанный на рис. 7.8.

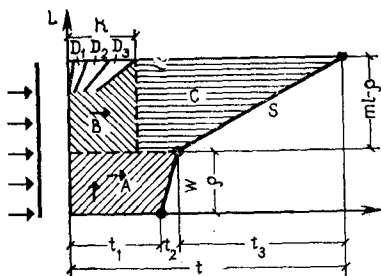


Рис. 7.8. Принципиальная схема расчетного графика

Этот график имеет три зоны: *A* — нарастание плотностей происходит по длине прохода и во времени (см. стрелки); *B* — увеличение плотностей главным образом во времени; *C* — стабилизация плотности (для данного случая).

Длительность процесса t , мин, может быть разбита на три последовательных периода: t_1 , t_2 и t_3 , таким образом (см. рис. 7.8):

$$t = t_1 + t_2 + t_3.$$

Первый период t_1 выражает продолжительность выхода людей из ряда в проход: $t_1 = t_p$. Для нормальных условий движения при $f = 0,1$ он равен, мин:

$$t_1 = \frac{0,5n}{v_p} = \frac{0,5n}{20,32} = 0,0246n,$$

где n — число мест в одном ряду; 0,5 — ширина кресла, м; v_p — скорость движения потока в ряду, равная 20,32 м/мин.

Второй период t_2 представляет собой время движения (в мин) по магистральному проходу замыкающей части потока из 1-го ряда:

$$t_2 = \frac{\rho}{\omega},$$

где ρ — длина магистрального прохода от 1-го ряда до начала зоны *C* стабилизации плотности, м; ω — средняя скорость движения замыкающей части объединенного потока до начала зоны *C* стабилизации плотности, м/мин.

Третий период t_3 равен остальному времени (до конца процесса) и обозначает продолжительность движения (в мин) замыкающей части потока в зоне *C* стабилизации плотности. Он равен:

$$t_3 = \frac{ml - \rho}{S},$$

где m — число рядов; l — ширина ряда, м; ml — рассчитываемая длина магистрального прохода, м; S — скорость движения замыкающей части потока в пределах зоны *C* от t_2 до конца процесса, м/мин.

Для нормальных условий движения по горизонтальному пути в магистральном проходе формула имеет вид:

$$t = t_1 + t_2 + t_3 = 0,0246n + \frac{\rho}{\omega} + \frac{ml - \rho}{S}.$$

Чтобы эту формулу можно было применять для расчета любого вида пути в магистральном проходе (горизонтальный, спуск или подъем по лестнице), а также для нормального и аварийного режимов движения, в нее

введены коэффициенты, учитывающие влияние указанных факторов. Окончательно формула приобретает вид:

Для $ml > \rho$

$$t = a \left[k + \theta \left(0,0246n - k + \frac{\rho}{\omega} + \frac{ml - \rho}{S} \right) \right]; \quad (7.13)$$

для $ml < \rho$

$$t = a \left[k + \theta \left(0,0246n - k + \frac{ml}{\omega} \right) \right]. \quad (7.14)$$

В этих формулах

a — коэффициент, учитывающий режим движения (нормальный, аварийный); θ — коэффициент, учитывающий вид пути в проходе (горизонтальный, спуск и подъем по лестнице); k — продолжительность роста плотности от $t=0$, когда в проходе $D=0$, то $t=k$, когда D стабилизируется.

Период $t=k$, когда на выходе из прохода плотность остается стабильной, выделен в формуле отдельно (см. рис. 7.8), потому что значения коэффициента θ подобраны применительно к стабильным плотностям, тогда как период k имеет иную характеристику плотностей потока.

Значения коэффициентов a и θ , зависящие от числа мест в ряду, получены из расчетных таблиц (см. прил. I) путем сопоставлений скоростей движения по наклонным путям со скоростями горизонтального движения в аварийных и нормальных условиях.

Величины ρ , ω и S , зависящие от δ (ширины прохода) или одновременно от n и δ , получены в результате решения графоаналитическим методом большого числа вариантов задач по движению людских потоков в проходах зрелищных помещений, причем широко варьировались число мест в ряду и ширина магистрального прохода. Числовые значения указанных величин приводятся в табл. 7.1 и 7.2. Промежуточные величины находятся интерполированием. Для нормальных условий движения коэффициент $a=1$. В аварийных условиях значения a могут быть приняты равными 0,74; 0,8; 0,82 и 0,86 соответственно для 5; 10; 15; 20 и 25 мест в ряду. Наибольшее влияние на результат расчета оказывает величина S .

Рассмотрим несколько примеров расчета и их результаты сравним с точными решениями.

Пример. Рассчитать длительность процесса для условий задачи, приведенной в § 2 и 3 гл. 7. Исходные данные: $m=8$; $n=12$; $l=1$ м; $\delta=2$ м; путь в проходе горизонтальный, режим движения нормальный.

Решение. Сначала выясняем, какой из двух формул — (7.13) или (7.14) следует в данном случае пользоваться.

$$ml = 8 \cdot 1 = 8 > \rho = 3,7.$$

Следовательно, рассчитывать необходимо по формуле (7.13).

Подставляем в нее значения коэффициентов, взятые из табл. 3 и 7.4:

Таблица 7.3. Расчетные коэффициенты ρ , ω , k , S

Расчетный параметр	Число мест в ряду	Ширина ряда $l=0,8$ м					Ширина ряда $l=1$ м				
		Ширина прохода δ , м									
		2,2	1,8	1,4	1	0,6	2,2	1,8	1,4	1	0,6
ρ	Любое	2,93	2,45	1,92	1,4	0,9	4,05	3,31	2,6	1,88	1,15
ω	»	53,8	51,3	46,4	36,5	20	51	48,8	46,7	40	20
k	»	0,26	0,2	0,15	0,1	0,34	0,32	0,26	0,18	0,12	0,42
S	5	20,8	18,9	16	12,3	7	26,6	23,9	20,8	16,2	8
	10	14,8	12,7	10	6,9	3,7	17,1	14,35	11,5	8,2	4,2
	15	10,5	8,5	6,6	4,65	2,67	13,25	10,6	7,9	5,45	3,15
	20	8,75	6,45	4,7	4,32	2,15	6,6	7,75	5,8	4,1	2,5
	25	7,2	5	3,43	2,45	1,65	7,9	6,15	4,55	3,2	1,9

Таблица 7.4. Коэффициент θ , характеризующий состояние пути

Характер пути в проходе	Число мест в ряду n				
	5	10	15	20	25
Горизонтальный и пандус	1	1	1	1	1
Спуск по лестнице:					
$l=1$	0,9	1,51	2,1	2,2	2,1
$l=0,8$	0,94	1,7	2,06	2,2	2,18
Подъем по лестнице	1,3	1,27	1,42	1,43	1,43

$$t = 1 \left[0,29 + 1 \left(0,0246 \cdot 12 - 0,29 + \frac{3,7}{50} + \frac{8 \cdot 1 - 3,7}{14,25} \right) \right] = 0,674 \text{ мин.}$$

По формуле (7.7) было получено $t=0,66$ мин. Отклонение составляет 2,3%, или ~ 1 с — разница ничтожна.

Пример. Для условий задачи, рассмотренной в § 3 гл. 7, также рассчитать время завершения процесса. Начальные данные: $m=8$; $n=25$; $\delta=2$; $l=1$. Режим движения нормальный, путь в проходе горизонтальный.

Решение. Проверяем: $ml=8 \cdot 1=8 > \rho=3,7$. Для расчета необходима формула (7.13):

$$t = 1 \left[0,29 + 1 \left(0,0246 \cdot 25 - 0,29 + \frac{3,7}{50} + \frac{8 \cdot 1 - 3,7}{7,05} \right) \right] = 1,291 \text{ мин.}$$

По формуле (7.7) было получено $t=1,32$ мин. Несовпадение составляет 2,2%, или 0,03 мин, разница также незначительна.

Тот же пример рассчитать для аварийных условий и случая, когда магистральным проходом является лестница (спуск). Задача решается по формуле (7.13):

$$t = 0,86 \left[0,29 + 2,18 \left(0,0246 \cdot 25 - 0,29 + \frac{3,7}{50} + \frac{8 \cdot 1 - 3,7}{7,05} \right) \right] = 2,12 \text{ мин.}$$

Вторая формула для приближенного расчета времени формирования и движения людского потока в проходах зрелищных помещений получена на основании обработки первого члена выражения (7.7), который показывает увеличение продолжительности процесса (в мин) в результате постепенного увеличения пропускной способности на выходе из прохода от начала процесса ($t=0$) до момента стабилизации:

$$t = \frac{nmf}{q_{\text{ср}} \delta} + \frac{l D_1}{q_1} \frac{(k+1)(2k+1)}{6}, \quad (7.15)$$

где $nmf=N$, m^2 — общее количество людей,двигающихся по проходу (n и m — число мест и число рядов; f — площадь горизонтальной проекции человека, m^2); $q_{\text{ср}}$ — интенсивность движения на выходе из прохода после момента стабилизации, м/мин; $q_{\text{ср}}$ — принимается равной (см. § 3 гл. 7); $q_{\text{ср}} = \frac{Q_p m}{\delta}$ м/мин, если она меньше

$q_{\text{макс}}$; $q_{\text{ср}}$ равна интенсивности движения при $D_{\text{ср}}$, если она больше $q_{\text{макс}}$, а $D_{\text{ср}} < D_c$ (при скоплении);

$$D_{\text{ср}} = \omega \cdot t_p = \frac{Q}{l \delta} t_p \text{ [см. (7.2) и (7.9)];}$$

$q_{\text{ср}}$ равна интенсивности движения при плотности скопления D_c , если она больше $q_{\text{макс}}$ и $D_{\text{ср}} > D_c$; δ — ширина прохода, м; l — расстояние между рядами, м; $q_1 = \frac{Q_p}{\delta}$ — интенсивность движения в проходе на уровне первого ряда, м/мин; Q_p — пропускная способность людского потока в ряду; D_1 — плотность людского потока, соответствующая q_1 ; k — коэффициент — целая часть от деления $\frac{q_{\text{ср}}}{q_1}$

Формула (7.3) несколько проще выражения (7.7), но дает небольшое отклонение от точного значения t .

Определим по выражению (7.3) время формирования и движения людских потоков, воспользовавшись данными трех примеров расчета, приведенных в § 2—4 гл. 7.

Для всех трех примеров: $\delta=2$ м; $l=1$ м; $f=0,1$ м²; $D_p=0,33$; $v_p=20,32$ м/мин; $q_p=6,71$ м/мин; $Q_p=4,03$ м/мин.

Интенсивность движения в проходе на уровне первого наиболее удаленного ряда:

$$q_1 = \frac{Q_p}{\delta} = \frac{4,03}{2} = 2,01 \text{ м/мин}; D_1 = 0,04.$$

Пример 1: $m=8$; $n=12$; $t_p = \frac{n \cdot 0,5}{v_p} \cdot \frac{12 \cdot 0,5}{20,32} = 0,29$ мин.

Определим по выражению (7.10) $q_m = \frac{Q_p m}{\delta} = \frac{4,03 \cdot 8}{2} = 16,12 \text{ м/мин} > q_{\text{макс}}$;

Следовательно, движение происходит или при относительной стабилизации, или при скоплении людей. Найдем

$$D_{\text{ср}} = \frac{Q_p}{l \delta} t_p = \frac{4,03}{2} \cdot 0,29 = 0,58 < D_c.$$

Следовательно, движение происходит при относительной стабилизации при $D_{\text{ср}}=0,58$; $q_{\text{ср}}=9,09$ м/мин. Тогда

$$t = \frac{n m f}{q_{\text{ср}} \delta} + \frac{l D_1}{q_1} \frac{(k+1)(2k+1)}{6} =$$

$$= \frac{12 \cdot 8 \cdot 0,1}{9,09 \cdot 2} + \frac{1 \cdot 0,04}{2,01} \frac{(4+1)(8+1)}{6} = 0,68 \cong 0,66 \text{ мин},$$

где $k = \frac{q_{\text{ср}}}{q_1} = \frac{9,09}{2,01} = 4.$

Пример 2. $m=4$; $n=12$; $t_p=0,29$ мин;

$$q_m = \frac{Q_p m}{\delta} = \frac{4,03 \cdot 4}{2} = 8,06 \text{ м/мин} < q_{\text{макс}}.$$

Движение происходит при устойчивой стабилизации, т. е. $q_m = q_{\text{ср}}$:

$$t = \frac{n m f}{q_{\text{ср}} \delta} + \frac{l D_1}{q_1} \frac{(k+1)(2k+1)}{6} =$$

$$= \frac{12 \cdot 4 \cdot 0,1}{9,09 \cdot 2} + \frac{1 \cdot 0,04}{2,01} \frac{(4+1)(8+1)}{6} = 0,41 \cong 0,40 \text{ мин}.$$

Пример 3. $m=8$; $n=25$; $t_p = \frac{n \cdot 0,5}{v_p} = \frac{25 \cdot 0,5}{20,32} \cong 0,6$;

$$q_m = \frac{Q_p m}{\delta} = \frac{4,03}{2} = 50,5 \text{ м/мин} > q_{\text{макс}};$$

$$D_{\text{ср}} = \frac{Q_p}{\delta} t_p = \frac{4,03}{2} \cdot 0,6 = 1,25 > D_c = 0,92.$$

Следовательно, движение происходит при скоплении людей в проходе при $D_{\text{ср}}=0,92$; $q_{\text{ср}}=8,35$ м/мин; $k=\frac{q_{\text{ср}}}{q_1}=\frac{8,35}{2,01}=4$;

$$t = \frac{n m f}{q_{\text{ср}} \delta} + \frac{l D_1}{q_1} \frac{(k+1)(2k+1)}{6} =$$

$$= \frac{25 \cdot 8 \cdot 0,1}{8,35 \cdot 2} + \frac{1 \cdot 0,04 (4+1)(8+1)}{2,01 \cdot 6} = 1,35 \text{ мин} \cong 1,32 \text{ мин.}$$

Результаты расчета по выражению (7.15) достаточно близки к результатам, полученным графоаналитическим методом и по формуле (7.7).

§ 6. Людские потоки в проходах переменной ширины зрелищных помещений и определение времени движения

Распространенные в практике проектирования зрелищных помещений поперечные проходы постоянной ширины между рядами мест для зрителей являются далеко не лучшим решением задачи сокращения времени движения и обеспечения его комфортности.

Действительно, чтобы избежать скопления людей и задержки движения в проходе, ширину его необходимо доводить до величины $\delta^{\text{тр}}$ (см. § 5 гл. 5). При этом в проходе постоянной ширины его удаленные от выхода части окажутся загруженными недостаточно (людской поток имеет малые плотности; рис. 7.9). В результате нерационально используется площадь зрелищного помещения, занимаемая избыточными по ширине проходами.

Чтобы подтвердить сказанное, рассмотрим результаты расчета обычным графоаналитическим методом элементарного примера определения времени и характера движения в поперечном проходе, объединяющем 8 рядов по 12 мест в каждом. Примем проход расширяющимся от 0,6 м (на уровне наиболее удаленного ряда) до 3,4 м на выходе. Таким образом, площадь, занимаемая проходом, составляет 16 м² (при ширине ряда 1 м).

В § 2 гл. 7 был приведен пример расчета времени и характера движения в поперечном проходе постоянной ширины ($\delta=2$ м) при том же числе рядов ($m=8$) и мест ($n=12$), т. е. с той же площадью прохода 16 м².

Опуская собственно расчет, рассмотрим полученные графики движения в расширяющемся проходе, изменения пропускной способности и нарастания плотности

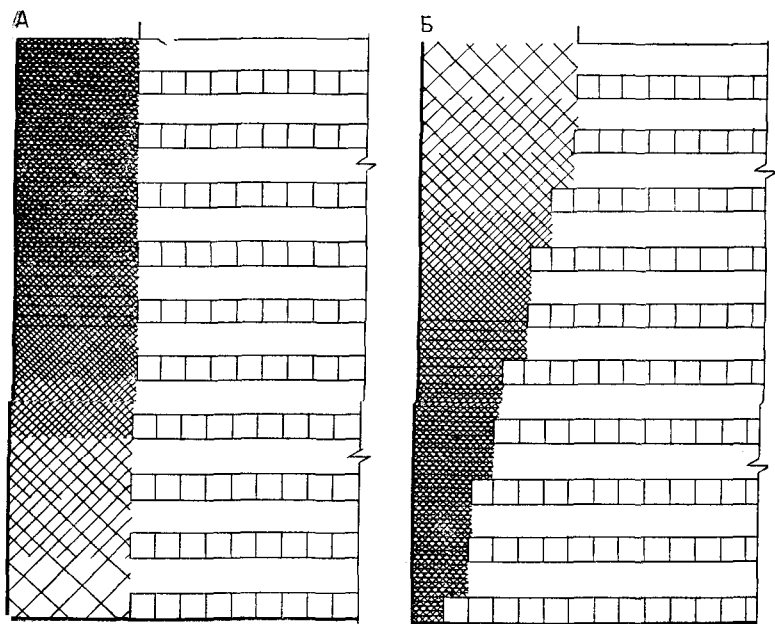
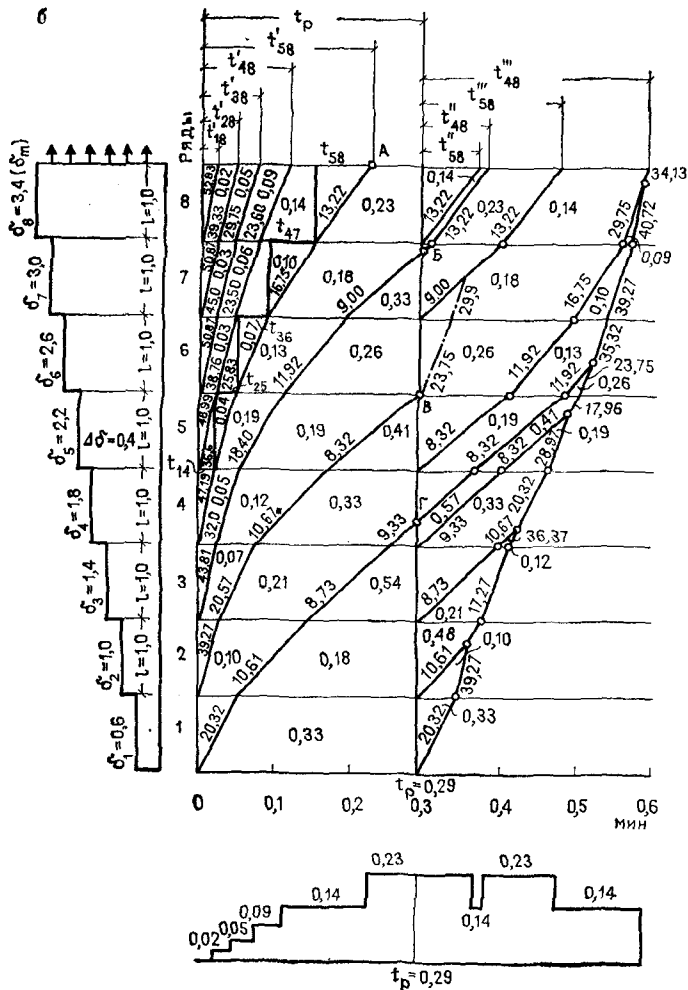


Рис. 7.9. Распределение плотности в проходах
 а — проход постоянной ширины; б — расширяющийся проход

(рис. 7.10) и сравним их с данными примера при проходе постоянной ширины такой же площади. Из сравнения следует, что в расширяющемся проходе процесс протекает не только при более равномерном распределении людей в проходе, но и при существенно меньших плотностях на выходе из прохода ($D=0,23$ вместо $0,72$; см. рис. 7.9) и с меньшей затратой времени (примерно на 12%). Если принять (при одном и том же времени эвакуации) плотности людского потока в расширяющемся проходе такими же, как при проходе постоянной ширины, т. е. $D=0,72$, то площадь расширяющегося прохода, очевидно, может быть меньше, вследствие чего будет достигаться некоторый экономический эффект по использованию площади. Следовательно, расширяющиеся проходы можно считать более рациональными, чем проходы постоянной ширины.

Возникает вопрос: почему, несмотря на очевидную эффективность расширяющихся поперечных проходов,

6



ющемся проходе

дачу, а при расширяющихся проходах в рядах размещается различное число мест. Применение расширяющихся проходов, как следует из опыта проектирования и строительства зрелищных сооружений, чаще всего обуславливается формами помещений (сооружений) в плане, например круглой, эллиптической, трапецидальной, для которых при размещении мест блоками с равным числом

кресел в каждом ряду поперечные проходы получают естественное расширение.

Следует отметить также, что в ряде сооружений при применении расширяющихся проходов учитывались требования улучшения условий эвакуации, например в Кремлевском Дворце съездов, на трибунах Олимпийского стадиона в Мюнхене и др.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И ДВИЖЕНИЯ ЛЮДСКИХ ПОТОКОВ В ПРОХОДАХ ПРИ $\delta \neq \text{const}$

В отличие от процесса движения в проходах постоянной ширины, с момента прекращения увеличения количества людей, покидающих проход (на выходе), при расширяющихся проходах ни устойчивой, ни относительной стабилизации не наблюдается. В этот момент количество людей на выходе достигает своего максимума, а затем постепенно падает, поскольку при значительно меньших плотностях, чем в равновеликих проходах постоянной ширины, движение происходит быстрее, и накопления людей, формирующих относительно стабильный поток, не образуется. Стабилизация (устойчивая) при расширяющихся проходах возможна лишь при образовании скоплений, т. е. при $D > D_{\text{макс}}$. Однако применение расширяющихся проходов с допуском скоплений в значительной степени теряет практический смысл, поэтому этот случай рассматривать не следует.

Выражение (7.2)

$$\frac{Q_p}{l} = \frac{\sum_1^l (\Delta D \delta)}{\Sigma t} \text{const} = \omega$$

справедливо и для расширяющихся поперечных проходов (если $Q_p = \text{const}$, т. е. число мест во всех рядах, объединяемых проходом, одинаково).

Действительно, если принять для расширяющихся проходов двойную индексацию параметров движения, обозначив первой цифрой количество потоков из рядов, а второй — номер участка прохода (т. е. номер ряда), и обратиться к расчетному графику на рис. 7.10, то получим:

для участка прохода на уровне 4-го ряда

$$\omega_{14} = \frac{(D_{14} - D_{04}) \delta_4}{t_{14}} = \frac{(0,05 - 0) 1,8}{0,02} = 4^*;$$

то же, 5-го ряда

$$\begin{aligned} \omega_{25} &= \frac{(D_{14} - D_{04}) \delta_4 + (D_{25} - D_{15}) \delta_5}{t_{14} + t_{25}} = \\ &= \frac{(0,05 - 0) 1,8 + (0,09 - 0,04) 2,2}{0,02 + 0,03} = 4; \end{aligned}$$

то же, 6-го ряда

$$\begin{aligned} \omega_{36} &= \frac{(D_{14} - D_{04}) \delta_4 + (D_{25} - D_{15}) \delta_5 + (D_{36} - D_{26}) \delta_6}{t_{14} + t_{25} + t_{36}} = \\ &= \frac{(0,05 - 0) 1,8 + (0,09 - 0,04) 2,2 + (0,13 - 0,07) 2,6}{0,02 + 0,03 + 0,04} = 4; \end{aligned}$$

то же, 7-го ряда

$$\begin{aligned} \omega_{47} &= \frac{(D_{14} - D_{04}) \delta_4 + (D_{25} - D_{15}) \delta_5 + (D_{36} - D_{26}) \delta_6 + (D_{47} - D_{37}) \delta_7}{t_{14} + t_{25} + t_{36} + t_{47}} = \\ &= \frac{(0,05 - 0) 1,8 + (0,09 - 0,04) 2,2 + (0,13 - 0,07) 2,6 + (0,18 - 0,1) 3}{0,02 + 0,03 + 0,04 + 0,06} = \\ &= 4; \end{aligned}$$

то же, 8-го ряда (выход головной части потока 4-го ряда за пределы прохода)

$$\begin{aligned} \omega_{58} &= \frac{(D_{14} - D_{04}) \delta_4 + (D_{25} - D_{15}) \delta_5 + (D_{36} - D_{26}) \delta_6 + \\ &+ (D_{47} - D_{37}) \delta_7 + (D_{58} - D_{48}) \delta_8}{t_{14} + t_{25} + t_{36} + t_{47} + t_{58}} = \\ &= \frac{(0,05 - 0) 1,8 + (0,09 - 0,04) 2,2 + (0,13 - 0,07) 2,6 + \\ &+ (0,18 - 0,1) 3 + (0,23 - 0,14) 3,4}{0,02 + 0,03 + 0,04 + 0,06 + 0,077} = 4. \end{aligned}$$

Существенный интерес представляет изменение интенсивности движения вдоль и поперек (на уровне каждого ряда) расширяющихся поперечных проходов зрелищных помещений.

На рис. 7.11 представлен характер изменения интенсивности движения вдоль и поперек проходов постоянной ширины ($\delta = 2$ м) и переменной ширины (δ от 0,6 до 3,4 м), одинаковых по своей площади (к примерам на рис 7.3 и 7.10). Из рисунка следует, что в проходах постоянной ширины как вдоль, так и поперек

* Неточность результата за счет округления значения D до второго знака.

их (на уровне любого ряда) q изменяется по линейному закону и одинаково¹, подчиняясь выражению

$$q_i = \frac{i Q_p}{\delta}, \quad (7.16)$$

где i — число сливающихся потоков из рядов и порядковый номер ряда.

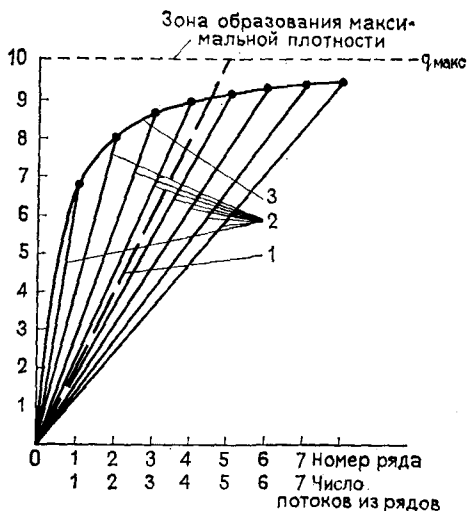


Рис. 7.11. График изменения интенсивности движения в проходах постоянной и переменной ширины

1 — в проходе постоянной ширины; 2 — поперек прохода переменной ширины; 3 — вдоль прохода переменной ширины

Беспрепятственное движение возможно лишь при слиянии пяти потоков из рядов в поперечном проходе, и если t_p было бы больше, то в проходе началось бы скопление людей, начиная от 6-го ряда до выхода. В расширяющихся проходах интенсивность движения (в м/мин) вдоль прохода изменяется согласно выражению

$$q_{ik} = \frac{i Q_p}{\delta_k}, \quad (7.17)$$

где i — число сливающихся потоков из рядов; k — номер ряда; δ_k — ширина прохода на уровне k -го ряда.

Величина δ_k , м, может быть выражена уравнением

$$\delta_k = (\Delta l + k l) \operatorname{tg} \varphi, \quad (7.18)$$

где Δl — расстояние от вершины угла φ до начала прохода, м (см. рис. 7.11); l — ширина ряда, м.

¹ Одинаковое изменение q вдоль и поперек проходов постоянной ширины позволяет применить не двойную, а одинарную индексацию значений параметров движения, как это сделано в § 3 гл. 7.

Из рис. 7.11 следует, что:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\Delta \delta}{l}; \quad \Delta l = \frac{\delta_1 - \Delta \delta}{\Delta \delta} l,$$

где $\Delta \delta$ — прирост ширины прохода на уровне каждого ряда, м.

После подстановки в выражение (7.18), получим

$$\delta_k = \delta_1 + \Delta \delta (k - 1) \text{ м.} \quad (7.19)$$

Тогда выражение (7.17) примет вид

$$q_{ik} = \frac{i Q_p}{\delta_1 + \Delta \delta (k - 1)}, \quad (7.20)$$

т. е. интенсивность движения (в м/мин) вдоль расширяющегося прохода изменяется нелинейно (см. кривую 2 на рис. 7.11).

Для рассматриваемого примера наибольшее значение q_{88} ($i=8, k=8$) достигается в точке *Б* и оно меньше $q_{\text{макс}}$, т. е. в этом случае, при той же площади прохода скопления людей образоваться не может. Более того, при проектировании может быть несколько уменьшен прирост ширины прохода на уровне каждого ряда, поскольку величина q в точке *Б* меньше $q_{\text{макс}}$.

Из формулы (7.20) легко определить требуемую (минимальную) величину прироста $\Delta \delta^{\text{треб}}$, м (без образования скопления):

$$\Delta \delta^{\text{треб}} = \frac{i Q_p}{q_{\text{макс}} (k - 1)} - \frac{\delta_1}{k^2 - 1}, \quad (7.21)$$

а по выражению (7.19) — ширину прохода на уровне последнего ряда, т. е. δ_m .

Для рассматриваемого примера при $\delta_1=0,6$ и восьми рядах ($i=8, k=8$)

$$\Delta \delta^{\text{треб}} = \frac{i Q_p}{q_{\text{макс}} (k - 1)} - \frac{\delta_1}{k^2 - 1} = \frac{8 \cdot 4,02}{10,13 \cdot 7} - \frac{0,6}{7} = 0,36 \text{ м}$$

вместо принятого 0,4 м; тогда по формуле (7.19) $\delta_8 = 3,12$ м вместо принятой ширины 3,4 м.

Интенсивность движения поперек расширяющегося прохода изменяется по линейному закону, но на уровне каждого k -го ряда имеет свое значение:

$$q_{ik} = \frac{i Q_p}{\delta_k} \quad (7.22)$$

где δ_k — ширина прохода на уровне k -го ряда.

На графике (рис. 7.11) изменение q_{ik} поперек прохода представлено прямыми 2. Эта закономерность

имет важное значение для расчета времени движения по расширяющемуся проходу, поскольку на уровне каждого ряда будет соблюдаться постоянство

$$q_i - q_{i-1} = q_i = \Delta q = \text{const.}$$

Расчет времени движения в расширяющихся проходах

Расчет времени движения людского потока в расширяющемся проходе разбивается на два этапа: определение количества людей N_p , покинувших проход за время t_p , и определение времени движения t_y от момента выхода людей из рядов t_p до полного завершения процесса.

Для определения N_p необходимо установить значения времени достижения выхода из прохода головных частей потоков из рядов, начиная от ближайшего к выходу ряда, т. е. t_{1m} , t_{2m} , t_{3m} , ..., t_{im} (см. рис. 7.10); при этом t_{im} не должно быть больше t_p :

$$N_p = t'_{1m} Q_{0m} + (t'_{2m} - t'_{1m}) Q_{1m} + (t'_{3m} - t'_{2m}) Q_{2m} + \\ + \dots + (t_p - t'_{im}) Q_{im}.$$

Зная δ_m и q_{1m} , q_{2m} , q_{3m} , ..., q_{im} , можно записать:

$$N_p = t'_{1m} q_{0m} \delta_m + t'_{2m} q_{1m} \delta_m - t'_{1m} q_{1m} \delta_m + t'_{3m} q_{2m} \delta_m - \\ - t'_{2m} q_{2m} \delta_m + \dots + t_p q_i \delta_m - t'_i q_i \delta_m.$$

Имея в виду, что за время t'_{1m} достижения головной частью потока из последнего ряда выхода из прохода люди еще не покидают прохода, т. е. $Q_{0m} = 0$, и принимая во внимание закономерность (7.22), т. е.:

$$Q_{1m} = \delta_m q_{1m}; \quad Q_{2m} = \delta_m \cdot 2q_{1m};$$

$$Q_{3m} = \delta_m \cdot 3q_{1m}, \dots, \quad Q_{im} = \delta_m i q_{1m}.$$

получим:

$$N_p = t'_{1m} q_{0m} \delta_m + t'_{2m} q_{1m} \delta_m - t'_{1m} q_{1m} \delta_m + t'_{3m} 2q_{1m} \delta_m - \\ - t'_{2m} 2q_{1m} \delta_m + \dots + t_p i q_{1m} \delta_m - t'_{im} i q_{1m} \delta_m = \\ = \delta_m q_{1m} (t'_{2m} - t'_{1m} + 2t'_{3m} - 2t'_{2m} + 3t'_{4m} - 3t'_{3m} + \dots + \\ + i t_p - i t'_{im}) = \delta_m q_{1m} \left(i t_p - \sum_i^m t' \right);$$

$$N_p = \delta_m q_m \left(i t_p - \sum_i^m t' \right). \quad (7.23)$$

Для определения значений t , мин, в выражении (7.23) можно воспользоваться закономерностью изменения коэффициента плотности (см. § 3 гл. 7), из которой получим

$$t_{im} = \frac{l}{Q_p} \sum_i^m (\Delta D \delta). \quad (7.24)$$

Зная N_p , легко определить оставшееся количество людей N_y , м², в расширяющемся проходе после окончания их выхода из рядов:

$$N_y = N - N_p.$$

Как следует из рис. 7.10, N_y составляет

$$N_y = t''_{im} Q_{im} + t''_{(i-1)m} Q_{(i-1)m} + t''_{(i-2)m} Q_{(i-2)m} + \dots + t''_{jm} Q_{jm}, \quad (7.25)$$

где t' — время, отсчитываемое от момента t_p и определяющее момент выхода замыкающих частей потоков каждого ряда из расширяющегося прохода,

Поскольку N_y известно, смысл уравнения (7.25) состоит в определении t'_j , т. е. времени выхода замыкающей части потока некоторого ряда j из прохода, мин:

$$t'_j = \frac{N_y - \sum_i^{j-1} (t''_m Q_m)}{Q_{jm}}. \quad (7.26)$$

Значения t'_m определяются по тем же принципам, что и для головных частей потоков из рядов, т. е. от момента t_p по сумме времени прохождения каждого ряда от j до последнего ряда в проходе m . Затем, суммируя значения t_p и $\sum t''_m$, получим общую продолжительность процесса в мин, т. е.

$$t = t_p + \sum t''_m. \quad (7.27)$$

Как следует из изложенного, расчет продолжительности процесса движения людского потока в расширяющемся проходе, хотя и элементарен, но более трудоемок.

Поясним порядок расчета на том же примере, для которого время t было определено графоаналитическим способом (см. рис. 7.10).

Пример.

$n=12$ местам в ряду; $m=8$ рядам; $l=1$ м; $L=8$ м; $\delta_1=0,6$ м; $\Delta\delta=0,4$ м; $\delta_8=3,4$ м (последнего к выходу ряда, так как $m=8$);

Таблица 7.5. Расчет времени движения головных частей потоков из рядов до конца расширяющегося прохода

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Номера строк	
Номера рядов	δ , м	q_1 , м/мин	Число потоков i	1	2	3	4	5	6	7	8	1	
			t'_{im} , мин	0,017	0,048	0,075	0,120	0,224	0,43 > t_p	0,631	0,750	2	
8	3,40	1,19	$\frac{q_1 \cdot i}{D}$	1,19 0,02	2,37 0,05	3,56 0,09	4,74 0,14	5,93 0,23	7,11 0,38	8,30 0,51	9,48 0,62	3	а б в
			$(D_i - D_{i-1}) \delta$	0,068	0,102	0,136	0,170	0,306	0,501	0,442	0,374		
7	3	1,34	$\frac{q_1 \cdot i}{D}$	1,34 0,03	2,69 0,06	4,03 0,10	5,37 0,18	6,72 0,33	8,06 0,48	9,40 0,61	A	4	а б в
			$(D_i - D_{i-1}) \delta$	0,090	0,090	0,120	0,240	0,450	0,450	0,390	B		
6	2,60	1,55	$\frac{q_1 \cdot i}{D}$	1,55 0,03	3,10 0,07	4,65 0,13	6,20 0,26	7,75 0,45	9,30 0,60			5	а б в
			$(D_i - D_{i-1}) \delta$	0,078	0,104	0,156	0,338	0,494	0,390				

$tg\varphi=0,4$; $N=9,6 \text{ м}^2$ (при $f=0,1 \text{ м}^2$); $D_p=0,33$; $v_p=20,32 \text{ м/мин}$; $q_0=6,71 \text{ м/мин}$; $Q_p=4,03 \text{ м}^2/\text{мин}$; $L_p=6 \text{ м}$; $t_p=0,29 \text{ мин}$.

Расчет по формулам (7.23)—(7.27) целесообразно вести в табличной форме.

Прежде всего определяется время движения головных частей потоков из рядов до выхода из расширяющегося прохода, т. е. значения t_{im} ; расчет приведен в табл. 7.5. Порядок табличного расчета следующий:

в первой вертикальной графе вписываются номера рядов (снизу вверх);

во второй — проставляется назначенная ширина прохода δ на уровне каждого ряда: δ назначается либо умозрительно, либо определяется по формуле (7.21);

в третьей — даются значения интенсивности движения в проходе одного потока на уровне каждого ряда, определяемые по выражению (7.16). Например:

$$q_{1m} = \frac{l Q_p}{\delta_m} = \frac{1 \cdot 4,03}{3,40} = 1,19 \text{ м/мин}; \quad q_{14} = \frac{1 \cdot 4,03}{1,80} = 2,24 \text{ м/мин};$$

в верхней горизонтальной строке (в соответствующих вертикальных графах, начиная с пятой) вписывается число потоков из рядов;

во второй горизонтальной строке — результаты расчета, т. е. t_{im} , мин;

в четвертой вертикальной графе даны расчетные выражения, результаты которых выписываются в соответствующих строчках вертикальных граф для каждого ряда и числа потоков.

Интенсивность движения на уровне каждого ряда и для соответствующего числа потоков устанавливается умножением q_i на i , т. е. на число потоков (например, $q_{3m} = q_{1m} \cdot 3 = 1,19 \cdot 3 = 3,56 \text{ м/мин}$). Далее соответственно установленному значению q_i на уровне каждого ряда по прил. I определяется соответствующая плотность D (например, при $q_{3m} = 3,56 \text{ м/мин}$ $D = 0,09$).

Третья строка каждой вертикальной графы представляет разность плотностей в проходе (на уровне каждого ряда) данного количества потоков и предыдущего, умноженную на ширину прохода, т. е.

$$(D_i - D_{i-1}) \delta_m,$$

например $(D_{38} - D_{28}) \delta_8 = (0,09 - 0,05) 3,40 = 0,136$; полученные таким образом значения третьих строк складываются по диагонали, умножаются на l и делаются на Q_p ; результат вписывается во вторую горизонтальную строку и представляет собой t'_{im} , мин; например:

$$\begin{aligned} t'_{38} &= \frac{l}{Q_p} \left[(D_{18} - D_{08}) \delta_8 + (D_{27} - D_{17}) \delta_7 + (D_{38} + D_{28}) \delta_8 \right] = \\ &= \frac{1}{4,03} \left[(0,03 - 0) 2,60 + (0,06 - 0,03) 3 + (0,09 - 0,05) 3,4 \right] = \\ &= \frac{1}{4,03} (0,078 + 0,090 + 0,136) = 0,075 \text{ мин.} \end{aligned}$$

Из табл. 7.5 следует, что до момента t_p конца прохода достигает головная часть потока из 4-го ряда со временем $t'_{58} = 0,224 \text{ мин} <$

$< t_p$; головная часть потока из 3-го ряда может достигнуть конца прохода лишь за $t'_{68} = 0,43$ мин $> t_p$. Иначе говоря, головные части потоков из 1, 2 и 3-го рядов достигнут конца прохода вместе с замыкающими частями потоков из других рядов.

Воспользовавшись выражением (7.23), определим N_p :

$$N_p = \delta_8 q_{18} \left(i t_p - \sum_i^m t' \right) =$$

$$= 3,40 \cdot 1,19 [5 \cdot 0,29 - (0,017 + 0,048 + 0,075 + 0,120 + 0,224)] =$$

$$= 4,05 \text{ м}^2.$$

Таким образом, оставшееся количество людей в проходе составляет в момент t_p :

$$N_y = N - N_p = 9,60 - 4,05 = 5,55 \text{ м}^2.$$

Поскольку в рассматриваемом примере головные части потоков из рядов 1—3 выходят из прохода вместе с замыкающими частями, следует предварительно определить количество потоков и последовательность его изменения на выходе из прохода (на уровне 8-го ряда) за пределами t_p .

Как установлено (табл. 7.5), максимальное количество потоков из рядов на выходе из прохода в момент t_p составляет 5 при $D=0,23$ (см. рис. 7.10 и в табл. 7.5 графу, отмеченную А). Определим положение во времени головной части потока из 3-го ряда в зоне слияния с замыкающими частями потоков из других рядов. Для этого по табл. 7.4 определим положение во времени головной части потока из 3-го ряда в момент, наиболее близкий к t_p , складывая последовательно по диагонали табличные значения $(D_i - D_{i-1})\delta$ и определяя время достижения головной частью того или иного места в проходе, мин, т. е.

$$t_{i(m-k)} = \frac{[\sum (D_i - D_{i-1}) \delta_{m-k}] l}{Q_p}.$$

Произведя вычисления, установим, что

$$t_{57} = \frac{(0,098 + 0,126 + 0,220 + 0,338 + 0,450) l}{4,03} = 0,306 \text{ мин}$$

(см. рис. 7.10 и в табл. 7.5 графу, отмеченную Б).

Следовательно, головная часть потока из 3-го ряда достигнет в проходе уровня 8-го ряда после выхода в проход замыкающих частей потоков из рядов, в том числе замыкающей части потока из 8-го ряда, поскольку $t_p = 0,29 < t_{57}$.

Таким образом, в проходе на уровне 8-го ряда в течение некоторого периода времени поток будет сформирован из четырех потоков из рядов с $D=0,14$ (это хорошо видно на рис. 7.10). Далее, в момент $t_{57}=0,306$ в проходе на уровне 8-го ряда начинается движение головная часть потока из 3-го ряда, и количество потоков, выходящих из прохода, снова возрастает до пяти при $D=0,23$. Это количество будет сохраняться до выхода замыкающей части из 7-го ряда. Затем количество потоков вновь сократится до четырех при $D=0,14$.

Проведем аналогичные вычисления для головной части потока из 2-го ряда и установим, что

$$t_{45} = \frac{(0,100 + 0,196 + 0,378 + 0,484) l}{4,03} = 0,29 \text{ мин.}$$

т. е. головная часть потока из 2-го ряда достигнет в проходе уровня 6-го ряда в момент $t_p = 0,29$ или, иначе говоря, в момент выхода в проход замыкающей части потока из 6-го ряда. Таким образом, количество потоков в проходе не изменится, поскольку замыкающая часть потока из 6-го ряда и головная часть потока из 2-го ряда будут двигаться одна за другой без разрыва во времени (см. рис. 7.10 и в табл. 7.5 графу, отмеченную В).

Предполагая, что головная часть потока из 1-го ряда не дойдет до выхода из прохода, т. е. переформируется ранее, начнем вычисление времени хода процесса.

Целесообразно вести его последовательно, одновременно устанавливая количество людей, покинувших проход.

Определим время выхода (от момента t_p) замыкающей части потока из 8-го ряда:

$$t''_{58} = l \frac{D_{58} - D_{48}}{q_{58} - q_{48}} = l \frac{D_{58} - D_{48}}{q_{18}} = l \frac{0,23 - 0,14}{1,19} = 0,075 \text{ мин.}$$

$$N''_{58} = t''_{58} q_{58} \delta_8 = 0,075 \cdot 5,93 \cdot 3,40 = 1,51 \text{ м}^2.$$

Значение t''_{48} (см. рис. 7.10) может быть установлено проще. Поскольку головная часть потока из 3-го ряда вновь увеличивает количество выходящих потоков до пяти, скорость переформирования между частями потока с плотностями 0,14 и 0,23 останется прежней, а время выхода головной части потока из 3-го ряда на уровень 8-го ряда прохода известно и составляет $t_{57} = 0,306$ мин; поэтому $t_{57} - t_p = 0,29 - 0,306 = 0,016$ мин после момента t_p .

Следовательно:

$$t''_{48} = (t_{57} - t_p) + t''_{58} = 0,306 - 0,29 + 0,075 = 0,091 \text{ мин.}$$

$$N_{48} = (t''_{48} - t''_{58}) q_{48} \delta_8 = 0,016 \cdot 4,74 \cdot 3,40 = 0,26 \text{ м}^2.$$

Далее движется поток, состоящий из людей, вышедших из пяти рядов с $D = 0,23$ (за счет головной части потока из 3-го ряда) до момента выхода замыкающей части потока из 7-го ряда.

Значение t'''_{58} (см. рис. 7.10) составляет

$$t'''_{58} = l \frac{D_{57} - D_{47}}{q_{57} - q_{47}} + l \frac{D_{58} - D_{48}}{q_{58} - q_{48}} = l \frac{D_{57} - D_{47}}{q_{17}} + l \frac{D_{58} - D_{48}}{q_{18}} = l \frac{0,33 - 0,18}{1,34} + l \frac{0,23 - 0,14}{1,19} = 0,11 + 0,075 = 0,185 \text{ мин.}$$

$$N_{58} = (t'''_{58} - t''_{48}) q_{58} \delta_8 = (0,185 - 0,091) 5,93 \cdot 3,40 = 1,90 \text{ м}^2.$$

Поскольку в проходе на уровне 6-го ряда замыкающая часть потока из него и головная часть потока из 2-го ряда движутся слитно в составе четырех потоков из рядов, то переформирования

между ними не происходит, поэтому определять время движения замыкающей части потока из 6-го ряда не требуется.

Поэтому определим время выхода замыкающей части потока из 5-го ряда.

$$\begin{aligned}
 t_{48}''' &= l \frac{D_{45} - D_{35}}{q_{45} - q_{35}} + l \frac{D_{46} - D_{36}}{q_{46} - q_{36}} + l \frac{D_{47} - D_{37}}{q_{47} - q_{37}} + \\
 &+ l \frac{D_{48} - D_{38}}{q_{48} - q_{38}} = l \frac{D_{45} - D_{35}}{q_{15}} + l \frac{D_{46} - D_{36}}{q_{16}} + \\
 &+ l \frac{D_{47} - D_{37}}{q_{17}} + l \frac{D_{48} - D_{38}}{q_{18}} = l \frac{0,41 - 0,19}{1,83} + \\
 &+ l \frac{0,26 - 0,13}{1,55} + l \frac{0,18 - 0,10}{1,34} + l \frac{0,14 - 0,09}{1,19} = \\
 &= 0,12 + 0,08 + 0,06 + 0,04 = 0,30 \text{ мин};
 \end{aligned}$$

$$N_{48}''' = (t_{48}''' - t_{58}''') q_{48} \delta_8 = (0,30 - 0,185) 4,74 \cdot 3,40 \approx 1,86 \text{ м}^2;$$

$$\begin{aligned}
 N_y &= N_{58}'' + N_{48}'' + N_{58}''' + N_{48}''' = 1,51 + 0,26 + 1,90 + 1,86 = \\
 &= 5,53 \approx 5,55 \text{ м}^2.
 \end{aligned}$$

Следовательно, движение по проходу на этом заканчивается, а его общее время составляет:

$$t_p + t_{48}''' = 0,29 + 0,30 = 0,59 \text{ мин.}$$

Если бы N_y оказалось больше $5,55 \text{ м}^2$, т. е. установленной ранее величины, то, зная N_{48}''' , следовало бы определить t_{48}''' ; в противном случае ($N_y < 5,55 \text{ м}^2$) следовало бы вести расчет дальше, определив время движения замыкающей части потока из 4-го ряда.

BOOKS.PROEKTANT.ORG

**БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОННЫХ
КОПИЙ КНИГ**

**для проектировщиков
и технических специалистов**

**ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ С УЧЕТОМ
ДВИЖЕНИЯ ЛЮДСКИХ ПОТОКОВ**

Глава 8

**РАСЧЕТНЫЕ ПРЕДЕЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ И МЕТОДИКА
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ЛЮДСКИХ ПОТОКОВ
И РАЗМЕРОВ КОММУНИКАЦИОННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ****§ 1. Расчетные предельные состояния**

Расчет движения людей в зданиях проводится для принятия обоснованных объемно-планировочных решений, а также обеспечения нормальных условий движения и эвакуации людей из зданий.

Расчет движения людских потоков осуществляется по так называемым расчетным предельным состояниям.

Первым расчетным предельным состоянием путей движения называется такое, при котором они перестают удовлетворять предъявляемым к ним эксплуатационным требованиям по времени движения, т. е. когда пути движения не могут пропустить в заданное время, называемое предельным или допустимым $t_{\text{доп}}$, установленное число людей.

Условие первого расчетного предельного состояния может быть выражено следующей формулой:

$$t \leq t_{\text{доп}}. \quad (8.1)$$

Расчет по первому предельному состоянию ведется, например, при вынужденной эвакуации людей из здания в случае пожара или других аварийных обстоятельств.

Вторым расчетным предельным состоянием путей движения называется такое, при котором они перестают удовлетворять предъявляемым к ним эксплуатационным требованиям по комфортности движения, т. е. когда на путях движения создаются такие плотности потока, которые превышают установленные, предельные для данного здания. Предельное условие

$$D \leq D_{\text{доп}}. \quad (8.2)$$

Расчет путей движения по второму предельному состоянию ведется для таких зданий и помещений, где необходимо предупредить возможность образования

высоких плотностей людских потоков (залы для проведения съездов, конференций, детские и лечебные учреждения и т. п.). Величины t и D являются функциями количества людей N , параметров путей движения l и δ и интенсивности движения q .

Величины $t_{\text{доп}}$ и $D_{\text{доп}}$ являются функциями назначения зданий; кроме того, $t_{\text{доп}}$ — функцией аварийных обстоятельств.

Ввиду того, что общий путь движения людского потока в здании складывается из различных участков, отличающихся по виду, протяженности и ширине, общее время движения (в мин), с учетом коэффициентов условий движения, может быть представлено в виде

$$t = \Sigma \frac{l}{v} \frac{1}{\mu \eta} + \Sigma \frac{N}{\mu \eta} \left(\frac{1}{Q_{n+1}} - \frac{1}{Q_n} \right) \leq t_{\text{доп}}, \quad (8.3)$$

где l — длина участка пути, м; v — скорость движения, м/мин; N — расчетное количество людей в потоке, м²; Q_n — пропускная способность участка n , м²/мин; Q_{n+1} — пропускная способность участка $n+1$, м²/мин; μ и η — коэффициенты условий движения.

Первый член суммы выражает общее время движения потока, а второй — общее время задержек движения.

Для оценки комфортности движения определяется плотность потока на каждом участке пути по формуле

$$D = \frac{Q}{v \delta} \frac{l}{\mu \eta} \leq D_{\text{доп}}. \quad (8.4)$$

Значения $t_{\text{доп}}$ и $D_{\text{доп}}$, характеризующие продолжительность и режим движения людских потоков для зданий и сооружений общественного назначения, не только не нормировались, но даже не установлены. Лишь для театральных зданий еще с 1937 г., по предложению С. В. Беляева, для вынужденной эвакуации при пожаре максимально допустимое время $t_{\text{доп}}$ обычно принимается 2 мин для зала и 6 мин для здания в целом. Эти параметры определены умозрительно, они не были подтверждены какими-либо опытными или теоретическими разработками. Вместе с тем от этих величин зависит не только рациональное и экономически целесообразное архитектурно-планировочное решение здания, но и его эксплуатационные качества, включая вопросы обеспечения безопасности людей, поэтому назначение и нормирование этих величин должно быть обосновано соответствующими исследованиями. Ниже даются лишь некоторые предпосылки для решения этой задачи.

Прежде всего для каждого вида здания должны быть установлены расчетные условия, в которых происходит движение; например в театральных зданиях движение происходит в комфортных или аварийных условиях; в административных и промышленных зданиях — в нормальных и аварийных и т. п.

Следовательно, в зависимости от вида зданий расчетные условия могут быть комфортными или нормальными и, кроме того, аварийными, исключая некоторые категории сооружений типа открытых спортивных трибун, расположенных в сейсмических районах.

Затем для каждого вида зданий устанавливаются расчетные предельные состояния; например для театральных зданий расчет для комфортных и аварийных условий движения следует вести как по первому, так и по второму предельным состояниям; для административных зданий, где обычно движение происходит в нормальных условиях, можно допустить высокую плотность движения и вести расчет только по первому предельному состоянию. Для лечебных учреждений расчет для аварийных условий следует вести по первому и второму предельным состояниям путей движения.

§ 2. Предпосылки для определения $t_{доп}$ и $D_{доп}$

Для выявления $t_{доп}$ и $D_{доп}$ при движении людских потоков в комфортных и нормальных условиях целесообразно воспользоваться реально наблюдаемыми величинами, отвечающими заданным условиям эксплуатации здания.

Например, время $t_{доп}$ в нормальных и комфортных условиях может быть установлено на основании практических данных, полученных при натуральных наблюдениях с их последующей математической обработкой. В частности, для театральных зданий время $t_{доп}$ для комфортных условий может быть получено путем установления удобного для людей времени, необходимого для освобождения зала, движения до гардероба, одевания и выхода из здания. Можно также руководствоваться технологическими или эксплуатационными соображениями, например по продолжительности антракта между действиями спектакля, по продолжительности перерыва между сеансами в кинотеатре и т. п.

Во всех случаях при движении в нормальных и комфортных условиях $t_{\text{доп}}$ должно быть возможно меньше, поскольку оно может быть отнесено ко времени, затрачиваемому непродуктивно.

Как замечено, в театральные здания в комфортных условиях плотность движения редко превышает 0,6 (5—6 чел/м²), поэтому эта величина может быть принята в качестве $D_{\text{доп}}$.

В аварийных условиях $t_{\text{доп}}$ зависит от аварийных обстоятельств и может иметь разные значения, которые устанавливаются на основании соответствующих исследований. Например, М. Я. Ройтман предложил определять допустимую продолжительность эвакуации людей из помещений при пожаре исходя из времени, необходимого для нагрева воздуха в помещении до критической температуры, превышение которой делает невозможным пребывание в нем человека.

Количество тепла $Q_{\text{в}}$, ккал, затрачиваемого на нагрев воздуха в помещении до некоторой средней температуры $\theta_{\text{ср}}$, при которой в месте пребывания людей достигается критическая температура $\theta_{\text{кр}}$, составляет

$$Q_{\text{в}} = w c (\theta_{\text{ср}} - \theta_{\text{н}}), \quad (8.5)$$

где w — объем помещения, м³; c — объемная теплоемкость воздуха, ккал/(м³·°С); $\theta_{\text{ср}}$ и $\theta_{\text{н}}$ — соответственно средняя и начальная температуры в помещении, °С.

Количество тепла $Q_{\text{г}}$, ккал, выделяемого при пожаре в течение $t_{\text{доп}}$, равно:

$$Q_{\text{г}} = n q f t_{\text{доп}}, \quad (8.6)$$

где n — весовая скорость выгорания данного материала, кг/(м²·мин); q — теплота горения, ккал/кг; f — горизонтальная площадь поверхности горения, м², которая при равномерном радиальном развитии горения равна:

$$f = \pi R^2 = \pi v^2 t_{\text{доп}}^2$$

(здесь v — линейная скорость горения материала, м/мин).

Если к выражению для $Q_{\text{г}}$ присоединить в качестве сомножителя величину $(1-\varphi)$, где φ — коэффициент использования тепла на нагрев воздуха до $\theta_{\text{ср}}$, равный $Q_{\text{к}}/Q_{\text{г}}$ (здесь $Q_{\text{к}}$ — количество тепла, расходуемого за время $t_{\text{доп}}$ на нагрев конструкций), то тогда величину $Q_{\text{г}}$ можно привести к $\theta_{\text{н}}$, т. е.

$$w c (\theta_{\text{ср}} - \theta_{\text{н}}) = n q \pi v^2 t_{\text{доп}}^3 (1 - \varphi).$$

Решив это выражение относительно $t_{\text{доп}}$, получим расчетную формулу

$$t_{\text{доп}} = \sqrt[3]{\frac{\omega c (\theta_{\text{ср}} - \theta_{\text{н}})}{\pi n q v^2 (1 - \varphi)}} \quad (8.7)$$

В качестве критической температуры $\theta_{\text{кр}}$ обычно принимается 70°C .

Средняя температура $\theta_{\text{ср}}$ в помещении, из которого эвакуируют людей в момент $t_{\text{доп}}$, может быть вычислена по формуле

$$\theta_{\text{ср}} = \frac{273 + \theta_{\text{кр}}}{0,8 + \frac{0,4h}{H}} - 273^\circ\text{C},$$

где H — высота помещения, м; h — высота от уровня пола до точки, в которой температура достигала $\theta_{\text{кр}}$.

Пример. Определить $t_{\text{доп}}$ для помещения при следующих исходных данных: $\theta_{\text{н}} = 20^\circ$; $\theta_{\text{кр}} = 70^\circ$; $h = 2$ м; $H = 10$ м; $c = 0,25$ ккал/(м³·°C); $q = 4000$ ккал/кг; $n = 0,9$ кг/(м²·мин); $v = 2$ м/мин; $\varphi = 0,5$.

Находим среднюю температуру в помещении в момент $t_{\text{доп}}$:

$$\theta_{\text{ср}} = \frac{273 + \theta_{\text{кр}}}{0,8 + \frac{0,4h}{H}} - 273 = \frac{273 + 70}{0,8 + \frac{0,4 \cdot 2}{10}} - 273 = 117^\circ\text{C}.$$

Объем помещения

$$\omega = 50 \cdot 50 \cdot 10 = 25\,000 \text{ м}^3.$$

Искомое время

$$t_{\text{доп}} = \sqrt[3]{\frac{\omega c (\theta_{\text{ср}} - \theta_{\text{н}})}{\pi n q v^2 (1 - \varphi)}} = \sqrt[3]{\frac{25\,000 \cdot 0,25 (117 - 20)}{3,14 \cdot 0,9 \cdot 4000 \cdot 4 (1 - 0,5)}} \cong \cong 3 \text{ мин}.$$

Однако не только время нагревания воздуха в помещении до критической температуры определяет величину $t_{\text{доп}}$. Кроме него на величину $t_{\text{доп}}$ влияют:

категория производства по степени огнеопасности, например в промышленных зданиях, где производство связано с легковоспламеняющимися и горючими веществами, на величину $t_{\text{доп}}$ может влиять скорость распространения огня;

скорость распространения продуктов горения, опасные для человека концентрации которых могут возникнуть раньше, чем температура в помещении достигнет критических величин. Последнее особенно важно потому, что в настоящее время кроме обычных стораемых материалов (дерево и др.) широко применяются различного вида синтетические материалы, при горении которых

могут выделяться сильно токсичные продукты горения. При этом следует иметь в виду, что продукты горения могут распространяться через другие помещения (лестничные клетки, коридоры) или системы вентиляции в другие части здания, создавая в них опасные для людей условия;

объемно-планировочное решение здания. Например, в высоких зрелищных помещениях, имеющих балконы, температура в верхней зоне, а также концентрация продуктов горения может наступить значительно раньше, чем в нижней части, поэтому время эвакуации людей с балконов зрелищных помещений должно быть меньше, чем из партера;

степень огнестойкости конструкций и здания в целом. Чем выше огнестойкость, тем больше может быть допустимое время эвакуации $t_{\text{доп}}$;

контингент людей, населяющих здание. Например, в детских учреждениях при всех прочих равных условиях $t_{\text{доп}}$ должно быть меньше, чем для зданий со взрослым населением, способным принимать разумные решения при возникновении опасной ситуации.

Наконец, $t_{\text{доп}}$ в аварийных условиях зависит от причин, вызвавших необходимость вынужденной эвакуации людей. Кроме пожара, ими могут быть различные стихийные бедствия (см. § 2 гл. 2), поэтому определение $t_{\text{доп}}$ представляет для аварийных условий очень важную, но и очень сложную задачу, учитывая многообразие технологических процессов в промышленных зданиях, многообразие типов зданий, их объемно-планировочных и конструктивных решений. Работы в этом направлении ведутся различными научно-исследовательскими организациями.

Кроме времени $t_{\text{доп}}$ для обеспечения движения людских потоков в аварийных условиях имеет существенное значение $D_{\text{доп}}$, т. е. предельно допустимая плотность потока. К сожалению, современные методы нормирования эвакуации людей из зданий, не опирающиеся на правильные научные представления о процессе движения, совершенно не учитывают этой величины. В то же время в условиях аварийной эвакуации для ряда зданий необходимо ограничивать плотность людского потока, например в детских учреждениях, школах, больницах и других подобных учреждениях. Более того, во многих зданиях, преимущественно общественного наз-

начения, нельзя допускать скопления людей и задержек движения или образования физически предельных плотностей потоков. Упомянутые же выше представления о процессе движения, на которых основано нормирование, предполагают, что скоплений избежать невозможно, игнорируя объективные данные и теоретические основы процесса движения, поэтому для ряда зданий эвакуацию людей в аварийных условиях следует рассчитывать по двум предельным состояниям, т. е. по времени и по комфортности (удобству) движения.

§ 3. Методика расчета движения людских потоков и определение размеров коммуникационных помещений

Расчет производится в следующем порядке:

1. Определяется общая постановка задачи, например обеспечение заданного времени движения людских потоков в аварийных, нормальных или комфортных условиях или необходимых удобств при движении в здании того или иного общественного назначения.

2. В соответствии с назначением здания выбираются расчетные предельные состояния. Если значения $t_{доп}$ и $D_{доп}$ не заданы, их следует установить, сообразуясь с положениями, изложенными в § 2 гл. 8, и согласовать с инстанциями, утверждающими проект (например, с органами пожарной охраны, архитектурно-планировочным управлением города и пр.).

3. Устанавливается расчетное количество людских потоков. Для этого по проектному заданию (или по окончательному эскизу, если расчет ведется в стадии составления технико-экономических обоснований) устанавливаются группы помещений, отвечающие главному и подсобным функциональным процессам, протекающим в здании. Обычно для расчета движения людских потоков и определения размеров коммуникационных помещений можно ограничиться группой помещений главного функционального назначения, в которых, как правило, сосредоточивается наибольшее число людей. Например, если проектируется здание высшего учебного заведения, то, очевидно, для расчета следует взять аудитории как основные помещения, исключив административные, где бывает относительно немного людей.

Для выбранной группы помещений устанавливается расчетное количество людских потоков. Например, если

проектируется кинотеатр с двумя залами разной вместимости или различных архитектурных решений, то для каждого зала делается свой расчет движения людских потоков. В здании высшего учебного заведения с коридорной системой, если потоки из аудиторий по мере продвижения к выходу из здания сливаются, следует принимать один расчетный поток.

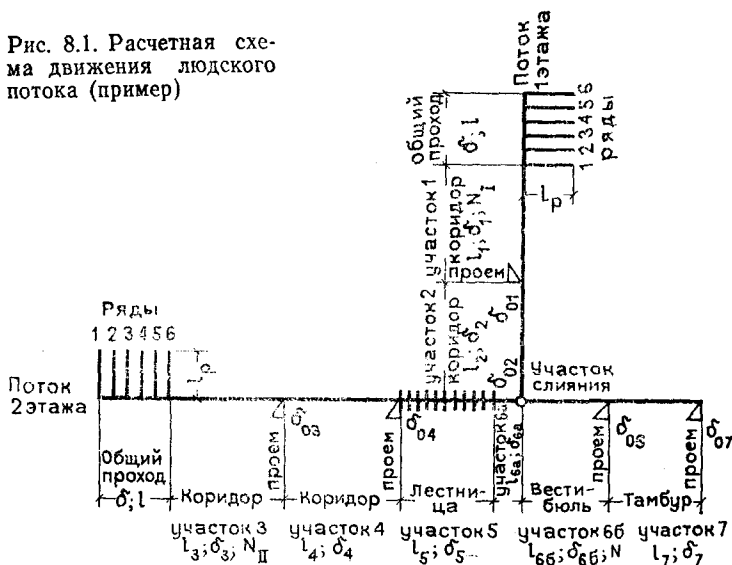
4. Выбираются наиболее вероятные пути движения людских потоков, что представляет довольно сложную задачу, поскольку объективных методов пока не существует. Здесь необходимо учитывать следующее. Люди всегда стараются идти к цели по кратчайшему пути. Из двух путей, ведущих к одной цели, они выбирают тот путь, который хорошо просматривается (прямой путь), свободнее и по которому легче идти. Этим, например, объясняется, что плотность потоков на параллельных путях обычно бывает одинакова. Наконец, бывает и так, особенно в аварийных условиях, что люди устремляются к выходу, который увидели перед собой в момент начала эвакуации, хотя в другой стороне выход может быть ближе. При этом всегда люди будут стремиться двигаться в сторону, противоположную очагу опасности, несмотря на то, что они могли бы быстрее покинуть опасную зону, если бы воспользовались выходом, расположенным в направлении очага опасности. Следовательно, выбор пути движения, например в зрительном зале, где обычно делается много выходов, будет условным. Принимая во внимание особенности поведения людей, можно выбрать наиболее вероятный путь движения. Но иногда приходится рассчитывать несколько вариантов направлений движения потоков, если наиболее вероятное направление определить не удается.

Выбранным путям движения должно отвечать расчетное количество потоков; находящихся в здании или помещении людей следует разбить на блоки или группы, образующие на некоторых отрезках пути самостоятельные потоки,двигающиеся до мест слияния с другими потоками.

В соответствии с установленным количеством людских потоков и путями их движения вычерчивается общая схема. На ней указываются пути движения, их характер и параметры (длина и ширина), проемы, их ширина, а также места слияния потоков (рис. 8.1)

5. Устанавливаются количество людей в каждом потоке (блоке или группе) и его начальная плотность на первом участке пути движения. Следует отметить, что выбор начальной плотности зависит от закономерностей формирования потоков, которые еще недостаточно

Рис. 8.1. Расчетная схема движения людского потока (пример)



изучены. Например, в театральные залы, как показано в главе 6, поток формируется в рядах кресел и затем в проходах между рядами, его формирование подчиняется сложным закономерностям, поэтому приходится допускать определенные упрощения, принимая в целях гарантии (создания запаса во времени) наиболее неблагоприятные условия. Например, если люди находятся на рабочих местах, расположенных вдоль прохода, то можно считать, что в момент начала движения они заполнят проход по всей его длине.

6. Расчет движения каждого потока производится путем определения параметров и времени движения на каждом участке при помощи приведенных в первом разделе формул с одновременным вычерчиванием графика движения (см. § 1 гл. 4). Расчет движения каждого потока (блока, группы) производится до места слияния с

другим потоком. Затем на график наносится время выхода головных и замыкающих частей обоих сливающихся потоков и дальше расчет ведется с учетом переформирования до слияния со следующим потоком. Следует отметить, что в целях облегчения расчета в сложных случаях целесообразно строить несколько графиков движения, например для каждого блока до места слияния.

7. Результаты расчета анализируются для установления правильности запроектированных параметров коммуникационных помещений. Здесь прежде всего проверяется соответствие результатов расчета установленным значениям $t_{\text{доп}}$ и $D_{\text{доп}}$. Если они оказались больше установленных, выявляются места, где происходит задержка движения, где оно осуществляется слишком медленно и где плотность людского потока превышает установленные пределы. В этих местах следует путем расширения соответствующих участков пути обеспечить такой ход процесса, который отвечал бы заданным условиям и не создавал причин для повышения напряженности процесса и связанных с ним несчастных случаев, особенно в аварийных условиях. Обычно расширяются те участки пути, на которых скорости движения потока имеют относительно небольшие величины и расширение которых не вызовет существенного увеличения стоимости здания. Наоборот, если в результате расчета значения t и D таковы, что имеется значительный запас по времени или по плотности, то сокращают размеры тех участков здания, которые могут дать наибольший экономический эффект (например, если сокращение ширины участка позволит уменьшить объем здания).

Анализ параметров коммуникационных помещений производится по результатам расчета как в нормальных (или комфортных), так и в аварийных условиях.

В прил. III приведены основные расчетные формулы.

§ 4. Пример расчета движения людских потоков и размеров коммуникационных помещений по первому предельному состоянию

Изложенная в предыдущем параграфе методика расчета движения людских потоков поясняется на следующем примере.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

1. Требуется обеспечить заданное время движения людских потоков для нормальных и аварийных условий в производственном здании промышленного предприятия (рис. 8.2).

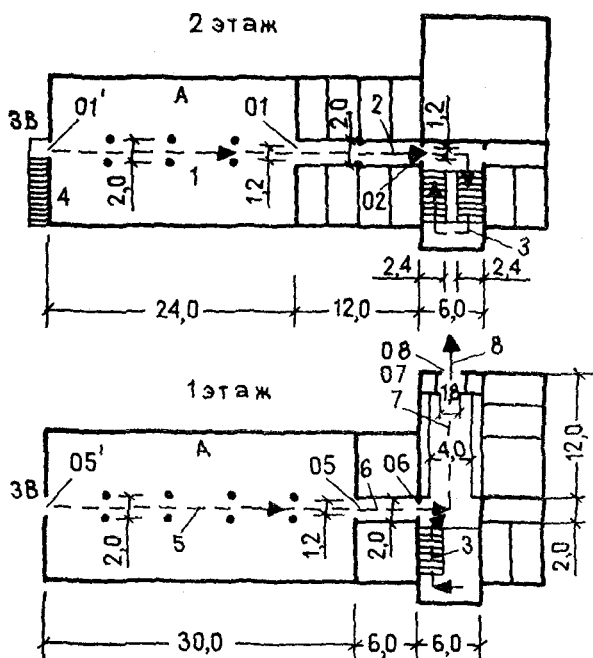


Рис. 8.2. Планы производственного здания

А — помещения, отвечающие основному функциональному назначению; ЗВ — запасные выходы; 1—8 — номера участков пути

2. В соответствии с поставленной задачей расчет ведется только по первому предельному состоянию. Для нормальных условий $t_{доп}$ не лимитируется, для аварийных — время эвакуации людей из здания установлено заданием на проектирование и в данном случае не должно превышать 2 мин.

3. Главному функциональному назначению здания отвечают два помещения на первом и втором этажах (А), остальные имеют вспомогательное назначение с небольшим числом находящихся в них людей и в рас-

чет могут не приниматься. Следовательно, на каждом этаже образуется по одному людскому потоку.

4. Пути движения потоков: поток второго этажа — проход производственного помещения (участок 1); проем 01; коридор 2; проем 02; лестница вниз 3; вестибюль 7; тамбур 8 выхода на улицу с двумя дверями 07 и 08; поток первого этажа — проход производственного помещения 5; проем 05; коридор 6; проем 06; вестибюль 7; тамбур 8 выхода на улицу.

В вестибюле оба потока сливаются.

Для аварийных условий (в случае задымления лестничной клетки или преграждения огнем пути из производственных помещений) предусмотрены запасные выходы. Из второго этажа — через проем 01' и по наружной одномаршевой пожарной лестнице (участок 4); из первого этажа — через проем 05 непосредственно на улицу.

Общая схема движения (по основным путям и через вестибюль) представлена на рис. 8.3. На схеме приняты следующие обозначения: сплошная линия — горизонтальный путь; сплошная линия с черточками — лестница (наклонный путь); треугольники — проемы; стрелка — место слияния.

Ширина пути δ_n , где n — порядковый номер участка. Ширина проемов δ_{on} , где o — обозначает проем, а n — порядковый номер участка, предшествующий проему. L_n — длина n -го участка.

5. В потоке первого этажа 150 чел. Поскольку уличная одежда хранится у рабочих мест, то $f=0,125 \text{ м}^2$. Тогда $N=150 \cdot 0,125=18,75 \text{ м}^2$. Предполагая, что в момент начала движения все люди вышли в проход, начальную плотность на участке формирования потока первого этажа (участок 5) можно определить по формуле (3.4а):

$$D_5 = \frac{N}{\delta_5 L_5} = \frac{18,75}{2 \cdot 30} = 0,31.$$

В потоке второго этажа 90 чел., $N=90 \cdot 0,125=11,25 \text{ м}^2$.

При аналогичных условиях начальная плотность потока на участке формирования (участок 1) будет

$$D_1 = \frac{N}{\delta_1 L_1} = \frac{11,25}{2 \cdot 24} = 0,235.$$

Условимся считать, что в скоплениях людей плот-

ность не превысит $D_c=0,92$. Эти исходные данные позволяют рассчитать время движения людей из здания и определить его характер на различных участках пути.

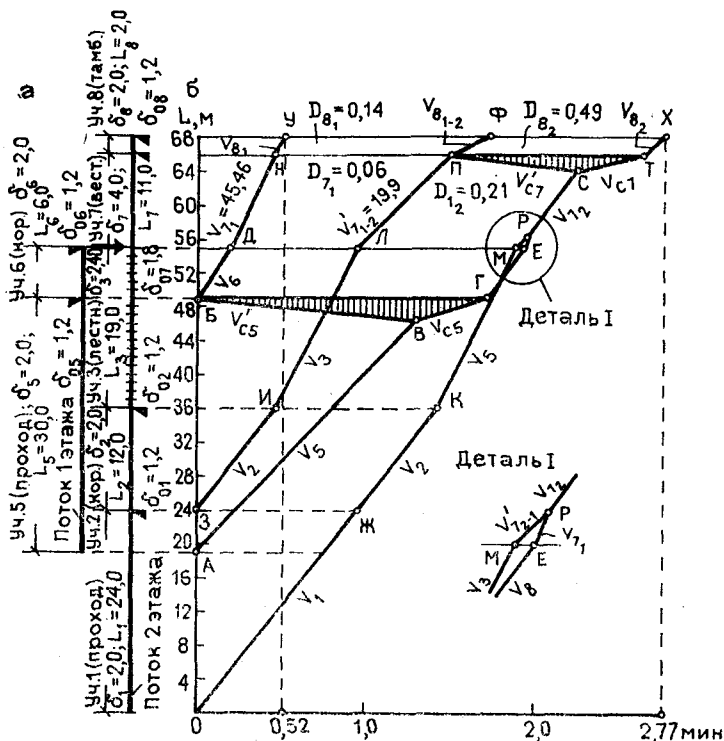


Рис. 8.3. Схема путей движения (а) и расчетный график для нормальных условий (б)

РАСЧЕТ ДЛЯ НОРМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ДВИЖЕНИЯ

Рассчитаем движение потока первого этажа от начала движения (участок 5) до места слияния (вестибюль, участок 7). Участок 5 (проход). $D_5=0,31$; по таблице прил. I для нормальных условий движения $v_5 = 21,15$ м/мин; $q_5 = 6,56$ м/мин;

$$Q_5 = q_5 \delta_5 = 6,56 \cdot 2 = 13,12 \text{ м}^2/\text{мин.}$$

Головная часть потока сразу начинает движение через проем 05 . Время движения замыкающей части потока по участку 5 составит

$$t_5 = \frac{L_5}{v_5} = \frac{30}{21,15} = 1,42 \text{ мин.}$$

Проем 05. По выражению (5.3)

$$q_{05} = \frac{q_5 \delta_5}{\delta_{05}} = \frac{6,56 \cdot 2}{1,2} = 10,95 \text{ м/мин,}$$

а $q_{\text{макс}} = 10,59 \text{ м/мин}$ (для проемов). Следовательно, $D_{05} = 0,92$ и по прил. I $v_{05} = 9,85 \text{ м/мин}$; $q_{05} = 9,06 \text{ м/мин}$; $Q_{05} = q_{05} \delta_{05} = 9,06 \cdot 1,2 = 10,85 \text{ м}^2/\text{мин}$, а перед проемом происходит скопление людей и задержка движения.

Скорость скопления людей определяется из выражения (5.8):

$$v'_{c5} = \frac{q_{05} \frac{\delta_{05}}{\delta_5} - q_5}{D_{05} - D_5} = \frac{9,06 \frac{1,2}{2} - 6,56}{0,92 - 0,31} = -1,84 \text{ м/мин;}$$

при этом оно начинается с момента движения, поскольку головная часть потока сразу проходит через проем 05. Скорость рассасывания скопления можно определить по формуле (5.9):

$$v_{c5} = v_{05} \frac{\delta_{05}}{\delta_5} = 9,85 \frac{1,2}{2} = 5,92 \text{ м/мин.}$$

Отрезок участка 5, на который распространится скопление, определяется с помощью зависимости (5.11) без учета величины скорости скопления:

$$l_{c5} = \frac{N}{Q_5} \frac{v'_{c5} v_5}{(v_5 + v'_{c5})} = \frac{18,75}{13,12} \frac{1,84 \cdot 21,15}{(21,15 + 1,84)} = 2,42 \text{ м.}$$

Максимальное количество скапливающихся перед проемом людей на основании зависимости (5.12) составит

$$N_{c5} = D_{05} \delta_5 l_{c5} = 0,92 \cdot 2 \cdot 2,42 = 4,45 \text{ м}^2, \text{ или } \approx 35 \div 36 \text{ чел.}$$

Нанесем полученные данные на график рис. 8.3. Из точки А, соответствующей началу движения замыкающей части потока первого этажа, проведем линию под углом, тангенс которого равен v_5 ; из точки В (место проема 05) проведем линию, отвечающую v'_{c5} (скорость образования скопления); так как v'_{c5} величина отрицательная, угол откладывается вниз; из места пересечения линий v_5 и v'_{c5} в точке В проведем линию v_{c5} (скорость рассасывания скопления людей) до пересечения с границей участка в точке Г; заштрихованный треуголь-

ник *БВГ* характеризует процесс во времени в месте скопления людей.

Фактическое время движения потока по участку определяется отрезком *БГ* и составляет 1,72 мин; оно может быть определено также и аналитически.

Определим время задержки:

$$\tau_{05} = N \left(\frac{1}{Q_{05}} - \frac{1}{Q_5} \right) = 18,75 \left(\frac{1}{10,85} - \frac{1}{13,12} \right) = 0,3 \text{ мин.}$$

Так как t_5 (без учета задержки) равно 1,42 мин, то $t_5 + \tau_{05} = 1,42 + 0,3 = 1,72$ мин.

Очевидно, что время движения через проем также равно

$$t_{05} = \frac{N}{Q_{05}} = \frac{18,75}{10,85} = 1,72 \text{ мин.}$$

Участок *б* (коридор). На основании зависимости (5.3)

$$q_6 = \frac{q_{05} \delta_{05}}{\delta_6} = \frac{9,06 \cdot 1,2}{2} = 5,43 \text{ м/мин.}$$

По прил. I получим

$$D_6 = 0,185; \quad v_6 = 29,4 \text{ м/мин}; \quad Q_6 = q_6 \delta_6 = 5,43 \cdot 2 = 10,85 \text{ м}^2/\text{мин},$$

т. е. равна пропускной способности проема *05*.

Ввиду того, что растекание потока в условиях нормального движения в данном примере мы не учитываем, время движения головной и замыкающей частей потока составит

$$t_6 = \frac{L_6}{v_6} = \frac{6}{29,4} = 0,2 \text{ мин.}$$

На графике движение головной и замыкающей частей со скоростью v_6 изображено отрезками *БД* и *ГЕ*.

Проем *06*. Исходя из зависимости (5.3):

$$q_{06} = \frac{q_6 \delta_6}{\delta_{06}} = \frac{5,43 \cdot 2}{1,2} = 9,06 \text{ м/мин},$$

что меньше $q_{\text{макс}} = 10,59$ м/мин, следовательно, задержки движения перед проемом не будет:

$$D_{06} = 0,38; \quad v_{06} = 23,83 \text{ м/мин};$$

$$Q_{06} = q_{06} \delta_{06} = 9,06 \cdot 1,2 = 10,85 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$t_{06} = \frac{N}{Q_{06}} = \frac{18,75}{10,85} = 1,72 \text{ мин.}$$

Таким образом, головная часть потока первого этажа выйдет в вестибюль (участок 7) через 0,2 мин после начала движения.

Произведем расчет движения потока второго этажа от начала движения (участок 1) до места слияния (вестибюль, участок 7).

Поскольку методика расчета ясна из предыдущего примера, опустим излишние пояснения, ссылки и вычисления.

Участок 1 (проход):

$$D_1 = 0,235; \quad v_1 = 25,39 \text{ м/мин}; \quad q_1 = 5,97 \text{ м/мин};$$

$$Q_1 = q_1 \delta_1 = 5,97 \cdot 2 = 11,93 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$t_1 = \frac{L_1}{v_1} = \frac{24}{25,39} = 0,95 \text{ мин.}$$

Проем 01:

$$q_{01} = \frac{q_1 \delta_1}{\delta_{01}} = \frac{5,97 \cdot 2}{1,2} = 9,95 \text{ м/мин} < q_{\text{макс}}$$

(задержки движения нет).

$$D_{01} = 0,51; \quad v_{01} = 19,47 \text{ м/мин};$$

$$Q_{01} = q_{01} \delta_{01} = 9,95 \cdot 1,2 = 11,93 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$t_{01} = \frac{N}{Q_{01}} = \frac{11,25}{11,93} = 0,95 \text{ мин.}$$

Участок 2 (коридор):

$$q_2 = q_{01} \frac{\delta_{01}}{\delta_2} = 9,95 \frac{1,2}{2} = 5,97 \text{ м/мин.}$$

Очевидно, при отсутствии задержки движения перед проемом 01 и одинаковой ширине параметры движения на участке 2 будут такими же, как на участке 1:

$$D_2 = 0,235; \quad v_2 = 25,39 \text{ м/мин}; \quad Q_2 = 11,93 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$t_2 = \frac{L_2}{v_2} = \frac{12}{25,39} = 0,47 \text{ мин.}$$

Проем 02. Параметры движения такие же, как в проеме 01:

$$q_{02} = 9,95 \text{ м/мин}; \quad D_{02} = 0,51; \quad v_{02} = 19,47 \text{ м/мин};$$

$$Q_{02} = 11,93 \text{ м}^2/\text{мин}; \quad t_{02} = 0,95 \text{ мин.}$$

Далее поток выходит на лестничную клетку (участок 3).

Участок 3 (лестница вниз):

$$q_3 = \frac{q_{02} \delta_{02}}{\delta_3} = \frac{9,95 \cdot 1,2}{2,4} = 4,98 \text{ м/мин};$$

$$D_3 = 0,125; \quad v_3 = 39,85 \text{ м/мин};$$

зательны следующие условия: число источников и мест притяжения должно быть больше двух (см. рис. 6.7, б); хотя бы два места притяжения должны находиться по одну сторону от прямой, проходящей через источники потоков (рис. 6.7, в); хотя бы одно из мест притяжения не находится на прямой, проходящей через другие и на отрезке прямой, заключенном между источниками (рис. 6.7, г).

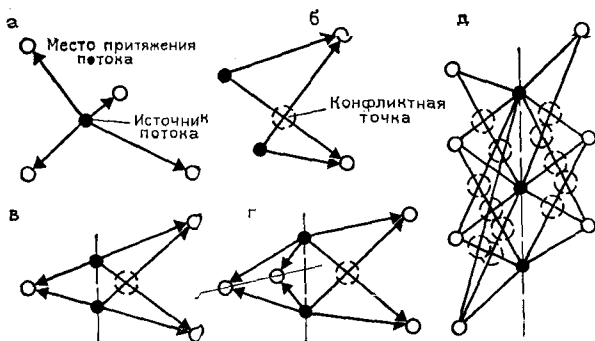


Рис. 6.7. Условия образования пересекающихся людских потоков
а — пересечения потоков нет; б, в, г, д — пересекающиеся людские потоки

Увеличение числа источников или мест притяжения резко увеличивает количество пересечений людских потоков (рис. 6.7, д).

Натурные наблюдения пересекающихся людских потоков и обработка результатов методами математической статистики позволили установить связь между скоростью и плотностью пересекающихся потоков, а также параметры и качественную картину процесса движения. Между скоростью и плотностью пересекающихся людских потоков установлена зависимость:

$$v = -619 D^3 + 900 D^2 - 576 D + 154 \text{ м/мин.} \quad (6.8)$$

Графическая интерпретация этой зависимости представлена на рис. 6.8, а в сравнении с другими видами движения людских потоков. На рис. 6.8, б приведена зависимость интенсивности движения от плотности пересекающихся потоков.

Характерной особенностью движения пересекающихся людских потоков является то, что оно протекает при

Нанесем на график отрезок $ЛП$, соответствующий v'_{7_1-2} .

После прекращения выхода в вестибюль потока со второго этажа в точке M туда будет выходить только поток с первого этажа, пополняя объединенный поток. Тогда

$$v'_{7_2-1} = \frac{q_{7_2} - q_{7_1}}{D_{7_2} - D_{7_1}} = \frac{5,7 - 2,72}{0,21 - 0,06} = 19,9 \text{ м/мин},$$

или

$$v'_{7_2-1} = v'_{7_1-2}.$$

Прямую, соответствующую v'_{7_2-1} , проводим из точки M до пересечения с прямой v_{7_1} и из точки E до пересечения в точке P , где прекращается пополнение объединенного потока. Далее замыкающая часть объединенного потока пойдет со скоростью $v_{7_2} = 27,27 \text{ м/мин}$ (прямая $РС$ на графике).

Проем 07 . В точке H (см. график) через $0,45$ мин после начала движения головная часть потока первого этажа достигнет тамбура

$$q_{07_1} = q_7 \frac{\delta_7}{\delta_{07}} = 2,72 \frac{4}{1,8} = 6,05 \text{ м/мин} < q_{0 \text{ макс}}$$

(задержки движения не будет).

$$D_{07_1} = 0,14; \quad v_{07_1} = 42,90 \text{ м/мин};$$

$$Q_{07_1} = q_{07_1} \delta_{07} = 6,05 \cdot 1,8 = 10,85 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

В точке $П$ через проем 07 начнется движение объединенного потока:

$$q_{07_2} = q_{7_2} \frac{\delta_7}{\delta_{07}} = 5,70 \frac{4}{1,8} = 12,65 \text{ м/мин} > q_{0 \text{ макс}};$$

перед тамбуром на участке 7 образуется скопление людей и произойдет задержка движения:

$$D_{07_2} = 0,92; \quad v_{07_2} = 9,85 \text{ м/мин}; \quad q_{07_2} = 9,06 \text{ м/мин};$$

$$Q_{07_2} = q_{07_2} \delta_{07} = 9,06 \cdot 1,8 = 16,3 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

Скорость образования скопления:

$$v'_{c7} = \frac{q_{07_1} \frac{\delta_{07}}{\delta_7} - q_{7_1}}{D_{07_1} - D_{7_1}} = \frac{9,06 \frac{1,8}{4} - 5,7}{0,92 - 0,21} = -2,3 \text{ м/мин.}$$

Проводим на графике прямую v'_7 из точки Π до пересечения с прямой v_{7_2} в точке C .

Скорость рассасывания скопления людей составит:

$$v_{c7} = v_{07_1} \frac{\delta_{07}}{\delta_7} = 9,85 \frac{1,8}{4} = 4,43 \text{ м/мин.}$$

Длина отрезка, на котором происходит скопление:

$$l_{c7} = \frac{N_{7_2}}{Q_{7_2}} \cdot \frac{v'_{c7} v_{7_2}}{v_{7_2} + v'_{c7}}.$$

Прежде чем определить l_{c7} , надо установить значение N_{7_2} , поскольку часть людей N_{7_1} вышла на участок 8 (тамбур). Время выхода первой части потока определяется по графику (отрезок HP) и составляет 1,05 мин, тогда

$$N_{7_1} = Q_{7_1} \cdot 1,05 = 10,85 \cdot 1,05 = 11,4 \text{ м}^2.$$

Так как общее количество людей 30 м², то $N_{7_2} = 18,6 \text{ м}^2$; тогда

$$l_{c7} = \frac{18,6}{22,8} \cdot \frac{2,3 \cdot 27,27}{(27,27 + 2,3)} = 1,76 \text{ м.}$$

Максимальное количество людей в скоплении:

$$N_{c7} = D_{\text{макс}} \delta_7 l_{c7} = 0,92 \cdot 4 \cdot 1,76 = 6,5 \text{ м}^2 (\approx 52 \text{ чел.}).$$

Участок 8 (тамбур). В тамбур выходит из проема 07 поток, также состоящий из двух частей:

$$q_{8_1} = q_{07_1} \frac{\delta_{07}}{\delta_8} = 6,05 \frac{1,8}{2} = 5,43 \text{ м/мин};$$

$$D_{8_1} = 0,185; \quad v_{8_1} = 29,4 \text{ м/мин};$$

$$Q_{8_1} = q_{8_1} \delta_8 = 5,43 \cdot 2 = 10,85 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$q_{8_2} = q_{07_2} \frac{\delta_{07}}{\delta_{08}} = 9,06 \frac{1,8}{2} = 8,15 \text{ м/мин};$$

$$D_{8_2} = 0,49; \quad v_{8_2} = 16,62 \text{ м/мин};$$

$$Q_{8_2} = q_{8_2} \delta_8 = 8,15 \cdot 2 = 16,3 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

Происходит переформирование потоков:

$$v'_{8_{1-2}} = \frac{q_{8_2} - q_{8_1}}{D_{8_2} - D_{8_1}} = \frac{8,15 - 5,43}{0,49 - 0,185} = 8,92 \text{ м/мин.}$$

Нанесем прямые v_{8_1} , v_{8_2} и v'_{8_1-2} на график (соответственно $HУ$, $ТХ$ и $ПФ$).

Проем 08 (выход за пределы здания):

$$q_{08_1} = q_{8_1} \frac{\delta_8}{\delta_{08}} = 5,43 \frac{2}{1,8} = 6,05 \text{ м/мин};$$

$$D_{08_1} = 0,14; \quad v_{08_1} = 42,9 \text{ м/мин};$$

$$Q_{08_1} = q_{08_1} \delta_{08} = 6,05 \cdot 1,8 = 10,85 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$q_{08_2} = q_{8_2} \frac{\delta_8}{\delta_{08}} = 8,15 \frac{2}{1,8} = 9,06 \text{ м/мин};$$

$$D_{08_2} = 0,38; \quad v_{08_2} = 23,83 \text{ м/мин};$$

$$Q_{08_2} = q_{08_2} \delta_{08} = 8,15 \cdot 2 = 16,3 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

Таким образом, выход людей за пределы здания начинается через 0,52 мин после начала движения и заканчивается через 2,77 мин (по графику). Процесс происходит при относительно небольших плотностях людского потока, но две задержки увеличивают продолжительность движения.

Для проверки правильности полученного результата определим число людей, вышедших из здания за установленное время. Оно должно быть равно заданному.

Время, определяемое отрезком $УФ$, составляет 1,22 мин, а отрезком $ФХ$ — 1,03 мин, тогда

$$N = 1,22 Q_{08_1} + 1,03 Q_{08_2} = 1,22 \cdot 10,85 + 1,03 \cdot 16,3 = \\ = 30,05 \text{ м}^2 (\approx 30 \text{ м}^2).$$

Ошибка ничтожна, и можно считать, что расчет произведен правильно.

РАСЧЕТ ДЛЯ АВАРИЙНЫХ УСЛОВИЙ ДВИЖЕНИЯ

Произведем такой же расчет для аварийных условий движения. Методика расчета аналогична предыдущей, за исключением учета растекания потока; параметры движения принимаются по прил. I для аварийных условий.

Расчет движения потока первого этажа (от участка 5 до участка 7).

Участок 5 (проход):

$$D_5 = 0,31; \quad v_5 = 29,14 \text{ м/мин}; \quad q_5 = 9,03 \text{ м/мин};$$

$$Q_5 = q_5 \delta_5 = 9,03 \cdot 2 = 18,06 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$t_5 = \frac{L_5}{v_5} = \frac{30}{29,14} = 1,03 \text{ мин}.$$

На графике рис. 8.4 движение замыкающей части потока изображается прямой АВ. Схема путей движения приведена на предыдущем рисунке.

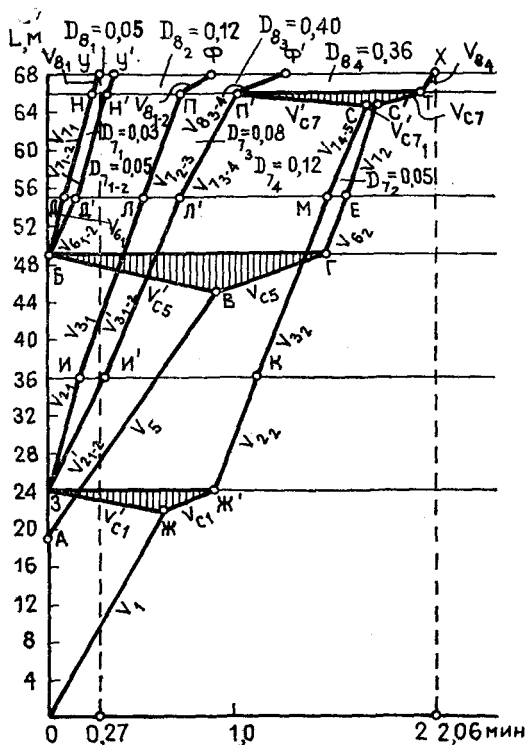


Рис. 8.4. Расчетный график для аварийных условий

Проём 05:

$$q_{05} = q_5 \frac{\delta_5}{\delta_{05}} = 9,03 \frac{2}{1,2} = 15,05 \text{ м/мин} > q_{0 \text{ макс}} = 13,27 \text{ м/мин},$$

т. е. происходят задержка движения и скопление людей:

$$D_{05} = D_c = 0,92; \quad v_{05} = 11,42 \text{ м/мин}; \quad q_{05} = 10,5 \text{ м/мин};$$

$$Q_{05} = q_{05} \delta_{05} = 10,5 \cdot 1,2 = 12,6 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$v'_{c5} = \frac{q_{05} \frac{\delta_{05}}{\delta_5} - q_5}{D_{05} - D_5} = \frac{10,50 \frac{1,2}{2} - 9,03}{0,92 - 0,31} = -4,47 \text{ м/мин};$$

$$v_{c5} = v_{05} \frac{\delta_{05}}{\delta_5} = 11,42 \frac{1,2}{2} = 6,85 \text{ м/мин};$$

$$l_{c5} = \frac{N}{Q_5} \cdot \frac{v'_{c5} v_5}{(v_5 + v'_{c5})} = \frac{18,75}{18,06} \frac{4,47 \cdot 29,14}{29,14 + 4,47} = 4,02 \text{ м};$$

$$N_{c5} = D_c \delta_5 l_{c5} = 0,92 \cdot 2 \cdot 4,02 = 7,4 \text{ м}^2 (\approx 59 \div 60 \text{ чел.});$$

$$\tau_{05} = N \left(\frac{1}{Q_{05}} - \frac{1}{Q_5} \right) = 18,75 \left(\frac{1}{12,6} - \frac{1}{18,06} \right) = 0,45 \text{ мин};$$

$$\tau_5 + \tau_{05} = 1,03 + 0,45 = 1,48 \text{ мин};$$

$$t_{05} = \frac{N}{Q_{05}} = \frac{18,75}{12,6} = 1,48 \text{ мин}.$$

Наносим полученные результаты на график (прямые *БВ* и *ВГ*). Участок 6 (коридор).

При растекании (см. § 4 гл. 4) головная часть потока пойдет с плотностью свободного движения:

$$D_{6_1} = 0,05; \quad v_{6_1} = 69,46 \text{ м/мин}; \quad q_{6_1} = 3,47 \text{ м/мин};$$

$$Q_{6_1} = q_{6_1} \delta_6 = 3,47 \cdot 2 = 6,94 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

Эта часть потока достигнет проема *Об* через

$$t_{6_1} = \frac{L_6}{v_{6_1}} = \frac{6}{69,46} = 0,09 \text{ мин (прямая БД на графике)}.$$

Таким образом, на участке образуется поток, состоящий из двух частей разной плотности; параметры второй части потока определяются обычным путем:

$$q_{6_2} = q_{05} \frac{\delta_{05}}{\delta_6} = 10,5 \frac{1,2}{2} = 6,3 \text{ м/мин};$$

$$D_{6_2} = 0,12; \quad v_{6_2} = 52,92 \text{ м/мин};$$

$$Q_{6_2} = q_{6_2} \delta_6 = 6,3 \cdot 2 = 12,6 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

Скорость переформирования первой и второй частей потока:

$$v'_{6_1-2} = \frac{q_{6_2} - q_{6_1}}{D_{6_2} - D_{6_1}} = \frac{6,3 - 3,47}{0,12 - 0,05} = 40,4 \text{ м/мин (прямая БД')}.$$

Замыкающая часть потока достигнет проема *Об* через

$$t_{6_2} = \frac{L_6}{v_{6_2}} = \frac{6}{52,92} = 0,11 \text{ мин (прямая ГЕ)}.$$

Проем *Об* (выход в вестибюль):

$$q_{06_1} = q_{6_1} \frac{\delta_6}{\delta_{06}} = 3,47 \frac{2}{1,2} = 5,78 \text{ м/мин};$$

$$D_{06_1} = 0,075; \quad v_{06_1} = 76,3 \text{ м/мин};$$

$$Q_{06_1} = q_{06_1} \delta_{06} = 5,78 \cdot 1,2 = 6,94 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$q_{06_2} = q_{6_2} \frac{\delta_6}{\delta_{06}} = 6,3 \frac{2}{1,2} = 10,5 \text{ м/мин};$$

$$D_{06_2} = 0,21; \quad v_{06_2} = 49,7 \text{ м/мин};$$

$$Q_{06_2} = q_{06_2} \delta_{06} = 10,5 \cdot 1,2 = 12,6 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

Поскольку поток состоит из двух частей, вместо определения времени прохода через проем *Об* для упрощения целесообразно принять результат, полученный по графику, проверив количество людей.

Отрезок *ДД'* соответствует 0,06 мин; отрезок *Д'Е* — 1,45 мин, тогда

$$N = 0,06 Q_{06_1} + 1,45 Q_{06_2} = 0,06 \cdot 6,94 + 1,45 \cdot 12,6 = \\ = 18,7 (\approx 18,75 \text{ м}^2).$$

Произведем расчет движения людского потока со второго этажа (от участка *1* до участка *7*):
участок *1* (проход):

$$D_1 = 0,235; \quad v_1 = 35,68 \text{ м/мин}; \quad q_1 = 8,38 \text{ м/мин};$$

$$Q_1 = q_1 \delta_1 = 8,38 \cdot 2 = 16,76 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$t_1 = \frac{L_1}{v_1} = \frac{24}{35,68} = 0,67 \text{ мин (отрезок ОЖ)}.$$

Проем *О1*:

$$q_{01} = q_1 \frac{\delta_1}{\delta_{01}} = 8,38 \frac{2}{1,2} = 13,95 > q_{0 \text{ макс}} = 13,27 \text{ м/мин},$$

т. е. образуется скопление людей (при нормальных условиях движения скопления перед проемом *О1* не было):

$$D_{01} = 0,92; \quad v_{01} = 11,42 \text{ м/мин}; \quad q_{01} = 10,5 \text{ м/мин};$$

$$Q_{01} = q_{01} \delta_{01} = 10,50 \cdot 1,2 = 12,6 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$v'_{c1} = \frac{q_{01} \frac{\delta_{01}}{\delta_1} - q_1}{D_{01} - D_1} = \frac{10,5 \frac{1,2}{2} - 8,38}{0,92 - 0,235} = -3,04 \text{ м/мин};$$

$$v_{c1} = v_{01} \frac{\delta_{01}}{\delta_1} = 11,42 \frac{1,2}{2} = 6,85 \text{ м/мин};$$

$$l_{c1} = \frac{N}{Q_1} \frac{v'_{c1} v_1}{v_1 + v'_{c1}} = \frac{11,25}{16,76} \frac{3,04 \cdot 35,68}{35,68 + 3,04} = 1,94 \text{ м}.$$

Количество людей в скоплении:

$$N_{c1} = D_c \delta_1 t_{c1} = 0,92 \cdot 2 \cdot 1,94 = 3,57 \text{ м}^2 (\approx 28 \div 29 \text{ чел.});$$

$$\tau_{01} = N \left(\frac{1}{Q_{01}} - \frac{1}{Q_1} \right) = 11,25 \left(\frac{1}{12,6} - \frac{1}{16,76} \right) = 0,22 \text{ мин.}$$

Участок 2 (коридор). Происходит растекание потока:

$$D_{2_1} = 0,05; \quad v_{2_1} = 69,46 \text{ м/мин}; \quad q_{2_1} = 3,47 \text{ м/мин};$$

$$Q_{2_1} = q_{2_1} \delta_2 = 3,47 \cdot 2 = 6,94 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$t_{2_1} = \frac{L_2}{v_2} = \frac{12}{69,46} = 0,17 \text{ мин (прямая ЗИ)};$$

$$q_{2_2} = q_{01} \frac{\delta_{01}}{\delta_2} = 10,5 \frac{1,2}{2} = 6,3 \text{ м/мин};$$

$$D_{2_2} = 0,12; \quad v_{2_2} = 52,92 \text{ м/мин};$$

$$Q_{2_2} = q_{2_2} \delta_2 = 6,3 \cdot 2 = 12,60 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$v'_{2_{1-2}} = \frac{q_{2_2} - q_{2_1}}{D_{2_2} - D_{2_1}} = \frac{6,3 - 3,47}{0,12 - 0,05} = 40,4 \text{ м/мин (прямая ЗИ')};$$

$$t_{2_2} = \frac{L_2}{v_{2_2}} = \frac{12}{52,92} = 0,23 \text{ (прямая Ж'К)}.$$

Проем 02:

$$q_{02_1} = q_{2_1} \frac{\delta_2}{\delta_{02}} = 3,47 \frac{2}{1,2} = 5,78 \text{ м/мин} < q_{0 \text{ макс}};$$

$$D_{02_1} = 0,075; \quad v_{02_1} = 76,3 \text{ м/мин};$$

$$Q_{02_1} = q_{02_1} \delta_{02} = 5,78 \cdot 1,2 = 6,94 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$q_{02_2} = q_{2_2} \frac{\delta_2}{\delta_{02}} = 6,3 \frac{2}{1,2} = 10,5 \text{ м/мин};$$

$$D_{02_2} = 0,21; \quad v_{02_2} = 49,7 \text{ м/мин};$$

$$Q_{02_2} = q_{02_2} \delta_{02} = 10,5 \cdot 1,2 = 12,6 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

Участок 3 (лестница). Поток, выходящий на лестницу, состоит из двух частей разной плотности (за счет растекания):

$$q_{3_1} = q_{02_1} \frac{\delta_{02}}{\delta_3} = 5,78 \frac{1,2}{2,4} = 2,89 \text{ м/мин} < q_{\text{макс}} = 9,05 \text{ м/мин}$$

(скопления и задержки движения нет);

$$D_{3_1} = 0,05; \quad v_{3_1} = 56,13 \text{ м/мин};$$

$$Q_{3_1} = q_{3_1} \delta_3 = 2,89 \cdot 2,4 = 6,94 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$t_{3_1} = \frac{L_3}{v_{3_1}} = \frac{19}{56,13} = 0,34 \text{ мин (прямая ИЛ)};$$

$$q_{3_2} = q_{02} \frac{\delta_{02}}{\delta_3} = 10,5 \frac{1,2}{2,4} = 5,25 \text{ м/мин} < q_{\text{макс}};$$

$$D_{3_2} = 0,10; \quad v_{3_2} = 51,04 \text{ м/мин};$$

$$Q_{3_2} = q_{3_2} \delta_3 = 5,25 \cdot 2,4 = 12,6 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$v'_{3_{1-2}} = \frac{q_{3_2} - q_{3_1}}{D_{3_2} - D_{3_1}} = \frac{5,25 - 2,89}{0,1 - 0,05} = 47,2 \text{ м/мин (прямая И'Л')};$$

$$t_{3_2} = \frac{L_3}{v_{3_2}} = \frac{19}{51,4} = 0,37 \text{ мин (прямая КМ)}.$$

Целесообразно проверить расчет.

Отрезок $ЛЛ'$, определяющий время выхода первой части потока с $Q_{3_1} = 6,94 \text{ м}^2/\text{мин}$, равен 0,19 мин; отрезок $Л'М$, определяющий время выхода второй части потока с $Q_{3_2} = 12,6 \text{ м}^2/\text{мин}$, — 0,79 мин. Тогда $Q_{3_2} = 0,19 \cdot 6,94 + 0,79 \cdot 12,6 = 11,28 \approx 11,25 \text{ м}^2/\text{мин}$ (90 чел.). Таким образом, на участке 7 (вестибюль) образуется поток, состоящий из пяти частей с разными плотностями (см. рис. 8.4).

Далее произведем расчет движения потоков от места слияния (вестибюль) до выхода из здания.

Участок 7:

$$q_{7_1} = q_{06_1} \frac{\delta_{06}}{\delta_7} = 5,78 \frac{1,2}{4} = 1,73 \text{ м/мин};$$

$$D_{7_1} = 0,03; \quad v_{7_1} = 75,24 \text{ м/мин};$$

$$Q_{7_1} = q_{7_1} \delta_7 = 1,73 \cdot 4 = 6,94 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

$$t_{7_1} = \frac{L_7}{v_{7_1}} = \frac{11}{75,24} = 0,15 \text{ мин (прямая ДН)};$$

$$q_{7_2} = q_{06_2} \frac{\delta_{06}}{\delta_7} = 10,5 \frac{1,2}{4} = 3,15 \text{ м/мин};$$

$$D_{7_2} = 0,05; \quad v_{7_2} = 69,46 \text{ м/мин};$$

$$Q_{7_2} = q_{7_2} \delta_7 = 3,15 \cdot 4 = 12,6 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$v'_{7_{1-2}} = \frac{q_{7_2} - q_{7_1}}{D_{7_2} - D_{7_1}} = \frac{3,15 - 1,73}{0,05 - 0,03} = 71 \text{ м/мин (прямая Д'Н')}.$$

В точке $Л$ в вестибюль начинает выходить головная часть потока второго этажа; происходит слияние потоков:

$$q_{7_3} = \frac{Q_{06_2} + Q_{3_1}}{\delta_7} = \frac{12,6 + 6,94}{4} = 4,89 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$D_{7_3} = 0,08; \quad v_{7_3} = 61,71 \text{ м/мин};$$

$$Q_{7_3} = q_{7_3} \delta_7 = 19,54 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$v'_{7_{2-3}} = \frac{q_{7_3} - q_{7_2}}{D_{7_3} - D_{7_2}} = \frac{4,89 - 3,15}{0,08 - 0,05} = 58 \text{ м/мин (прямая ЛП)};$$

$$q_{7_1} = \frac{Q_{06_2} + Q_{3_2}}{\delta_7} = \frac{12,6 + 12,6}{4} = 6,3 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$D_{7_4} = 0,12; \quad v_{7_4} = 52,92 \text{ м/мин};$$

$$Q_{7_4} = q_{7_4} \delta_4 = 6,3 \cdot 4 = 25,2 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$v'_{7_{3-4}} = \frac{q_{7_4} - q_{7_3}}{D_{7_4} - D_{7_3}} = \frac{6,3 - 4,89}{0,12 - 0,08} = 35,2 \text{ м/мин (прямая Л'П')}.$$

В точке *M* выход потока со второго этажа заканчивается, так как вслед за частью плотностью $D_{7_4} = 0,12$ пойдет часть потока первого этажа плотностью $D_{7_2} = 0,05$:

$$v'_{7_{4-5}} = \frac{q_{7_4} - q_{7_2}}{D_{7_4} - D_{7_2}} = \frac{6,3 - 3,15}{0,12 - 0,05} = 45 \text{ м/мин (прямая МС)}.$$

Очевидно, что замыкающая часть потока по участку 7 пойдет со скоростью $v_{7_2} = 69,46 \text{ м/мин}$ (прямая ЕС').

Проем 07:

$$q_{07_1} = q_{7_1} \frac{\delta_7}{\delta_{07}} = 1,73 \frac{4}{1,8} = 3,85 \text{ м}^2/\text{мин} < q_{0 \text{ макс}};$$

$$D_{07_1} = 0,045; \quad v_{07_1} = 84,37 \text{ м/мин};$$

$$Q_{07_1} = q_{07_1} \delta_{07} = 3,85 \cdot 1,8 = 6,94 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$q_{07_2} = q_{7_2} \frac{\delta_7}{\delta_{07}} = 3,15 \frac{4}{1,8} = 7 \text{ м}^2/\text{мин} < q_{0 \text{ макс}};$$

$$D_{07_2} = 0,1; \quad v_{07_2} = 70,29 \text{ м/мин};$$

$$Q_{07_2} = q_{07_2} \delta_{07} = 7 \cdot 1,8 = 12,6 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$q_{07_3} = q_{7_3} \frac{\delta_7}{\delta_{07}} = 4,89 \frac{4}{1,8} = 10,85 \text{ м}^2/\text{мин} < q_{0 \text{ макс}};$$

$$D_{07_3} = 0,235; \quad v_{07_3} = 46,22 \text{ м/мин};$$

$$Q_{07_3} = q_{07_3} \delta_{07} = 10,85 \cdot 1,8 = 19,54 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$q_{07_4} = q_{7_4} \frac{\delta_7}{\delta_{07}} = 6,3 \frac{4}{1,8} = 14 \text{ м}^2/\text{мин} > q_{0 \text{ макс}} = 13,27 \text{ м}^2/\text{мин}$$

(задержка движения и скопление людей);

$$D_{07_4} = 0,92; \quad v_{07_4} = 11,42 \text{ м/мин}; \quad q_{07_4} = 10,5 \text{ м/мин};$$

$$Q_{07_4} = q_{07_4} \delta_{07} = 10,5 \cdot 1,8 = 18,9 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$v'_{c7} = \frac{q_{07_4} \frac{\delta_{07}}{\delta_7} - q_{7_4}}{D_{07_4} - D_{7_4}} = \frac{10,5 \frac{1,8}{4} - 6,3}{0,92 - 0,12} = -1,96 \text{ м/мин (пря-}$$

мая П'С);

$$v_{c7} = v_{07_4} \frac{\delta_{07}}{\delta_7} = 11,42 \frac{1,8}{4} = 5,14 \text{ м/мин};$$

$$l_{c7} = \frac{N_{7_4}}{Q_{7_4}} \frac{v'_{c7} v_{7_4}}{v_{7_4} + v_{c7}} = \frac{18,42}{25,2} \frac{1,96 \cdot 52,92}{52,92 + 1,96} = 1,38 \text{ м.}$$

Количество вышедших людей $N_{07_1} + N_{07_2} + N_{07_3}$ определяется:

$$H = 0,07 \text{ мин}; \quad H'П = 0,4 \text{ мин}; \quad ПП' = 0,31 \text{ мин},$$

тогда:

$$N_{07_1} = 0,07 Q_{07_1} = 0,07 \cdot 6,94 = 0,48 \text{ м}^2;$$

$$N_{07_2} = 0,4 Q_{07_2} = 0,4 \cdot 12,6 = 5,04 \text{ м}^2;$$

$$N_{07_3} = 0,31 Q_{07_3} = 0,31 \cdot 19,5 = 6,06 \text{ м}^2;$$

$$N_{07_1} + N_{07_2} + N_{07_3} = 11,58 \text{ м}^2.$$

Следовательно, остались: $N_{7_4} = N - 11,58 = 18,42 \text{ м}^2;$

$$N_{c7} = D_{\text{макс}} \delta_7 l_{c7} = 0,92 \cdot 4 \cdot 1,38 = 5,08 \text{ м}^2 \text{ (40 чел.)}.$$

В точке С скорость образования скопления людей изменится, так как к нему подойдет поток плотностью $D_{7_2} = 0,05$:

$$v'_{c7_1} = \frac{q_{07_4} \frac{\delta_{07}}{\delta_7} - q_{7_2}}{D_{07_4} - D_{7_2}} = \frac{10,5 \frac{1,8}{4} - 3,15}{0,92 - 0,05} = 1,8 \text{ м/мин}.$$

Поскольку v'_{c7_1} получило положительное значение, началось рассасывание скопления.

Проводим прямую CC' , соответствующую найденной скорости v'_{c7_1} . В точке C' скорость рассасывания скопления станет равной v_{c7} (прямая $C'T$).

Участок 8 (тамбур). В нем поток будет состоять из четырех частей вместо пяти, что объясняется задержкой движения перед проёмом 07:

$$q_{8_1} = q_{07_1} \frac{\delta_{07}}{\delta_8} = 3,85 \frac{1,8}{2} = 3,47 \text{ м/мин};$$

$$D_{8_1} = 0,05; \quad v_{8_1} = 69,46 \text{ м/мин};$$

$$Q_{8_1} = q_{8_1} \delta_8 = 3,47 \cdot 2 = 6,94 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$t_{8_1} = \frac{L_8}{v_{8_1}} = 0,03 \text{ мин (прямая НУ)};$$

$$q_{8_2} = q_{07_2} \frac{\delta_{07}}{\delta_8} = 7 \frac{1,8}{2} = 6,3 \text{ м/мин};$$

$$D_{8_2} = 0,12; \quad v_{8_2} = 52,92 \text{ м/мин};$$

$$Q_{8_2} = q_{8_2} \delta_8 = 6,3 \cdot 2 = 12,6 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$v'_{8_{1-2}} = \frac{q_{8_2} - q_{8_1}}{D_{8_2} - D_{8_1}} = \frac{6,3 - 3,47}{0,12 - 0,05} = 40,4 \text{ м/мин (прямая Н'У')};$$

$$q_{8_3} = q_{07_3} \frac{\delta_{07}}{\delta_8} = 10,85 \frac{1,8}{2} = 9,77 \text{ м/мин};$$

$$D_{8_3} = 0,4; \quad v_{8_3} = 24,48 \text{ м/мин};$$

$$Q_{8_3} = q_{8_3} \delta_8 = 9,77 \cdot 2 = 19,54 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$v'_{8_{2-3}} = \frac{q_{8_3} - q_{8_2}}{D_{8_3} - D_{8_2}} = \frac{9,77 - 6,3}{0,4 - 0,12} = 12,4 \text{ м/мин (прямая ПФ)};$$

$$q_{8_4} = q_{07_4} \frac{\delta_{07}}{\delta_8} = 10,5 \frac{1,8}{2} = 9,45 \text{ м/мин};$$

$$D_{8_4} = 0,36; \quad v_{8_4} = 26,22 \text{ м/мин};$$

$$Q_{8_4} = q_{8_4} \delta_8 = 9,45 \cdot 2 = 18,9 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$v'_{8_{3-4}} = \frac{q_{8_4} - q_{8_3}}{D_{8_4} - D_{8_3}} = \frac{9,45 - 9,77}{0,36 - 0,4} = 8 \text{ м/мин (прямая П'Ф')}.$$

Очевидно, что замыкающая часть потока пойдет со скоростью $v_{8_4} = 26,22$ (прямая ТХ).

Проем 08 (выход за пределы здания):

$$q_{08_1} = q_{8_1} \frac{\delta_8}{\delta_{08}} = 3,47 \frac{2}{1,8} = 3,85 \text{ м/мин} < q_0 \text{ макс};$$

$$D_{08_1} = 0,045; \quad v_{08_1} = 84,37 \text{ м/мин};$$

$$Q_{08_1} = q_{08_1} \delta_{08} = 3,85 \cdot 1,8 = 6,94 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$q_{08_2} = q_{8_2} \frac{\delta_8}{\delta_{08}} = 6,3 \frac{2}{1,8} = 7 \text{ м/мин} < q_0 \text{ макс};$$

$$D_{08_2} = 0,1; \quad v_{08_2} = 70,29 \text{ м/мин};$$

$$Q_{08_2} = q_{08_2} \delta_{08} = 7 \cdot 1,8 = 12,6 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$q_{08_3} = q_{8_3} \frac{\delta_8}{\delta_{08}} = 9,77 \frac{2}{1,8} = 10,85 \text{ м/мин} < q_{0 \text{ макс}};$$

$$D_{08_3} = 0,235; \quad v_{08_3} = 46,22 \text{ м/мин};$$

$$Q_{08_3} = q_{08_3} \delta_{08} = 10,85 \cdot 1,8 = 19,54 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$q_{08_4} = q_{8_4} \frac{\delta_8}{\delta_{08}} = 9,45 \frac{2}{1,8} = 10,5 \text{ м/мин} < q_{0 \text{ макс}};$$

$$D_{08_4} = 0,21; \quad v_{08_4} = 49,7 \text{ м/мин};$$

$$Q_{08_4} = q_{08_4} \delta_{08} = 10,5 \cdot 1,8 = 18,9 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

Проверим расчет. Определяемое отрезком $УУ'$ время составляет 0,09 мин; $У'Ф$ — 0,51 мин; $ФФ'$ — 0,4 мин и $Ф'Х$ — 0,8 мин. Тогда

$$\begin{aligned} N &= 0,09 Q_{08_3} + 0,51 Q_{08_3} + 0,4 Q_{08_3} + 0,8 Q_{08_4} = \\ &= 0,09 \cdot 6,94 + 0,51 \cdot 12,6 + 0,4 \cdot 19,54 + 0,8 \cdot 18,9 = 29,99 = \\ &= 30 \text{ м}^2. \end{aligned}$$

Таким образом, при аварийном движении выход на улицу начинается через 0,25 мин после начала движения и заканчивается через 2,06 мин (по графику), т. е. практически в пределах установленного $t_{\text{доп}} = 2$ мин.

Оценивая результаты расчета движения людских потоков в нормальных и аварийных условиях, можно сделать следующие выводы.

Продолжительность движения в аварийных условиях меньше, чем в нормальных (2,06 мин против 2,77 мин); плотность потоков также несколько меньше из-за растекания и более интенсивного хода процесса, а также в результате задержек движения, которых в аварийных условиях больше; кроме того, движение более напряженное.

При задержках и скоплении людей происходит как бы «растягивание» движения во времени и снижение плотностей на последующих участках. Это наблюдается в театрах после окончания спектакля, когда публику задерживают в зале или фойе, перекрывая проход, чтобы освободить вестибюль.

Однако таким приемом можно пользоваться только в нормальных и комфортных условиях движения. В аварийных ситуациях задержки движения на отдельных участках пути опасны.

В рассматриваемом примере в нормальных условиях движения скопления людей возникли на участке 5 перед проемом 05 (поток первого этажа) и перед выходом из

вестибюля в тамбур (на участке 7 перед проемом 07); в аварийных условиях — в этих же местах и, кроме того, на участке 1 перед проемом 01.

РАСЧЕТ БЕСПРЕПЯТСТВЕННОГО ДВИЖЕНИЯ

Предположим, что, несмотря на удовлетворительный срок для эвакуации, решено обеспечить беспрепятственное движение людского потока на всем пути до конца движения, чтобы избежать скоплений, которые в аварийных условиях могут привести к нежелательным последствиям.

Пользуясь выражением (5.8), определим требуемую ширину проемов 05 и 01:

Для нормальных условий (проем 05)

$$\delta_{05}^{\text{треб}} = q_5 \frac{\delta_5}{q_0 \text{ макс}} = 6,56 \frac{2}{10,59} = 1,24 \text{ м};$$

для аварийных условий (проем 05)

$$\delta_{05}^{\text{треб}} = q_5 \frac{\delta_5}{q_0 \text{ макс}} = 9,03 \frac{2}{13,27} = 1,37 \text{ м};$$

для аварийных условий (проем 01)

$$\delta_{01}^{\text{треб}} = q_1 \frac{\delta_1}{q_0 \text{ макс}} = 8,38 \frac{2}{13,27} = 1,27 \text{ м}.$$

Следовательно, учитывая требования унификации, целесообразно принять ширину проемов 05 и 01 не 1,2 м, а 1,4 м по большему полученному значению $\delta_{\text{треб}}$. Очевидно, что проемы 06 и 02 также следует увеличить до 1,4 м.

Ликвидировав таким образом задержку движения в аварийных условиях перед проемом 01 и увеличив соответственно его пропускную способность с 12,1 м²/мин до $Q_{01} = Q_1 = 16,76$ м²/мин, необходимо проверить, не образуется ли скопления людей перед лестницей (участком 3) (проем 02 также будет иметь пропускную способность $Q_{02} = 16,76$ м²/мин). Для этого при $\delta_{02} = 1,4$ м и в аварийных условиях определим:

$$q_{02} = \frac{Q_{02}}{\delta_{02}} = \frac{16,76}{1,4} = 11,95 \text{ м/мин};$$

$$q_3 = q_{02} \frac{\delta_{02}}{\delta_3} = 11,95 \frac{1,4}{2,4} = 6,98 \text{ м/мин},$$

что меньше $q_0 = 9,05$ м/мин (для лестниц). Проверим расчет для нормальных условий движения:

$$q_{02} = \frac{Q_2}{\delta_{02}} = \frac{11,93}{1,4} = 8,55 \text{ м/мин};$$

$$q_3 = q_{02} \frac{\delta_{02}}{\delta_3} = 8,55 \frac{1,4}{2,4} = 4,98 \text{ м/мин.}$$

Для лестниц в этих условиях $q_0 = 7,48$ м/мин. Следовательно, при $\delta_3 = 2,4$ м скопления перед лестницей не будет.

Проверим в новых условиях ширину вестибюля, принимая наихудший случай, т. е. объединенный поток наибольшего наполнения.

Для нормальных условий Q_{06} при беспрепятственном движении будет равна $Q_5 = 13,12$ м²/мин;

$$Q_3 = Q_1 = 11,93 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$q_7 = \frac{Q_{06} + Q_3}{\delta_7} = \frac{13,12 + 11,93}{4} = 6,27 \text{ м/мин,}$$

что меньше $q_{\text{макс}} = 10,13$ м/мин. Но плотность потока возрастает до 0,27 вместо 0,21.

Для аварийных условий:

$$Q_{06} = Q_5 = 18,06 \text{ м}^2/\text{мин}; \quad Q_3 = Q_1 = 16,76 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$q_7 = \frac{Q_{06} + Q_3}{\delta_7} = \frac{18,06 + 16,76}{4} = 8,7 \text{ м/мин,}$$

что также меньше $q_{\text{макс}} = 12,42$ м/мин. Плотность составит также 0,27 вместо 0,12.

Необходимо проверить выход в тамбур (проем 07): для нормальных условий

$$q_{07} = q_7 \frac{\delta_7}{\delta_{07}} = 6,27 \frac{4}{1,8} = 13,9 \text{ м/мин,}$$

что превышает $q_{\text{омакс}} = 10,59$ м/мин. Тогда

$$\delta_{07}^{\text{треб}} = q_7 \frac{\delta_7}{q_{0 \text{ макс}}} = 6,27 \frac{4}{10,59} = 2,36 \text{ м};$$

для аварийных условий

$$q_{07} = q_7 \frac{\delta_7}{\delta_{07}} = 8,7 \frac{4}{1,8} = 19,35 \text{ м/мин,}$$

что также больше $q_{\text{омакс}} = 13,27$ м/мин;

$$\delta_{07}^{\text{треб}} = q_7 \frac{\delta_7}{q_{0 \text{ макс}}} = 8,7 \frac{4}{13,27} = 2,62 \text{ м.}$$

Следовательно, вместо одной двери в проеме 07 шириной 1,8 м целесообразно запроектировать две шириной

Рис. 8.5. Расчетный график для беспрепятственного движения в аварийных условиях

не менее 1,3 м каждая, соответственно увеличив ширину тамбура (участок 8) до 3 м, а двери в проеме 08 принять такими же, как в проеме 07.

Заведомо можно сказать, что при новой ширине проемов, обеспечивающей беспрепятственное движение, условия $t_{дрп}$ будут выдержаны. Однако для установления времени движения необходимо расчет провести повторно.

Произведем расчет для аварийных условий с построением графика движения (рис. 8.5); вычисления и пояснения опускаем.

Поток первого этажа $N=18,75$ м² (от участка 5 до участка 7).

Участок 5 (проход) ($L_5=30$ м; $\delta_5=2$):

$$D_5 = 0,31; v_5 = 29,14 \text{ м/мин}; q_5 = 9,03 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$Q_5 = 18,06 \text{ м}^2/\text{мин}; t_5 = 1,03 \text{ мин (прямая AB)}.$$

Проем 05 ($\delta_{05}=1,4$ м):

$$q_{05} = 12,9 \text{ м}^2/\text{мин} < q_{0 \text{ макс}}; D_{05} = 0,49;$$

$$v_{05} = 26,32 \text{ м/мин}; Q_{05} = 18,06 \text{ м}^2/\text{мин}; t_{05} = 1,03 \text{ мин}.$$

Участок 6 (коридор) ($L_6=6$ м; $\delta_6=2$ м). Растеканье потока:

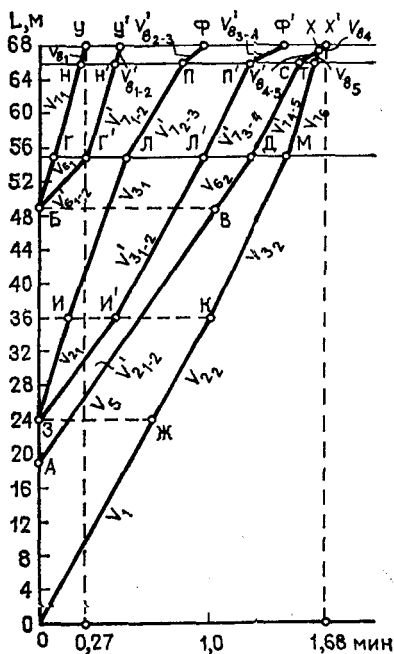
$$D_{6_1} = 0,05; v_{6_1} = 69,46 \text{ м/мин};$$

$$q_{6_1} = 3,47 \text{ м}^2/\text{мин}; Q_{6_1} = 6,94 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$t_{6_1} = 0,09 \text{ мин (прямая БГ)};$$

$$q_{6_2} = 9,03 \text{ м}^2/\text{мин}; D_{6_2} = 0,31; v_{6_2} = 29,14 \text{ м/мин};$$

$$Q_{6_2} = 18,06 \text{ м}^2/\text{мин}; t_{6_2} = 0,21 \text{ мин (прямая ВД)};$$



$$v_{6_{1-2}}' = 21,4 \text{ м/мин (прямая БГ')}.$$

Проем 06 ($\delta_{06} = 1,4 \text{ м}$):

$$q_{06_1} = 4,96 \text{ м/мин}; D_{06_1} = 0,06; v_{06_1} = 80,15 \text{ м/мин};$$

$$Q_{06_1} = 6,94 \text{ м}^2/\text{мин}; q_{06_2} = 12,9 \text{ м/мин}; D_{06_2} = 0,49;$$

$$v_{06_2} = 26,32 \text{ м/мин}; Q_{06_2} = 18,06 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

Поток второго этажа $N = 11,25 \text{ м}^2$ (от участка 1 до участка 7).

Участок 1 (проход) ($L_1 = 24 \text{ м}$; $\delta_1 = 2 \text{ м}$):

$$D_1 = 0,235; v_1 = 35,68 \text{ м/мин}; q_1 = 8,38 \text{ м/мин};$$

$$Q_1 = 16,76 \text{ м}^2/\text{мин}; t_1 = 0,67 \text{ мин (прямая ОЖ)}.$$

Проем 01 ($\delta_{01} = 1,4 \text{ м}$):

$$q_{01} = 11,95 \text{ м/мин} < q_{0 \text{ макс}}; D_{01} = 0,34; v_{01} = 35,21 \text{ м/мин};$$

$$Q_{01} = 16,76 \text{ м}^2/\text{мин}; t_{01} = 0,67 \text{ мин}.$$

Участок 2 (коридор) ($L_2 = 12 \text{ м}$; $\delta_2 = 2 \text{ м}$). Растекающие потока:

$$D_{2_1} = 0,05; v_{2_1} = 69,46 \text{ м/мин};$$

$$q_{2_1} = 3,47 \text{ м/мин}; Q_{2_1} = 6,94 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$t_{2_1} = 0,17 \text{ мин (прямая ЗИ)};$$

$$q_{2_2} = 8,38 \text{ м/мин}; D_{2_2} = 0,235; v_{2_2} = 35,68 \text{ м/мин};$$

$$Q_{2_2} = 16,76 \text{ м}^2/\text{мин}; t_{2_2} = 0,34 \text{ мин (прямая ЖК)};$$

$$v_{2_{1-2}}' = 26,6 \text{ м/мин (прямая ЗИ')}.$$

Проем 02 ($\delta_{02} = 1,4 \text{ м}$):

$$q_{02_1} = 4,96 \text{ м/мин}; D_{02_1} = 0,06; v_{02_1} = 80,15 \text{ м/мин};$$

$$Q_{02_1} = 6,94 \text{ м}^2/\text{мин}; q_{02_2} = 11,95 \text{ м/мин}; D_{02_2} = 0,34;$$

$$v_{02_2} = 35,21 \text{ м/мин}; Q_{02_2} = 16,76 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

Участок 3 (лестница) ($L_3 = 19 \text{ м}$; $\delta_3 = 2,4 \text{ м}$):

$$q_{3_1} = 2,89 \text{ м/мин} < q_{\text{макс}}; D_{3_1} = 0,05; v_{3_1} = 56,13 \text{ м/мин};$$

$$Q_{3_1} = 6,94 \text{ м}^2/\text{мин}; t_{3_1} = 0,34 \text{ мин (прямая ИЛ)}.$$

$$q_{3_2} = 6,98 \text{ м/мин} < q_{\text{макс}}; D_{3_2} = 0,16; v_{3_2} = 44,27 \text{ м/мин};$$

$$Q_{3_2} = 16,76 \text{ м}^2/\text{мин}; t_{3_2} = 0,43 \text{ мин (прямая КМ)};$$

$$v_{3_{1-2}}' = 37,2 \text{ м/мин (прямая И'Л')}.$$

Объединенный поток $N = 30 \text{ м}^2$ (от участка 7 до проема 08).

Участок 7 (вестибюль) ($L_7=11$ м; $\delta_7=4$ м):

$$q_{7_1} = q_{06} \frac{\delta_{06}}{\delta_7} = 1,73 \text{ м/мин}; \quad D_{7_1} = 0,03;$$

$$v_{7_1} = 75,24 \text{ м/мин};$$

$$Q_{7_1} = 6,94 \text{ м}^2/\text{мин}; \quad t_{7_1} = 0,15 \text{ мин (прямая ГН)};$$

$$q_{7_2} = q_{06_2} \frac{\delta_{06_2}}{\delta_7} = 4,52 \text{ м/мин}; \quad D_{7_2} = 0,07; \quad v_{7_2} = 64,18 \text{ м/мин};$$

$$Q_{7_2} = 18,06 \text{ м}^2/\text{мин}; \quad v'_{7_{1-2}} = 69,7 \text{ м/мин (прямая Г'Н')};$$

$$q_{7_3} = \frac{Q_{06_2} + Q_{3_1}}{\delta_7} = 6,25 \text{ м/мин}; \quad D_{7_3} = 0,12; \quad v_{7_3} = 52,92 \text{ м/мин};$$

$$Q_{7_3} = 25 \text{ м}^2/\text{мин}; \quad v'_{7_{2-3}} = 34,6 \text{ м/мин (прямая ЛП)};$$

$$q_{7_4} = \frac{Q_{06_2} + Q_{3_2}}{\delta_7} = 8,72 \text{ м/мин}; \quad D_{7_4} = 0,18; \quad v_{7_4} = 42,61 \text{ м/мин};$$

$$Q_{7_4} = 34,82 \text{ м}^2/\text{мин}; \quad v'_{7_{3-4}} = 41,2 \text{ м/мин (прямая Л'П')};$$

$$q_{7_5} = q_{3_2} \frac{\delta_3}{\delta_7} = 4,18 \text{ м/мин}; \quad D_{7_5} = 0,06; \quad v_{7_5} = 66,74 \text{ м/мин};$$

$$Q_{7_5} = 16,74 \text{ м}^2/\text{мин}; \quad t_{7_5} = 0,16 \text{ мин (прямая МТ)};$$

$$v'_{7_{4-5}} = 38 \text{ м/мин (прямая ДС)}.$$

Проем 07 (две двери по 1,3 м; $\delta_{07}=2,6$ м):

$$q_{07_1} = 2,67 \text{ м/мин}; \quad D_{07_1} = 0,03; \quad v_{07_1} = 88,62 \text{ м/мин};$$

$$Q_{07_1} = 6,94 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$q_{07_2} = 6,95 \text{ м/мин}; \quad D_{07_2} = 0,1;$$

$$v_{07_2} = 70,29 \text{ м/мин}; \quad Q_{07_2} = 18,06 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$q_{07_3} = 9,63 \text{ м/мин}; \quad D_{07_3} = 0,17; \quad v_{07_3} = 56,16 \text{ м/мин};$$

$$Q_{07_3} = 25 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$q_{07_4} = 13,35 \text{ м/мин} \approx q_0 \text{ макс}; \quad D_{07_4} = 0,4; \quad v_{07_4} = 20,74 \text{ м/мин};$$

$$Q_{07_4} = 34,82 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$q_{07_5} = 6,45 \text{ м/мин}; \quad D_{07_5} = 0,09; \quad v_{07_5} = 72,76 \text{ м/мин};$$

$$Q_{07_5} = 16,74 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

Участок 8 (тамбур) ($L=2$ м; $\delta_8=3$ м):

$$q_{8_1} = 2,31 \text{ м/мин}; \quad D_{8_1} = 0,03; \quad v_{8_1} = 75,24 \text{ м/мин};$$

$$Q_{8_1} = 6,94 \text{ м}^2/\text{мин}; \quad t_{8_1} = 0,03 \text{ мин (прямая } HУ);$$

$$q_{8_2} = 6,02 \text{ м/мин}; \quad D_{8_2} = 0,11; \quad v_{8_2} = 54,94 \text{ м/мин};$$

$$Q_{8_2} = 18,06 \text{ м}^2/\text{мин}; \quad v'_{8_{1-2}} = 46,3 \text{ м/мин (прямая } H'У');$$

$$q_{8_3} = 8,35 \text{ м/мин}; \quad D_{8_3} = 0,23; \quad v_{8_3} = 36,22 \text{ м/мин};$$

$$Q_{8_3} = 25 \text{ м}^2/\text{мин}; \quad v'_{8_{2-3}} = 19,24 \text{ м/мин [(прямая } ПФ);$$

$$q_{8_4} = 11,6 \text{ м/мин}; \quad D_{8_4} = 0,58; \quad v_{8_4} = 40,07 \text{ м/мин (прямая } ХХ');$$

$$Q_{8_4} = 34,82 \text{ м}^2/\text{мин}; \quad v'_{8_{3-4}} = 9,30 \text{ м/мин (прямая } П'Ф');$$

$$q_{8_5} = 5,58 \text{ м/мин}; \quad D_{8_5} = 0,1; \quad v_{8_5} = 57,1 \text{ м/мин (прямая } ТХ);$$

$$Q_{8_5} = 16,74 \text{ м}^2/\text{мин}; \quad v'_{8_{4-5}} = 12,5 \text{ м/мин (прямая } СХ).$$

Очевидно, что параметры движения в проеме 08 будут такими же, как в проеме 07.

Из расчета следует, что расширение проемов 01, 02, 05, 06, 07 и 08 позволило ликвидировать скопление людей, сделать движение беспрепятственным и тем самым резко сократить вероятность возникновения осложнений при аварийной ситуации, а также сократить время движения до 1,68 мин.

Следует обратить внимание, что при беспрепятственном движении пропускные способности сохраняют постоянное значение на всех участках пути. Это позволяет упростить практические расчеты. Однако во избежание ошибок это можно рекомендовать лишь после уверенного овладения изложенным методом.

РАСЧЕТ ДВИЖЕНИЯ В ПРЕДЕЛАХ $t_{доп}$ И ВОЗМОЖНОСТИ СОКРАЩЕНИЯ ШИРИНЫ НЕКОТОРЫХ УЧАСТКОВ ПУТИ

Ввиду того, что расширение проемов создало некоторый запас времени (0,32 мин), можно уменьшить ширину некоторых участков пути с относительно небольшой плотностью движения потока. К таким участкам относятся лестница и вестибюль, на которых максимальные плотности составляют соответственно 0,16 и 0,18. Однако ввиду того, что в вестибюле обычно имеются мебель, различные стенды и др., сокращать его площадь не следует.

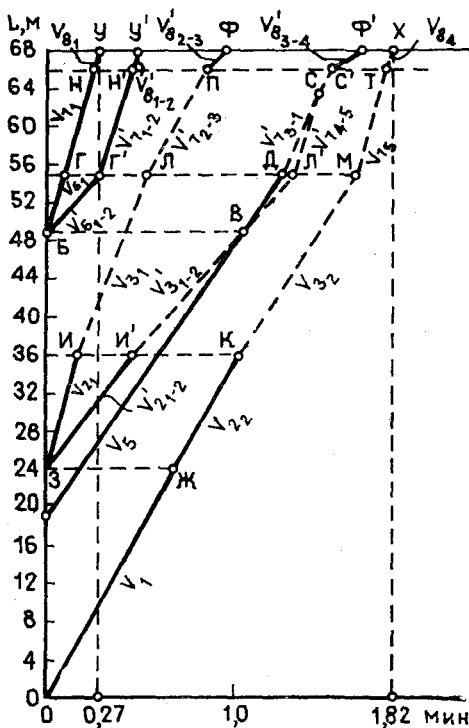
Рассмотрим для примера возможность сокращения ширины лестницы, сохранив ее пропускную способ-

ность $Q_{31} = 6,94 \text{ м}^2/\text{мин}$ для первой части потока второго этажа и $Q_{32} = 16,76 \text{ м}^2/\text{мин}$ для второй части потока.

Определим требуемую ширину лестницы при максимально допустимой плотности потока $D_3 = 0,34$, которая соответствует $q_{\text{макс}}$ для лестниц при аварийных (а также нормальных) условиях движения:

$$\delta_3^{\text{треб}} = \frac{Q_{32}}{q_{\text{макс}}} = \frac{16,76}{9,05} = 1,85 \text{ м вместо принятых } 2,4 \text{ м.}$$

Рис. 8.6. Расчетный график для аварийных условий при уменьшенной ширине некоторых участков пути



Примем $\delta_3 = 1,9 \text{ м}$ и проверим расчет. Изменения хода процесса относительно предыдущего расчета (см. рис. 8.6) нанесем на график (рис. 8.6) пунктиром.

Участок 3 (лестница) ($L_3 = 19 \text{ м}$; $\delta_3 = 1,9 \text{ м}$):

$$q_{31} = 3,65 \text{ м/мин} < q_{\text{макс}}; \quad D_{31} = 0,07; \quad v_{31} = 54,17 \text{ м/мин};$$

$$Q_{31} = 6,94 \text{ м}^2/\text{мин}; \quad t = 0,35 \text{ мин (прямая ИЛ)};$$

$$q_{32} = 8,87 \text{ м/мин} < q_{\text{макс}}; \quad D_{32} = 0,28; \quad v_{32} = 31,73 \text{ м/мин};$$

$$Q_{32} = 16,76 \text{ м}^2/\text{мин}; \quad t = 0,6 \text{ мин (прямая КМ)};$$

$$v_{3-2}^{\cdot} = 24,8 \text{ м/мин (прямая Н'Л')}.$$

Участок 7 (вестибюль) ($L_7=11$ м; $\delta_7=4$ м):

$$q_{7_1} = \frac{Q_{06_2} + Q_{3_1}}{\delta_7} = 6,25 \text{ м/мин}; D_{7_1} = 0,12; v_{7_1} = 52,92 \text{ м/мин};$$

$$Q_{7_1} = 25 \text{ м}^2/\text{мин}; v_{7_2-3}^{\cdot} = 34,6 \text{ м/мин (прямая ЛП)};$$

$$q_{7_4} = q_{3_1} \frac{\delta_3}{\delta_7} = 1,73 \text{ м/мин}; D_{7_4} = 0,02; v_{7_4} = 78,35 \text{ м/мин};$$

$$Q_{7_4} = 6,94 \text{ м}^2/\text{мин}; v_{7_3-4}^{\cdot} = 45,2 \text{ м/мин (прямая ДС)};$$

$$q_{7_5} = q_{3_1} \frac{\delta_3}{\delta_7} = 4,18 \text{ м/мин}; D_{7_5} = 0,06; v_{7_5} = 66,74 \text{ м/мин};$$

$$Q_{7_5} = 16,74 \text{ м}^2/\text{мин}; v_{7_4-5}^{\cdot} = 61,2 \text{ м/мин (прямая Л'С)};$$

$$v_{7_3-5}^{\cdot} = 34,5 \text{ м/мин (прямая СС')}.$$

Проем 07 ($\delta_{07}=2,6$ м). Поток в проеме состоит из четырех частей:

$$q_{07_1} = 2,67 \text{ м/мин}; D_{07_1} = 0,03; v_{07_1} = 88,62 \text{ м/мин};$$

$$Q_{07_1} = 6,94 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$q_{07_2} = 6,95 \text{ м/мин}; D_{07_2} = 0,10; v_{07_2} = 70,29 \text{ м/мин};$$

$$Q_{07_2} = 18,06 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$q_{07_3} = 9,63 \text{ м/мин}; D_{07_3} = 0,17; v_{07_3} = 56,16 \text{ м/мин};$$

$$Q_{07_3} = 25 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$q_{07_4} = 6,45 \text{ м/мин}; D_{07_4} = 0,09; v_{07_4} = 72,67 \text{ м/мин};$$

$$Q_{07_4} = 16,74 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

Участок 8 (тамбур) ($L_8=2$ м; $\delta_8=3$ м):

$$q_{8_1} = 2,31 \text{ м/мин}; D_{8_1} = 0,03; v_{8_1} = 75,24 \text{ м/мин (прямая НУ)}$$

$$Q_{8_1} = 6,94 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$q_{8_2} = 6,02 \text{ м/мин}; D_{8_2} = 0,11; v_{8_2} = 54,94 \text{ м/мин};$$

$$Q_{8_2} = 18,06 \text{ м}^2/\text{мин}; v_{8_1-2}^{\cdot} = 46,3 \text{ м/мин (прямая Н'У')};$$

$$q_{8_3} = 8,35 \text{ м/мин}; D_{8_3} = 0,23; v_{8_3} = 36,22 \text{ м/мин};$$

$$Q_{8_3} = 25 \text{ м}^2/\text{мин}; v_{8_2-3}^{\cdot} = 19,4 \text{ м/мин (прямая ПФ)};$$

$t_{8_4} = 58,5$ м/мин; $D_{8_4} = 0,10$; $v_{8_4} = 57,1$ м/мин (прямая $T X$);

$Q_{8_4} = 16,74$ м²/мин; $v'_{8_{3-4}} = 13,6$ м/мин (прямая $C' \Phi'$).

Параметры движения в проеме 08 такие же, как в проеме 07 . Значит уменьшение ширины марша лестницы (участка 3) на $0,5$ м увеличивает продолжительность движения только на $0,14$ мин, но зато не вызывает скопления людей и задержек. А за счет сокращения ширины лестничной клетки можно расширить полезную площадь смежных помещений или уменьшить объем здания.

Из приведенного примера следует, что путем расчета можно подобрать такие параметры путей движения людских потоков, которые создадут не только наиболее благоприятные условия движения при обеспечении заданного $t_{\text{доп}}$, но в некоторых случаях позволят устранить недостатки проектного решения и достигнуть определенной экономии.

Предвидя возможность преграждения основного пути движения, например огнем на участке 6 или 2 , целесообразно рассчитать пропускную способность запасных выходов: из первого этажа через проем $05'$ и из второго этажа через проем $01'$ и по наружной лестнице (участок 4). Расчеты проводятся по приведенной выше методике. Полученные параметры путей движения должны обеспечивать продолжительность процесса в пределах $t_{\text{доп}} = 2$ мин. Ввиду элементарного характера расчетов они здесь не приводятся.

Из примера следует, что даже относительно небольшое уменьшение ширины путей движения, особенно проемов, может резко ухудшить весь ход процесса, поэтому эксплуатация здания должна находиться в строгом соответствии с установленным режимом движения людского потока. Нельзя загромождать пути движения мебелью, навесными сильно выступающими из плоскости стены стендами и т. д. Особенно важно, чтобы при эксплуатации была обеспечена возможность немедленно открыть двери на их полную рабочую ширину, однако это элементарное условие часто нарушается. Например, для облегчения контроля при пропускной системе одна из двух входных дверей закрывается или даже заделывается наглухо; закрытые долгое время вторые створки двухпольных дверей из-за неисправности шпингалетов невозможно быстро от-

крыть, поэтому содержание в исправности системы путей движения не менее важно, чем систем водоснабжения или освещения.

§ 5. Особенности методики расчета по второму предельному состоянию

Методика расчета по второму предельному состоянию в принципе не отличается от изложенной в предыдущем параграфе.

Прежде всего необходимо провести расчет движения людских потоков по установленным в проекте параметрам путей движения и подвергнуть его всесторонней оценке, как сделано в примере (§ 4 гл. 8). Затем выбрать, если она не установлена в задании на проектирование, величину $D_{\text{доп}}$ и определить участки движения, включая проемы, где полученная плотность превышает $D_{\text{доп}}$. Далее по выражению

$$\delta_{n+1}^{\text{треб}} = \frac{q_n \delta_n}{q_{D_{\text{доп}}}} \quad (8.8)$$

найти требуемую ширину тех путей, где плотность не должна превышать установленной.

Выражение (8.8) аналогично (5.14) с той разницей, что в знаменатель вместо $q_{\text{макс}}$ вводится величина интенсивности движения, соответствующая заданной предельной плотности $q_{D_{\text{доп}}}$. Значения $q_{D_{\text{доп}}}$ берутся из прил. I.

Для пояснения сказанного предположим, что для условий нормального движения из здания, приведенного в примере расчета в § 4 гл. 8, по тем или иным причинам требуется, чтобы плотность $D_{\text{доп}}$ не превышала 0,25, т. е. два человека на 1 м², включая проемы.

Повторим расчет с учетом $D_{\text{доп}} = 0,25$.

Поток первого этажа ($N = 18,75$ м²).

Участок 5 (проход) ($L_5 = 30$ м; $\delta_5 = 2$ м).

$D_5 = 0,25$ (вместо 0,31); $v_5 = 24,38$ м/мин; $q_5 = 6,1$ м/мин.

Требуемую ширину первого от начала движения участка пути (в данном случае участка 5) определим из выражения (15.1а):

$$\delta_5^{\text{треб}} = \frac{N}{DL} = \frac{18,75}{0,25 \cdot 30} = 2,5 \text{ м;}$$

$$Q_5 = q_5 \delta_5^{\text{треб}} = 6,1 \cdot 2,5 = 15,25 \text{ м}^2/\text{мин.}$$

Проем 05 ($\delta_{05} = 1,2$ м):

$D_{05} = 0,25$ (вместо 0,92 по предыдущему расчету);

$v_{05} = 31,65$ м/мин; $q_{05} = 7,91$ м/мин;

$$\delta_{05}^{\text{треб}} = \frac{q_5 \delta_5}{q_{05}} = \frac{6,1 \cdot 2,5}{7,91} = 1,93 \text{ м};$$

$$Q_{05} = q_{05} \delta_{05}^{\text{треб}} = 7,91 \cdot 1,93 = 15,25 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

Очевидно, что участок 6 (коридор) и проем 06 должны иметь ширину такую же, как участок 5 и проем 05; $\delta_6^{\text{треб}} = 2,5$ м и $\delta_{06}^{\text{треб}} = 1,93$ м.

Поток второго этажа ($N = 11,25$ м²).

Участок 1 (проход $L_1 = 24$ м; $\delta_1 = 2$ м). Поскольку по предыдущему расчету $D_1 = 0,235 < D_{\text{доп}} = 0,25$, сохраняется установленная ширина участка $\delta_1 = 2$ м, следовательно:

$v_1 = 25,39$ м/мин; $q_1 = 5,97$ м/мин; $Q_1 = 11,93$ м²/мин.

Проем 01 ($\delta_{01} = 1,2$ м):

$D_{01} = 0,25$ (вместо 0,51); $v_{01} = 31,65$ м/мин; $q_{01} = 7,91$ м/мин.

$$\delta_{01}^{\text{треб}} = \frac{q_1 \delta_1}{q_{05}} = \frac{5,97 \cdot 2}{7,91} = 1,51 \text{ м};$$

$$Q_{01} = q_{01} \delta_{01}^{\text{треб}} = 7,91 \cdot 1,51 = 11,93 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

Участок 2 (коридор) и проем 02 должны иметь ширину $\delta_2 = 2$ м и $\delta_{02}^{\text{треб}} = 1,51$ м.

Участок 3 (лестница $L_2 = 19$ м; $\delta_3 = 2,4$ м).

Его ширину, определенную по проекту, можно было бы оставить без изменения, поскольку плотность $D_3 = 0,125 < D_{\text{доп}} = 0,25$. Однако в целях возможного сокращения объема здания ширину марша можно уменьшить:

$D_3 = 0,25$ (вместо 0,125); $v_3 = 28,62$ м/мин; $q_3 = 7,15$ м/мин;

$$\delta_3^{\text{треб}} = \frac{q_{02} \delta_{02}}{q_3} = \frac{7,91 \cdot 1,51}{7,15} = 1,67 \text{ м};$$

$$Q_3 = q_3 \delta_3^{\text{треб}} = 7,15 \cdot 1,67 = 11,93 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

Далее расчет ведется с построением графика.

Оставляя прежнюю схему путей движения (см. рис. 8.3), нанесем полученные данные на график (рис. 8.7).

Объединенный поток $N = 30$ м². В вестибюле (участок 7) поток состоит из трех частей.

Участок 7 ($L_7=11$ м; $\delta_7=4$ м). Ширину вестибюля оставляем без изменений:

$$q_{7_1} = q_{006} \frac{\delta_{006}}{\delta_7} = 7,91 \frac{1,93}{4} = 3,82 \text{ м/мин};$$

$$D_{7_1} = 0,10; \quad v_{7_1} = 39,27 \text{ м/мин};$$

$$Q_{7_1} = q_{7_1} \delta_7 = 3,82 \cdot 4 = 15,25 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$q_{7_2} = \frac{Q_{006} + Q_3}{\delta_7} = \frac{15,25 + 11,93}{4} = 6,8 \text{ м/мин};$$

$$D_{7_2}' = 0,34 > D_{\text{доп}} = 0,25.$$

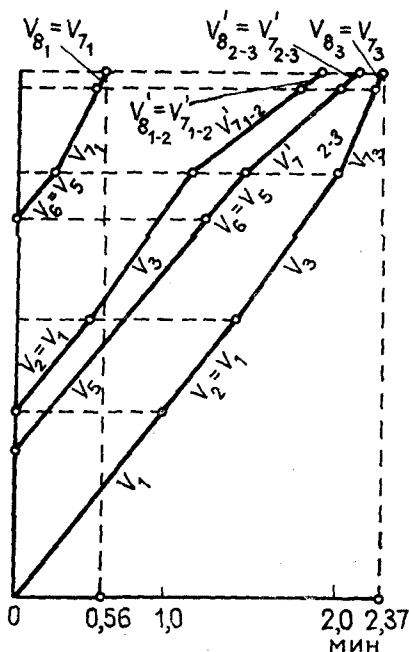


Рис. 8.7. Расчетный график движения людских потоков с ограничением плотности (по второму предельному состоянию)

Следовательно, ширину вестибюля необходимо увеличить:

$$D_{7_2} = 0,25; \quad v_{7_2} = 24,38 \text{ м/мин}; \quad q_{7_2} = 6,1 \text{ м/мин};$$

$$\delta_7^{\text{греб}} = \frac{Q_{006} + Q_3}{q_{7_2}} = \frac{15,25 + 11,93}{6,1} = 4,46 \text{ м};$$

$$Q_{7_2} = q_{7_2} \delta_7^{\text{греб}} = 6,1 \cdot 4,46 = 27,18 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

При $\delta_7=4,46$ м:

$$q_{7_1} = q_{06} \frac{\delta_{06}}{\delta_7^{\text{греб}}} = 7,91 \frac{1,93}{4,46} = 3,42 \text{ м/мин};$$

$$D_{7_1} = 0,08; \quad v_{7_1} = 42,24 \text{ м/мин};$$

$$Q_{7_1} = q_{7_1} \delta_7^{\text{греб}} = 3,42 \cdot 4,46 = 15,25 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$q_{7_2} = q_3 \frac{\delta_3}{\delta_7^{\text{греб}}} = 7,15 \frac{1,67}{4,46} = 2,68 \text{ м/мин};$$

$$D_{7_2} = 0,06; \quad v_{7_2} = 45,46 \text{ м/мин};$$

$$Q_{7_2} = q_{7_2} \delta_7^{\text{греб}} = 2,68 \cdot 4,46 = 11,93 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$v'_{1-2} = \frac{q_{7_2} - q_{7_1}}{D_{7_2} - D_{7_1}} = \frac{6,1 - 3,42}{0,25 - 0,08} = 15,75 \text{ м/мин};$$

$$v'_{2-3} = \frac{q_{7_3} - q_{7_2}}{D_{7_3} - D_{7_2}} = \frac{2,68 - 6,1}{0,06 - 0,25} = 18 \text{ м/мин}.$$

Проем 07 ($\delta_{07} = 1,8$ м). Определяем $\delta_{07}^{\text{греб}}$ по второй части потока (с $Q_{07} = Q_{06} + Q_3$ м²/мин):

$$D_{07_2} = 0,25 \text{ (вместо } 0,92); \quad v_{07_2} = 31,65 \text{ м/мин};$$

$$q_{07_2} = 7,91 \text{ м/мин};$$

$$\delta_{07}^{\text{греб}} = \frac{Q_{06} + Q_3}{q_{07_2}} = \frac{15,25 + 11,93}{7,91} = 3,34 \text{ м}$$

(две двери по 1,67 м каждая);

$$Q_{07_2} = q_{07_2} \delta_{07}^{\text{греб}} = 7,91 \cdot 3,34 = 27,18 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

При $\delta_{07} = 3,34$ м:

$$q_{07_1} = q_{7_1} \frac{\delta_7}{\delta_{07}^{\text{греб}}} = 3,42 \frac{4,46}{3,34} = 4,57 \text{ м/мин};$$

$$D_{07_1} = 0,09; \quad v_{07_1} = 49,84 \text{ м/мин};$$

$$Q_{07_1} = q_{07_1} \delta_{07}^{\text{греб}} = 4,57 \cdot 3,34 = 15,25 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$q_{07_2} = q_{7_2} \frac{\delta_7}{\delta_{07}^{\text{греб}}} = 2,68 \frac{4,46}{3,34} = 3,47 \text{ м/мин};$$

$$D_{07_2} = 0,07; \quad v_{07_2} = 52,97 \text{ м/мин};$$

$$Q_{07_2} = q_{07_2} \delta_{07}^{\text{греб}} = 3,47 \cdot 3,34 = 11,93 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

Участок 8 ($L_8 = 2$ м; $\delta_8 = 2$ м). Определяем $\delta_8^{\text{греб}}$ по второй части потока (с $Q_8 = Q_{07_2}$):

$D_{8_2} = 0,25$ (вместо 0,49); $v_8 = 27,38$ м/мин; $q_{8_2} = 6,1$ м/мин;

$$\delta_8^{\text{треб}} = q_{07_2} \frac{\delta_{07}}{q_8} = 7,91 \frac{3,34}{6,1} = 4,46 \text{ м,}$$

т. е. ширина тамбура должна быть равна ширине вестибюля:

$$Q_{8_2} = q_{8_2} \delta_8^{\text{треб}} = 6,1 \cdot 4,46 = 27,18 \text{ м}^2/\text{мин.}$$

Следовательно:

$$D_{8_1} = D_{7_1} = 0,08; \quad D_{8_2} = D_{7_2} = 0,07.$$

Очевидно также, что параметры проема 08 должны быть такими же, как проема 07.

Из графика следует, что расчет по второму предельному состоянию (с ограничением плотности, в данном случае $D_{\text{доп}} = 0,25$) не только дает увеличение ширины некоторых участков пути, но и позволяет уменьшить отдельные участки. Движение при этом характеризуется равномерностью, отсутствием задержек и скопления людей, поэтому для равномерности движения людских потоков не только в нормальных, но и в аварийных условиях расчет и определение параметров путей движения следует производить и по первому, и по второму предельным состояниям.

§ 6. Принципы автоматизации расчетов движения людских потоков

Указанные выше недостатки графоаналитического метода расчета движения людских потоков и параметров коммуникационных помещений преодолеваются при использовании электронно-вычислительных машин (ЭВМ). Возможность формализовать процесс движения и выразить его в виде четкого алгоритма решения, а также цикличность вычислительных операций по ходу процесса позволили разработать достаточно эффективные программы для расчета движения людских потоков.

Следует отметить, что создание автоматизированной системы проектирования объектов строительства (АСПОС) предлагает разработку таких подсистем, как «Город» и «Здание», которые включают в себя объекты проектирования, в которых главным функциональным процессом является движение людских потоков, определяющее в ряде случаев объемно-планировочное

решение здания или сооружения. Следовательно, автоматизацию расчетов движения людских потоков можно рассматривать как отдельный элемент (фрагмент) АСПОС. Этот фрагмент включает решение двух задач: расчет параметров людского потока по участкам коммуникационного пути (комплекс «Поток-1»), и параметров коммуникационных помещений при движении по ним людского потока (комплекс «Поток-2»). При решении этих задач предусматривается по крайней мере наличие двух условий движения людского потока: аварийное и нормальное.

Попытки использовать ЭВМ для расчетов движения людских потоков предпринимались неоднократно. Впервые ЭВМ использованы для этой цели в 1962 г. (ВИА им. В. В. Куйбышева). Однако отсутствие в то время теоретических основ движения людских потоков не позволило достигнуть эффективного решения задачи.

Дальнейшую разработку вопросы, связанные с применением ЭВМ для расчета движения людских потоков, получили в работах МИСИ им. В. В. Куйбышева. Была предложена математическая модель, алгоритм которой реализован на ЭВМ «Урал-2». Использование этой модели обеспечивало получение результатов, достаточно точно совпадающих с результатами графоаналитического метода расчета. Указанные работы явились существенным шагом вперед, но в силу некоторых причин (несовершенство ЭВМ «Урал-2», отсутствие процедурно-ориентированных языков, неформализованные некоторые элементы процесса движения) не могли получить распространения.

Появление быстродействующих машин второго и третьего поколения с большим объемом оперативной памяти и развитой системой ввода и вывода информации, а также разработка входных языков высокого уровня (АЛГОЛ-60 и ФОРТРАН) открыли новые возможности для автоматизации расчетов движения людских потоков.

Автоматизированные методы расчета движения людских потоков, разработка алгоритмов и программ базируются на математической статистике, теории вероятностей, математическом программировании. Разработка этих методов стала возможной только в результате развития функциональных основ проектирова-

ния. Теория движения людских потоков как составная часть функциональных основ проектирования зданий и сооружений является основополагающим условием при решении задачи автоматизации расчетов движения людских потоков.

В настоящее время имеются зависимости скорости движения от его условий и плотности потока для каждого вида пути. Экспериментальные исследования в этом направлении, по-видимому, можно считать законченными (общее количество наблюдений составляет около 15 тыс.). Эти зависимости выражены в виде полиномов 4-й и 5-й степени или в виде таблиц, которые являются основой как для ручного, так и для машинного счета. В теории движения людских потоков широко применяются математические выражения, численные математические методы и логические зависимости, что дает возможность полностью формализовать процесс движения людского потока. Формализованный процесс является в свою очередь математической моделью, которая построена на основе формул, количественных закономерностей, логических условных и безусловных связей. Структура модели позволила использовать ее для автоматизации расчетов движения людских потоков на ЭВМ. На основе модели процесса движения разработаны алгоритмы решения указанных выше задач. При этом использованы общие теоретические положения, которые сформулированы в виде, приемлемом для решения задач при помощи ЭВМ.

1. Зависимости скорости движения и интенсивности движения от плотности людского потока $v=f(D)$ и $q=\varphi(D)$ в общем случае выражены в виде полиномов относительно D . При изменении условий движения (аварийное, нормальное, комфортное) или вида пути (горизонтальный путь, лестница вниз, лестница вверх, проем) зависимость сохраняется, изменяются только коэффициенты полинома. Для механического участка пути (например, эскалатор) значение v постоянно, а значение q зависит от D . Указанные зависимости являются основой для определения текущих параметров потока q_i , v_i , D_i на каждом из участков пути. От их определения с помощью вычисления и анализа корней полиномов пришлось отказаться, так как эта операция занимает много времени и значительный объем оперативной памяти ЭВМ. По тем же причинам не применя-

ется и итерационный метод, так как его использование для отыскания текущих параметров малоэффективно.

При разработке алгоритма решения использованы таблицы параметров для различного вида пути и условий движения (см. прил. 1). Таблицы параметров рассчитаны для интервала, плотности от $D=0,01$ до $D=0,92$ с шагом $h=0,01$. Каждому значению плотности D соответствует значение интенсивности q и скорости движения v . Таблицы представлены в виде матриц размеров $[1:4, 1:92]$ или $[1:1, 1:368]$ (рис. 8.8). Для отыскания текущих параметров используется про-

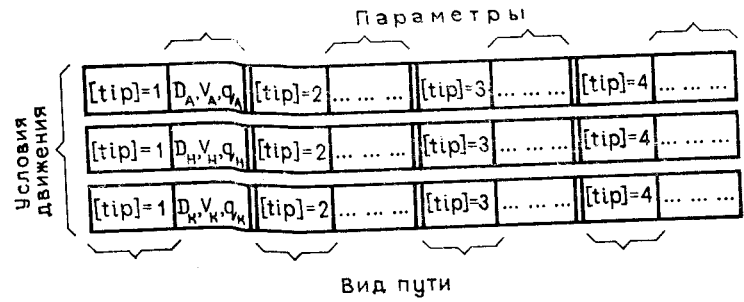
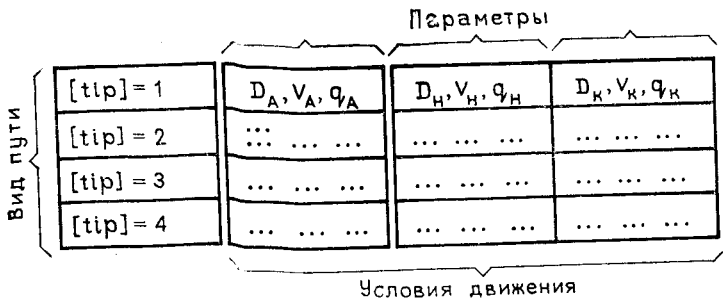


Рис. 8.8. Способы организации исходных данных на машинных носителях информации

цедура обращения к таблицам постоянных параметров. По соответствующим строке и столбцу матрицы находят нужное значение текущего параметра. Вначале вычисляется q_i и по нему отыскиваются соответственно значения v_i и D_i . Для матриц размером $[1:4, 1:92]$ каждой строке i соответствуют параметры q_i, v_i, D_i , а столбцу j — вид пути. Следовательно, каждому

значению $q_i [j]$ определено одно значение параметра v_i или D_i . В случае, если значение находится между двумя величинами постоянных параметров $q_{i-1} [j]$ и $q_{i+1} [j]$, искомые v_i или D_i находят с помощью подпрограммы прямой и обратной интерполяции (рис. 8.9):

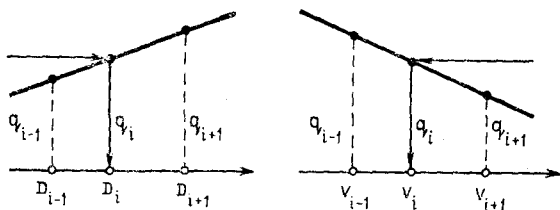


Рис. 8.9. Определение текущих параметров движения людского потока при помощи подпрограммы интерполяции

$$v_i = v_{i-1} + \frac{(q_i - q_{i+1})}{(q_{i-1} - q_{i+1})} (v_{i+1} - v_{i-1}); \quad (8.9)$$

$$D_i = D_{i-1} - \frac{(q_i - q_{i-1})}{(q_{i+1} - q_{i-1})} (D_{i+1} - D_{i-1}), \quad (8.10)$$

где v_i и D_i — искомые текущие параметры при известном значении $q_i [j]$.

При использовании матрицы размеров $[1 : 1, 1 : 368]$ строке i соответствует условие движения потока, а столбцу j — три постоянных параметра: q_i , v_i , D_i , размещенных в одной ячейке. Строка имеет четыре зоны, каждая из которых принадлежит одному виду пути (см. рис. 8.8). Использование зависимостей $v = f(D)$ и $q = \varphi(D)$, выраженных в табличной форме, и отыскание текущих параметров с помощью матриц позволило разработать эффективно действующие программы.

2. Зависимость параметров движения от вида пути является одним из основных положений теории движения людских потоков. При разработке автоматизированных методов расчета это условие необходимо формализовать. Для этого каждый вид пути должен иметь свою метку — [tip]. Приняты следующие обозначения вида пути (метки), по которым движется людской поток:

[tip] = 1 — горизонтальный участок пути;

[tip] = 2 — проем;

[tip] = 3 — лестница вниз;

[tip] = 4 — лестница вверх;

[tip] = 5 — механический участок пути.

Расчет текущих параметров на новом участке пути всякий раз начинается с анализа вида пути и обращения к той части матриц, которая соответствует данной метке. Если встретился механический участок пути [tip] = 5, то значению скорости присваивается постоянное значение: $v[\text{tip}] = \text{const}$. Интенсивность движения определяется по пропускной способности предыдущего участка, а плотность людского потока на полотне эскалатора — из условия (6.6).

3. При движении по коммуникационным помещениям людской поток переходит через границу смежных участков пути с одного на другой. Интенсивность движения (в м/мин) на последующем участке определяется из выражения (4.5):

$$q_{i+1} = q_i \frac{\delta_i}{\delta_{i+1}}.$$

Это условие позволяет организовать процесс вычисления на ЭВМ в виде циклов и перейти от определения текущих параметров v_i, D_i, Q_i, t_i (соответствующих данному виду пути [tip] к нахождению параметров на $(i+1)$ -м участке пути.

4. В том случае, если пропускная способность последующего участка пути меньше пропускной способности предыдущего участка, $Q_{i+1} < Q_i$, происходят задержка движения и скопление людей, и, согласно выражению (5.3):

$$q_{i+1} > q_{\text{макс}} [\text{tip}]. \quad (8.11)$$

Условия (4.5) и (5.3) перехода на последующий участок пути являются определяющими, так как позволяют организовать ветвящиеся процессы вычисления с замкнутыми циклами. При выполнении первого условия — движение без задержки, работает левая часть блок-схемы (рис. 8.10) — находят текущие параметры движения q_i, v_i, D_i и основные параметры t_i, C_0, S_0 ,

где t_i — время движения потока по участку пути, м; C_0 — время движения головной части потока, м; S_0 — время движения замыкающей части потока, м.

При выполнении второго условия — задержка движения и образование скопления — включается тот

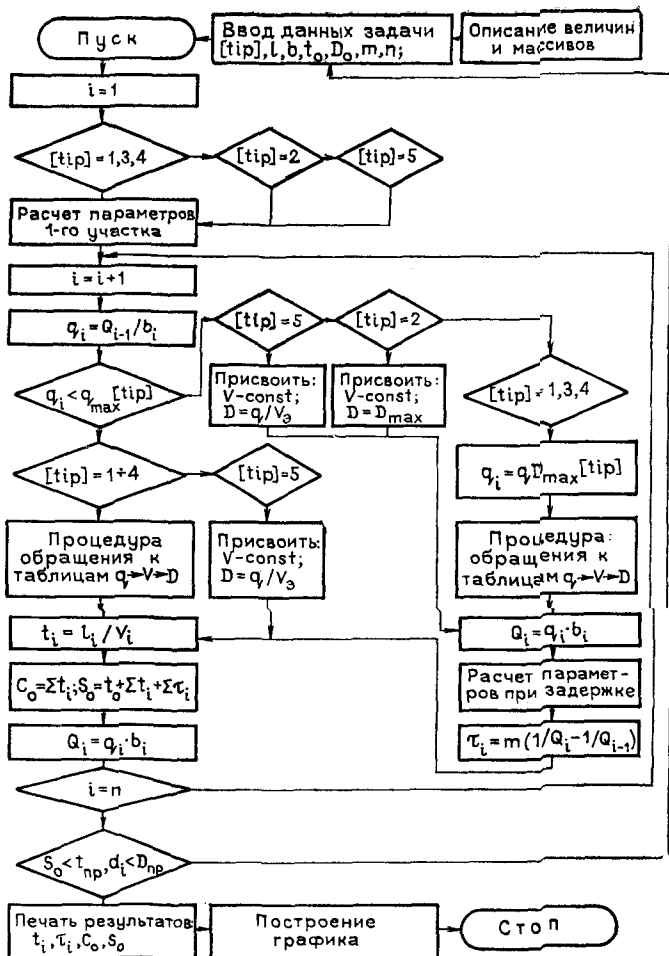


Рис. 8.10. Блок-схема алгоритма для определения параметров движения людского потока

блок программы, который рассчитывает время задержки движения τ_i (правая часть блок-схемы на рис. 8.10). Эта подпрограмма определяет также все характеристики, связанные с задержкой движения: скорость образования скопления v'_c , скорость рассасывания скопления v_c , количество людей, находящихся в скоплении, N_c и его длину l_c .

5. При задержке движения и скоплении людей плотность потока резко возрастает и достигает своего максимального значения — $D_{\text{макс}}$ *. Параметры движения на последующем участке пути следует рассчитывать с учетом образования $D_{\text{макс}}$, при этом текущие параметры на $(i+1)$ -м участке пути определяются с учетом разуплотнения потока по $q_{D_{\text{макс}}}$. Выполнение условия (5.3) влечет за собой операцию присваивания

$$q_{i+1} = q_{D_{\text{макс}}} [\text{tip}] \quad (8.12)$$

и определение текущих параметров по значению $q_{D_{\text{макс}}}$. Исключение составляют проемы. Если $[\text{tip}] = 2$, то присваиваются значения постоянных параметров: $v[\text{tip}] = 9,85$ м/мин и $D[\text{tip}] = 0,92$.

6. Пути движения имеют предел пропускной способности, определяемый плотностью потока при максимальной интенсивности в зависимости от различного вида пути и условий движения — $q_{\text{макс}} [\text{tip}]$. Для каждого вида пути интенсивность движения достигает $q_{\text{макс}}$, а затем падает (см. рис. 3.26). Использование этого теоретического положения позволило разработать алгоритм решения комплекса «Поток-2», так как выражение (8.11) служит в качестве логического блока условия перехода к той части программы, которая рассчитывает новые параметры коммуникационного помещения (рис. 8.11). Достаточное однообразие повторяющихся на каждом этапе вычислений позволило построить несколько замкнутых циклов, что в значительной степени повысило эффективность программы.

В виде цикла организован расчет текущих параметров интенсивности и скорости движения, плотности потока, пропускной способности участка пути. Основные параметры потока — время движения по участку пути, время движения головной и замыкающей части потока — также находят с помощью этих замкнутых циклов. Отдельной подпрограммой выделена процедура обращения к таблицам постоянных параметров, которая используется на каждом этапе вычислений. За границы указанных циклов вынесен расчет параметров движения на первом участке, так как алгоритм его параметров несколько отличается от последующих участков.

В разработку автоматизации расчетов движения

* Для автоматизированных расчетов принято $D_{\text{макс}} = 0,92$.

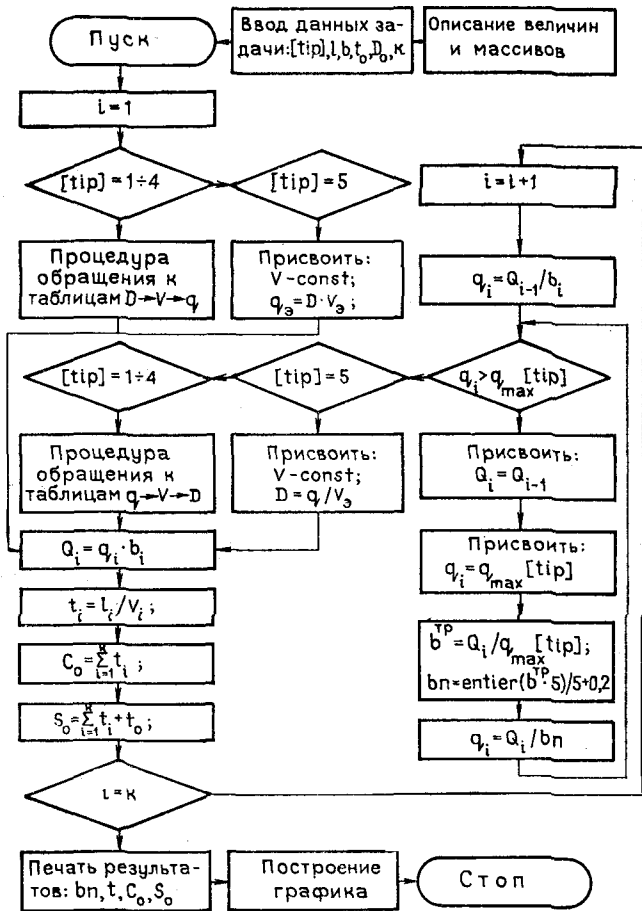


Рис. 8.11. Блок-схема алгоритма для определения параметров коммуникационных помещений при движении людского потока

людских потоков при подготовке информации положены следующие требования: минимум и предельная простота исходных данных, сохранение их традиционного представления и минимум кодирования. Под простотой исходных данных понимается прежде всего возможность сохранить их в традиционном для потребителя виде. Объем исходных данных определен в зависимости от типа решаемой задачи.

Эффективность программ зависит и от того, на-

сколько правильно выбраны, разделены и систематизированы исходные данные. Анализ решаемых задач позволил выделить два массива исходных данных: условно постоянную и переменную входную информацию. Автоматизация расчетов движения людских потоков имеет весьма важную особенность: при решении задачи приходится иметь дело с двумя видами величин. Одни относятся к характеристике процесса движения (скорость, плотность, интенсивность и др.), другие являются характеристиками планировочного решения здания или сооружения (длина и ширина, вид пути). Величины, характеризующие процесс движения, входят в массив условно-постоянных исходных данных, а величины, относящиеся к планировочному решению, образуют массив переменных исходных данных. Разделение входной информации на два массива в этом случае необходимо, так как условно-постоянная исходная информация используется для решения класса задач, в то время как массив переменных исходных данных — только для одной задачи

Условно-постоянная информация включает в себя матрицы параметров движения D , v и q размером $[1:4, 1:92]$ или $[1:1, 1:368]$ и постоянные предельные значения интенсивности движения — q_{\max} $[1:4]$, $q_{D\max}$ $[1:4]$. Для расчета механического участка пути определены постоянные значения: v_5 — const, D_5_{\max} и q^5_{\max} . Совокупность таблиц постоянных параметров для различных видов пути и условий движения представляет собой информационное обеспечение программного комплекса «Поток».

Матрицы постоянных параметров могут быть представлены на любых машинных носителях информации. Способы организации физических данных на машинных носителях представлены на рис. 8.8. В первом случае каждая строка i соответствует виду пути, а столбец j — одному из параметров. Матрица размером A $[1:4, 1:92]$ соответствует аварийным условиям движения, H $[1:4, 1:92]$ — нормальному движению и K $[1:4, 1:92]$ — комфортным условиям. Второй способ организации данных отличается тем, что матрица $[1:1, 1:368]$ отвечает одному из условий движения, где каждая строка разбита на четыре зоны, соответствующие виду пути. По эффективности работы эти способы организации условно-постоянной информации приближи-

тельно равны, хотя предпочтение следует отдать первому. Текущие параметры движения в первом случае находятся непосредственно на пересечении строки и столбца; во втором — прежде необходимо определить зону и уже потом текущие параметры. Одним из указанных выше способов наносится информация постоянных значений: q_{\max} [tip] $q_{D\max}$ [tip], v_5 , D_5 , q_5 .

Переменный массив исходных данных включает в себя условие отдельной задачи. Для удобного представления этой исходной информации вводится понятие модуля (рис. 8.12). За модуль принят отдельный участок коммуникационного пути, на котором остаются неизменными два параметра: ширина пути δ и его вид

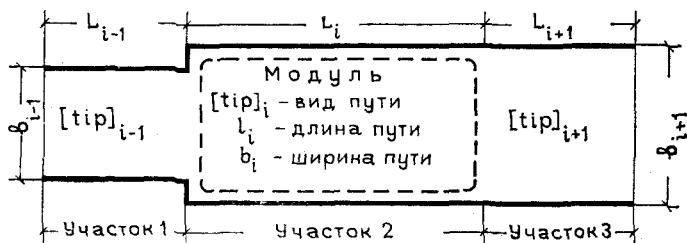


Рис. 8.12. Организация переменного массива исходных данных на основе модуля

[tip]. Изменение хотя бы одного из них свидетельствует о переходе к новому участку. Модуль описывается параметрами:

L_i — длина i -го участка; δ_i — ширина i -го участка; [tip] — вид пути i -го участка; n — количество модулей на пути движения потока.

Другая часть массива характеризует людской поток и представляет собой информацию о его начальных параметрах:

N — число человек, участвующих в движении, m^2 ; D_0 — плотность потока перед началом движения, m^2/m^2 ; t_0 — время выхода замыкающей части потока, мин.

Подготовка и составление исходных данных производятся в определенном порядке.

На планировочной схеме здания или сооружения устанавливаются коммуникационные помещения, по которым движется людской поток. Далее на основе

планировочной схемы составляется расчетная схема движения людского потока. Каждый участок коммуникационного пути на расчетной схеме должен быть представлен в виде модуля и описан тремя параметрами, которые должны быть сформированы в виде массивов данных: $\delta[1:n]$, $L[1:n]$, $tip[1:n]$. Здесь же определяются начальные параметры движения: N , D_0 , t_0 . Подготовленные таким образом данные наносятся на машинный носитель информации. Условно-постоянная информация и переменный массив исходных данных вводятся в память ЭВМ.

Объем входной информации при автоматизации расчетов не превышает обычно используемого, а подготовка исходных данных занимает столько же времени, как и подготовка при решении задачи графоаналитическим методом.

Программа построена таким образом, чтобы на печать выдавались все текущие параметры движения (q_i , v_i , D_i и др.), но такой вывод результатов нужен в процессе отладки программы и в том случае, когда требуется проследить внутренний механизм процесса движения. Для задач проектирования обычно достаточно вывести на печатающее устройство основные параметры движения: t_i , C_0 , S_0 , а также δ_{n_i} — требуемую ширину участка движения. Для контроля расчетов выводится исходная информация.

Кроме вывода информации, представленной цифровыми данными, в программах предусмотрено получение результатов в виде графиков движения людского потока. Графопостроители могут иметь два режима работы: автономный и совместно с ЭВМ. Для этого программа имеет подпрограмму вычисления и записи основных параметров движения на магнитный барабан.

В качестве подпрограммы используется блок «Построение графиков». Для построения графиков движения людского потока необходимо вычислить значения точек координат, характеризующих конфигурацию графика, и хранить в памяти машины в виде одного массива. Учитывая, что ЭВМ может оперировать такими величинами, которые имеют количественную интерпретацию, как было указано выше, введены дополнительно два основных параметра: время движения головной части потока C_0 , мин, и время движения замыкающей части потока S_0 , мин (рис. 8.13). Положение любой

точки графика определяется двумя координатами: временем движения по оси X и длиной пути по оси Y . Но так как график движения представляет собой две ветви, то координаты точек по оси X для левой ветви определяются по значению C_0 , а для правой — по значению S_0 (см. рис. 8.13):

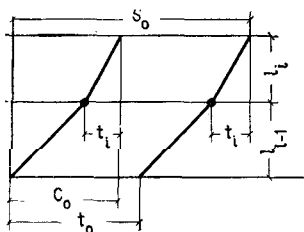


Рис. 8.13. Вывод результирующей информации в виде графика движения или основных параметров людского потока

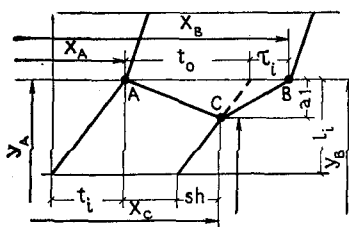


Рис. 8.14. Определение координат точек для построения графика движения людского потока

$$C_0 = \sum_{i=1}^n t_i; \quad (8.13)$$

$$S_0 = t_0 + \sum_{i=1}^n t_i + \sum_{k=1}^{n'} \tau_k; \quad (8.14)$$

где t_0 — начальное время движения; $\sum_{k=1}^{n'} \tau_k$ — время задержек движения; n' — количество мест, где образуются задержки движения; $\sum_{i=1}^n t_i$ — накопленное время движения людского потока по участкам пути.

Параметр $\sum_{k=1}^{n'} \tau_k$ может отсутствовать, если движение происходит без задержки. В случае же задержки движения определяются координаты дополнительной точки в м (точка C на рис. 8.14):

$$y_C = \sum_{i=1}^n L + (L_i - l_C). \quad (8.15a)$$

Принимая во внимание, что

$$l_C = \frac{N v'_C v_l}{Q_i (v'_C + v_l)},$$

получим:

$$y_c = \sum_{i=1}^n L + \left[L_i - \frac{N \sigma_c^2 v_i}{Q_i (v_c' + v_i)} \right]. \quad (8.156)$$

Координата точки C по оси X :

$$x_c = t_0 + \sum_{i=1}^n t_i + \sum_{k=1}^{n'} \tau_k + Sh, \quad (8.16a)$$

где Sh — время движения людского потока по участку i до границы скопления (в мин), определяемое из выражения

$$Sh = \frac{L - l_c}{v_i}. \quad (8.166)$$

Принимая во внимание выражение (8.16), получим:

$$x_c = S_0 \frac{L_1 - l_c}{v_i}. \quad (8.16a)$$

Координаты точки A (см. рис. 8.8) определяются из условий:

$$y_A = \sum_{i=1}^n L_i; \quad x_A = \sum_{i=1}^n t_i, \quad (8.17a)$$

то же, для точки B :

$$y_B = \sum_{i=1}^n L_i; \quad x_B = t_0 + \sum_{i=1}^n t_i + \sum_{k=1}^{n'} \tau_k. \quad (8.176)$$

Эти же параметры движения потока выдаются на печатающее устройство, если построение графика не требуется. Приведенные выше результаты исследований нашли свое отражение в разработанных алгоритмах и программах.

Комплекс программ «Поток-1» предназначен для расчета параметров людского потока при движении его по коммуникационным помещениям общественных зданий и сооружений. Приводимая на рис. 8.9 блок-схема алгоритма представляет собой информационно-функциональную модель процесса, так как отображает не только логическую последовательность производимых вычислений, но и содержание информации в каждом блоке.

Задача решается исходя из условия существования двух предельно допустимых расчетных состояний. При расчете по первому предельному состоянию определяются текущие параметры движения и время движения люд-

ского потока по коммуникационным помещениям. Согласно выражению (8.14) и принятым в программе «Поток» обозначениям:

$$S_0 \leq t_{\text{доп}}.$$

Если это условие не выполняется, производится перерасчет. Предварительно назначаются новые параметры коммуникационных помещений. По второму предельному состоянию проверяется соответствие хода процесса предъявляемым эксплуатационным требованиям по комфортности движения. Расчетные параметры движения: плотность потока на i -м участке пути сравнивается с предельно допустимой плотностью для данного помещения, здания или сооружения:

$$D_i \leq D_{\text{доп}} [\text{tip}].$$

Программа «Поток-1» работает по приведенному ниже алгоритму.

С машинного носителя информации в оперативную память ЭВМ считывается исходная информация. Решение задачи начинается с первого участка, перед которым находится сформировавшийся людской поток. Алгоритм расчета на i -м участке несколько отличается от последующих, так как текущие параметры потока определяют по его начальной плотности. На каждом последующем i -м участке текущие параметры потока q_i , v_i , D_i , Q_i находят с помощью таблицы постоянных параметров. Для i -го участка определяется время движения головной и замыкающей части потока — t_i , а также накапливается общее время движения по коммуникационным помещениям головной S_0 и замыкающей S_0 частей потока. Если выполняется условие (8.11), то текущие параметры потока рассчитываются с учетом задержки движения по $D_{\text{макс}}$, а общее время движения определяется с учетом времени задержки τ_i . Подпрограмма рассчитывает параметры v'_c , v_c , l_c , Sh , необходимые для определения точек координат графика движения. После окончания расчетов всех параметров движения на i -м участке выполняется переход на $i+1$ -й участок (по условию § 2 гл. 4); определяется вид $(i+1)$ -го участка пути — [tip]; все последующие вычисления производятся по аналогичному циклу. При выполнении условия $i=n$ выдается команда на печать результатов по отдельным участкам или величинам; при невыполнении предельных условий следует команда на ввод новых данных.

Комплекс программ «Поток-1» разработан на языке АЛГОЛ применительно к ЭВМ «Мир-2» с транслятором «Альфа» и системой СМОГ, а также для ЭВМ М-220М с использованием транслятора ТА-1М. Программа для расчета параметров движения людского потока «Поток-1» приводится в прил. II.

Комплекс программ «Поток-2» используется для решения задач, связанных с определением требуемых параметров коммуникационных помещений. Применение данных программ в процессе проектирования позволяет получить при существующих критериях наиболее экономичные планировочные решения и одновременно обеспечивает условия безопасного и беспрепятственного движения людских потоков. На тех участках пути, где параметры коммуникационных помещений не удовлетворяют условиям беспрепятственного движения, назначается новая ширина пути для движения людского потока:

$$\delta_{i+1}^{\text{треб}} = \frac{Q_i}{q_{\text{макс}} [\text{tip}]}$$

Определение требуемой ширины пути по максимальной интенсивности $q_{\text{макс}}$ позволяет установить его минимальную ширину. Блок-схема алгоритма для расчета параметров коммуникационных помещений приводится на рис. 8.11.

Построение алгоритма задачи приведено ниже. В оперативную память машины вводится информация о начальных условиях задачи. По начальному значению плотности потока определяются текущие параметры движения на 1-м участке. Переход на последующий $(i+1)$ -й участок пути осуществляется исходя из выражения (4.5). Определяется вид пути $(i+1)$ -го участка пути — [tip]. С помощью таблицы постоянных параметров вычисляются текущие параметры потока на $(i+1)$ -м участке пути. Если выполняется условие беспрепятственного движения, то расчет производится до конца цикла по i . Если же происходит задержка движения, назначаются новые параметры коммуникационного помещения, m :

$$\delta_{i+1}^{\text{треб}} = \frac{q_i \delta_i}{q_{\text{макс}} [\text{tip}]}$$

или

$$\delta_{i+1}^{\text{треб}} = \frac{q_i \delta_i}{q_{D_{\text{макс}}}}$$

Для того чтобы обеспечить условия беспрепятственного движения и минимально необходимую ширину последующего участка, интенсивность движения на нем следует принять наибольшую — q_{\max} [tip]. В случае когда необходимо обеспечить нормируемое предельное значение плотности $D_{\text{доп}}$ на участках коммуникационного пути, в формулах используется значение интенсивности при заданной плотности $q_{D_{\text{доп}}}$.

Подпрограммой вычисления требуемой ширины коммуникационных помещений назначаются размеры, кратные $M=0,2$ м с округлением в большую сторону, с учетом требований унификации и модульной системы.

Программа работает в цикле, последовательно рассчитывая все участки схемы до тех пор, пока не выполнится условие $i=k$, после чего выдается команда на печать результатов. Наконец, результаты расчетов основных и текущих параметров с краткими комментариями выдаются на печать.

Комплекс программ «Поток-2» разработан на языке АЛГОЛ применительно к ЭВМ типа М-220М с использованием транслятора ТА-1М. Программа расчета параметров коммуникационных помещений «Поток-2» приводится в прил. II.

Таким образом, использование основных теоретических положений графоаналитического метода расчета для разработки алгоритма задачи позволило создать автоматизированные методы, дающие результаты с достаточной степенью точности, отвечающие современным инженерным требованиям. Применение автоматизированных методов расчета в практике архитектурно-строительного проектирования позволяет получать проектные решения на качественно новом уровне, отвечающем требованиям научно-технического прогресса. Программные комплексы «Поток-1» и «Поток-2» целесообразно использовать на стадии предварительных разработок проектного решения.

Глава 9

КОММУНИКАЦИОННЫЕ ПОМЕЩЕНИЯ

§ 1. Коридоры и проходы

Рациональные размеры коридоров и проходов помещений, основным функциональным назначением кото-

рых является движение людей, могут быть рассчитаны на основании данных и методики, приведенных выше.

При их проектировании следует принимать во внимание особенности движения людских потоков. Минимальная ширина коридора или прохода должна быть не менее 1 м, что отвечает ширине идущего человека и стоящего боком. Такая ширина позволяет двум идущим навстречу людям разойтись. Большие размеры коридоров определяются расчетом с соблюдением модульной системы. На выбор ширины коридора существенно влияет система открывания дверей (рис. 9.1). В тех случаях, когда двери из помещений открываются в коридор, его расчетную ширину следует принимать в све-

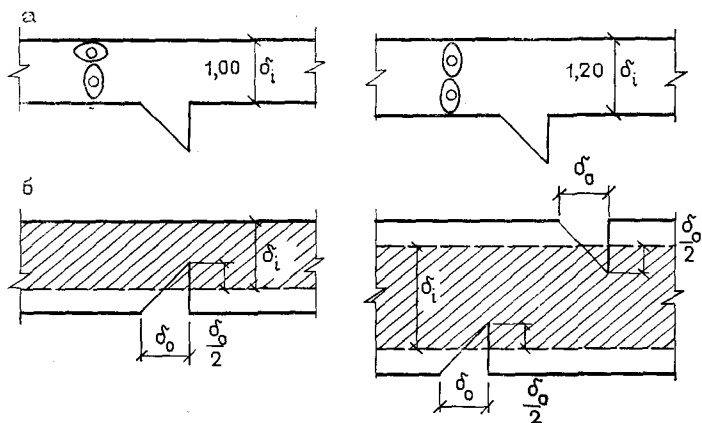


Рис. 9.1. Минимальные (а) и расчетные (б) ширины коридоров
 δ_i — расчетная ширина

ту плюс половину ширины дверного полотна, при двустороннем расположении помещений — ширину коридора в свету плюс полную ширину дверного полотна.

Если коридор (или проход) предназначен для аварийного движения, то его минимальная ширина не должна быть менее 1,2 м (ширина двух человек, идущих рядом). Такая ширина позволяет обогнать впереди идущего человека и предупреждает остановку потока при встречном движении.

Исключением при назначении минимальной ширины прохода являются проходы между местами в зрительных залах, которые понизу могут быть 0,4—0,5 м. Од-

нако их ширину для расчета следует принимать 0,6 м, т. е. на уровне плеч человека (рис. 9.2).

Коридоры и проходы можно делать и шире. Определяющими факторами в этом случае должна быть экономичность планировочного решения и комфортность движения. Однако сказанное не следует распространять на выбор ширины тех коридоров или проходов, где происходит формирование людских потоков, поскольку начальные параметры движения определяют характер всего хода процесса, как это следует из § 4 и 5 гл. 8. Так, при чрезмерной ширине начального участка

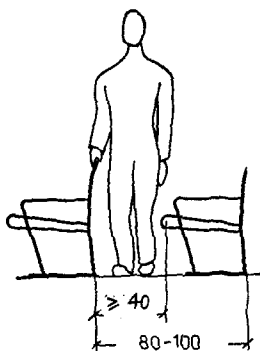


Рис. 9.2. Проход между стульями в зрительном зале

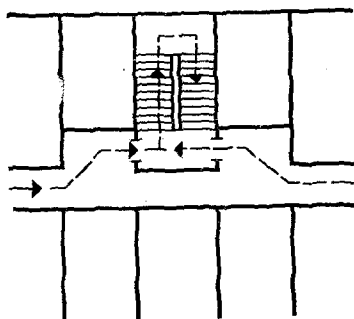


Рис. 9.3. Расширение прохода перед проемом

и, следовательно, при повышенной начальной скорости движения повышается вероятность нарушения движения на последующих участках пути. Наоборот, при большей плотности потока на первом участке (но в пределах величин, обеспечивающих достаточные удобства для людей) и при дальнейшем снижении плотности на последующих участках легче достигнуть ритмичности движения, как это имеет место в расширяющихся проходах зрелищных помещений. Целесообразная величина начальной плотности и, следовательно, ширина коридора или прохода, где происходит формирование потока, проверяется расчетом движения потока.

При расчете ширины коридора или прохода нельзя допускать, чтобы пропускная способность предшествующего участка была больше последующего, так как при этом возникают скопление людей и задержка движе-

ния. Если коридор или проход проектируется с учетом увеличения потока, то пути движения целесообразно расширить и, наоборот, при численном уменьшении потока ширину пути можно уменьшить.

Если перед проемом, пересекающим коридор или проход, по расчету образуются скопление людей и задержка движения, то в этом месте целесообразно расширить путь. Требуемую ширину и длину этого участка коридора легко определить по максимальному количеству людей в скоплении N_c и предельно допустимой плотности (рис. 9.3).

При проектировании следует стремиться, чтобы коридоры и проходы были как можно короче и имели меньше поворотов, причем последние не должны быть больше 90° .

Простота и четко выраженная направленность пути исключают возможность ошибки при выборе направления движения людьми в аварийной ситуации.

Коридоры и проходы, используемые в качестве эвакуационных, нужно располагать в здании так, чтобы движение к выходам происходило по возможности без приближения к месту аварии. В театре, например, наиболее вероятным местом возникновения пожара является сцена, а в кинотеатре — проекционная и перемоточная, поэтому эвакуационное движение в зрительном зале театра организуется вправо и влево от сцены, а также в противоположную от нее сторону; в кинотеатре — вправо и влево от проекционной и в сторону экрана.

В пределах расчетной ширины коридора или прохода нельзя ставить мебель, развешивать выставочные стенды, устанавливать оборудование, сужающее свободную ширину прохода. Если коридор или проход служит путем аварийного движения, в архитектурном решении интерьера нельзя допускать устройства декоративных фальшивых дверей и зеркал, которые могли бы дезориентировать людей при движении. Известно, что зеркала, особенно в торцах коридора, становились причинами несчастных случаев даже в условиях нормального движения.

Необходимо следить за тем, чтобы двери в коридор открывались по ходу движения людского потока (см. рис. 9.1).

На всем протяжении коридора и прохода не должно

быть порогов или промежуточных ступеней; при небольшой разности уровней пола устраиваются пандусы с уклоном не более 1:8—1:10.

Желательно, чтобы оси коридоров и проходов совпадали с осями дверей или помещений, в которые вливается коридор. Это обеспечивает более правильное и равномерное распределение людей в потоке и лучше ориентирует их относительно дальнейшего движения.

При необходимости организации встречного движения больших потоков людей (хотя это и нежелательно) участок такого пути должен быть по возможности короче, а встречные потоки должны двигаться отдельно. Для обеспечения четкости движения границу между встречными потоками целесообразно обозначить разделительным барьером или соответствующими надписями и указателями (рис. 9.4).

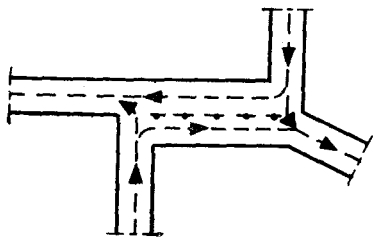


Рис. 9.4. Расширение пути при встречном движении людских потоков

Если встречные потоки имеют невысокие плотности, достаточно предусмотреть соответствующую ширину коридора (см. § 4 гл. 6).

§ 2. Лестницы и пандусы

По назначению лестницы подразделяются на основные, второстепенные, служебные, аварийные и пожарные.

Для передвижения людей в нормальных условиях служат только основные лестницы. Для аварийной эвакуации кроме основных используются также второстепенные и аварийные. Служебные лестницы предназначены только для обслуживающего персонала здания. Пожарные внутренние лестницы предназначены для борьбы с огнем; примером могут служить лестницы, соединяющие планшет театральной сцены с верхними ее частями (колосниками, галереями и т. п.).

Как известно, лестницы могут быть двух- и трехмаршевыми. С точки зрения движения людских потоков форма лестницы существенного влияния не имеет, поскольку повороты на площадках практически не сказываются на темпе и характере движения. Однако имеют значение длина и количество маршей. Более короткие марши несколько облегчают движение, поскольку каждая площадка является как бы местом кратковременной передышки, или, вернее, границей короткого пути, который человек проходит быстро. Вместе с тем с увеличением количества маршей (за счет сокращения их длины) растет количество площадок и, следовательно, общая длина пути по лестнице, а также движения по ней потока, что, конечно, нежелательно.

Для эвакуации людей из здания с высотой этажа более 5 м или, наоборот, при небольшой высоте этажа можно применить перекрестные двухмаршевые лестницы (две лестницы, размещенные в одной лестничной клетке), которые при одинаковых размерах лестничной клетки могут пропустить вдвое большее число людей, чем обычные (рис. 9.5).

Перекрестные лестницы целесообразно применять главным образом как аварийные в зданиях с большой концентрацией людей. Однако в практике строительства имеются случаи использования перекрестных лестниц в качестве основных, например в наземном вестибюле станции метро «Сокольники» в Москве. Перекрестные лестницы (с одним маршем между этажами) применены в 17-этажном жилом доме на проспекте Мира в Москве. В данном случае лестница имеет второстепенное значение.

Известны также лестницы различной формы в плане (многоугольные, круглые, овальные, с полукруглыми междуэтажными площадками и т. п.). Такие лестницы по условиям движения людских потоков не отличаются от обычных, если в них не применены забежные ступени (с проступью переменной ширины), неудобные и представляющие опасность для движущихся людских потоков, особенно в аварийных условиях, поскольку при этом легко нарушается ритм движения (рис. 9.6).

Обеспечение равномерности движения по лестнице следует считать важной задачей при проектировании. Для этого целесообразно, чтобы марши были по возможности одинаковой длины (с равным количеством

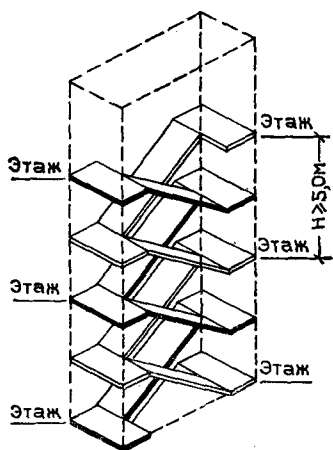


Рис. 9.5. Схема перекрестной лестницы

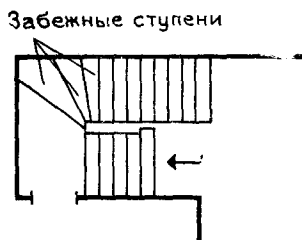
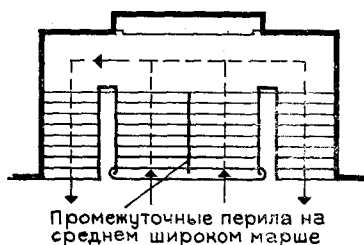


Рис. 9.6. Забежные ступени

Рис. 9.7. Лестница с промежуточными перилами



ступеней). Вместе с тем марш не следует делать очень длинным или очень коротким. При длинном марше ритм движения, как правило, сбивается. опытом установлено, что в марше не должно быть более 18 ступеней. При очень коротких маршах (один или два подступенка) люди зрительно плохо ощущают перепад уровня пола или площадок и могут легко оступиться.

Ширина лестничных маршей (в свету на уровне поручня) определяется по расчету, как показано в § 1 гл. 3. Наименьшая ширина марша лестницы в общественных зданиях, рассчитанная на встречное движение, рекомендуется 1,1 м (лучше 1,2 м). Максимальная ширина марша (по отечественным нормам) должна быть 2,4 м. При этой величине человек, двигаясь посередине марша, в случае необходимости может легко дотянуться до поручня. Если требуется большая ширина марша, следует устраивать промежуточные перила с поручнем (рис. 9.7). Для лестниц с шириной марша более 1,5 м целесообразно делать поручни с двух сторон. Высота поручня от края проступи — 90 см. Целесообразно лестницы с одним поручнем проектировать так, чтобы при спуске поручень находился с правой

стороны по ходу движения потока. Ширина лестничных площадок делается не менее ширины марша. Ограждение марша должно быть таким, чтобы ребенок не мог проскользнуть между стойками или другими элементами ограждения и упасть на соседний марш или в пролет между ними. Кроме того, ограждения должны быть достаточно прочными на горизонтальные нагрузки, особенно в тех случаях, когда можно ожидать скопления людей.

Уклон, или «заложение» лестницы, имеет большое значение для движения, влияя на величину скорости. Чем круче заложение, тем меньше (при тех же плотностях потока) скорость движения. В отечественной строительной практике лестницы с двойным заложением, т. е. с уклоном 1:2 ($\text{tg}\alpha=0,5$), считаются наиболее удобными. Лестницы с большим уклоном дают некоторую экономию площади лестничной клетки, но преодолеваются труднее.

Размеры ступеней обычно согласовываются с длиной шага. Если средняя длина шага человека составляет около 60 см, то при ходьбе по лестнице длина шага должна быть равна длине двух подступенков и одной проступи. Следовательно, при уклоне 1:2 размер ступени будет: подступенок — 15 см; проступь — 30 см.

Для обеспечения постоянного ритма движения важно, чтобы все ступени имели одинаковую высоту подступенков, поэтому совершенно недопустима небрежность при проектировании и постройке лестниц, когда одна из ступеней получает меньший или больший подступенок. При движении в аварийных условиях один такой выпадающий размер ступени может стать причиной несчастья. Важно, чтобы ступень имела ва-



Рис. 9.8. Форма ступени

лик или чтобы подступенок был скошен. В противном случае лестница станет неудобной для хождения, так как люди будут задевать подступенок ногами (рис. 9.8).

Так же как и в коридорах, не допускается размещение на лестничных площадках и маршах каких-либо

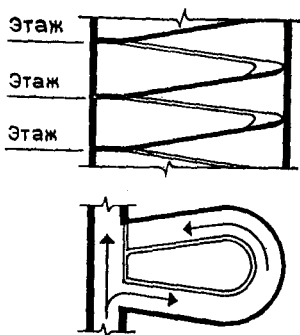


Рис. 9.9. Пандус

устройств, сужающих расчетную ширину лестницы. Двери в смежных с лестницей помещениях нужно делать так, чтобы раскрытая дверь не сужала расчетную ширину площадки.

Для вертикального сообщения между этажами вместо лестниц иногда применяются пандусы, представляющие собой наклонные (без ступеней) плоскости, заменяющие марши лестницы (рис. 9.9). Уклон пандусов обычно равен 1:6 или 1:10, т. е. значительно меньше уклона лестниц.

По сравнению с лестницами пандусы занимают гораздо больше места в здании, поэтому они неэкономичны. Кроме того, путь по пандусу значительно длиннее, чем по лестнице, вследствие чего вопрос о времени движения при выборе способа сообщения между этажами должен решаться расчетом.

Считается, что движение по пандусу удобнее, чем по лестнице, хотя есть и другое мнение. Следует отметить, что спуск или подъем по наклонной плоскости вызывает значительное напряжение, поэтому многие предпочитают подняться по относительно крутой лестнице, чем долго идти по пологому пандусу.

Для безопасности движения пандусы с уклоном более 1:10 должны иметь специальное шероховатое покрытие, а при уклоне 1:6 должны быть устроены ходовые бруски.

§ 3. Прочие виды коммуникационных помещений

К коммуникационным помещениям можно также отнести различного рода кулуары и рекреационные помещения, фойе и вестибюли.

Фойе и кулуары обычно предусматриваются в театральных зданиях, имеющих зрительный зал. В виде широких коридоров кулуары опоясывают с одной, двух или трех сторон зрительный зал, с которым они непосредственно сообщаются. Через кулуары зрители вхо-

Рис. 9.10. Схема движения людей в фойе и кулуарах

дят в зал и выходят из него во время антрактов, они служат местом прогулок публики. При отсутствии фойе кулуары используются для ожидания начала спектакля, киносеансов.

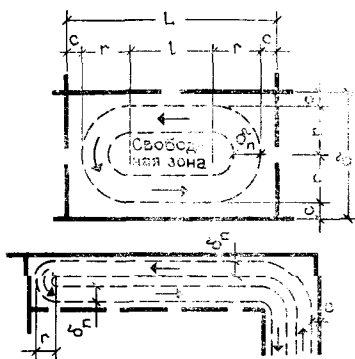
Рекреационные помещения являются принадлежностью учебных зданий, это широкие коридоры, предназначенные для отдыха учащихся во время перерывов между занятиями.

Фойе служит главным образом местом ожидания, отдыха и прогулок публики перед началом спектакля (киносеансов, собрания) и в антрактах.

С помощью расчетов определяются необходимые размеры кулуаров, рекреационных помещений и фойе применительно к каждой выполняемой ими функции. Допустим, через кулуар проходит публика в зрительный зал при его заполнении и выходит при разгрузке зала в нормальных и аварийных условиях. В данном случае следует произвести расчет применительно к каждому из трех случаев. Окончательным принимается результат того расчета, который дает наибольшие размеры помещения.

Расчет производится обычным порядком. При этом следует иметь в виду, что «прогулочное» движение людей по кулуарам или фойе происходит при незначительных плотностях ($D=0,10-0,20$) и пониженных (против нормального движения) скоростях. Это бесконечный людской поток, движущийся по замкнутой траектории, приблизительно повторяющей очертания помещения. Ширина $\delta_{л}$ потока зависит от размера помещения и числа людей. Между идущими навстречу по замкнутой траектории потоками обычно всегда остается некоторая свободная площадь, особенно в фойе (рис. 9.10).

Расчет размеров помещений и параметров движущихся в них потоков, а также помещений, где предполагается «прогулочное» движение, имеет некоторую



особенность. Ниже приводится формула, с помощью которой можно, задаваясь некоторыми параметрами, определить площадь $F_{л}$, занимаемую потоком, количество людей и минимально необходимые размеры помещений, m^2 :

$$F_{л} = 3,14 \delta_{л} (2r - \delta_{л}) + 2 \delta_{л} l,$$

где r — радиус поворота внешней стороны потока, м; l — длина прямой части потока, м.

Пример. Какое количество прогуливающих можно разместить в фойе размером 25×15 м, если ширина потока $\delta_{л} = 4$ м при $D = 0,2$, а расстояние между ним и стенами $c = 1,5$ м.

Решение. Из рис. 9.10 следует, что $l = L - \delta = 25 - 15 = 10$ м;

$$r = \frac{\delta}{2} - c = \frac{15}{2} - 1,5 = 6 \text{ м.}$$

Площадь, занимаемая потоком, равна

$$\begin{aligned} F_{л} &= 3,14 \delta_{л} (2r - \delta_{л}) + 2 \delta_{л} l = \\ &= 3,14 \cdot 4 (2 \cdot 6 - 4) + 2 \cdot 4 \cdot 10 = 180,5 \text{ м}^2. \end{aligned}$$

При площади горизонтальной проекции одного человека $f = 0,1 \text{ м}^2$ и плотности потока $D = 0,2$ на 1 м^2 размещаются два человека. Отсюда искомое число людей составит:

$$N = F_{л} \cdot 2 = 180,5 \cdot 2 = 361 \text{ чел.}$$

В тех случаях, когда помещение служит местом ожидания, площадь его определяют по формуле

$$F = \frac{N}{D}, \quad (9.1)$$

где F — искомая площадь помещения, m^2 ; N — количество человек, подлежащих размещению, m^2 ; D — принимаемая в этом помещении плотность ($D = 0,2 - 0,4$).

Пример. Для 500 чел., ожидающих киносеанса, минимальная площадь фойе составит (при $f = 0,125 \text{ м}^2$ и $D = 0,3$):

$$F = \frac{500 \cdot 0,125}{0,3} = 208 \text{ м}^2.$$

При определении размеров фойе или кулуаров нужно разумно сочетать требования экономики с требованиями комфорта.

Входным узлом называют комплекс помещений, примыкающих к основному входу в общественное здание. Узел состоит из вестибюля и гардероба; к нему также относятся входные двери с тамбурами и некоторые вспомогательные помещения (например, кассы, бюро пропусков и др.). Обычно к входному узлу непосредственно примыкают главная лестница, лифты и магистральные коридоры. Его назначение состоит в приеме и распределении людских потоков по зданию, а также в обеспечении организованного выхода из него масс людей

Вестибюль служит для приема и кратковременного размещения значительного числа людей в период загрузки и разгрузки здания. В зимнее время для более эффективной борьбы с охлаждением вестибюля вследствие проникания холодного воздуха за входными дверями часто устраивается специальное помещение — аванвестибюль, который располагается между вестибюлем и тамбурами.

В зависимости от назначения здания людские потоки могут проходить через входной узел в одних случаях концентрированно в определенные относительно малые промежутки времени (например, в театре, школе и т. п.); в других — двигаться непрерывно в течение длительного времени (например, в универмаге, музее); в третьих — комбинированно (например, в административном здании, где в начале рабочего дня происходит заполнение здания, а в конце — разгрузка; в остальное время — непрерывное незначительное по интенсивности движение посетителей). Особое место занимает возможный случай концентрированного движения потоков в сторону наружных выходов при аварийной эвакуации здания.

Важнейшей задачей является определение размеров вестибюля и гардероба. Для некоторых видов общественных зданий эти размеры задаются нормами или рекомендуются в технической литературе. Так, для театров на одного человека отводится $0,25 \text{ м}^2$ площади вестибюля, а размеры гардероба определяются из расчета $0,08—0,1 \text{ м}^2$ на человека. На 30—40 человек полагается 1 пог. м барьера.

Однако принятые нормы не всегда оправдываются на практике. В одних случаях они оказываются несколько завышенными, в других — недостаточными. Это происходит потому, что нормативами и рекомендациями не учитывается перемещение людских потоков во времени, которое может вносить существенные изменения в наше представление о характере процесса.

Более правильные результаты можно получить, если размеры вестибюля определять по расчету движения людского потока. Расчет дает возможность выяснить, в какие моменты движение через входной узел достигает наибольшей интенсивности и какова при этом количественная характеристика потока.

Рассмотрим возможную методику определения размеров вестибюля на элементарном примере.

Пример. Воспользуемся данными § 4 гл. 8 для нормальных условий движения (см. рис. 8.3). Из графика следует, что в вестибюле (участок 7) образуется поток, состоящий из двух частей с плотностями $D_{7_1} = 0,06$ и $D_{7_2} = 0,21$.

Пропускная способность первой части потока $Q_{7_1} = 10,85 \text{ м}^2/\text{мин}$; второй — $Q_{7_2} = 22,8 \text{ м}^2/\text{мин}$. Первая часть потока выходит в вестибюль в течение 0,75 мин (по графику отрезок $ДЛ$); вторая — 0,95 мин (отрезок $ЛМ$); замыкающая часть людского выходящего потока из первого этажа в связи с ничтожным временем в расчет не принимается (отрезок $МЕ$). $Q_{7_1} \cdot 0,75 + Q_{7_2} \cdot 0,95 = 30 \text{ м}^2$, т. е. расчетному числу людей (240 чел.).

Предположим, что выходящие люди должны получить одежду в гардеробе, одеться, а затем продолжить движение к выходу. На получение одежды и одевание каждый человек затрачивает от 3 до 5 мин, если пропускная способность гардероба такова, что исключается ожидание в очереди. Примем для расчета 4 мин. Тогда верхняя часть графика должна выглядеть так, как показано на рис. 9.11. В левой части рисунка показан график движения в вестибюле и в тамбуре (участок 8) без учета времени получения одежды и одевания (см. рис. 8.3). Предположим, что человек за-

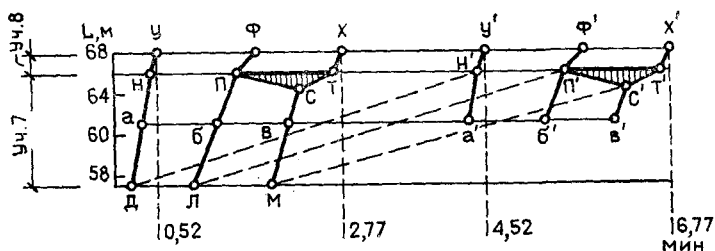


Рис. 9.11. Расчетный график движения в вестибюле

держивается в гардеробе на 4 мин. Тогда из точек $a, б, в$ графика, соответствующих половине пройденного пути по вестибюлю, необходимо отложить отрезок времени в 4 мин по горизонтали (см. точки $a', б', в'$), т. е. $aa' = bb' = vv' = 4$ мин, и из них продолжить построение графика по данным, полученным при расчете. Соответственно продолжительность процесса возрастет до 6,77 мин. С учетом получения одежды и одевания средняя скорость движения людей в вестибюле резко уменьшается (до 2—3 м/мин), как показано пунктирными линиями на рис. 9.11.

Из графика видно, что с момента $М$ (выхода замыкающей части потока в вестибюль) до момента $Н'$ (выхода головной части потока в тамбур) в вестибюле будет находиться все расчетное количество людей (30 м^2), тогда плотность в вестибюле составит

$$D_7 = \frac{N}{\delta_2 L_2} = \frac{30}{4 \cdot 11} = 0,68 (\sim 6 \text{ чел./м}^2).$$

Учитывая, что расчетная ширина пути движения принята 4 м, а полная ширина вестибюля составляет 6 м, фактическая плотность будет меньше:

$$D_7 = 0,45 (\sim 4 \text{ чел/м}^2).$$

Последняя цифра принята в отечественных нормах для определения площади вестибюля.

Следовательно, вестибюль вмещает всех людей, находящихся в здании, с нормативной плотностью, что очень важно для движения в аварийных условиях. Однако при такой плотности получать одежду и одеваться будет неудобно. Для обеспечения необходимого комфорта плотность следует уменьшить, увеличив соответственно размеры вестибюля.

Наконец, может быть определена требуемая производительность гардероба. Установим количество людей в первой и во второй частях потока N_1 и N_2 . Величина отрезков ab и $b\alpha$ соответствует 0,9 и 0,88 мин, тогда:

$$N_1 = Q_{7_1} \cdot 0,9 = 10,85 \cdot 0,9 = 9,75 \text{ м}^2 (78 \text{ чел.});$$

$$N_2 = Q_{7_2} \cdot 0,88 = 22,80 \cdot 0,88 = 20,25 \text{ м}^2 (162 \text{ чел.}).$$

Общая продолжительность пребывания в вестибюле первой части потока определяется отрезком $ab' = 4,9$ мин; второй части — отрезком $b\alpha' = 4,88$ мин. Полагая, что один гардеробщик может обслужить шесть человек в минуту, потребное число гардеробщиков составит:

для первой части потока

$$\frac{78}{4,9 \cdot 6} \cong 3 \text{ чел.},$$

для второй части потока

$$\frac{162}{4,88 \cdot 6} \cong 6 \text{ чел.}$$

Очевидно, что столько штатных гардеробщиков иметь нерацонально.

При двух гардеробщиках время на получение одежды и одевание для первой части потока составит $\frac{68}{26} = 6,5$ мин; для второй части — $\frac{162}{12} = 13,5$ мин.

Следовательно, для предупреждения задержки людей в вестибюле необходимо в часы пик добавлять гардеробщиков из числа другого обслуживающего персонала; в противном случае придется мириться с увеличением времени эвакуации людей из здания более чем в 2 раза.

В вестибюле или аванвестибюле нередко делают ступени (3—4), что позволяет повысить уровень пола и тем самым улучшить теплотехнические качества помещения (предупредить распространение холодного воздуха, врывающегося через входные двери). С точки зрения эвакуации, особенно в аварийных условиях, устройство таких ступеней нежелательно, так как этим резко ухудшаются условия движения.

При проектировании коммуникационных путей, предназначенных для аварийной эвакуации, следует стремиться не создавать объединенных потоков, а, наоборот, разделять их на более мелкие. Примером является устройство в зрелищных сооружениях непрерывных рядов кресел, создающих независимые секции, имеющие отдельные выходы.

Глава 10

КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И СПЕЦИАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА, СВЯЗАННЫЕ С ДВИЖЕНИЕМ ЛЮДСКИХ ПОТОКОВ

§ 1. Двери

В общественных зданиях применяются двери четырех типов (рис. 10.1): распашные (однопольные и двупольные); вращающиеся (турникеты); раздвижные (одно-

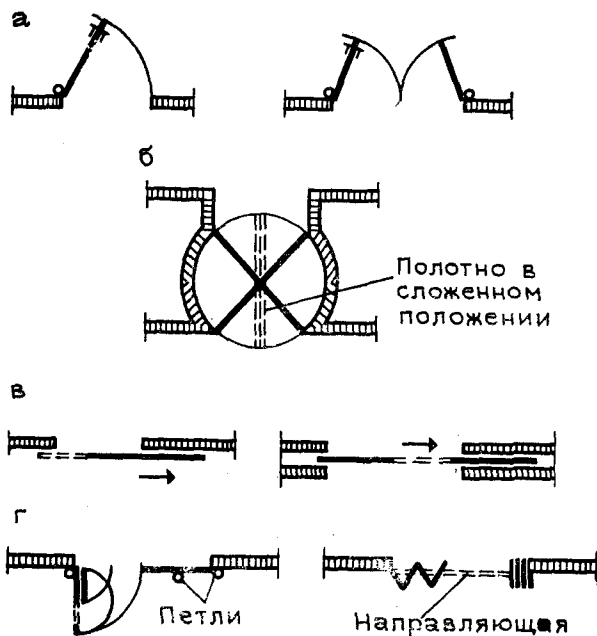


Рис. 10.1. Типы дверей

а — распашные; б — вращающиеся; в — раздвижные; г — складывающиеся

польные и двупольные); складывающиеся (однопольные и двупольные).

Распашные двери являются самыми распространенными, наиболее простыми в исполнении и наилучшими с точки зрения беспрепятственного движения людских потоков.

Вращающиеся двери эффективны для защиты от проникания в зимнее время холодного воздуха в вестибюль через наружный вход, а также для регулирования количества и порядка подхода людей к следующему участку пути (например, к билетному контролю). Однако они имеют малую пропускную способность и непригодны для аварийного движения. Некоторые конструкции допускают складывание дверного полотна, что увеличивает пропускную способность вращающихся дверей, но недостаточная ширина и часто ненадежность механизма складывания полотен не позволяют рекомендовать их в качестве эвакуационных, поэтому в общественных зданиях параллельно с вращающимися дверями устраиваются обычные распашные.

Раздвижные и складывающиеся двери довольно просты по конструкции и имеют нормальную пропускную способность. Однако отсутствие уверенности в том, что в аварийной ситуации люди смогут их быстро открыть, исключает возможность применения таких дверей на путях движения людских потоков. Дело в том, что полотно раздвижной или складывающейся двери может под напором людей (при скоплении) получить перекосяк или быть прижатым к стене. Складные и раздвижные двери могут использоваться в общественных зданиях только как служебные (не для массового пользования).

Полотно распашной двери закрепляется в деревянной или металлической коробке. В зависимости от конструкции двери и способа ее навески полотно может выступать за проем и тем самым уменьшать его расчетную ширину. Поэтому расчетную ширину проема следует принимать в свету с учетом дверного полотна (рис. 10.2). Уменьшить ширину проема могут также дверные приборы, которые также необходимо учитывать при определении его ширины.

Следует отметить, что всякие выступающие части дверного полотна создают известные помехи движению и поэтому их лучше избегать. Широко применяемые в

настоящее время щитовые гладкие двери с этой точки зрения более предпочтительны.

В общественных зданиях не следует устраивать пороги в дверных проемах, через которые возможно массовое движение людей. Пол в дверях должен быть на одном уровне с полами смежных помещений. В особых случаях, когда устройство порогов смежных помещений на разных уровнях вызывается необходимостью (напри-

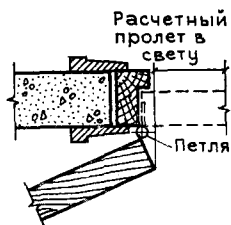


Рис. 10.2. Расчетная ширина распашной двери

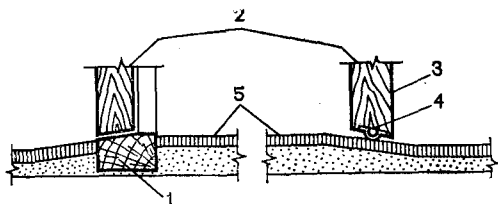


Рис. 10.3. Конструкция порога

1 — коробка (нижний элемент); 2 — полотно двери; 3 — металлическая окантовка низа полотна; 4 — уплотнение из резины; 5 — пол

мер, по условиям производства, чтобы предотвратить разлив жидкости за пределы данного помещения), этот перепад должен быть отлогим, сделанным в виде пандуса (рис. 10.3).

При разности уровней полов в смежных с дверным проемом помещениях не следует допускать устройства ступеней непосредственно у двери. Лучше устроить отлогий пандус или отнести ступени на такое расстояние, чтобы они были хорошо заметны при движении.

На участках массового движения людских потоков рекомендуется устанавливать только двупольные двери, однопольные могут быть лишь в местах, где движение незначительно.

Ширина дверей определяется расчетом, и они должны открываться в направлении к выходам из здания. В сомнительных случаях или при возможности движения в любом направлении двери должны открываться в обе стороны.

В целях безопасности не рекомендуется также оборудовать двери аварийных выходов внутренними замками. На таких дверях целесообразно устанавливать запоры простой конструкции, которые могли бы быть открыты без помощи эксплуатационного персонала (напри-

мер, типа накладных крюков), причем только с той стороны, откуда должен двигаться поток.

Важную роль в организации движения людских потоков играет рациональное решение главных входов в общественные здания. Климатические условия вынуждают принимать специальные меры против охлаждения вестибюлей в зимнее время вследствие проникания холодного воздуха через входные двери, особенно при оживленном движении через них (например, в универмагах, крупных административных зданиях и т. п.).

На рис. 10.4 показаны два решения входа с вращающимися и распашными дверями. В первом случае вращающиеся двери предназначены для постоянного использования в нормальных условиях, а распашные—специально для аварийной эвакуации: эвакуация происходит в прямом направлении, минуя вращающиеся

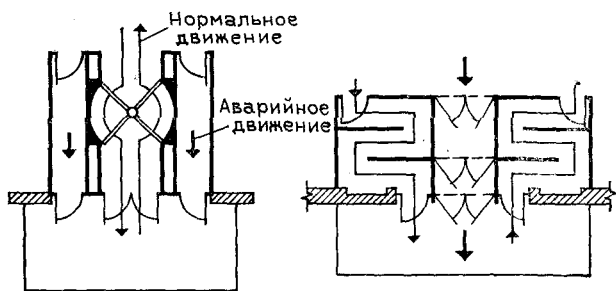


Рис. 10.4. Устройство входных тамбуров

двери. Во втором случае показан вход с ломаным в плане шлюзом (тамбуром) и прямым проходом специально для аварийной эвакуации, который в обычное время закрыт. Как в этом, так и в предыдущем примере двери, предназначенные для аварийного движения, в теплое время года можно использовать для нормального движения.

Перед главным входом в здание обычно устраивается площадка с одной или несколькими ступенями. Если площадка недостаточна по размерам и ступени расположены слишком близко к выходным дверям или находятся в неудовлетворительном эксплуатационном состоянии (например, в зимнее время из-за обледенения или заноса снегом), они могут стать причиной дезорга-

низации выхода людей из здания. Для предупреждения обледенения наружных ступеней у входов в здания и в других подобных случаях, например ступеней подземных переходов через улицы, их целесообразно делать прогреваемыми, устанавливая под ними нагревательные приборы.

Для защиты от атмосферных осадков над главным входом целесообразно устраивать навес в виде портика или козырька. В ненастную погоду в зданиях, где такого навеса нет, движение во входных дверях замедляется, так как люди часто пережидают дождь в тамбурах.

В последние годы в практике строительства получили распространение цельностеклянные двери из толстого полированного стекла. Входные тамбуры также делаются из больших цельностеклянных панелей от пола до верха. Такое решение, эффективное в архитектурном отношении, с точки зрения организации движения людей может привести к несчастным случаям, которые, к сожалению, имели место на практике. Дело в том, что при сплошных стеклянных ограждающих конструкциях и стеклянных дверях люди в движении могут не различить где дверь, а где ограждение, и наткнуться на последнее, поэтому необходимо устраивать ограничительные барьеры в виде круглого металлического поручня на 100—120 см от пола и ярких указателей на стекле на уровне глаз человека.

§ 2. Полы

Качество полов в коммуникационных помещениях в большой степени влияет на движение. По хорошему полу люди идут уверенно, в нормальном темпе. В противном случае уверенность уменьшается, скорость движения падает и человек может упасть.

Выбор материала для пола зависит от назначения помещения, и не только от его главной, но и подсобной функции. Полы коммуникационных помещений должны иметь ровную поверхность, поэтому нужно выбирать материал, хорошо сопротивляющийся истиранию. Материал пола должен обладать способностью заглушать шаги, так как постоянное движение может мешать людям, находящимся в смежных помещениях и главным образом расположенных этажом ниже, а также создавать неприятный шумовой фон в самом помещении. Пол

не следует делать скользким. Наконец, он должен легко очищаться от грязи и быть влагостойким, поскольку увлажнение пола неизбежно как при уборке, так и при загрязнении (в ненастную погоду).

Если коммуникационное помещение кроме своей основной функции (движение людей) выполняет и другие, то необходимо расширить и требования к полам. Например, если речь идет о проходе в производственном помещении, то пол должен иметь достаточную прочность для восприятия нагрузок от напольного промышленного транспорта, обладать в зависимости от характера производства огнестойкостью или стойкостью против воздействия химических веществ или высокой температуры.

Общественные здания и их отдельные помещения могут иметь разное назначение, поэтому подбор материалов для полов также должен быть строго индивидуальным. Вместе с тем общественные здания имеют много функционально-идентичных помещений (в данном случае связанных с движением людских потоков), применительно к которым можно сформулировать рекомендации для выбора типа пола.

Например, через вестибюль ежедневно проходит масса людей, на которую рассчитано общественное здание. Очевидно, что пол в вестибюле должен полностью удовлетворять всем перечисленным выше требованиям. Необходимо подчеркнуть особое значение его влагоустойчивости и гигиеничности, поскольку вестибюль является первым помещением после входа с улицы, поэтому наиболее целесообразными материалами для пола следует считать естественный камень твердых пород (шлифованные гранитные плиты) и метлахскую плитку. Можно устраивать полы на цементной основе, например из мозаичных бетонных плит, но при условии высокого качества самих изделий и производства работ. Возможны также полы из синтетических материалов (с высоким коэффициентом сопротивления истиранию), лучше из рулонных, поскольку при большом количестве швов (например, при полах из плитки) снижается долговечность пола. Меньшее значение в данном случае имеет требование бесшумности, поскольку люди находятся в вестибюле короткое время. Относительно высокая стоимость полов из естественного камня или метлахской плитки по единовременным затратам окупается за счет

резкого сокращения расходов на ремонт в процессе эксплуатации.

В коридорах общественных зданий также происходит постоянное движение людских потоков, а в определенные часы (например, начало или окончание работы) — массовое с высокими плотностями, поэтому ровность пола, высокое сопротивление истиранию, малая скользкость, гигиенические качества должны обязательно учитываться при выборе материала.

Большое значение имеет бесшумность пола, поскольку в коридоры выходят рабочие помещения, в которых должен соблюдаться установленный шумовой режим. При выборе материала пола следует оценивать назначение и режим работы здания. Например, в учебных корпусах высших учебных заведений, характеризующихся напряженным движением перед началом и концом занятий и в перерывах, целесообразны полы из натурального камня или метлахских плиток. Их повышенные шумовые характеристики в данном случае имеют меньшее значение, поскольку движение и, следовательно, вызываемый им шум происходят в то время, когда нет занятий. Применяющиеся до последнего времени дорогие паркетные полы, как показывает опыт эксплуатации вузовских зданий, совершенно непригодны, так как они быстро изнашиваются и требуют почти ежегодного ремонта.

В коридорах административных зданий с меньшей напряженностью движения полы лучше делать из синтетических материалов или дерева. Последние целесообразно закрывать синтетической ковровой дорожкой, снимающей шум от ходьбы, или целиком затягивать синтетическим ковром. Ковровые дорожки покрытия необходимо хорошо натягивать и надежно прикреплять к полу во избежание образования складок, задиранья краев, что может оказаться опасным в аварийных условиях.

В кулуарах и фойе, например, театральных зданий, где массовое движение происходит в антрактах и отличается сравнительно малой напряженностью, при выборе типа пола следует учитывать парадный характер помещения и, следовательно, повышенные архитектурные качества, которые должны быть приданы полу. В театрах люди обычно находятся в легкой обуви, поэтому материал пола должен обладать небольшим коэффициентом теплоусвоения. В этих помещениях хороши

паркетные полы или полы из синтетических материалов, а также ковровые покрытия.

В кулуарах и фойе кинотеатров, где люди находятся в повседневной уличной обуви и где наблюдаются сравнительно высокие плотности людских потоков, паркетные полы и ковровые покрытия мало пригодны по соображениям как прочности и долговечности, так и гигиены. Полы из камня и керамики, хотя и удовлетворяют этим эксплуатационным условиям, но отличаются большой, как говорят, жесткостью. Поэтому люди, ожидая киносеанса, как правило, стоя, будут быстро уставать; кроме того, высокий коэффициент теплоусвоения делает эти полы «холодными», непригодными для длительного нахождения людей. Учитывая эти условия, можно рекомендовать полы из синтетических рулонных материалов, отличающихся эластичностью, гигиеничностью и достаточной прочностью.

Эти примеры показывают, что при выборе пола помещения должны всесторонне оцениваться условия его эксплуатации в зависимости от назначения и режима работы.

Поверхности лестниц и лестничных площадок, где всегда можно предполагать массовое движение людских потоков, должны отвечать требованиям прочности, малой истираемости и гигиеничности (имея в виду очистку от грязи) и долговечности. Особое внимание надо обращать на то, чтобы лестницы и площадки не были скользкими, так как движение по лестницам вниз в аварийных условиях является наиболее опасным, и случайное падение человека или даже нарушение ритма движения может привести к тяжелым последствиям.

Лестницы также должны быть несгораемыми, поскольку по ним осуществляется массовая эвакуация при пожарах. Удовлетворяющими этим требованиям материалами являются естественный камень, покрытия на цементной основе и метлахская плитка (для площадок). Однако ступени по мере истирания теряют первоначальную форму

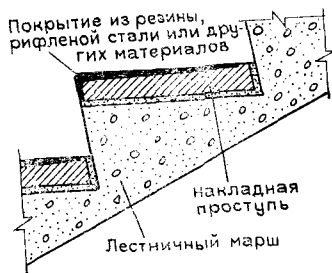


Рис. 10.5. Покрытия для ступеней

и становятся скользкими, поэтому часто применяются специальные покрытия для ступеней, делающие их более долговечными и безопасными для ходьбы (рис. 10.5). Имеет значение и форма ступеней. Например, применяющиеся ступени с полукруглым валиком на краю проступи менее целесообразны, чем ступени с полкой (вместо валика) или со скошенным подступенком.

Следует обращать постоянное внимание на состояние лестничных маршей. Образующиеся в процессе эксплуатации отколы краев ступеней или их чрезмерное истирание могут стать причиной нарушения движения людского потока, поэтому должен быть обеспечен своевременный ремонт поверхностей лестниц.

Покрытие лестниц ковровой дорожкой можно рекомендовать лишь в исключительных случаях, преимущественно для лестниц с небольшим движением в зданиях с малой населенностью. Дорожка должна быть надежно закреплена.

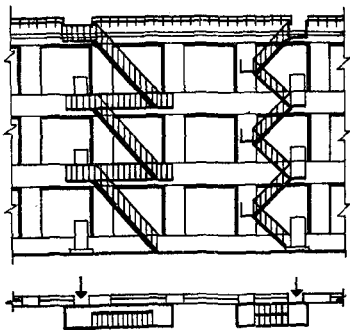
§ 3. Аварийные лестницы

Аварийными называются лестницы, служащие для эвакуации людей во время пожара или аварии, если обычные лестницы оказываются отрезанными от выходов или непроходимыми, например при задымлении. Аварийные лестницы размещаются внутри или снаружи здания.

Аварийная лестница должна быть безопасной для спуска. Она состоит из площадок, устраиваемых на уровне каждого этажа (кроме первого) против специальных аварийных дверных проемов, и маршей, соединяющих площадки. Не следует смешивать аварийные лестницы, предназначенные для эвакуации людей, с наружными лестницами, служащими исключительно для пожаротушения (более крутые, часто без перил и промежуточных площадок).

Аварийные лестницы бывают двух типов: одномаршевые и двухмаршевые с промежуточными междуэтажными площадками. Первый тип конструктивно проще, но площадки получаются при этом длинными. Лестницы второго типа занимают меньше места, но конструктивно сложнее. Первый тип лестниц целесообразен при относительно невысоких этажах (до 4 м). Уклон маршей

Рис. 10.6. Схемы аварийных лестниц



аварийных лестниц составляет 1 : 1. Ширина маршей обычно делается 0,6—0,7 м, хотя может быть и больше, если требуется по расчету.

Чтобы на аварийных лестницах не задерживались атмосферные осадки, площадки и марши делают в виде рам из полосовой или уголкового стали, а пол площадок и ступеней маршей — из прутковой стали с интервалами 6—7 см между прутками, привариваемыми к рамам. Как площадки, так и марши обязательно оборудуются прочными перилами. На рис. 10.6 показаны схемы наружных аварийных лестниц.

Следует отметить, что люди, вынужденные спускаться по аварийным лестницам, обыкновенно оказываются неподготовленными или малоподготовленными к такого рода спуску (боязнь высоты, головокружение, отсутствие привычки к решетчатым полам), вследствие чего эвакуация протекает медленно, тем более что ширина маршей допускает движение только в один ряд, друг за другом. Как показывают наблюдения, скорость движения по крутым лестницам существенно меньше обычной. Однако данных накоплено еще недостаточно, поэтому для приближенного решения значения скоростей при аварийном движении для крутых лестниц (очень условно) можно их принимать равными скоростям комфортного движения по лестницам вниз при обычных уклонах.

Ограниченная пропускная способность аварийных лестниц определяет необходимость тщательной оценки факторов, влияющих на срочность эвакуации, так как от этого зависит решение вопроса о количестве и местах расположения аварийных лестниц, а также их конструктивное решение. Вместе с тем следует учитывать, что выход людей на площадки аварийной лестницы является началом эвакуации, поэтому немаловажное значение приобретает вопрос об их размерах.

Пример. В производственном помещении, расположенном на втором этаже, работают 90 чел. (см. § 4 гл. 8). Допустимый срок

эвакуации $t_{\text{доп}} = 2$ мин. Требуется определить размеры элементов аварийной лестницы (участок 4).

Решение. Количество людей в помещении (в размерности м^2) составляет

$$N = 90 \cdot 0,125 = 11,25 \text{ м}^2.$$

Параметры движения на участке 1 (см. § 4 гл. 8 расчет движения потока второго этажа для аварийных условий): $D_1 = 0,235$; $v_1 = 35,63$ м/мин; $q_1 = 8,38$ м/мин; $\delta_1 = 2$;

$$Q_1 = 16,76 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

Проём O_{1A} (выход на аварийную лестницу $\delta_{01A} = 1,2$ м). $q_{01A} = 13,95 > q_{\text{макс}} = 13,27$ м/мин, т. е. скопление людей перед выходом, тогда $D_{01A} = 0,92$; $v_{01A} = 11,42$ м/мин; $q_{01A} = 10,50$ м/мин;

$$Q_{01A} = 12,6 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

Время прохождения потоком проёма O_{1A} , с учетом задержки, составит

$$t = \frac{N}{Q_{01A}} = \frac{11,25}{12,6} = 0,89 \text{ мин} < t_{\text{доп}} = 2 \text{ мин}.$$

Ширину площадки принимаем $\delta_{41} = 2,2$ м, тогда:

$$q_{41} = \frac{Q_{01A}}{\delta_{41}} = \frac{12,6}{2,2} = 5,73 < q_{\text{макс}} = 8,3 \text{ м/мин}$$

($q_{\text{макс}}$ — для комфортного движения по горизонтальным путям);

$$D_{41} = 0,45; v_{41} = 12,78 \text{ м/мин}; Q_{41} = q_{41} \delta_{41} = 12,6 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

Ширину марша δ_{42} принимаем равной 2 м:

$$q_{42} = \frac{Q_{41}}{\delta_{42}} = \frac{12,6}{2} = 6,3 \text{ м/мин} > q_{\text{макс}} = 5,68 \text{ м/мин}$$

(для лестниц), т. е. перед маршем происходит задержка движения потока людей:

$$D_{42} = 0,92; v_{42} = 3,68 \text{ м/мин}; q_{42} = 3,39 \text{ м/мин};$$

$$Q_{42} = q_{42} \delta_{42} = 3,39 \cdot 2 = 6,78 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

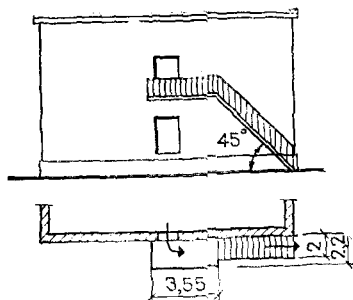
Скорость скопления:

$$v'_c = \frac{q_{42} \frac{\delta_{42}}{\delta_{41}} - q_{41}}{D_{42} - D_{41}} = \frac{3,39 \frac{2}{2,2} - 5,73}{0,92 - 0,45} = -5,77.$$

Длина скопления и, следовательно, длина площадки (рис. 10.7):

$$l_c = \frac{N}{Q_{41}} \frac{v'_c v_{41}}{v'_c + v_{41}} = \frac{11,25}{12,6} \frac{5,77 \cdot 12,78}{5,77 + 12,78} = 3,55 \text{ м}.$$

Рис. 10.7. Одномаршевая наружная аварийная лестница



Подбор размеров аварийной лестницы и площадок должен обеспечивать возможность завершения эвакуации в течение $t_{доп}$ для данного здания.

§ 4. Аварийные спуски

Аварийные спуски, как и аварийные лестницы, служат для эвакуации людей. Спуски бывают трех видов: вертикальные, наклонные и спиральные.

Вертикальный спуск представляет собой деревянную или стальную хорошо отполированную штангу диаметром 100—150 мм, закрепленную вертикально (рис. 10.8). Обхватив ее руками и ногами, человек соскальзывает в нижерасположенный этаж. Такие устройства применяются, например, в зданиях пожарных команд. С помощью вертикального спуска пожарные при объявлении боевой тревоги быстро спускаются из дежурного помещения непосредственно в гараж к пожарным машинам. Вертикальные спуски связывают не более двух смежных этажей и устанавливаются как внутри, так и снаружи здания. Они обладают очень небольшой пропускной способностью и главное требуют от людей, пользующихся ими, специальной тренировки.

По этим причинам нельзя рассматривать их как средство эвакуации относительно большого количества людей за пределы здания. Они могут быть рекомендованы лишь как средство служебного назначения (подобно приведенному примеру в зданиях пожарных команд) и как средство эвакуации небольшого числа людей, заранее подготовленных к такой возможности. Например, вертикальные спуски можно использовать в промышленных зданиях для эвакуации персонала с рабочих площадок или из опасных по технологическому процессу помещений с небольшим числом работающих, где требуется быстрая эвакуация людей.

Наклонные спуски представляют собой трубу диаметром 0,75—0,8 м, закрепленную в наклонном положе-

нии с наружной стороны здания (рис. 10.9). Верхний конец трубы с помощью специального переходного элемента входит в окно или специальный проем в стене того этажа, откуда должна производиться эвакуация людей, а нижний конец вблизи уровня земли плавно

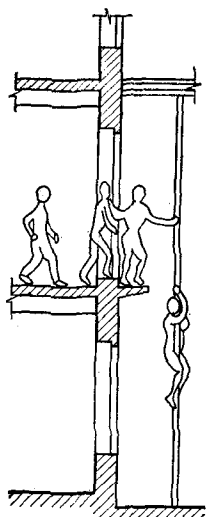


Рис. 10.8. Вертикальный спуск

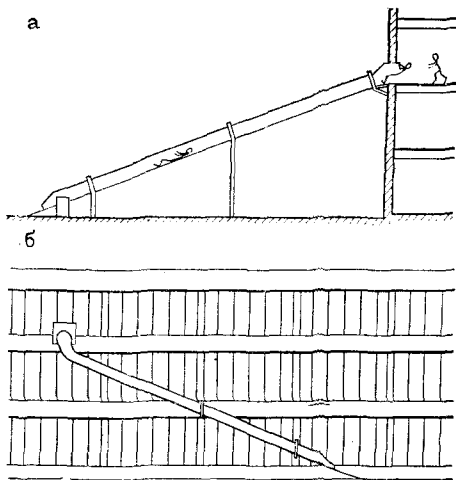


Рис. 10.9. Наклонные спуски поперек (а) и вдоль (б) здания

переходит в горизонтальное положение. Во время эвакуации человек садится на край трубы ногами вперед и соскальзывает вниз под действием собственного веса. Внутренняя поверхность трубы покрывается материалом, обеспечивающим легкое скольжение.

Наклонные спуски вполне безопасны, но, так же как и вертикальные, требуют некоторой подготовки людей. Их максимальная пропускная способность невелика (около 15 чел/мин), поэтому такие спуски эффективны преимущественно для промышленных зданий при небольшом числе эвакуируемых людей. Их применение целесообразно там, где при работе с легковоспламеняющимися материалами возникший пожар может быстро распространиться. Пользуясь наклонными спусками, люди, работающие в верхних этажах или на рабочих площадках, могут в короткое время оказаться далеко за пределами

здания, что очень важно в случаях, когда развитие аварии может привести к взрыву.

Спуски располагают параллельно или перпендикулярно к стенам здания, к которым их крепят при помощи кронштейнов.

Наклонные спуски не получили широкого распространения. Устройство их обходится довольно дорого, кроме того, они требуют большой свободной территории около здания при расположении перпендикулярно к стенам и затемняют помещения нижних этажей при размещении вдоль здания.

При проектировании наклонных спусков следует иметь в виду, чтобы скорость скольжения в конце спуска не была чрезмерно большой, поскольку при значительных скоростях некоторые люди не умеют тормозить или плохо переносят спуск.

Скорость скольжения в нижнем конце спуска v , м/с, может быть найдена из уравнения кинетической энергии:

$$\frac{m v^2}{2} = A_G - A_F,$$

где m — масса человека, кг·с²/м; A_G — работа силы тяжести человека, кгм; A_F — работа силы трения, кгс.

Путем преобразования и подстановок получим:

$$v = \sqrt{2gH(1-f \operatorname{ctg} \alpha)}, \quad (10.1)$$

где g — ускорение силы тяжести, м/с²; H — расстояние по вертикали между верхним и нижним концами спуска, м; f — коэффициент трения; α — угол наклона спуска к горизонту.

Пример. Определить конечную скорость и продолжительность движения по наклонному спуску высотой $H=10$ м при $\alpha=14^\circ$ и $f=0,2$.

Решение:

$$v = \sqrt{2gH(1-f \operatorname{ctg} \alpha)} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 10(1-0,2 \cdot 4,03)} = 6,15 \text{ м/с.}$$

Средняя скорость движения составит

$$\bar{v} = \frac{v}{2} = \frac{6,15}{2} = 3,08 \text{ м/с.}$$

Длина спуска

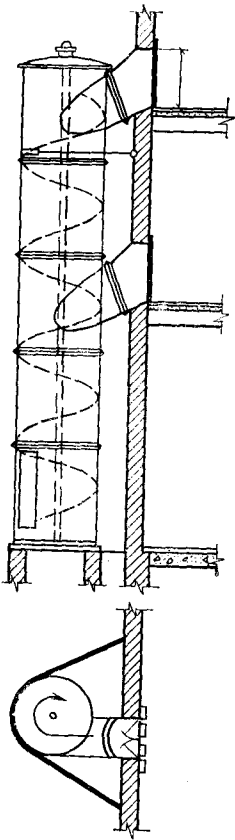
$$L = \frac{H}{\sin \alpha} = \frac{10}{0,24} = 41,6 \text{ м.}$$

Время спуска

$$t = \frac{L}{\bar{v}} = \frac{41,6}{3,08} = 13,5 \text{ с} = 0,225 \text{ мин.}$$

Изменяя наклон спуска или величину коэффициента трения, можно получить желаемую скорость скольже-

Рис. 10.10. Спиральный спуск



ния. Более того, благодаря действию силы трения можно подобрать такой наклон, что человек будет скользить по спуску равномерно. Этого же результата можно добиться, сделав коэффициент трения переменным по длине спуска.

Спиральные спуски являются не менее эффективным устройством (чем наклонные) для аварийной эвакуации людей из верхних этажей зданий (рис. 10.10). По сравнению с наклонным спиральный спуск занимает значительно меньше места и может быть размещен как снаружи, так и внутри здания. Спиральный спуск представляет круглую шахту диаметром 1,5—2,2 м с винтовой лентой внутри, по которой скользит человек.

Лента спирального спуска наклонена к центру шахты, что компенсирует влияние центробежной силы, возникающей при движении человека по спирали вокруг вертикальной оси шахты. В местах, где плоскость спирального спуска совпадает с уровнем пола этажей здания, в стенах шахты имеются специ-

альные люки, через которые при эвакуации люди могут попадать на ленту спуска.

Спиральные спуски более безопасны, чем наклонные, но также требуют подготовки людей, поскольку скольжение происходит с довольно большой скоростью и, кроме того, с вращением. Их пропускная способность невелика, поэтому применяются они, как правило, в промышленных зданиях с небольшим числом работающих, где требуется быстрая эвакуация людей из верхних этажей или с верхних рабочих площадок.

§ 1. Состояние вопроса и основные предпосылки

Теория движения людских потоков позволяет поставить на научную основу нормирование коммуникационных помещений. В настоящее время оно предусматривается лишь на случай вынужденной эвакуации людей из зданий при возникновении пожара, т. е. только на один вид стихийных бедствий. Вместе с тем необходимость быстрой и безопасной эвакуации людей обуславливается не только возникновением пожара или землетрясения, но и производственной аварии (грозящей тяжелыми последствиями), а также при угрозе наводнений и других бедствий. Для этих случаев действующие нормативы не дают никаких рекомендаций относительно обеспечения эвакуации людей.

Как отмечалось выше (см. Введение, § 1, 2), движение людских потоков представляет собой функциональный процесс, наблюдающийся почти во всех видах зданий. При этом для некоторых из них в обычных, нормальных условиях эксплуатации, например в сооружениях метрополитена, на вокзалах, движение людских потоков является главным функциональным процессом, которому подчинены их объемно-планировочные и конструктивные решения. Для ряда зданий движение людских потоков является сопутствующим функциональным процессом, который вместе с тем имеет огромное значение. К таким зданиям относятся, например, высшие учебные заведения и школы с кабинетной системой обучения, в которых после каждой пары или после каждого учебного часа возникают потоки учащихся, в том числе встречные, перемещающиеся в другие учебные помещения. К таким же зданиям относятся крупные магазины, в которых людской поток движется непрерывно в течение всего времени работы магазина. Серьезное значение движение людских потоков имеет для крупных спортивных сооружений при их освобождении от зрителей после спортивного состязания. Можно назвать и другие типы зданий, где нормирование коммуникационных помещений здания играет важную роль при отыскании их пра-

вильного объемно-планировочного решения. Однако к коммуникационным помещениям таких зданий в действующих строительных нормах и правилах не выдвигаются достаточно обоснованные требования для обеспечения их правильного функционирования.

По решению Госстроя СССР в последние годы были предприняты исследовательские работы по созданию научно обоснованных норм эвакуации людей из зданий. Работы проводились рядом организаций в СССР* и в зарубежных странах, объединяемых Советом Экономической Взаимопомощи (НРБ, ВНР, ГДР, ПНР и ЧССР). Также решение обосновывается тем, что нормирование коммуникационных помещений в настоящее время не имеет комплексного характера. В силу этого не исключена возможность получения неправильных проектных решений зданий, которые удовлетворяют лишь требованиям пожарной безопасности, но не отвечают другим аварийным условиям и главное не обеспечивают нормальной эксплуатации зданий и сооружений. Следовательно, можно считать, что комплексное нормирование коммуникационных помещений зданий и сооружений является задачей, которую необходимо решить в ближайшем будущем.

Поскольку комплексное нормирование пока отсутствует, рассмотрим действующие противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений (глава СНиП II-A.5-70 «Противопожарные требования. Основные положения проектирования»), которыми предписывается обеспечение безопасной эвакуации людей из зданий и сооружений на случай возникновения пожара. Изложенные в них общие положения развиваются и конкретизируются в нормах проектирования каждого вида зданий и сооружений. Сравнивая эти нормы, можно заметить, что в них условия обеспечения безопасной эвакуации людей нормируются по-разному: в одном случае по допустимой продолжительности эвакуации (по времени), а в других — по предельной протяженности путей эвакуации (по наибольшему допустимому расстоянию от места нахождения человека до эвакуационного выхода) и по их пропускной способности. В первом случае для

* Со стороны СССР принимали участие МИСИ им. В. В. Куйбышева, Высшая школа МВД СССР, ЦНИИпромзданий Госстроя СССР, ЦНИИЭП учебных зданий и ЦНИИЭП зрелищных зданий и спортивных сооружений Госгражданстроя.

определения времени эвакуации t и параметров путей движения необходимо выполнить расчет движения людского потока; в других — расчета не требуется, поскольку соответствующие цифры указаны в нормах.

Причины применения разного подхода к нормированию остаются неизвестными. Можно предположить, что второй способ нормирования также предусматривает ограничение времени эвакуации, но в скрытой форме, т. е. через длину пути. Если это так, то оба способа можно считать правомерными.

Возникает и другой вопрос: в каких случаях следует применять тот или другой способ нормирования? Ответа на него также найти не удалось. Можно предположить, что нормирование по времени (например, в театрах) принято потому, что в некоторых зданиях на относительно небольшой площади одновременно концентрируется большое число людей (например, в зрительном зале), поэтому требуется более надежное решение эвакуации, обоснованное расчетом. Однако для других зданий аналогичного назначения принято нормирование по предельной протяженности путей эвакуации и по их пропускной способности (кинотеатры, крытые спортивные сооружения и т. п.). Таким образом, нормирование коммуникационных помещений в настоящее время не имеет единого обоснованного научно-методического подхода.

В § 2 гл. 8 уже говорилось о предпосылках для нахождения $t_{\text{доп}}$. Определение этих значений представляет серьезную и важную научно-исследовательскую задачу, поскольку занижение $t_{\text{доп}}$ чревато серьезными последствиями (не обеспечиваются условия безопасности людей), а завышение вызовет необоснованные и в ряде случаев существенные дополнительные затраты при строительстве. Работы в этом направлении проводятся, и достигнуты некоторые положительные результаты. На основе экспериментальных и главным образом теоретических исследований получены значения $t_{\text{доп}}$ для некоторых видов общественных и производственных зданий с учетом их объема, степени огнестойкости, категории производства по пожарной опасности и других условий. Несомненно, что эти данные представляются более надежными, чем данные С. В. Беляева, на которых базируется нормирование времени эвакуации в театрах. В 30-е годы С. В. Беляев предложил ориентировочные

данные для иллюстрации разработанной им в то время схемы нормирования. Однако с тех пор они остаются без изменения при каждом переиздании норм и специальной литературы. Метод расчета времени и параметров путей эвакуации, рекомендованный теми же нормами (см. также § 4 гл. 1), базируется на устаревших представлениях о процессе движения людских потоков. При этом не учитывается множество факторов, в том числе такие объективные закономерности, как взаимосвязь количества движения на соседних участках пути, образование и рассасывание скоплений и многие другие, поэтому полученные результаты не соответствуют действительному ходу этого процесса. По мнению авторов, этим методом пользоваться не следует, поскольку в большинстве случаев он дает либо избыточный запас и, следовательно, неэкономичное проектное решение, или, что особенно опасно, заниженные параметры путей по сравнению с теми, которые требуются для быстрой и безопасной эвакуации людей.

Сравнение нормируемых значений предельных протяженностей путей эвакуации и их пропускной способности (не только отечественных, но и зарубежных) обстоятельно выполнено в работах [10, 21, 22].

На примере некоторых отечественных норм можно проследить их непоследовательность и, следовательно, необоснованность. Например, по СНиП II-A.5-70 ширину дверей, коридоров и проходов следует принимать из расчета не менее 100 чел. на 0,6 м ширины, т. е. 167 чел. на 1 пог. м ширины; в СНиП II-Л.15-68 норма поставлена в зависимость от огнестойкости зданий и составляет от 50 до 167 чел. на 1 пог. м ширины; для крытых спортивных сооружений — от огнестойкости и объема и колеблется в широких пределах — от 80 до 320 чел. на 1 пог. м.

Аналогичное положение имеет место и при нормировании предельной протяженности путей эвакуации в зданиях: в крытых спортивных сооружениях — 32 м; в зданиях школ в зависимости от огнестойкости — от 20 до 65 м; в производственных зданиях норма колеблется в очень широких пределах в зависимости от категории производства по пожарной опасности.

В проекте Стандарта СЭВ «Противопожарные нормы строительного проектирования зданий и сооружений. Эвакуация людей из зданий и помещений» учтены

основные предпосылки нормирования эвакуации людей из зданий¹.

Так, главным критерием для обеспечения безопасности людей из помещений и зданий является допустимое время эвакуации $t_{\text{доп}}$.

Фактическое (расчетное) время эвакуации людей из зданий и помещений t_p не должно быть больше допустимого:

$$t_p \leq t_{\text{доп}}, \quad (11.1)$$

т. е. по первому предельному условию (см. § 1 гл. 8).

Расчетное время эвакуации людей из помещений и зданий t_p устанавливается в зависимости от времени движения одного или нескольких людских потоков от наиболее удаленных мест размещения людей до эвакуационных выходов.

Одновременно при расчете t_p устанавливается требуемая ширина $\delta_i^{\text{ТР}}$ участков пути эвакуации, обеспечивающая, как правило, беспрепятственное движение людских потоков, т. е. без образования скоплений людей и задержек движения перед проемами или другими сужениями пути и перед лестницами.

Для зданий и сооружений любого назначения, где нельзя ожидать образования людских потоков с плотностью больше 0,2 (2 чел/м²), требуемые параметры участков пути эвакуации (ширина $\delta_i^{\text{ТР}}$ и предельно допустимая длина $L_{\text{пр}}$) устанавливаются в соответствии с данными таблиц, приведенных в § 3 настоящей главы и построенных на основании закономерностей движения людских потоков.

Таким образом, впервые для нормирования эвакуации людей из зданий и сооружений приняты единые предпосылки.

§ 2. Обеспечение вынужденной эвакуации людей на основе расчета времени движения

Расчетное время эвакуации t_p определяют на основании вышеизложенных теоретических положений и метода расчета с учетом установленных закономерностей процесса движения людских потоков. Однако для нормирования эвакуации людей из помещений и зданий на

¹ Здесь и далее в настоящей главе приняты обозначения в соответствии с проектом Стандарта СЭВ.

случай пожара представилось целесообразным упростить расчет, отказавшись от учета некоторых факторов, не имеющих решающего значения. Это позволило не прибегать к трудоемкому графоаналитическому методу и устанавливать время эвакуации и требуемую ширину путей движения на основе использования только основных расчетных формул. Естественно, что степень точности расчетов несколько снижается (в сторону создания некоторого запаса по времени). Например, не учитывается растекание потока, которое на путях ограниченной длины, характерных для зданий, незначительно влияет на время эвакуации (в сторону уменьшения); сокращена расчетная таблица значений D_i , v_i и q_i , а также допускается интерполяция. Для скоплений принято значение плотностей D больше 1, соответствующих минимальной интенсивности движения, что также создает известный запас пропускной способности, поскольку, как следует из § 1—6 гл. 5, такие высокие плотности хотя и достигаемы, но относительно маловероятны.

Расчетное время эвакуации t_p , мин, определяется как сумма времени t_i беспрепятственного движения людского потока по отдельным участкам пути i и времени задержек движения Δt_{i-1} , возникающих перед границами смежных участков пути, т. е.

$$t_p = \sum t_i + \sum \Delta t_{i-1}. \quad (11.2)$$

Время t_i , мин, беспрепятственного движения людского потока по участку i длиной L_i составляет

$$t_i = \frac{L_i}{v_i}, \quad (11.3)$$

где L_i — длина i -го участка эвакуационного пути, м; v_i — скорость движения людского потока по i -му участку эвакуационного пути, м/мин.

Длина L_i участков пути (коридоров, проходов, лестниц), а также коротких участков горизонтального пути к проемам, т. е. к горизонтальным участкам с длиной $L_i=0$, или к коридорам (проходам) с конечной длиной L_i , производится согласно § 1 гл. 3.

Скорость движения v_i по различным видам пути определяется по табл. 11.1 как функция плотности людского потока D_i . Иначе говоря, в отличие от существующего метода, скорость не имеет постоянных значений, а меняется в зависимости от плотности, что отвечает действительному ходу процесса.

Табл. 11.1 представляет собой сокращенный вариант прил. I. Градация по плотности принята через 0,1 (вместо 0,01), значения v и q даны только до плотности, соответствующей $q_{\text{макс}}$, поскольку плотности за этим пределом, согласно § 3 гл. 5, соответствуют условиям образования скоплений и задержки движения при разных условиях движения (нормальное, комфортное и пр.). Для расчета при образовании скоплений принято, как сказано выше, минимальное значение q при возможной максимальной плотности.

Таблица 11.1. Параметры движения людских потоков

$D, \text{ м}^2/\text{м}^2$	Горизонтальный путь →		Проем (дверь, сужение) □	Лестница вниз ↓		Лестница вверх ↑	
	$v, \text{ м/мин}$	$q, \text{ м/мин}$	$q, \text{ м/мин}$	$v, \text{ м/мин}$	$q, \text{ м/мин}$	$v, \text{ м/мин}$	$q, \text{ м/мин}$
0,01	80	0,8	0,95	60	0,6	55	0,55
0,05	70	3,5	4,20	56	2,8	50	2,55
0,10	57	5,7	7	51	5,1	42	4,20
0,20	40	8	10,20	40	8	28	5,60
0,30	30	9	11,70	30	9	21	6,30
0,40	25	10	12,40	—	—	18	7,20
0,50	22	11	13	—	—	17	8,50
0,60	20	12	13,20	—	—	15,5	9,30
0,70	18	12,6	13,30	—	—	—	—
Скопление	10,5	9,7	8,7	6	5,5	8,3	7,6

Значения скоростей v и интенсивностей движения q в пределах плотностей от 0,01 до D при $q_{\text{макс}}$ приняты для условий аварийного движения (см. прил. I, графы 4 и 5), т. е. средние между значениями для нормального движения и максимальными наблюдаемыми в натуре. Таким образом, при расчете обеспечивается некоторый запас при определении t_i .

Плотность людского потока на первом (начальном) участке эвакуационного пути D_1 находят по формуле

$$D_1 = \frac{N}{\delta_1 L_1} \text{ м}^2/\text{м}^2, \quad (11.4)$$

где N — количество людей в потоке, м^2 ; N определяется умножением числа людей на f — площадь горизонтальной проекции человека: 0,125 м^2 — взрослый в зимней одежде; 0,113 м^2 — в демисезонной; 0,10 м^2 — в летней; 0,07 м^2 — подросток (подробно см. табл. 3.1);

δ_1 и L_1 — соответственно ширина и длина начального участка пути, занимаемого потоком в месте его формирования.

Плотность людского потока на всех участках после первого устанавливается в табл. 11.1 по соответствующему значению интенсивности движения людского потока q_i . На рассматриваемом участке q_i , м/мин, и определяется по формуле

$$q_i = \frac{q_{i-1} \delta_{i-1}}{\delta_i}, \quad (11.5)$$

где δ_{i-1} и δ_i — ширина предшествующего и рассматриваемого участков пути, м; q_{i-1} — интенсивность движения людского потока по предшествующему участку пути.

Интенсивность движения людского потока на первом (начальном) участке пути q_1 определяется из табл. 11.1 по найденному по формуле (11.4) значению D_1 .

Места образования скопления и задержек движения людей устанавливаются в процессе последовательного расчета по формуле (11.5). В этом случае найденное значение q_i оказывается больше $q_{\text{макс}}$ (при аварийном движении) для соответствующего вида пути, т. е. $q_i > q_{\text{макс}}$, и на участке $i-1$ перед границей рассматриваемого участка образуются скопление людей и задержка движения; в этом случае для обеспечения беспрепятственного движения требуется увеличение ширины данного участка пути.

Расчетные значения $q_{\text{макс}}$ приведены ниже и в прил. I.

Если установленное по формуле (11.5) значение $q_i < q_{\text{макс}}$, то принятая в проекте ширина участка или проема удовлетворяет условиям беспрепятственного движения.

Максимальная интенсивность движения

Вид пути	$q_{\text{макс}}$, м/мин
Горизонтальный	12,40
Проем (дверь, сужение)	14,30
Лестница-вниз	9
Лестница-вверх	9,20

Требуемая ширина участка пути $\delta_{i\text{гр}}$, м, для обеспечения беспрепятственного движения, т. е. для ликвидации скоплений и задержек движения людского потока, определяется по формуле

$$\delta_i^{\text{гп}} = \frac{q_{i-1} \delta_{i-1}}{q_{\text{макс}}} . \quad (11.6)$$

Образование скоплений людей при эвакуации их из помещений и зданий допускается, если ширина путей эвакуации обеспечивает продолжительность движения в пределах предусмотренного времени эвакуации. Нормирование путей эвакуации только с учетом обеспечения беспрепятственного и комфортного движения существенно повышает безопасность людей, но должно быть увязано с другими факторами, определяющими планировочное решение зданий и сооружений.

В детских дошкольных учреждениях, общеобразовательных школах, средних специальных учебных заведениях, в лечебных и лечебно-профилактических учреждениях и детских специализированных театрах в обязательном порядке должно обеспечиваться беспрепятственное движение людских потоков. Это объясняется тем, что в период вынужденной эвакуации трудно рассчитывать на организованное поведение указанных контингентов.

В случае когда допускается скопление людей, время движения по i -му участку составит, мин:

$$t_i = \frac{L_i}{v_i} + N \left(\frac{1}{q_{\text{ск}} \delta_{i+1}} - \frac{1}{q_i \delta_i} \right), \quad (11.7)$$

где $\frac{L_i}{v_i}$ — продолжительность движения по участку i при беспрепятственном движении (в мин), определяемое по формуле (11.3); $q_{\text{ск}}$ — интенсивность движения при скоплении (в м/мин), принимаемая в соответствии со значениями интенсивности движения, приведенными выше, или по прил. I; δ_{i+1} — ширина последующего участка пути (в м), перед границей которого образуется скопление.

Второй член суммы в уравнении (11.7) представляет время, затрачиваемое на задержку движения (образование и рассасывание скопления).

Ниже приведены значения интенсивности движения при скоплении перед проемами, принятые с учетом «эффекта ложного проема», хотя, как сказано в § 4 гл. 5, количественные показатели нуждаются в уточнении. Учет указанных ниже значений $q_{\text{ск}}$ обеспечивает создание запаса, что можно считать целесообразным до накопления опытных и новых исследовательских данных.

При слиянии в процессе эвакуации двух или более людских потоков, расчет времени движения по участ-

Интенсивность движения при образовании скоплений

Вид пути	$q_{ск}$, м/мин
Горизонтальный	8,50
Проем (дверь, сужение) при, м:	
$\delta = 1,60$	} 8,50
$\delta = 1,40$	
$\delta = 1,20$	
$\delta = 1$	} 6
$\delta = 0,80$	
Лестница-вниз	
Лестница-вверх	7,60

кам, начиная от места слияния и далее по ходу движения, следует производить, как правило, с учетом общего количества людей сливающихся потоков. При этом вместо (11.5), (11.6) и (11.7) следует соответственно пользоваться формулами:

$$q_i = \frac{\sum q_{i-1} \delta_{i-1}}{\delta_i}; \quad (11.5a)$$

$$\delta_i^{TP} = \frac{\sum q_{i-1} \delta_{i-1}}{q_{макс}}; \quad (11.6a)$$

$$t_i = \frac{L_i}{v_i} + \sum N \left(\frac{1}{q_{ск} \delta_{i+1}} - \frac{1}{q_i \delta_i} \right), \quad (11.7a)$$

где v_i — скорость объединенного потока, м/мин; q_i — интенсивность движения, установленная по формуле (11.5a).

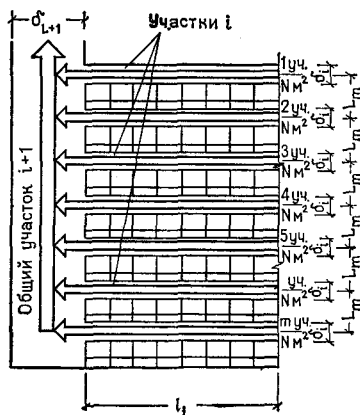


Рис. 11.1. Схема движения людских потоков, выходящих с участков i на общий участок $i+1$

Если одинаковые людские потоки выходят из участков i на один общий $i+1$, где происходит их слияние в один поток (рис. 11.1), то время движения людей (в мин) по участкам как i , так и $i+1$ может быть определено по приближенной формуле

$$t = \frac{N m}{q_{i+1} \delta_{i+1}} + \frac{L_m D_{i+1}}{q_{i+1}} \frac{(k+1)(2k+1)}{6}, \quad (11.8)$$

где N — количество людей в одном потоке, m^2 ; m — число одинаковых людских потоков, равное числу участков i ; L_m — расстояние между участками i по длине участка $i+1$, м; q_{i+1} — согласно (11.5), интенсивность движения на участке $i+1$ одного потока с участка i , м/мин; D_{i+1} — значение плотности потока, соответствующее q_{i+1}

и определяемое по табл. 11.1; k — целая часть от деления $\frac{q_{i+1}}{q_{i+1}}$.

Значение q_{i+1} принимается:

1) $q_{i+1} = \frac{q_i \delta_i m}{\delta_{i+1}}$, если оно меньше q_{\max} ;

2) $q_{i+1} = q_{\text{ск}}$, если оно больше q_{\max} , а плотность

$$D = \frac{q_i \delta_i}{\delta_{i+1} L_m} t_i > D_{\text{ск}}$$

(в этом случае на участке $i+1$ образуется скопление, и на границах участков i и $i+1$ происходит задержка движения);

3) $q_{i+1} = q_{\text{ск}}$, если оно больше q_{\max} , а плотность меньше плотности при скоплении.

Формула (11.8) согласуется с выражением (4.2); введены новые обозначения в соответствии с проектом Стандарта СЭВ. Расчет по (11.7) возможен: в зрительных залах (i — проходы в рядах мест для зрителей; $i+1$ — поперечный проход); в производственных помещениях (i — проходы в рядах между оборудованием; $i+1$ — магистральный поперечный проход); в зданиях коридорной системы (i — выходы из помещений; $i+1$ — коридор); в лестничных клетках (i — выходы с этажей; $i+1$ — лестницы). Ниже приводится пример расчета t_p .

§ 3. Обеспечение вынужденной эвакуации людей на основе нормирования их предельного удаления от выходов и пропускной способности путей эвакуации

Как указано выше, обеспечение вынужденной эвакуации людей из зданий на основе нормирования предельного удаления их от выходов и пропускной способности путей эвакуации целесообразно для зданий, в помещениях которых нельзя ожидать высоких плотностей. К ним относятся административные, некоторые учебные здания, но главным образом производственные. Напри-

мер, в цехах заводов машиностроительной промышленности число людей составляет от 0,015 до 0,1 чел/м², т. е. на одного человека приходится соответственно от 70 до 10 м². При этом потоки с высокими плотностями, как правило, не образуются.

При нормировании предельного удаления $L_{пр}$ и пропускной способности $\delta^{гп}$ путей эвакуации следует исходить из следующих предпосылок:

$L_{пр}$ и $\delta^{гп}$ являются функциями допустимого времени эвакуации $t_{доп}$, т. е. основного критерия безопасности людей;

конкретные значения $L_{пр}$ и $\delta^{гп}$ должны быть основаны на действительных объективных научных закономерностях процесса движения людского потока.

При нормировании по предельному удалению и по пропускной способности путей эвакуации, например для производственных зданий, могут быть выделены два типичных случая:

1) помещения с боковыми проходами между рядами оборудования и со сборным центральным, ведущим к эвакуационному выходу (рис. 11.2);

2) помещения со случайным расположением оборудования, не имеющие достаточно четких путей эвакуации (рис. 11.3).

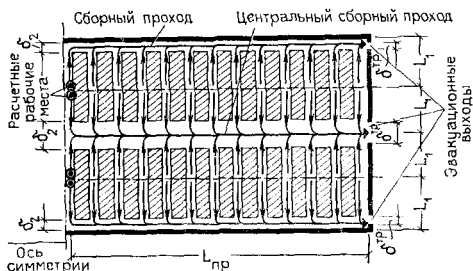
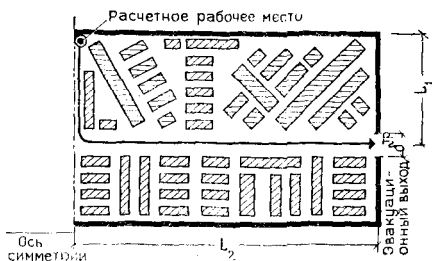


Рис. 11.2. Помещение с расположением оборудования рядами

Рис. 11.3. Помещение со свободным расположением оборудования



В первом случае до начала эвакуации все люди находятся в боковых проходах; во втором — на всей площади помещения.

Для определения $L_{\text{пр}}$ в первом случае используется формула

$$L_{\text{пр}} = \left(t_{\text{доп}} - \frac{L_1}{v_1} \right) v_2, \quad (11.9)$$

где $L_{\text{пр}}$ — предельно допустимая длина сборного прохода от последнего ряда оборудования до эвакуационного выхода, м; $t_{\text{доп}}$ — предельно допустимое время продолжительности эвакуации, мин; L_1 — фактическая длина бокового прохода, считая от оси сборного прохода до расчетного рабочего места. Если сборный проход принимает людские потоки из двух противоположных боковых проходов, то L_1 принимается как сумма длин двух проходов (применительно к рис. 11.2 для центрального прохода — $2L_1$); v_1 — скорость движения людского потока в боковом проходе (в м/мин), соответствующая фактической плотности D_1 потока в боковом проходе, чел/м²; v_2 — скорость движения людского потока в сборном проходе, м/мин, соответствующая фактической плотности D_2 потока в сборном проходе.

В выражении (11.9) член $\frac{L_1}{v_1}$ представляет поправку к $t_{\text{доп}}$, т. е. время, требующееся на движение по боковому проходу. Значения D_1 и D_2 , чел/м², вычисляются по следующим элементарным формулам:

$$D_1 = \frac{N}{F_1}; \quad (11.10)$$

$$D_2 = \frac{N}{F_2}, \quad (11.11)$$

где N — число людей в помещении; F_1 — суммарная площадь боковых проходов, м²; F_2 — суммарная площадь сборных проходов, м². В данном случае размерность плотности принята в чел/м², поскольку участники движения одинаковы как по физическим данным, так и по одежде.

Определение поправки к $t_{\text{доп}}$, т. е. значения $\frac{L_1}{v_1}$, производится по табл. 11.2.

Определение $L_{\text{пр}}$ для случаев с рядовым расположением оборудования производится по табл. 11.3.

Ширина эвакуационного выхода $\delta^{\text{гр}}$ для первого случая при рядовом расположении оборудования для беспрепятственного движения определяется по формуле

$$\delta^{\text{гр}} = \frac{q_2}{q_{\text{макс}}} \delta_2, \quad (11.12)$$

где q_2 — интенсивность движения людского потока в сборном проходе, чел·м/мин; $q_{\text{макс}}$ — максимальная интенсивность движения

Таблица 11.2. Значения поправки к $t_{доп}$ $\left(\frac{L_1}{v_1}, \text{ мин}\right)$

Длина бокового прохода между оборудованием L_1 , м	Плотность размещения людей в проходе между оборудованием D_1 , чел/м ²				
	до 0,10	0,50	1	2	3
До:					
6	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
12	0,15	0,20	0,20	0,30	0,40
18	0,20	0,25	0,30	0,45	0,60
24	0,30	0,35	0,40	0,60	0,80
30	0,40	0,45	0,55	0,75	1
36	0,45	0,50	0,65	0,90	1,20

Таблица 11.3. Предельная длина сборных проходов $L_{пр}$ и удаление рабочих мест от эвакуационных выходов

$t_{доп} - \frac{L_1}{v_1}$ или $t_{доп}$	Плотность людского потока в сборном проходе D_2 , чел/м ² , или в помещении при свободном размещении оборудования				
	до 0,10	0,50	1	2	3
0,25	20	15	15	10	5
0,50	40	35	30	20	15
0,75	60	50	45	30	20
1,00	80	70	60	40	30
1,25	100	90	70	50	40
1,50	120	100	90	60	45
1,75	140	120	100	70	50
2	160	140	115	80	60
2,50	200	180	140	100	75
3	250	210	170	120	90

Примечание. В табл. 11.2 и 11.3 значения $\frac{L_1}{v_1}$ и $L_{пр}$ даны округленно, а промежуточные можно определить по интерполяции.

людского потока через эвакуационный выход, чел·м/мин; δ_2 — ширина сборного прохода, м.

На основании выражения (11.12) составлена табл. 11.4, в которой приведены значения $\delta_{пр}$. Для определения $\delta_{пр}$ следует воспользоваться ранее вычисленным значением D_2 и известной из проекта величиной δ_2 .

Предельное удаление для второго случая, т. е. при свободном размещении оборудования в помещении (см. рис. 11.3), складывается из расстояния от крайнего ра-

Таблица 11.4. Требуемая ширина эвакуационного выхода $\delta_{\text{ТР}}$, м, из сборного прохода производственных помещений с размещением оборудования рядами

Ширина сборного прохода δ_2 , м	Плотность людского потока в сборном проходе D_2 , чел/м ²		
	до 1	2	3
1	0,80	0,80	0,80
1,20	0,80	0,80	0,90
1,40	0,80	0,90	1
1,60	0,80	1	1,10
1,80	0,80	1,10	1,20
2	0,90	1,20	1,35
2,20	1	1,30	1,50
2,40	1	1,45	1,60

Примечание. При промежуточных значениях δ_2 и D_2 величина $\delta_{\text{ТР}}$ определяется по интерполяции.

бочего места до продольной оси помещения, проведенной через центр эвакуационного выхода, L_1 и длины помещения L_2 , т. е.

$$L_{\text{пр}} = L_1 + L_2. \quad (11.13)$$

Выразив предельное удаление людей (в м) через предельное время продолжительности их эвакуации $t_{\text{доп}}$, получим

$$L_{\text{пр}} = t_{\text{доп}} v, \quad (11.14)$$

где v — скорость движения людей, м/мин, соответствующая средней плотности их D в помещении, чел/м².

Вычислив среднюю плотность по формуле

$$D = \frac{N}{F_0}, \quad (11.15)$$

где F_0 — площадь помещения, не занятая оборудованием, м²; по табл. 11.2 можно определить значение $L_{\text{пр}}$, отвечающее установленному $t_{\text{доп}}$ и найденному значению D .

Если по тем или иным причинам определить по проекту значение F_0 трудно, можно для ориентировочного результата принять F_0 равным 0,2 общей площади помещения.

Нормируемую ширину эвакуационного выхода (в м) для второго случая (при свободном размещении оборудования) можно найти по формуле

$$\delta_{\text{ТР}} = \frac{N}{t_{\text{доп}} q_{\text{ск}}}, \quad (11.16)$$

где $q_{ск}$ — интенсивность движения людского потока, чел·м/мин, соответствующая принимаемой плотности при скоплении $D_{ск}$; последняя может быть принята равной 9,2 чел/м², или, с обеспечением запаса, по физическому пределу плотности 11,5 чел/м².

В данном случае принята максимальная плотность, так как при случайном размещении людей в помещении нельзя исключить возможности скопления людей перед эвакуационным выходом.

На основании выражения (11.16) составлена табл. 11.5, в которой приведены значения $\delta^{тр}$ в зависимости от числа людей в помещении и установленной продолжительности эвакуации.

Таблица 11.5. Требуемая суммарная ширина эвакуационных выходов $\delta^{тр}$ из производственных помещений при свободном размещении оборудования

$t_{доп}$	Число людей в помещении (расчетное) N										
	до 10	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
а) При $D_{ск} = 9,2$ чел/м ²											
0,25	0,8	3,8	7,6	11,4	15,2	19,0	22,8	26,6	30,4	34,2	38
0,50	0,8	1,9	3,8	5,7	7,6	9,5	11,4	13,3	15,2	17,1	19
0,75	0,8	1,25	2,5	3,8	5,0	6,3	7,6	8,8	10,1	11,3	12,6
1,00	0,8	0,95	1,9	2,85	3,8	4,75	5,7	6,65	7,0	8,6	9,5
1,25	0,8	0,8	1,5	2,3	3,05	3,8	4,6	5,3	6,1	6,85	7,6
1,50	0,8	0,8	1,3	1,9	2,55	3,2	3,8	4,45	5,1	5,7	6,35
1,75	0,8	0,8	1,1	1,6	2,20	2,7	3,25	3,80	4,35	4,9	5,45
2,00	0,8	0,8	0,95	1,45	1,90	2,4	2,85	3,35	3,80	4,3	4,75
2,50	0,8	0,8	0,8	1,15	1,50	1,9	2,3	2,7	3,05	3,45	3,8
3,00	0,8	0,8	0,8	0,95	1,30	1,6	1,9	2,25	2,55	2,85	3,2
б) При $D_{ск} = D_{ф.п} = 11,5$ чел/м ²											
0,25	0,6	7,3	14,5	21,8	29,1	36,4	43,6	50,9	58,2	65,4	72,7
0,50	0,6	3,7	7,3	10,9	14,6	18,2	21,8	25,5	29,1	32,7	36,4
0,75	0,6	2,4	4,8	7,3	9,7	12,1	14,6	16,9	19,4	21,6	24,2
1,00	0,6	1,8	3,6	5,4	7,3	9,1	10,9	12,7	14,6	16,4	18,2
1,25	0,6	1,5	2,9	4,4	5,8	7,3	8,7	10,2	11,6	13,1	14,5
1,50	0,6	1,2	2,4	3,6	4,8	6,1	7,3	8,5	9,7	10,9	12,1
1,75	0,6	1,0	2,1	3,1	4,2	5,2	6,2	7,3	8,4	9,4	10,4
2,00	0,6	0,9	1,8	2,7	3,6	4,6	5,5	6,4	7,3	8,2	9,1
2,50	0,6	0,8	1,5	2,2	2,9	3,5	4,4	5,1	5,8	6,6	7,3
3,00	0,6	0,8	1,2	1,8	2,4	3,0	3,6	4,2	4,8	5,4	6,0

Примечание. При промежуточных значениях N и $t_{доп}$ величина $\delta^{тр}$ определяется интерполяцией.

Сравнивая данные обеих частей таблицы, можно заметить, что при расчете на $D_{ск} = D_{ф.п}$ требуемая ширина

эвакуационных выходов возрастает почти вдвое. Однако следует подчеркнуть, что при $D_{ск} = D_{ф.п}$ образуется запас, обусловливаемый относительно малой вероятностью сосредоточения всех людей, находящихся в помещении, около эвакуационного выхода (к моменту начала эвакуации) и образования предельной плотности в скоплении, поэтому, принимая $\delta^{тР}$ по табл. 11.5, следует серьезно обосновывать такое решение во избежание излишних затрат при строительстве.

Глава 12

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ

По назначению общественные здания очень разнообразны, поэтому рассмотреть их достаточно подробно даже только с точки зрения организации движения людей в объеме настоящей книги не представляется возможным. К тому же такое рассмотрение вряд ли необходимо, поскольку принципы и методы расчета движения людских потоков, а также нормирования во всех случаях остаются одинаковыми. Однако при постановке задач и их решении есть некоторые особенности, которые освещаются в настоящей главе.

§ 1. Учебные здания

В учебных зданиях (школы, средние специальные и другие учебные заведения) основным функциональным процессом являются учебные занятия, происходящие в классах, аудиториях, в лабораториях и других специальных учебных помещениях. Структурно учебные здания относятся к типу зданий коридорной системы. Учебные помещения, как правило, выходят в коридоры, служащие одновременно рекреационными помещениями, которые связаны с лестницами и входными узлами.

В настоящее время в средних общеобразовательных школах введена так называемая кабинетная система обучения, при которой учащиеся I—IV классов занимаются в закрепленных учебных помещениях, а V—X классов — в специализированных учебных кабинетах и лабораториях. Это позволило строить объемно-планировочную структуру школьного здания на основе обособленных

учебных секций для учащихся младшего, среднего и старшего возраста, для группы общешкольных помещений и др. Такая дифференциация функциональной структуры позволяет более четко организовать движение потоков школьников и учесть его специфику.

В последние годы, с учетом повышения требований к обеспечению безопасности детей и подростков при вынужденной эвакуации, а также в целях установления особенностей движения людских потоков, состоящих из детей и подростков, были проведены специальные экспериментальные и теоретические исследования в школьных зданиях, позволившие получить ряд полезных для проектирования рекомендаций.

Установлены некоторые данные, характеризующие людские потоки в школьных зданиях (табл. 12.1). Движение людских потоков в школьных зданиях связано с заполнением их перед началом занятий, освобождением и заполнением учебных помещений во время перемен и движением в рекреационных помещениях в перерывах, выходом на пришкольный участок, проведением общешкольных мероприятий, освобождением здания после окончания занятий и, наконец, с аварийной эвакуацией. Таким образом, движение людских потоков в школьных зданиях представляет важный элемент функционального процесса не только в аварийных условиях, но главным образом в условиях нормальной эксплуатации.

Таблица 12.1. Некоторые данные людских потоков в школах

Показатели	Возрастные группы		
	младшая (I—III клас- сы)	средняя (IV—VII классы)	старшая (VIII—X классы)
Площадь горизонтальной проекции учащегося в домашней одежде f , м ²	0,04	0,06	0,08
То же, со школьной сумкой, м ²	0,07	0,10	0,14
То же, в уличной зимней одежде со школьной сумкой, м ²	0,09	0,13	0,16
Коэффициент η , характеризующий физические данные состава потока (см. § 4 гл. 3)	1,25	1,29	1,19

Движение школьников при заполнении здания происходит спокойно с увеличением величины людского потока к моменту начала занятий в течение относительно продолжительного времени (от 30 до 60 мин). За 30 мин до начала занятий приходит $\sim 10\%$; за следующие 10 мин — 85% и за 5 мин до начала занятий — 5% учащихся. Этот вид движения можно отнести к длительно-поточному с переменным составом потока. Он представляет интерес для решения входного узла. Следует учитывать величину f для зимних условий со школьной сумкой. Площадь гардероба выбирается с учетом не только размещения уличной зимней одежды, но и передвижения школьников, которые при самообслуживании должны повесить или взять одежду. Коммуникационная зона вестибюля должна обеспечивать свободное движение ($D_{пр} = 0,05$), так как школьники двигаются в различных случайных направлениях.

Движение при освобождении классов и учебных кабинетов во время перемен носит кратковременный поточный характер. Его целесообразно иметь в виду при определении ширины проходов в учебных помещениях и ширины входов из них в смежные помещения. При расчете проходов в учебных помещениях, предназначенных для младшей возрастной группы, с учетом подвижности школьников и возникающего неорганизованного характера движения, целесообразно принимать $D_{доп} = 0,15$ (свободное поточное движение) при $f = 0,04 \text{ м}^2$; в учебных помещениях средней — старшей возрастной группы, учитывая необходимость обеспечения движения без контактных помех, можно рекомендовать для расчета $D_{доп} = 0,4$ при $f = 0,14 \text{ м}^2$ (со школьными сумками), имея в виду переход учащихся в другой кабинет или лабораторию.

Ширину дверного проема (выхода) целесообразно определять исходя из условия беспрепятственного движения, принимая интенсивность движения для младшей возрастной группы при $D = 0,32$ (максимальная плотность, наблюдавшаяся в натуре); для старшей — $D = 0,70$.

Движение в рекреационных помещениях зависит от возрастных особенностей школьников и системы обучения. Так, для школьников младшего возраста характерен подвижный отдых, поэтому движение носит беспорядочный характер. Площадь рекреационного по-

мещения должна обеспечивать условия для свободного движения ($D_{\text{доп}}=0,05$, т. е. при площади $0,8 \text{ м}^2$ на одного учащегося). Однако минимальная ширина прохода (местного сужения) в коммуникационной зоне рекреационного помещения может устанавливаться при $D_{\text{доп}}=0,15$.

При расположении нескольких учебных помещений по пути движения с одной стороны прохода коммуникационной зоны расчет ширины проходов (в м) следует производить на величину потока, составленного только из двух классов, т. е.

$$\delta_{\text{гр}} = \frac{2 N_{\text{к}}}{q \eta t_{\text{к}}}, \quad (12.1)$$

где $N_{\text{к}}$ — вместимость одного класса, м^2 ; q — интенсивность движения при $D_{\text{доп}}=0,15$, определяемая по прил. I для нормальных условий, $\text{м}/\text{мин}$; $t_{\text{к}}$ — время выхода учащихся из учебного помещения, мин ; η — коэффициент условий движения, учитывающий состав потока.

Если в проход выходит только одно учебное помещение, то вместо $2N$ в формуле (12.1) принимается N .

Переход школьников среднего и старшего возрастов из одного учебного помещения в другое при кабинетной системе обучения сопровождается образованием встречных людских потоков. В связи с этим ширина прохода коммуникационной зоны (в м), обеспечивающая беспрепятственное встречное движение, определяется по формуле

$$\delta_{\text{гр}} = \frac{4 N_{\text{к}} \cdot 1,15}{q \eta t_{\text{к}}}, \quad (12.2)$$

где q — интенсивность движения при $D_{\text{доп}}=0,40 \text{ м}/\text{мин}$ (прил. I, нормальные условия); $\eta=1,15$ — коэффициент, учитывающий встречное движение.

Движение школьников среднего возраста в рекреационных помещениях во время отдыха, так же как и младшей возрастной группы, имеет беспорядочный характер, поэтому $D_{\text{доп}}$ следует принимать равным $0,05$ при $f=0,06 \text{ м}^2$, т. е. площадь на одного учащегося составит $1,2 \text{ м}^2$.

Движение школьников старшего возраста во время отдыха в рекреационных помещениях имеет малоподвижный характер, поэтому можно принять $D_{\text{доп}}=0,15$.

Если рекреационные помещения предназначены для средней и старшей возрастных групп, то при определении их площади следует учитывать число учащихся

каждого возраста, принимая соответствующие значения $D_{\text{доп}}$.

Движение учащихся при выходе на пришкольный участок и возвращении (во время перемен) имеет кратковременный поточный характер.

Время выхода учащихся младшей возрастной группы на пришкольный участок (в мин) может быть определено по формуле

$$t_{y_m} = t_k + \frac{L_c}{v \eta} + \frac{3H}{v_d \eta} + \frac{L_b}{v \eta} + t_0, \quad (12.3)$$

где L_c и L_b — соответственно длина пути от наиболее удаленного дверного проема учебного помещения до лестничной клетки и длина пути от лестничной клетки до наружного дверного проема; v и v_d — соответственно скорости движения по горизонтальному пути и по лестнице при $D_{\text{доп}} = 0,15$ (по прил. I, нормальные условия); H — высота этажа, м; если время определяется для третьего этажа, принимается $6H$; для первого этажа $H = 0$; t_0 — время, затрачиваемое на одевание (раздевание), мин.

Время выхода на пришкольный участок учащихся среднего и старшего возрастов, мин:

$$t_{y_o} = t_c + \frac{L_c}{v \eta} + \frac{3H}{v_d \eta} + \frac{L_b}{v \eta} + t_0, \quad (12.4)$$

где v и v_d — принимаются при $D_{\text{доп}} = 0,40$; t_c — время перехода учащихся из одного учебного помещения в другое в пределах учебной секции (в мин) с обеспечением беспрепятственного встречного движения:

$$t_c = 2 t_k + \frac{L}{v \eta}, \quad (12.5a)$$

где L — расстояние между дверными проемами наиболее удаленных учебных помещений, м.

Если переход учащихся осуществляется в пределах смежных этажей, то t_c , мин, составит:

$$t_c = 2 t_k + \frac{2 L_c}{v \eta} + \frac{3 H}{v_d \eta} + \tau, \quad (12.5b)$$

где τ — время задержки у дверного проема лестничной клетки при выходе из учебной секции, мин; v_d — скорость движения по лестнице вверх или вниз при $D_{\text{доп}} = 0,4$.

Для оценки возможности использования пришкольного участка время выхода на участок и входа в здание ориентировочно можно принять равным.

Для обеспечения удобств при надевании уличной одежды целесообразно площадь зоны одевания и вестибюля предусматривать из расчета $0,5 \text{ м}^2$ на одного

учащегося при свободном доступе к вешалкам в открытом гардеробе.

Движение школьников, связанное с освобождением здания после окончания учебных занятий и проведением общешкольных мероприятий, не является определяющим в объемно-планировочном решении школьного здания.

С учетом организации движения людских потоков в нормальных условиях это решение должно быть проверено расчетом движения в аварийных условиях по методике, приведенной в § 3 гл. 8. Однако при этом должны быть рассмотрены два случая:

эвакуация из здания при одновременном проведении занятий во всех учебных помещениях. В этом случае можно считать, что в актовом и гимнастических залах и помещениях для занятий продленного дня находятся по 40 учащихся;

автономная эвакуация из группы общешкольных помещений и помещений для организации продленного дня при их проектном заполнении.

В первом случае при определении времени эвакуации из учебного помещения следует исходить из условия обеспечения беспрепятственного движения с момента его начала до выхода из помещения, считая, что 50% учащихся будут эвакуироваться со школьными сумками. При этом расчетные значения площади горизонтальной проекции школьника f следует принимать для групп: младшей — 0,055 м²; средней и старшей — 0,11 м², а интенсивность движения q в проеме для младшей, возрастной группы — при $D_{\text{доп}}=0,32$, а старшей — при $D_{\text{доп}}=0,62$.

Поясним сказанное на примере.

Пример. Определить параметры и время движения учащихся старшего возраста из учебного кабинета в аварийных условиях. Наполняемость класса — 40 учеников (рис. 12.1).

Решение. Принимаем $f=0,11$ м²; наполнение кабинета 40 чел., или $N=4,4$ м²; $\eta=1,19$. Участками формирования потоков являются проходы 1, 2, 3 и 4 между рядами столов.

В момент начала движения учащиеся одновременно выходят в проходы. Тогда начальные параметры движения:

в проходе 1:

$$D_1 = \frac{7f}{\delta_1 L_1} = \frac{7 \cdot 0,11}{0,5 \cdot 6,7} = 0,23;$$

$$v_1 = v \eta = 36,22 \cdot 1,19 = 43,10 \text{ м/мин};$$

$$q_1 = q \eta = 8,33 \cdot 1,19 = 9,91 \text{ м/мин},$$

где v и q — соответственно скорость и интенсивность движения людского потока при плотности D_1 , определяемые по прил. I для аварийных условий;

$$Q_1 = q_1 \delta_1 = 9,92 \cdot 0,5 = 4,96 \text{ м}^2/\text{мин};$$

в проходе 2:

$$D_2 = \frac{13 f}{\delta_2 L_2} = \frac{13 \cdot 0,11}{0,6 \cdot 6,7} = 0,36;$$

по прил. I установим скорость и интенсивность движения и с учетом $\eta = 1,19$ получим:

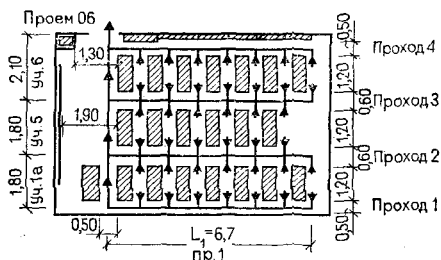


Рис. 12.1. Схема эвакуации учащихся из учебного кабинета

$$v_2 = v \eta = 31,2 \text{ м}^2/\text{мин}; \quad q_2 = q \eta = 11,23 \text{ м}/\text{мин}; \quad Q_2 = 6,74 \text{ м}^2/\text{мин};$$

в проходе 3 аналогично проходу 2:

$$v_3 = 31,2 \text{ м}/\text{мин}; \quad q_3 = 11,23 \text{ м}/\text{мин}; \quad Q_3 = 6,74 \text{ м}^2/\text{мин};$$

в проходе 4 аналогично проходу 1:

$$v_4 = 43,10 \text{ м}/\text{мин}; \quad q_4 = 9,91 \text{ м}/\text{мин}; \quad Q_4 = 4,96 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

Построим на графике (рис. 12.2) линии движения в проходах 1—4 замыкающих частей потоков до мест слияния, т. е. до выходов на участки 1а, 5, 6 и к проему 06 (пунктирные линии с указанием численных значений v в проходах).

Рассмотрим движение потоков из проходов на указанных участках.

Участок 1а:

$$\delta_{1a} = \delta_1 = 0,5, \text{ то } D_{1a} = 0,23; \quad v_{1a} = 43,10 \text{ м}/\text{мин};$$

$$q_{1a} = 9,91 \text{ м}/\text{мин}; \quad Q_{1a} = 4,96 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

Наносим на график полученное значение v_{1a} (сплошные линии).

Участок 5. Произойдет слияние потоков из проходов 1 и 2. Сначала на участок 5 выйдет головная часть потока из прохода 2 и приобретет параметры:

$$q_{5_1} = \frac{Q_2}{\delta_5 \eta} = \frac{6,74}{1,9 \cdot 1,9} = 2,98 \text{ м}/\text{мин};$$

по прил. I (аварийное движение) находим:

$$D_{5_1} = 0,04; \quad v_{5_1} = v \eta = 86,05 \text{ м}/\text{мин}; \quad Q_{5_1} = 6,54 \cong 6,74 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

Расхождение значений Q_{5_1} и Q_2 обусловлено округлением при определении D_{5_1} и v_{5_1} .

Слияние произойдет в момент, когда головная часть потока из прохода 1 пройдет участок 1а и достигнет участка 5 (точка А) Параметры объединенного потока:

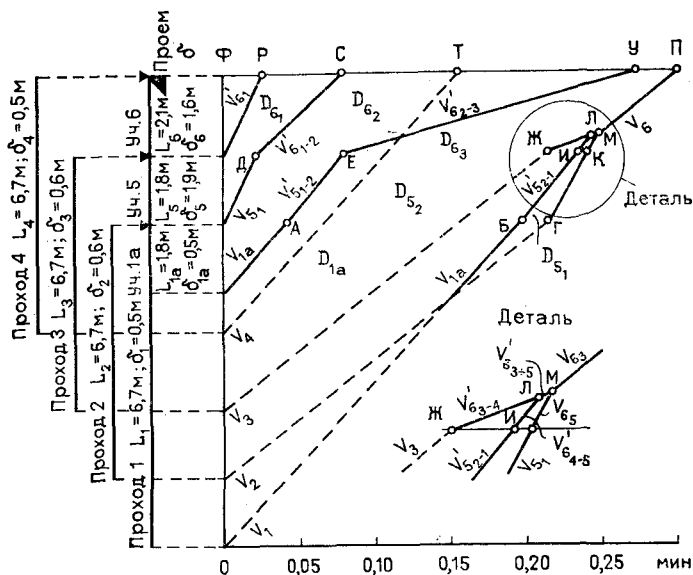


Рис. 12.2. Расчетный график эвакуации учащихся из учебного кабинета

$$q_{5_2} = \frac{Q_{1a} + Q_2}{\delta_5 \eta} = \frac{4,96 + 6,74}{1,9 \cdot 1,9} = 5,17 \text{ м/мин};$$

$$D_{5_2} = 0,085; v_{5_2} = v \eta = 72,04 \text{ м/мин}; Q_{5_2} = 11,63 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

Слияние потоков одновременно сопровождается их переформированием со скоростью

$$v'_{5_1-2} = \frac{q_{5_2} - q_{5_1}}{D_{5_2} - D_{5_1}} = \frac{5,17 - 2,98}{0,085 - 0,04} = 48,67 \text{ м/мин}.$$

При достижении замыкающей частью потока из прохода 1 участка 5 (точка Б) закончится слияние ее с потоком из прохода 2, замыкающая часть которого выйдет на участок 5 позже (точка Г). Следовательно, замыкающая часть объединенного потока (между точками Б—Г) имеет те же параметры, что и головная (между точками В—А), т. е.

$$D_{5_3} = 0,04; v_{5_3} = 86,05 \text{ м/мин}; q_{5_3} = 2,98 \text{ м/мин}; Q_{5_3} = 6,74 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

Скорость переформирования между замыкающей и второй частями потока $v_{5_2-3} = 48,67$ м/мин.

Наносим на график линии движения (сплошные линии с указанием величин v и v').

Участок 6. Поскольку участок 6 имеет сужение у дверного проема до 1,3 м, определим его среднюю расчетную ширину:

$$\delta_6 = \frac{1,9 + 1,3}{2} = 1,6 \text{ м.}$$

Головная часть потока из прохода 3 сразу попадает на участок 6:

$$q_{6_1} = \frac{Q_3}{\delta_6 \eta} = \frac{6,74}{1,6 \cdot 1,19} = 3,54 \text{ м/мин};$$

$$D_{6_1} = 0,05; v_{6_1} = v \eta = 82,66 \text{ м/мин}; Q_{6_1} \cong 6,74 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

При достижении головной частью потока из прохода 2 участка 6 (точка Д), т. е. после преодоления участка 5, начинается слияние с потоком из прохода 3 и одновременно их переформирование:

$$q_{6_2} = \frac{Q_3 + Q_{5_1}}{\delta_6 \eta} = \frac{6,74 + 6,74}{1,6 \cdot 1,19} = 7,08 \text{ м/мин};$$

$$D_{6_2} = 0,15; v_{6_2} = v \eta = 56,39 \text{ м/мин}; Q_{6_2} = 13,48 \text{ м/мин};$$

$$v'_{6_1-2} = \frac{q_{6_2} - q_{6_1}}{D_{6_2} - D_{6_1}} = \frac{7,08 - 3,54}{0,15 - 0,05} = 35,4 \text{ м/мин}.$$

В момент достижения объединенным потоком Q_{5_2} из проходов 1 и 2 участка 6 (точка Е) начнется его слияние с потоком из прохода 3:

$$q_{6_3} = \frac{Q_{5_2} + Q_3}{\delta_6 \eta} = \frac{11,63 + 6,74}{1,6 \cdot 1,19} = 9,65 \text{ м/мин};$$

$$D_{6_3} = 0,39; v_{6_3} = 29,61 \text{ м/мин}; Q_{6_3} = 18,47 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

Скорость переформирования между второй и третьей частями потока:

$$v'_{6_2-3} = \frac{q_{6_3} - q_{6_2}}{D_{6_3} - D_{6_2}} = \frac{9,65 - 7,08}{0,39 - 0,15} = 10,71 \text{ м/мин}.$$

В точке Ж замыкающая часть потока из прохода 3 достигнет участка 6. С этого момента на участке 6 останется объединенный поток Q_{5_2} , сформировавшийся из потоков, выходящих из проходов 1 и 2:

$$q_{6_4} = \frac{Q_{5_2}}{\delta_6 \eta} = \frac{11,63}{1,6 \cdot 1,19} = 6,11 \text{ м/мин};$$

$$D_{6_4} = 0,11; v_{6_4} = v \eta = 65,38 \text{ м/мин}; Q_{6_4} = 11,51 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$v'_{63-4} = \frac{q_{63} - q_{64}}{D_{63} - D_{64}} = \frac{9,65 - 6,11}{0,39 - 0,11} = 12,64 \text{ м/мин.}$$

В точке *И* прекратится выход на участок 6 объединенного потока с $Q_{5,2}$. Тогда на участке 6 останется часть потока с участка 5 (из прохода 4), которая приобретет следующие параметры:

$$q_{65} = \frac{Q_2}{\delta_6 \eta} = \frac{6,74}{1,6 \cdot 1,19} = 3,54 \text{ м/мин;}$$

$$D_{65} = 0,05; v_{65} = 82,66 \text{ м/мин; } Q_{65} = 6,74 \text{ м}^2/\text{мин;}$$

$$v'_{64-5} = \frac{q_{64} - q_{65}}{D_{64} - D_{65}} = \frac{6,11 - 3,54}{0,11 - 0,05} = 42,83 \text{ м/мин.}$$

Из графика видно, что прямые, соответствующие $v'_{63-4} = 12,64$ м/мин и $v'_{64-5} = 42,83$ м/мин, пересекутся в точке *Л*.

С этого момента начнется переформирование между третьей и пятой частями потока со скоростью

$$v'_{63-5} = \frac{q_{63} - q_{65}}{D_{63} - D_{65}} = \frac{9,65 - 3,54}{0,39 - 0,05} = 17,97 \text{ м/мин.}$$

Проводим из точки *Л* прямую v'_{63-5} до пересечения с прямой v_{65} в точке *М*, где прекращается пополнение объединенного потока. Далее замыкающая часть объединенного потока $Q_{6,3} = Q_1 + Q_2 + Q_3$ пойдет со скоростью $v_{6,3} = 29,61$ м/мин (прямая *МП* на графике).

Проем 06 (выход из учебного кабинета).

По графику можно установить, что поток, проходящий через дверной проем, будет состоять из пяти частей.

Головная часть потока из прохода 4 сразу попадает в дверной проем:

$$Q_{061} = Q_4 = 4,96 \text{ м}^2/\text{мин.}$$

В следующий момент (точка *Р*) подходит головная часть потока из прохода 3:

$$Q_{062} = Q_4 + Q_3 = 4,96 + 6,74 = 11,70 \text{ м}^2/\text{мин.}$$

С момента, определяемого точкой *С*, пропускная способность потока будет составлять

$$Q_{063} = Q_4 + Q_3 + Q_2 = 4,96 + 6,74 = 18,44 \text{ м}^2/\text{мин.}$$

В момент выхода замыкающей части потока из прохода 4 через дверной проем (точка *Т*) изменится пропускная способность потока:

$$Q_{064} = Q_3 + Q_2 = 6,74 + 6,74 = 13,48 \text{ м}^2/\text{мин.}$$

В точке *У* начинается выход пятой части потока:

$$Q_{065} = Q_3 + Q_2 + Q_1 = 6,74 + 6,74 + 4,96 = 18,44 \text{ м}^2/\text{мин.}$$

Определяем требуемую минимальную ширину дверного проема $\sigma_{06}^{треб}$, обеспечивающую беспрепятственность движения, по максимальной пропускной способности потока:

$$Q_{06_3} = Q_{06_5} = 18,44 \text{ м}^2/\text{мин};$$

$$\delta_{06}^{треб} = \frac{Q_{06_3}}{q_{\text{макс}} \eta} = \frac{18,44}{15,79} = 1,17 \text{ м}.$$

Тогда параметры движения потока в проеме составят, м/мин:

$$q_{06_1} = \frac{Q_{06_1}}{\delta_{06} \eta} = \frac{4,96}{1,17 \cdot 1,19} = 3,56;$$

$$q_{06_2} = \frac{Q_{06_2}}{\delta_{06} \eta} = \frac{11,70}{1,17 \cdot 1,19} = 8,40;$$

$$q_{06_3} = q_{06_5} = q_{0 \text{ макс}} = 15,79;$$

$$q_{06_4} = \frac{Q_{06_4}}{\delta_{06} \eta} = \frac{13,48}{1,16 \cdot 1,19} = 9,77.$$

Для проверки расчета определим количество учащихся, вышедших за установленное время из учебного кабинета.

Время, определяемое отрезками, составляет:

$$\Phi P - 0,025 \text{ мин}; \quad PC - 0,055 \text{ мин}; \quad CT - 0,075 \text{ мин};$$

$$TY - 0,115 \text{ мин}; \quad IP - 0,027 \text{ мин, тогда}$$

$$N = 0,025 Q_{06_1} + 0,055 Q_{06_2} + 0,075 Q_{06_3} + 0,115 Q_{06_4} + \\ + 0,027 Q_{06_5} = 0,025 \cdot 4,96 + 0,055 \cdot 11,70 + 0,075 \cdot 18,44 + \\ + 0,115 \cdot 13,48 + 0,027 \cdot 18,44 = 4,20 \approx 4,4 \text{ м}^2.$$

Ошибка 4% в пределах точности расчетов.

Таким образом, время эвакуации школьников старшего возраста из учебного кабинета при беспрепятственном движении через дверной проем составляет 0,3 мин. Следовательно, средняя пропускная способность проема 06 составит

$$Q_{06}^{ср} = \frac{N}{t} = \frac{4,4}{0,3} = 14,6 \text{ м}^2/\text{мин},$$

тогда $q_{06}^{ср} = 12,6 \text{ м}/\text{мин}$, которому соответствует (с учетом η) $D_{06}^{ср} = 0,22$.

Эти значения можно принять для дальнейшего расчета.

Далее расчет ведется в обычном порядке: устанавливаются пути движения, определяются места слияния отдельных потоков из учебных помещений, параметры которых приведены выше, и затем с построением графика рассчитывается весь процесс, на основании ре-

зультатов которого и заданных предельных условий определяются размеры путей движения и коммуникационных помещений (см. § 3 гл. 8):

При этом необходимо помнить, что одним из основных критериев обеспечения безопасной эвакуации людей следует считать беспрепятственность движения с момента его начала до полного завершения. Полное соблюдение этих требований накладывает следующие ограничения на объемно-планировочные решения школьных зданий:

предпочтительны двухэтажные здания, в противном случае каждый этаж должен иметь свои эвакуационные лестницы;

суммарная ширина лестничных маршей рекомендуется: для блока младшей возрастной группы — 2 м, средней — старшей — 2,7 м (двухмаршевые лестницы распашного типа); ширина входов с этажа на лестницу соответственно 1,5 и 1,85 м (размеры дверей, ближайšie по ГОСТу к указанным величинам);

расположение учебных помещений на этаже целесообразно одностороннее;

лестничные клетки рекомендуется располагать в торцовых зонах учебных секций и обеспечивать непосредственным выходом наружу;

не следует допускать слияния людских потоков первого и второго этажей.

При соблюдении требований, обеспечивающих беспрепятственность движения, расчетное время эвакуации из здания t_p практически будет меньше предельно допустимого времени пребывания людей в здании при пожаре (которое для школ может быть в пределах 5 мин). В том случае, когда нарушаются условия беспрепятственности движения, необходимо определить t_p и сопоставить его с $t_{доп}$.

Для предупреждения образования скоплений людей перед лестницами, что представляет большую опасность, ширина лестничного марша должна относиться к ширине проема, ведущего на лестничную клетку, как 1 : 0,86.

При обеспечении условий беспрепятственного движения в пределах учебной секции (ширина эвакуационного пути не менее 2,5 м) плотность людского потока будет не выше $D_{пр} = 0,40$.

Расчет автономной эвакуации из группы обще-

школьных помещений (актовый, гимнастический, обеденный залы) и помещений для организации продленного дня следует производить по известной методике (см. § 3 гл. 8).

§ 2. Торговые здания

При проектировании торговых зданий задача состоит в том, чтобы определить целесообразные размеры путей движения людей, удовлетворяющие требованиям нормальной эксплуатации здания и безопасной эвакуации людей при возникновении аварийной обстановки.

В торговом здании можно выделить следующие основные виды движения людских потоков: заполнение здания при открытии; непрерывное в течение всего рабочего дня движение людей (покупателей) по торговым залам, включая вход и выход из здания; освобождение здания от людей в конце рабочего дня; вынужденная эвакуация людей из здания (при возникновении пожара).

Непрерывное движение в нормальных условиях, длительно существующие людские потоки с переменным составом участников движения являются характерной особенностью торговых зданий. Очевидно, что определяющими видами следует считать поточное длительное движение, протекающее в нормальных условиях, и кратковременное — в аварийных.

Заполнение здания при открытии имеет значение лишь в частных случаях (большие универсальные магазины) главным образом с точки зрения оценки пропускной способности входа для быстрой ликвидации скопления людей на улице. Однако при проектировании следует иметь в виду, что нагрузка на входы может быть крайне неравномерной, как, например, в таких крупных московских универсальных магазинах, как ГУМ (рис. 12.3), «Детский мир», ЦУМ и др. Неравномерность загрузки входов связана с расположением близ магазина потокообразующих объектов (станций метрополитена, остановок городского наземного транспорта и пр.). Ввиду этого при проектировании крупных торговых зданий следует учитывать настоящую или перспективную градостроительную ситуацию и располагать входы в здание и предусматривать их про-

пусковую способность соответственно ожидаемой нагрузке.

Освобождение здания будет иметь значение лишь в тех случаях, когда с момента прекращения доступа в магазин до прекращения отпуска товаров установлен относительно короткий период. Тогда возникает поточное кратковременное движение, протекающее в нормальных условиях.

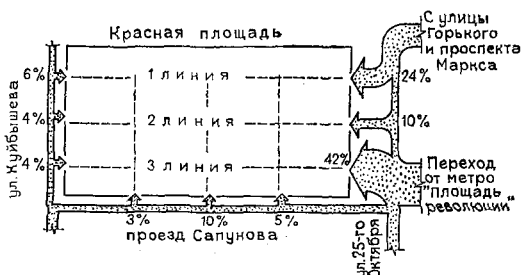


Рис. 12.3. Схема загрузки входов в здание ГУМа (Москва)

Расчет движения людских потоков и определение параметров коммуникационных помещений (проходов в торговых залах, проемов и лестниц) следует вести как по первому, так и по второму предельным состояниям: по первому рассчитывается вынужденная эвакуация людей из здания и освобождение здания в нормальных условиях, а по второму — непрерывное движение в течение рабочего дня.

Предельное условие $t_{\text{доп}}$ для аварийной эвакуации устанавливается в соответствии с назначением и величиной здания, степенью его пожароопасности и этажностью. Необходимо отметить, что имевшие место в последние годы пожары в крупных магазинах (Бельгия, Япония и пр.) показывают, что обеспечению эвакуации людей из зданий и, в частности, нахождению $t_{\text{доп}}$ следует уделять серьезное внимание.

Значение $t_{\text{доп}}$ для движения в нормальных условиях определяется, как указано выше, разностью времени между моментом прекращения торговли и моментом прекращения впуска в магазин новых покупателей. Если оно значительно превышает $t_{\text{доп}}$ для аварийного движения, то необходимость расчета движения в нормальных условиях в таких случаях отпадает.

Второе предельное условие $D_{\text{доп}}$ для непрерывного

длительного движения в магазине в течение всего рабочего дня также устанавливается в зависимости от специализации торгового предприятия, его величины и значения в сети обслуживания населенного пункта и др. Однако можно дать некоторые общие рекомендации.

Во-первых, движение в магистральных проходах торгового помещения, как показывают наблюдения, является поточным двусторонним в обоих направлениях. Из такого потока люди постоянно выбывают в проходы, ведущие к торговым секциям, и наоборот, из этих же проходов поток все время пополняется людьми, закончившими торговые операции или переходящими в другие секции, поэтому приблизительно можно сказать, что поток по численности сохраняет постоянство.

В этих условиях магистральные проходы целесообразно рассчитывать на свободное поточное движение, принимая $D_{\text{доп}}=0,15$ (но не больше 0,2). Предполагая наименее выгодные условия, можно принять $f=0,15 \text{ м}^2$, т. е. взрослые в зимней одежде, из которых часть с легкими свертками (см. табл. 3.1): $f=0,125 \cdot 0,75 + 0,235 \cdot 0,25 \approx 0,15 \text{ м}^2$. Тогда расчетная плотность потока для магистральных проходов составит 1 чел/м², или при $D_{\text{доп}}=0,2$ примерно 1,3 чел/м².

Во-вторых, в магистральных проходах с перекрестным движением потоков плотность свободного движения должна быть $D_{\text{доп}}=0,05$, или 0,3 чел/м².

В-третьих, движение покупателей внутри торговых секций может быть приравнено к беспорядочному (движение около прилавков при выборе товара, для оплаты в кассе, при получении покупки в столе выдачи), поэтому также $D_{\text{доп}}=0,05$.

Число одновременно находящихся в здании людей зависит от специализации магазина, его величины, значения в городе, наличия тех или иных товаров, времени года, суток и других обстоятельств, трудно поддающихся учету. К сожалению, статистических данных накоплено еще недостаточно, чтобы получить определенные закономерности. В настоящее время нормами (глава СНиП II-Л.7-70) расчетное количество находящихся в здании людей определяется по общей площади торговых помещений из расчета 1,35 м² на одного человека. Иначе говоря, при $f=0,15 \text{ м}^2$ предполагается средняя нормативная плотность:

$$D_{\text{ср}}^{\text{норм}} = \frac{f}{1,35} = 0,11.$$

Тогда расчетное количество (в м²) составит

$$N = F_0 D_{\text{ср}}^{\text{норм}}, \quad (12.6)$$

где F_0 — общая площадь торговых залов.

Часть из этих людей двигается по магистральным проходам, другая — в пределах торговых секций. Зная среднее соотношение количества людей,двигающихся в магистральных проходах и находящихся в секциях, легко составить приближенную схему распределения покупателей по территории магазина, которая может послужить основой для последующих расчетов движения людских потоков.

Поскольку известны площадь магистральных проходов и число находящихся в них людей, можно проверить правильность выбора ширины проходов для условий нормальной эксплуатации магазина. Для этого определим необходимую площадь магистральных проходов (в м²) при плотности $D=0,15$:

$$F_{\text{пр}}^{\text{треб}} = \frac{N_{\text{пр}}}{D_{\text{пр}}}. \quad (12.7)$$

Поскольку общая длина проходов известна, легко определяется требуемая ширина, при которой средняя плотность в нормальных условиях длительного движения не превысит $D_{\text{пр}}=0,15$.

Зная среднюю длительность пребывания покупателя в магазине, слагающуюся из времени, затрачиваемого на движение по магазину и на собственно торговую операцию t_m , можно определить требуемую в нормальных условиях общую ширину входов и выходов, т. е. количество входящих людей, м²/мин:

$$Q_0 = \frac{N}{t_m}, \quad (12.8)$$

откуда

$$\delta Q_{\text{треб}} = \frac{Q_0}{q_{D_{\text{пр}}}}.$$

Полученные параметры проходов и дверей проверяются расчетом движения в аварийных условиях. Окончательные размеры принимаются по большим значениям.

Пример. Требуется определить рациональные параметры путей движения людских потоков в здании одноэтажного торгового центра на 270 рабочих мест (рис. 12.4).

Решение. Определим количество одновременно находящихся в торговом зале людей.

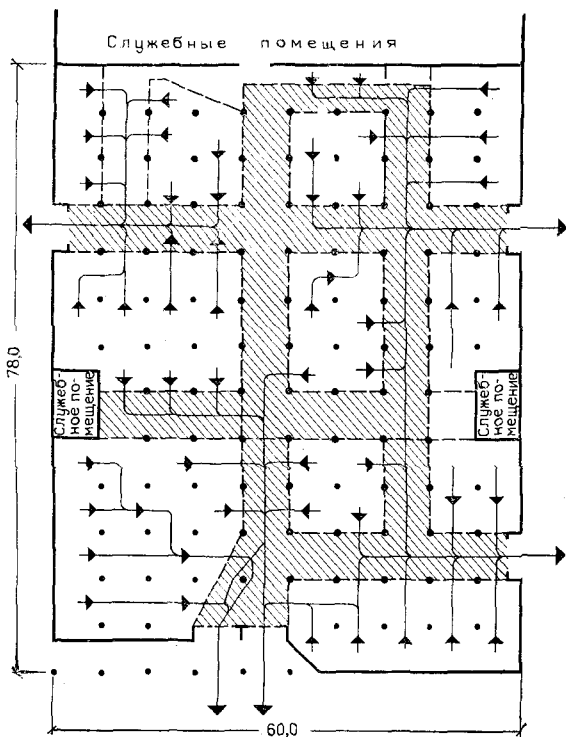


Рис. 12.4. Схема плана торгового центра

Площадь зала: $F_0 = 78 \cdot 60 = 4680 \text{ м}^2$ (100%).

Площадь магистральных проходов при принятой ширине $\delta_{пр} = 6 \text{ м}$ составит $F_{пр} = 1400 \text{ м}^2$, 30% (заштрихована на рис. 12.4). Площадь служебных помещений и проходов (не заштрихована), а также наружной галереи у главного входа составляет 550 м^2 . Тогда общая площадь торговых секций составит $F_{сек} = 2730 \text{ м}^2$ (58%), а общее количество покупателей:

$$N = F_0 D_{ср}^{норм} = 4680 \cdot 0,11 = 515 \text{ чел.}$$

Если люди в зимней одежде со свертками ($f = 0,15 \text{ м}^2$), то указанной величине соответствуют 3435 чел.

Предположим, что в среднем 75% покупателей находятся в пределах секций, а 25% — в магистральных проходах:

$$N_{сек} = 0,75 N = 0,75 \cdot 515 = 386 \text{ м}^2 \text{ (2570 чел.)};$$

$$N_{\text{пр}} = 0,25 N = 0,25 \cdot 515 = 129 \text{ м}^2 (865 \text{ чел.}).$$

Определим требуемую ширину магистральных проходов для условий нормального движения. По выражению (12.7):

$$F_{\text{пр}}^{\text{треб}} = \frac{N_{\text{пр}}}{D_{\text{пр}}} = \frac{129}{0,15} = 867 \text{ м}^2.$$

По проекту $F_{\text{пр}} \approx 1400 \text{ м}^2$, следовательно, ширину можно уменьшить. Поскольку общая длина магистральных проходов составляет около $L_{\text{пр}} = 220 \text{ м}$ (по чертежу), то

$$\delta_{\text{пр}}^{\text{треб}} = \frac{F_{\text{пр}}}{L_{\text{пр}}} = \frac{867}{220} \approx 4 \text{ м}.$$

При этом площадь торговых секций возрастет на $1400 - 867 = 533 \text{ м}^2$ и достигнет $F_{\text{сек}} = 3263 \text{ м}^2$, что составит 70% общей площади вместо принятой 58%.

Полагая, что площадь, занимаемая оборудованием (прилавками, стеллажами, горками), составляет 20% общей площади зала, т. е. $0,2 \cdot 4680 = 935 \text{ м}^2$, определим свободную площадь секций:

$$F'_{\text{сек}} = 3263 - 935 = 2328 \text{ м}^2.$$

Тогда средняя плотность в пределах секций составит

$$D_{\text{сек}} = \frac{N_{\text{сек}}}{F_{\text{сек}}} = \frac{386}{2328} = 0,165.$$

Часть людей плотностью $D = 0,05$ беспорядочно перемещается в пределах секций. Эта часть составит $0,05 \cdot 2328 = 116 \text{ м}^2$. Около продавцов находятся 1800 чел., что составляет 270 м^2 . При 270 рабочих местах около каждого продавца одновременно будут находиться в среднем 6—7 покупателей.

Определим необходимую ширину входных проемов. Предположим, что каждый покупатель в среднем задерживается в магазине $t_{\text{м}} = 15$ мин, тогда пропускная способность входных проемов будет

$$Q_0 = \frac{N}{t_{\text{н}}} 2 = \frac{515}{15} 2 = 68,7 \text{ м}^2/\text{мин},$$

а требуемая ширина

$$\delta_0^{\text{треб}} = \frac{Q_0}{q_D} = \frac{68,7}{4,17} = 16,5 \text{ м},$$

или по 3,3 м на каждый второстепенный вход и 6,6 м — на главный. Значение q_D принято для $D_{\text{пр}} = 0,15$ (как для проходов) при комфортном (т. е. замедленном) движении (см. прил. I).

Далее производится расчет времени вынужденной эвакуации по известной методике (см. § 4 гл. 8). Предварительно устанавливаются число потоков, людей в каждом потоке и пути движения. На рис. 12.4 показаны пути движения четырех потоков при возникновении пожара в служебной зоне магазина. Очевидно, следует сделать несколько проверочных расчетов вынужденной эвакуации, например при возникновении пожара в магазине, когда один из выходов будет отрезан огнем.

При определении числа людей в каждом потоке в начальный момент движения следует принимать: в магистральных проходах — $D_{пр} = 0,15$; в проходах секций — $D_{сек} = 0,165$. Зная (по схеме) площадь проходов и секций, приходящихся на данный поток, легко определить число людей. При этом следует учесть площадь, занятую оборудованием. Затем, если есть необходимость, можно проверить пропускную способность входов при открытии магазина и при освобождении его от покупателей в нормальных условиях.

Пропускная способность входов при открытии может быть проверена, если хотя бы приближенно известно возможное число скапливающихся людей. Предположим, что к открытию у входов скопилось 1500 чел., что соответствует 225 м^2 (по 45 м^2 на каждый второстепенный и 90 м^2 на главный вход). В этом случае будет повышенная напряженность движения, поэтому плотность перед дверями достигнет $D = 0,92$ при $q = 9,6 \text{ м/мин}$ (нормальное движение).

Пропускная способность каждого второстепенного входа составит $Q_0 = q_0 \delta_0 = 9,6 \cdot 3,3 = 31,7 \text{ м}^2/\text{мин}$, а время движения при всех открытых дверях будет

$$t_0 = \frac{N}{Q_0} = \frac{45}{31,7} = 1,42 \text{ мин.}$$

По-видимому, найденная ширина дверей удовлетворяет и условиям впуска людей при открытии магазина.

Эвакуация в нормальных условиях рассчитывается по той же схеме, что изображена на рис. 12.4, но по параметрам для комфортных условий.

§ 3. Зрелищные здания и сооружения

К зрелищным зданиям и сооружениям относятся театры, кинотеатры, цирки, концертные залы, крытые спортивные сооружения, крытые залы многофункционального назначения, открытые спортивные сооружения. Отличительной особенностью этих зданий является большой размер помещений или сооружений для размещения зрителей (зрительные залы, трибуны) и помещений, связанных с обслуживанием зрителей перед началом зрелищных мероприятий, в антрактах и после окончания. С учетом того, что современные зрелищные здания и сооружения рассчитываются на огромное число зрителей (в открытых спортивных сооружениях оно может превышать 100 тыс.), правильная организация движения людских потоков приобретает особо важное значение.

Как и в предыдущих типах зданий, здесь различаются следующие виды движения: заполнение здания или сооружения перед началом зрелища; движение во время антрактов; эвакуация зрителей из здания или

сооружения после окончания зрелища и эвакуация зрителей при возникновении аварийных условий.

Заполнение здания происходит длительное время и поэтому, как правило, не может являться определяющим видом движения. Довольно быстро заполняются зрительные залы кинотеатров. Соображения, высказанные ранее по поводу работы гардероба (см. § 4 гл. 8; § 2 гл. 12) при заполнении здания и при эвакуации в нормальных условиях, остаются справедливыми и для зрелищных зданий и сооружений. Площадь вестибюля должна рассчитываться по второму предельному состоянию, по заданному $D_{\text{доп}}$, чтобы создать необходимые удобства при получении одежды.

Во время антрактов возникает движение людей из зрительного зала в буфеты, курительные и санитарные узлы. Образование людских потоков по этим направлениям зависит от многих обстоятельств (количества антрактов, вида зрелищ, их продолжительности, контингента зрителей и пр.), трудно поддающихся учету. В одних случаях такие потоки образуются, в других они выражены слабо. До проведения специальных исследований, на основании которых можно было бы установить средний процент зрителей, посещающих буфеты, курительные и другие помещения зрелищного здания во время антракта, надежно рассчитать параметры путей движения от зрительного зала к одному из таких помещений и площадь самого помещения не представляется возможным. Для ориентировочных расчетов можно:

определить время движения по залу по параметрам комфортного движения исходя из того, что в антракте зал покидают не более 75% общего числа зрителей, а также время движения через кулуары и фойе исходя из ожидаемой в этих помещениях плотности (очевидно, не более 0,15) свободного поточного движения, принимая также комфортные условия; установить число людей, обслуживаемых в антракте буфетом, и, наконец, рассчитать пути, непосредственно ведущие в рассматриваемое помещение (буфет), считая, что люди подходят к началу пути равномерно в течение времени, равного половине или трети продолжительности антракта.

Очевидно, определяющими видами движения в зрелищных зданиях и сооружениях следует считать эвакуацию зрителей в нормальных и аварийных условиях.

каждой стороны продольного прохода и восемь полных рядов. Всего эвакуируются 474 чел. (половина зала).

Принимаем: $f=0,125 \text{ м}^2$; $N=474 \cdot 0,125=59,25 \approx 60 \text{ м}^2$.

Предположим, что $t_{\text{доп}}=3 \text{ мин}$.

Определим время движения людей из блока 1 до выхода из продольного прохода ($\delta=1,2 \text{ м}$) у стены к двери (см. § 5 гл. 7); $m=2$ ряда; $n=7$ мест; $N=mnf=2 \cdot 7 \cdot 0,125=1,75 \text{ м}^2$; $L_p=3,5$; $l=0,9 \text{ м}$.

По прил. I находим: $Q_p=4,47 \text{ м}^2/\text{мин}$; $v_p=17,76 \text{ м/мин}$;

$$t_p = \frac{3,5}{17,76} = 0,197 \text{ мин.}$$

По формуле (4.9):

$$q = \frac{Q_p m}{\delta} = \frac{4,47 \cdot 2}{1,2} = 7,42 < q_{\text{макс}} = 10,13 \text{ м/мин.}$$

Следовательно, движение стабилизируется при $D_i=0,42$, отвечающей $q_i=7,44 \text{ м/мин}$; тогда $q_{i_p}=q_i=7,44 \text{ м/мин}$;

$$q_i = \frac{Q_p}{\delta} = \frac{4,47}{1,2} = 3,72 \text{ м/мин}; D_1 = 0,09;$$

$$q_2 = 7,44 \text{ м/мин}; D_2 = 0,42; D_i = D_2 = 0,42;$$

$$\sum_1^{i-1} D = D_1 = 0,09; q_{i-1} = q_1 = 3,72 \text{ м/мин.}$$

По формуле (7.7):

$$\begin{aligned} t &= \frac{l}{q_{i_p}} \left[\frac{D_i}{\Delta q} (q_{i_p} - q_{i-1}) + \sum_1^{i-1} D \right] + \frac{N}{q_{i_p} \delta} = \\ &= \frac{0,9}{7,44} \left[\frac{0,42}{3,72} (7,44 - 3,72) + 0,09 \right] + \frac{1,75}{7,44 \cdot 1,2} = \\ &= 0,197 \approx 0,2 \text{ мин.} \end{aligned}$$

При коротких проходах с небольшим количеством мест в ряду t и t_p близки по значениям.

Определим время движения людей из блока 3 до выхода из продольного прохода ($\delta=1,2 \text{ м}$) в поперечный, ведущий к двери: $m=8$ рядов; $n=6$ мест; ряды расположены по обе стороны прохода; $N=mn \cdot 2f=8 \cdot 6 \cdot 2 \cdot 0,125=12 \text{ м}^2$; $L_p=3 \text{ м}$; $l=0,9 \text{ м}$;

$$Q_p = 4,47 \text{ м}^2/\text{мин}; v_p = 17,76 \text{ м/мин};$$

$$\begin{aligned} t_p &= \frac{L_p}{v_p} = 0,17 \text{ мин}; q = \frac{2 Q_p m}{1,2} = \frac{2 \cdot 4,47 \cdot 8}{1,2} = \\ &= 59,4 > q_{\text{макс}} = 10,13 \text{ м/мин.} \end{aligned}$$

Таким образом, движение в проходе стабилизируется в момент t_p или при $D_{\text{макс}}$.

Проверяем по t_p :

$$D_{i_p} = \frac{2 Q_p}{\delta l} t_p = \frac{2 \cdot 4,47}{1,2 \cdot 0,9} 0,17 = 1,41 > D,$$

отвечающей $q_{\text{макс}}$.

Следовательно, процесс стабилизируется при D_{\max} :

$$q_1 = \frac{2 Q_p}{\delta} = \frac{2 \cdot 4,47}{1,2} = 7,45 \text{ м/мин}; \quad D_1 = 0,42; \quad q_i = \Delta q;$$

$$q_2 = 14,9 \text{ м/мин} > q_{\max} = 10,13 \text{ м/мин};$$

$$D_i = D_1 = 0,42; \quad \sum_1^{i-1} D = 0; \quad q_{i-1} = 0.$$

По формуле (7.7):

$$t = \frac{0,9}{8,35} \left[\frac{0,45}{7,45} (8,35 - 0) + 0 \right] + \frac{1,2}{8,35 \cdot 1,2} = 1,25 \text{ мин.}$$

Только в первый момент при выходе в поперечный проход людской поток будет иметь плотность $D_1=0,42$, а затем $D_{\max}=0,92$, которую можно принять за расчетную.

Произведем расчет параметров движения из блока *a* (в поперечном проходе зала, ведущем к двери: $\delta=1,2$ м; $N=13 \cdot 0,125=1,62$ м²). С момента начала эвакуации люди сразу оказываются в проходе по всей его длине; плотность потока составит:

$$D = \frac{N}{\delta L} = \frac{1,62}{1,2 \cdot 6,5} = 0,21;$$

$$v = 27,27 \text{ м/мин}; \quad q = 5,73 \text{ м/мин}; \quad Q = 6,88 \text{ м}^2/\text{мин.}$$

Идущие из блоков *1*, *3* и *a* потоки сливаются; строим график, отражающий движение в поперечном проходе зала (рис. 12.6).

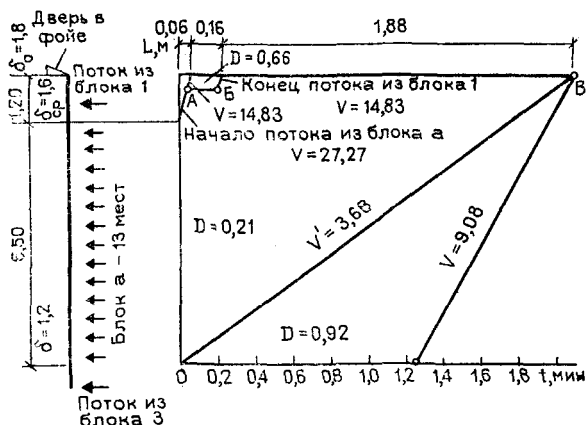


Рис. 12.6. Расчетный график движения в зале

Определим путь движения (см. схему слева от чертежа).

С момента начала эвакуации в поперечном проходе находится поток из блока *a*, к замыкающей части которого подходит головная часть потока из блока *3*. Следовательно, перестроение их будет происходить по схеме $v_1 > v_2$, тогда скорость составит

$$v' = \frac{q_2 - q_1}{D_2 - D_1} = \frac{8,35 - 5,73}{0,92 - 0,21} = 3,68 \text{ м/мин.}$$

Наносим на график линии: движения головной части потока из блока *a* ($v=27,27$ м/мин), перестроения ($v'=3,68$ м/мин) и движения в поперечном проходе замыкающей части потока из блока *3* ($v=9,08$ м/мин, поскольку ширина поперечного прохода равна ширине продольного, где $D_n=0,92$).

Головная часть потока из блока *a* встречает перед дверью начало потока из блока *1*, тогда

$$q = \frac{\Sigma Q}{\delta} = \frac{6,88 + 8,83}{1,6} = 9,8 < q_{\text{макс}} = 10,13 \text{ м/мин.}$$

Следовательно, скопления людей не будет. Средние параметры движения перед дверью составят: $D=0,66$; $v=14,83$ м/мин; $Q=15,8$ м²/мин.

Процесс слияния начинается в точке *A*, из которой проводится линия движения объединенного потока из блоков *a* и *1* ($v=14,83$ м/мин). Слияние оканчивается в точке *B*, соответствующей времени выхода потока из блока *1* в поперечный проход зала ($t=0,2$ мин). Следовательно, выход через дверь в фойе начинается через 0,06 мин; в течение следующего промежутка времени (0,16 мин) перед дверью будет поток плотностью $D=0,66$.

Процесс перестроения заканчивается перед дверью (точка *B* на графике). В течение 1,88 мин здесь будет поток плотностью $D=0,21$, соответствующий плотности потока из блока *a*, так как он все время пополняется людьми из потока блока *3*. Общее время выхода потоков из блоков *1*, *3* и *a* составит: $t=0,06+0,16+1,88=2,10$ мин.

Плотность людского потока в проходе будет меньше, чем перед дверью, так как последняя имеет ширину $\delta_0=1,8$ м.

При плотности потока перед дверью $D=0,66$:

$$q_0 = \frac{Q_{a+1}}{\delta_0} = \frac{15,8}{1,8} = 8,77 \text{ м/мин;}$$

$$D_0 = 0,34,$$

где Q_{a+1} — суммарная пропускная способность потоков из блоков *a* и *1*.

Перед дверью плотность потока $D=0,21$, тогда

$$q_0 = \frac{Q_a}{\delta_0} = \frac{6,88}{1,8} = 3,72 \text{ м/мин; } D_0 = 0,07 \div 0,08.$$

Следовательно, выход из зала происходит в благоприятных условиях.

Определим время движения людей из блока *2* по продольному проходу ($\delta=1,2$ м) у стены до двери, $m=5$ рядов; $n=7$ мест; $N=5 \cdot 7 \cdot 0,125=4,37$ м²; $L_p=3,5$ м; $t=0,9$ м; $Q_p=4,47$ м²/мин; $v_p=17,76$ м/мин;

$$t_p = \frac{3,5}{17,76} = 0,197 \text{ мин;}$$

$$q = \frac{Q_p m}{\delta} = \frac{4,47 \cdot 5}{2} = 11,175 > q_{\text{макс}} = 10,13 \text{ м/мин.}$$

Стабилизация происходит или в момент t_p , или при D_{\max} :

$$D_{ip} = \frac{Q_p}{\delta l} t_p = \frac{4,47}{1,2 \cdot 0,9} 0,197 = 0,82 > D, \text{ отвечающей } q_{\max}.$$

Следовательно, стабилизация при D_{\max} :

$$q_1 = \frac{Q_p}{\delta} = \frac{4,47}{1,2} = 3,72 \text{ м/мин}; D = 0,09; q_1 = \Delta q;$$

$$q_2 = 7,44 \text{ м/мин}; D_2 = 0,42; q_3 = 11,15 > q_{\max};$$

$$D_i = D_2 = 0,42; \sum_1^{i-1} D = D_i = 0,09; q_{i-1} = q_1 = 3,72 \text{ м/мин};$$

$$t = \frac{l}{q_{ip}} \left[\frac{D_i}{\Delta q} (q_{ip} - q_{i-1}) + \sum_1^{i-1} D \right] + \frac{N}{q_{ip} \delta} =$$

$$= \frac{0,9}{8,35} \left[\frac{0,42}{3,72} (8,35 - 3,72) + 0,09 \right] + \frac{4,37}{8,35 \cdot 1,2} = 0,57 \text{ мин.}$$

Однако учитывая, что два ряда расположены непосредственно против двери, время t будет фактически несколько меньше. Ориентировочно его можно принять равным 0,44 мин, т. е. по значению второго слагаемого в расчетной формуле.

Параметры движения в двери:

$$q_0 = \frac{q_{ip} \delta}{\delta_0} = \frac{8,35 \cdot 1,2}{1,2} = 8,35 \text{ м/мин}; D_0 = 0,29.$$

Аналогичный характер будет носить движение и из других блоков, поэтому принимаем: для блоков 4, 6 и б, 9, 7 и в параметры движения и время — по графику рис. 12.7; для блоков 5 и 8 — по расчету для блока 2.

Построим график движения в фойе — слева на чертеже (рис. 12.7) показана схема пути.

Нанесем на график справа время выхода потоков из зала. Из дверей I, III и V выходят потоки блоков 2, 5 и 8. Они выходят сразу после начала эвакуации, а замыкающие их части — через 0,44 мин (точки А и Б). Пропускная способность каждого $Q = 10 \text{ м}^2/\text{мин}$. Из дверей II, IV и VI выходят объединенные потоки из блоков 3, 1 и а; 6, 4 и б; 9, 7 и в. Они состоят из двух частей пропускной способностью $Q = 15,8 \text{ м}^2/\text{мин}$ и $Q = 6,88 \text{ м}^2/\text{мин}$. Головная часть потока выходит в фойе через 0,06 мин (точка В), конец первой части — через $0,06 + 0,16$ мин (точка Г) и замыкающая часть — через $0,06 + 0,16 + 1,88$ мин (точка Д).

Участок I. Определим параметры потока из блока 2 при движении в фойе (ширина фойе 5 м):

$$q = \frac{Q}{\delta} = \frac{10}{5} = 2 \text{ м/мин};$$

по прил. I (для нормального движения, по интерполяции): $D = 0,045$; $v = 48,1 \text{ м/мин}$; $Q_{0,045} = 10 \text{ м}^2/\text{мин}^*$.

* В дальнейшем для облегчения расчета пропускная способность пути обозначается с индексом по величине плотности потока.

Проводим из точек *A* и *B* в пределах участка 1 линии, соответствующие скорости движения $v=48,1$ м/мин головной и замыкающей частей потока.

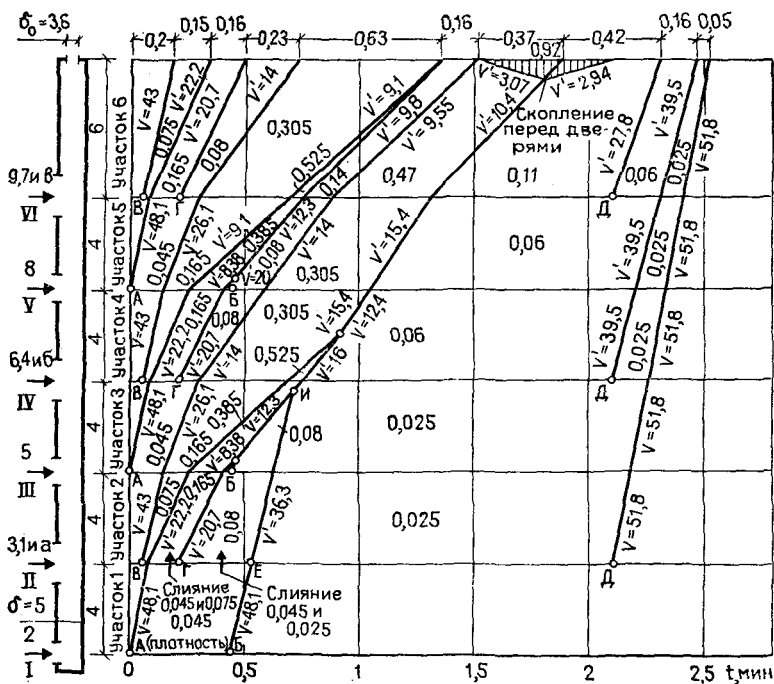


Рис. 12.7. Расчетный график движения от зала до выхода из здания

Участок 2. Параметры движения в фойе первой части потока из блоков 3, 1 и а:

$$q = \frac{Q}{\delta} = \frac{15,7}{5} = 3,14 \text{ м/мин};$$

$$D = 0,075; v = 43 \text{ м/мин}; Q_{0,075} = 15,7 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

То же, для второй части потока:

$$q = \frac{Q}{\delta} = \frac{6,88}{5} = 1,37 \text{ м/мин};$$

$$D = 0,025; v = 15,8 \text{ м/мин}; Q_{0,025} = 6,88 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

Проводим из точки *B* линию движения в пределах участка 2 головной части потока, идущего со скоростью $v=43$ м/мин. Из графика видно, что на границе участков 1 и 2 в поток вливается головная часть потока с участка 1; происходит сначала слияние, а затем переформирование на участке 2.

Сливаются потоки плотностью 0,045 и 0,075; параметры потока будут:

$$q = \frac{\Sigma Q}{\delta} = \frac{10 + 15,7}{5} = 5,14 \text{ м/мин};$$

$$D = 0,165; Q_{0,165} = 25,7 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

На участке 2 будет происходить переформирование части потока плотностью 0,075 и образовавшейся части плотностью 0,165. При $v_1 > v_2$ люди будут перебегать в идущую более быстро первую часть потока. Тогда скорость переформирования составит

$$v' = \frac{q_2 - q_1}{D_2 - D_1} = \frac{5,14 - 3,14}{0,165 - 0,075} = 22,2 \text{ м/мин}.$$

Нанесем скорость на график.

В точке Г заканчивается выход более плотной части потока из блоков 3, 1 и а. Следовательно, слияние потоков плотностью 0,045 и 0,075 прекращается, но начинается слияние потока с первого участка фойе со второй частью потока из блоков 3, 1 и а, т. е. потоков плотностью 0,045 и 0,025:

$$q = \frac{\Sigma Q}{\delta} = \frac{10 + 6,88}{5} = 3,38 \text{ м/мин}.$$

$$D = 0,08; Q_{0,08} = 16,88 \text{ м}^2/\text{мин}.$$

На участке 2 часть потока плотностью 0,165 и новая часть плотностью 0,08 сейчас же начнут переформировываться по схеме $v_1 < v_2$, т. е. новая часть будет пополнять идущую медленнее часть большей плотности:

$$v' = \frac{q_1 - q_2}{D_1 - D_2} = \frac{5,14 - 3,38}{0,165 - 0,08} = 20,7 \text{ м/мин}.$$

В точке Е поток с первого участка фойе заканчивается, а поток плотностью 0,025 продолжает выходить из двери II. Следовательно, на участке 2 также будет происходить переформирование потоков плотностью 0,08 и 0,025:

$$v' = \frac{q_1 - q_2}{D_1 - D_2} = \frac{3,38 - 1,37}{0,08 - 0,025} = 36,3 \text{ м/мин}.$$

Движение на участке 2 заканчивается в точке Д. Строим линию движения замыкающей части потока из двери II ($v = 51,8$ м/мин).

На графике слияние потоков на границе участков 1 и 2 фойе показано стрелками. Между линиями скоростей переформирования цифрами указано значение плотности.

Уяснив порядок расчета по участку 2, поступаем аналогично при определении параметров движения на участке 3.

Движение начинается в точке А выходом головной части потока из блока 5. По предыдущему расчету $q = 2$ м/мин; $D = 0,045$; $v = 48,1$ м/мин; $Q_{0,045} = 10$ м²/мин.

Определим параметры сливающихся частей потоков, выходящих с участка 2 и влияющих в поток плотностью 0,045. Полученные результаты представим в виде табл. 12.2.

Таблица 12.2. Параметры сливающихся частей потоков

Плотность сливающихся потоков, $\text{м}^2/\text{м}^2$	$q = \frac{\Sigma Q}{\delta}, \text{ м/мин}$	Искомое D , $\text{м}^2/\text{м}^2$	Q , $\text{м}^2/\text{мин}$
0,075 и 0,045	$q = \frac{15,7+10}{5} = 5,14$	0,165	$Q_{0,165} = 25,7$
0,165 и 0,045	$q = \frac{25,7+10}{5} = 7,14$	0,385	$Q_{0,385} = 35,7$
0,08 и 0,045	$q = \frac{16,88+10}{5} = 5,38$	0,18	$Q_{0,18} = 26,88$

Расчет скорости переформирования различных частей потока на участке 3 приведен в табл. 12.3.

Таблица 12.3. Расчет скорости переформирования различных частей потока на участке 3

Переформирование потоков плотностью, $\text{м}^2/\text{м}^2$	По схеме	$v' = \frac{q_1 - q_2}{D_1 - D_2}$ или $\frac{q_2 - q_1}{D_2 - D_1}$ в м/мин
0,045 и 0,165	$v_1 > v_2$	$v' = \frac{5,14 - 2}{0,165 - 0,045} = 26,1$
0,165 и 0,385	$v_1 > v_2$	$v' = \frac{7,14 - 5,14}{0,385 - 0,165} = 9,1$
0,385 и 0,18	$v_1 < v_2$	$v' = \frac{7,14 - 5,38}{0,385 - 0,18} = 8,38$
0,18 и 0,08	$v_1 < v_2$	$v' = \frac{5,38 - 3,38}{0,18 - 0,08} = 20$

В точках Ж и И линии скоростей переформирования пересекаются, т. е. полностью заканчивается этот процесс для частей потоков плотностью 0,18 и 0,08, поэтому определим дополнительные значения v' , ибо далее оно будет происходить при других сочетаниях плотностей:

$$\text{при } 0,385 - 0,08 \quad v_1 < v_2; \quad v' = \frac{7,14 - 3,38}{0,385 - 0,08} = 12,3;$$

Таблица 12.4. Расчет скорости переформирования потока на участках 4, 5 и 6

Слияние частей потоков				Переформирование частей потоков		
D , м ² /м ²	q , м/мин	искомое D , м ² /м ²	Q , м ² /мин	D , м ² /м ²	по схеме	v' , м/мин
Участок 4						
0,045 и 0,075	5,14	0,165	$Q_{0,385} = 25,7$	0,075 и 0,165	$v_1 > v_2$	22,2
0,045 и 0,025	3,38	0,08	$Q_{0,08} = 16,88$	0,165 и 0,08	$v_1 < v_2$	20,7
0,165 и 0,025	6,52	0,305	$Q_{0,305} = 32,58$	0,08 и 0,305	$v_1 > v_2$	14
0,385 и 0,025	8,53	0,525	$Q_{0,525} = 42,58$	0,325 и 0,525	$v_1 > v_2$	9,1
0,025 и 0,025	2,75	0,06	$Q_{0,06} = 13,76$	0,525 и 0,06	$v_1 < v_2$	12,4
				0,305 и 0,06	$v_1 < v_2$	15,4
				0,06 и 0,025	$v_1 < v_2$	39,5
Участок 5						
0,075 и 0,045	5,14	0,165	$Q_{0,165} = 25,7$	0,045 и 0,165	$v_1 > v_2$	26,1
0,165 и 0,045	7,14	0,385	$Q_{0,385} = 35,7$	0,165 и 0,385	$v_1 > v_2$	9,1
0,08 и 0,045	5,38	0,18	$Q_{0,18} = 26,88$	0,385 и 0,18	$v_1 < v_2$	8,38
				0,18 и 0,08	$v_1 < v_2$	20
				0,385 и 0,08	$v_1 < v_2$	12,3
Участок 6						
0,045 и 0,076	5,14	0,165	$Q_{0,165} = 25,7$	0,075 и 0,165	$v_1 > v_2$	22,2
0,045 и 0,025	3,38	0,08	$Q_{0,08} = 16,88$	0,165 и 0,08	$v_1 < v_2$	20,7
0,165 и 0,025	6,52	0,305	$Q_{0,305} = 32,58$	0,08 и 0,305	$v_1 > v_2$	14
0,385 и 0,025	8,53	0,525	$Q_{0,525} = 42,58$	0,305 и 0,525	$v_1 > v_2$	9,1
0,08 и 0,025	4,75	0,14	$Q_{0,14} = 23,76$	0,525 и 0,14	$v_1 < v_2$	9,8
0,305 и 0,025	7,9	0,47	$Q_{0,47} = 39,46$	0,14 и 0,47	$v_1 > v_2$	9,55
0,06 и 0,025	4,14	0,11	$Q_{0,11} = 20,64$	0,47 и 0,11	$v_1 < v_2$	10,4
				0,11 и 0,06	$v_1 < v_2$	27,8

$$\text{при } 0,385 - 0,025 v_1 < v_2; \quad v' = \frac{7,14 - 1,37}{0,385 - 0,025} = 16.$$

Данные для участков 4, 5 и 6 получены аналогичным образом (табл. 2.4).

Как следует из расчета, многие значения q , D , Q и v' на последующих участках фойе оказываются одинаковыми с предыдущими, что сокращает вычислительную работу. Из графика следует, что время эвакуации из здания определяется в данном случае движением замыкающей части потока из блока 2 и составляет 2,53 мин $< t_{\text{доп}}$.

Произведем проверку расчета; для этого по графику определим в конце участка 6 продолжительность выхода каждой части потока с определенной плотностью; найдем значения Q для этих плотностей и умножим последние на время t . Составим табл. 12.5.

Таблица 12.5. Данные проверки расчета

D частей потока	t , мин	Q , м ² /мин	$Qt=N$, м ²
—	0,2	—	—
0,075	0,15	15,7	2,36
0,165	0,16	25,7	4,11
0,08	0,2	16,88	3,88
0,305	0,63	32,58	20,5
0,44	0,16	23,76	3,8
0,47	0,37	39,46	14,6
0,11	0,42	20,64	8,67
0,06	0,16	13,76	2,2
0,025	0,05	6,88	0,34
—	2,5	—	60,46

Общее количество равно $N=60,46$ м², или 483 чел.; ошибка составляет 1,9%.

Для проверки пропускной способности выходных дверей шириной $\delta=3,6$ м определим q_0 для каждой части потока, подходящего к дверям. Если q_0 окажется больше $q_{\text{макс}}$, то перед дверями образуется скопление и $D_{\text{макс}}=0,92$; скопление образуется только в момент подхода части потока плотностью 0,47, поскольку

$$q_0 = \frac{Q_{0,47}}{\delta_0} = \frac{39,46}{3,6} = 11, \text{ т. е. больше } 10,59 \text{ м/мин.}$$

Следовательно, $q_0=9,06$ м/мин, ибо $D_0=0,92$.

Тогда скорость переформирования будет

$$v' = \frac{q_1 \frac{\delta_1}{\delta_2} - q_2}{D_1 - D_2} = \frac{9,06 \frac{3,6}{5} - 7,9}{0,92 - 0,47} = -3,07 \text{ м/мин.}$$

Нанесем на график линию до пересечения с линией переформирования. С этого момента скопление людей начнет убывать со скоростью

$$v' = \frac{q_1 \frac{\delta_1}{\delta_2} - q_2}{D_1 - D_2} = \frac{9,06 \frac{3,6}{5} - 4,14}{0,92 - 0,11} = 2,94 \text{ м/мин.}$$

Чтобы избежать скопления людей, общую ширину выходных дверей следует довести до

$$\delta_0^{\text{треб}} = \frac{Q_{0,47}}{q_{0\text{макс}}} = \frac{39,46}{10,59} = 3,73 \approx 3,8 \text{ м.}$$

Анализ хода процесса в целом позволяет сделать следующие выводы.

Ширина выходных дверей (I, III и V) из зала может быть уменьшена до

$$\delta_0 = \frac{Q}{q_{0\text{макс}}} = \frac{10,08}{10,59} = 1 \text{ м;}$$

дверей II, IV и VI — до

$$\delta_0 = \frac{Q}{q_{0\text{макс}}} = \frac{15,7}{10,59} = 1,5 \text{ м.}$$

Ширина фойе может быть уменьшена в результате увеличения продолжительности процесса до 3 мин; для этого надо сделать повторные расчеты с меньшей шириной фойе. Если расчет ведется и по второму предельному состоянию, т. е. если, например, поставлена задача не допускать образования максимальной плотности, то следует кроме выходных дверей расширить продольные и поперечные проходы в зале.

§ 4. Промышленные здания

Промышленные здания, хотя и не относятся к общественным, но тем не менее достаточно близки к ним по условиям организации движения людских потоков. Поскольку промышленные здания весьма разнообразны по технологическим процессам и, следовательно, по числу занятых на производстве людей, то излагаемые ниже вопросы проектирования, связанные с учетом движения людских потоков, относятся лишь к зданиям с большой населенностью.

Подобно любым общественным зданиям в промышленных имеются следующие виды движения людских потоков: при заполнении здания перед началом смены, в обеденный перерыв движение к столовой и обратно, освобождение здания после окончания смены и, наконец, эвакуация людей в аварийных условиях.

По наблюдениям, движение людских потоков первых трех видов происходит в спокойной обстановке в течение относительно продолжительного времени; плотность потоков в большинстве случаев не превышает

ет 0,3. Поэтому такие виды движения не являются определяющими. Однако следует иметь в виду особенности проектирования гардеробных помещений в промышленных зданиях. Хранение одежды может быть открытым, смешанным и закрытым (в индивидуальных шкафчиках). При открытом хранении в зависимости от численного состава людского потока и времени его движения следует произвести расчет площади вестибюля и собственно гардероба с учетом характера обслуживания (с гардеробщиками, с частичным или полным самообслуживанием).

При смешанном или закрытом способах хранения рассчитываются размеры проходов в помещениях, где размещаются шкафчики. Проверку целесообразно делать как при заполнении, так и при освобождении помещений, считая, что движение происходит в нормальных условиях.

Чтобы определить заполнение бытовых помещений во времени, надо сделать по обычной методике расчет движения людских потоков от места формирования до гардероба по первому предельному состоянию. Далее необходимо установить среднюю продолжительность пребывания людей в бытовых помещениях в связи со сменой одежды, умыванием и прочими операциями в начале или в конце работы и установить максимальное количество одновременно находящихся в гардеробе людей. Зная количество людей и плотность потока, легко установить площадь этих помещений, после чего расчет ведется по второму предельному состоянию.

Определяющим видом движения людских потоков при проектировании чаще всего является аварийная эвакуация людей из зданий.

Расчет аварийной эвакуации и определение параметров путей движения людских потоков производятся по приведенной выше методике (§ 3—5 гл. 8) по первому и второму предельному состоянию и не имеют существенных особенностей. Однако если в зрелищном здании при возникновении аварийной ситуации люди в тот же момент могут начать движение, то в промышленном требуется некоторое время для остановки станка, прекращения подачи воды, пара, сжатого воздуха и т. д.; в противном случае опасность может сильно возрасти. Необходимое для этого время определяется особенностями производства.

В процессе проектирования промышленных зданий необходимо установить в них количество аварийных выходов. Для этого нужно произвести расчет движения людских потоков к намеченным выходам и определять соответствие времени $t_{\text{доп}}$ установленному нормами или специальным расчетом для данной категории производства. Если оказывается, что найденное значение $t > t_{\text{доп}}$, то после анализа процесса делается попытка соответственно изменить параметры путей движения и достигнуть $t \leq t_{\text{доп}}$. Если же изменение размеров не дает нужных результатов или значительно сокращает производственную площадь, то намечается устройство дополнительных выходов и делается новый проверочный расчет.

Современные одноэтажные промышленные здания часто имеют значительные размеры по ширине и длине. В этих случаях может оказаться, что невозможно устроить дополнительные выходы из здания так, чтобы люди могли достигнуть их в заданное время $t \leq t_{\text{доп}}$, поэтому дополнительные выходы можно устраивать через подземные тоннели, в которых должны быть предусмотрены защитные средства против задымления. В зависимости от конкретных производственных условий можно также эвакуировать людей из очага опасности в соседние производственные помещения. Таким образом, при аварийном движении через тоннели или соседние производственные помещения целесообразно проводить эвакуацию в два этапа:

$$t_{\text{доп}} = t'_{\text{доп}} + t''_{\text{доп}}, \quad (12.9)$$

где $t'_{\text{доп}}$ — время эвакуации из первой зоны непосредственной опасности во вторую с меньшей степенью опасности (в тоннель или в соседние производственные помещения); $t''_{\text{доп}}$ — время эвакуации из второй зоны за пределы здания.

Значения $t'_{\text{доп}}$ и $t''_{\text{доп}}$ устанавливаются нормами, заданием на проектирование или специальным расчетом. Расчет движения по первому предельному состоянию ведется обычным порядком.

В многоэтажных промышленных зданиях при проектировании основной задачей (в связи с движением людских потоков) является установление количества и выбор мест расположения различных устройств для обеспечения безопасной эвакуации людей из здания.

При решении этой задачи нужно исходить из следующих соображений. Капитальные лестницы обеспе-

чивают движение людских потоков в нормальных условиях; для движения в аварийных условиях, если капитальных лестниц недостаточно, устраиваются дополнительные аварийные. Следовательно, количество капитальных лестниц устанавливается по технологическим соображениям и проверяется расчетом на обеспечение движения людских потоков в нормальных условиях по первому или второму, или по обоим предельным состояниям в зависимости от конкретных условий. Затем делается расчет движения в аварийных условиях и, если оказывается, что капитальные лестницы не обеспечивают эвакуацию в заданное время, устраиваются аварийные.

При значительных размерах здания можно применить тот же принцип, что для одноэтажных зданий. Если по условиям производства такая возможность предоставляется, то ею целесообразно воспользоваться в первую очередь, ибо в ряде случаев можно избежать устройства дополнительных аварийных лестниц.

§ 5. Спортивные сооружения

Вместимость спортивных трибун достигает в настоящее время внушительных размеров — более 100 тыс. в открытых и 40—45 тыс. мест в закрытых сооружениях. Вследствие этого вопросы размещения зрителей, их передвижения и эвакуация приобретают важное значение.

Спортивные сооружения, как уже указывалось, подразделяются на две группы — закрытые и открытые. В закрытых, как и в театральных зданиях, возможны следующие виды движения людских потоков: заполнение трибун перед началом спортивного соревнования или концерта; перемещение во время перерывов, выход по окончании зрелища и аварийная эвакуация.

Заполнение людьми спортивного сооружения протекает по-разному в зависимости от характера предстоящего зрелища.

На рис. 12.8 представлена интенсивность этого процесса перед началом концертной программы и спортивным соревнованием. В первом случае (кривая *I*) интенсивность заполнения имеет ясно выраженный пик за 10—12 мин до начала концерта и довольно большой процент опоздавших (6%). Состав публики — пример-

но 45% мужчин и 55% женщин. Во втором случае (кривая II) пик растянут на 20 мин и начинается за полчаса до начала соревнования, процент опоздавших незначителен (2%). Примерно 75% зрителей — мужчины. Знание закономерностей процесса заполнения здания людьми дает возможность обоснованного расче-

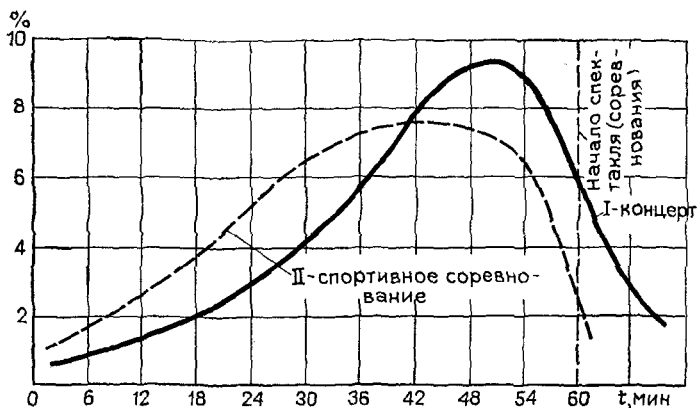


Рис. 12.8. Заполнение зрелищного здания во времени та и рациональной организации работы гардероба, определения необходимой площади вестибюлей, распределения людских потоков от гардероба на трибуны.

Движение зрителей во время перерывов происходит так же, как и в других зрелищных зданиях, и оно не является определяющим.

Наиболее ответственны последние два вида движения, особенно аварийная эвакуация. Оба вида характеризуются сравнительной кратковременностью и, следовательно, образованием больших людских потоков. Аварийная эвакуация, кроме того, отмечается весьма ограниченным сроком ее завершения, обусловленным возможностью осложнений в связи с аварией и зависящим от особенностей сооружения, поэтому при проектировании коммуникационных путей в спортивных сооружениях указанные виды движения (и прежде всего аварийное) являются основными.

Для правильного выбора размеров и видов путей эвакуации трибуны и коммуникационные помещения в остальной части сооружения должны рассчитываться с помощью методов, изложенных в предыдущих разделах.

Особенность трибун состоит в том, что почти все магистральные пути движения представляют лестницы с различными уклонами. На основании натурных исследований [6] их можно свести в две группы — от 1 : 1,5 до 1 : 2 и от 1 : 2 до 1 : 3,5.

Сравнение закономерностей движения по лестницам при таких уклонах с данными, приведенными в прил. I, позволило вывести количественные значения коэффициентов Ψ , отражающих особенность спортивных трибун. Для уклонов от 1 : 1,5 до 1 : 2 при спуске по лестнице этот коэффициент равен 0,86, а при уклонах от 1 : 2 до 1 : 3,5 — единице. При подъеме по лестнице значения Ψ соответственно равны 0,88 и 1,09.

Из этого следует, что, во-первых, подъем по лестнице происходит несколько быстрее, чем спуск, и, во-вторых, более крутые уклоны менее целесообразны, чем пологие, поэтому наиболее экономичным решением является направление потоков вверх по лестницам с менее крутыми уклонами.

Движение публики по горизонтальным путям в партере характеризуется коэффициентом $\Psi=1$, а по горизонтальным путям у люков — $\Psi=1,17$.

Приведенные выше коэффициенты могут быть положены в основу расчета путей движения потоков в спортивных сооружениях.

Пример. Определить время эвакуации зрителей с трибун сектора спортивного зала в аварийных условиях. Допустимая продолжительность эвакуации в этих условиях установлена 2,25 мин. Движение происходит вниз по лестницам с уклоном от 1 : 1,5 до 1 : 2. Остальные данные: $\delta=2$ м; $m=25$; $n=8$; $\delta_p=0,6$ м; $d_p=0,8$ м; $N=20$ м²; $L_p=11,25$ м.

Решение. Расчетная схема приведена на рис. 12.9. Плотность потока в ряду определяется из выражения:

$$D_p = \frac{f}{\delta_p l} = \frac{1}{0,45 \cdot 0,6} = 0,37.$$

По прил. I находим:

$$\begin{aligned} v_p &= 25,7 \text{ м/мин}; \quad q_p = 9,53 \text{ м/мин}; \\ Q_p &= \delta_p q_p = 0,6 \cdot 9,53 = 5,73 \text{ м}^2/\text{мин}; \\ t_p &= \frac{L_p}{v_p} = \frac{11,25}{25,7} = 0,438 \text{ мин}; \\ q_1 &= \frac{q_p \delta_p}{\delta} = \frac{9,53 \cdot 0,6}{2} = 2,85 \text{ м/мин}; \\ v_1 &= 35,6 \text{ м/мин}; \quad D_1 = 0,08; \end{aligned}$$

$$q_{II} = \frac{2 Q_p}{\delta} = \frac{9,53 \cdot 0,6 + 9,53 \cdot 0,6}{2} = 5,7 \text{ м/мин};$$

$$v_{II} = 23,8 \text{ м/мин}; D_{II} = 0,24;$$

$$v' = \frac{q_{II} - q_I}{D_{II} - D_I} = \frac{5,7 - 2,85}{0,24 - 0,08} = 17,9 \text{ м/мин};$$

$$q_{III} = 4,62 \text{ м/мин}; v_{III} = 5,02 \text{ м/мин}; D_{III} = 0,92;$$

$$t_1 = \frac{d_p}{v_I} = \frac{0,8}{35,6} = 0,0225 \text{ мин}; t_2 = \frac{d_p}{v'} =$$

$$= \frac{0,8}{17,9} = 0,0445 \text{ мин};$$

$$t_x = d_p \frac{D_{II}}{\Delta q} = 0,8 \frac{0,24}{2,85} = 0,0675 \text{ мин};$$

$$v_{VIII-8}^* = \frac{q_{II} - q_{III}}{D_{II} - D_{III}} = \frac{5,7 - 4,62}{0,24 - 0,11} = 8,3 \text{ м/мин};$$

$$t_3 = \frac{d}{v_{VIII-8}^*} = \frac{0,8}{8,3} = 0,096 \text{ мин}.$$

Распределение потока частями при $D_{\text{макс}}$:

$$\gamma = \frac{\delta_p q_p}{\delta_p q_p + q \delta} = \frac{0,6 \cdot 9,68}{2 \cdot 4,62 + 0,6 \cdot 9,68} = \frac{5,8}{15,04} = 0,385;$$

$$v_p = \frac{\delta q}{\delta_p q_p + q \delta} = \frac{2 \cdot 4,62}{15,04} = 0,615.$$

Скорость скопления при $D_{\text{макс}}$ на лестнице:

$$v' = \frac{q \gamma_p - q_{II}}{D_{\text{макс}} - D_{II}} = \frac{4,62 \cdot 0,615 - 5,7}{0,92 - 0,24} = -4,22 \text{ м/мин};$$

$$t = \frac{d_p}{v'} = \frac{0,8}{4,22} = 0,19 \text{ мин}.$$

Скорость скопления при $D_{\text{макс}}$ в ряду:

$$v_p^* = \frac{q \gamma - q_p}{D_{\text{макс}} - D_p} = \frac{9,68 \cdot 0,385 - 9,53}{0,92 - 0,37} = -10,6 \text{ м/мин};$$

$$t_p = \frac{d_p}{v_p^*} = \frac{0,8}{10,6} = 0,075 \text{ мин}.$$

Скорость скопления при $D_{\text{макс}}$ на лестнице при движении с плотностью $0,11 \text{ м}^2/\text{м}^2$:

$$v'_{II} = \frac{q\delta - q'}{D_{\max} - D_{VIII}} = \frac{4,62 \cdot 0,615 - 4,62}{0,92 - 0,11} = -2,21 \text{ м/мин};$$

$$t_{II} = \frac{d_p}{v'_{II}} = \frac{0,8}{2,21} = 0,362 \text{ мин.}$$

Скорость скопления при D_{\max} на лестнице на участке I:

$$v'_I = \frac{q\gamma - q_I}{D_{\max} - D_I} = \frac{4,62 \cdot 0,615 - 2,85}{0,92 - 0,08} = -0,24 \text{ м/мин};$$

$$t_I = \frac{d_p}{v'_I} = \frac{0,8}{0,24} = 3,33 \text{ мин};$$

$$v_p = 25,7 \text{ м/мин}; \text{ время одного ряда } t = \frac{0,8}{25,7} = 0,31 \text{ мин.}$$

Скорость выхода потока из 8-го ряда на участок лестницы:

$$v'_8 = v_8 \gamma_p = 10,52 \cdot 0,385 = 4,05 \text{ м/мин};$$

$$t_8 = \frac{d_p}{v'_8} = \frac{0,8}{4,05} = 0,197 \text{ мин.}$$

Скорость движения замыкающей части потока:

$$v_I = v_{\max} \gamma = 5,02 \cdot 0,615 = 3,08 \text{ м/мин};$$

$$t = \frac{d_p}{v_I} = \frac{0,8}{3,08} = 0,26 \text{ мин.}$$

Скорость движения после встречи конца основного потока с потоком из 2-го ряда ($v_I = 3,08$ м/мин) составит $v'_p = 10,6$ м/мин, что соответствует скорости движения при максимальной плотности по горизонтальному пути:

$$t_p = \frac{d_p}{v'_p} = \frac{0,8}{10,6} = 0,075 \text{ мин.}$$

Параметры движения основного потока и части из 2-го ряда на участке II лестницы:

$$v'_{II-3} = \frac{q\gamma - q_I}{D_{\max} - D_I} = \frac{4,62 \cdot 0,615 - 2,85}{0,92 - 0,08} = 0.$$

Скорость движения по участку III:

$$v'_{III} = \frac{q_{III} - q_3}{D_{\max} - D} = \frac{4,62 - 2,85}{0,92 - 0,08} = 2,1 \text{ м/мин};$$

$$t_{III} = \frac{d_p}{v'_{III}} = \frac{0,8}{2,1} = 0,381 \text{ мин.}$$

После слияния конца основного потока и потока из 3-го ряда на участке III лестницы конец объединенного потока приобретает скорость, соответствующую движению потока при $D_{\text{макс}}$ по лестнице вниз:

$$v_{\text{III}} = 5,02 \text{ м/мин}; \quad t_{\text{III}} = \frac{0,8}{5,02} = 0,159 \text{ мин.}$$

Далее движение протекает аналогично: потоки из рядов выходят и встречаются с замыкающей частью основного потока, имеющего ту же скорость и плотность, поэтому расчет здесь не повторяется, а завершается на графике (рис. 12.9).

Скорость потока по участку VIII лестницы будет соответствовать его плотности 0,11 и составит $v_{\text{VIII}} = 42,8 \text{ м/мин}$; отсюда:

$$t_{\text{VIII}} = \frac{0,8}{42,8} = 0,0187 \text{ мин};$$

$$t_{\text{эвак}} = 0,0445 + 0,046 + 2,09 = 2,18 \text{ мин.}$$

Проверка:

$$N_x = Q_x t_x = 0,0445 \cdot 2 \cdot 3,65 = 0,326 \text{ м}^2$$

$$N_y = Q_y t_y = 0,046 \cdot 2 \cdot 5,48 = 0,504 \text{ м}^2$$

$$N_z = Q_z t_z = 2,09 \cdot 2 \cdot 4,62 = 19,31 \text{ м}^2$$

$$\text{Итого } N = 20,14 > 20 \text{ м}^2$$

Ошибка составляет 0,7%, что вполне допустимо.

Итак, для того чтобы эвакуировать заданное число зрителей при движении их вниз, требуется площадь прохода $S = L\delta = 6,4 \cdot 2 = 12,8 \text{ м}^2$.

Расчет эвакуации, повторенный для приведенного примера, но при движении потока вверх по лестнице за то же время ($t_{\text{доп}} = 2,25 \text{ мин}$), показал, что необходимая ширина лестницы составляет лишь $\delta = 1,33 \text{ м}$ и, следовательно, площадь эвакуационного прохода на трибуне равна: $S = L\delta = 6,4 \cdot 1,33 = 8,42 \text{ м}^2$. Экономия составляет 4,36 м², или 12 дополнительных мест, т. е. 4,8% общего количества расчетных мест этого сектора.

Расчет эвакуации за пределами зрительного зала ничем не отличается от эвакуации этого типа для кинотеатров или театральных зданий. Характер движения потоков, пути, по которым они движутся, а также законы их переформирования остаются теми же.

В закрытых спортивных сооружениях вокруг трибун обычно устраиваются фойе. Для предупреждения задымления фойе при пожаре, что может крайне осложнить эвакуацию зрителей с трибун, рекомендуется разделять фойе на отсеки легкими дымонепроницаемыми перегородками с дверями. В этом случае задымленным окажется только один отсек, а не все помещение, и эвакуация зрителей через остальные отсеки будет

безопаснее. Это целесообразно иметь в виду при расчете количества, ширины и местоположения выходов (люков) из зрительного зала.

При проектировании открытых спортивных сооружений главная задача состоит в определении размеров путей движения, удовлетворяющих требованиям нормальной эксплуатации, поскольку здесь отсутствует непосредственная опасность пожара и, следовательно, нет необходимости в аварийной эвакуации зрителей.

Расчетные предпосылки, выведенные коэффициенты условий движения потоков и методика расчета трибун остаются такими же, как и для закрытых спортивных сооружений.

BOOKS.PROEKTANT.ORG

**БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОННЫХ
КОПИЙ КНИГ**

**для проектировщиков
и технических специалистов**

**РАСЧЕТНЫЕ ТАБЛИЦЫ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ
ЛЮДСКИХ ПОТОКОВ (* ОТМЕЧЕНЫ ЗНАЧЕНИЯ $q_{\text{макс}}$)**

D	Виды движения							
	аварийное (наибольшие возможные значения)		аварийное (средние значения)		нормальное		комфортное	
	v	q	v	q	v	q	v	q
По горизонтальным путям								
0,01	—	—	81,5	0,82	54,87	0,55	—	—
0,02	115,30	2,30	78,3	1,57	52,83	1,06	33,5	0,67
0,03	—	—	75,2	2,26	50,87	1,53	—	—
0,04	106,00	4,24	72	2,89	48,99	1,96	31,3	1,25
0,05	—	—	69,46	3,47	47,19	2,36	—	—
0,06	97,00	5,82	66,74	4,00	45,46	2,73	29,15	1,75
0,07	—	—	64,18	4,49	43,81	3,07	—	—
0,08	89,80	7,18	61,71	4,94	42,24	3,38	27,45	2,20
0,09	—	—	59,37	5,34	40,72	3,66	—	—
0,10	82,70	8,27	57,10	5,71	39,27	3,93	25,70	2,57
0,11	—	—	54,94	6,04	37,89	4,17	—	—
0,12	76,20	9,14	52,92	6,35	36,57	4,39	24,12	2,89
0,13	—	—	50,97	6,63	35,32	4,61	—	—
0,14	70,52	9,84	49,15	6,88	34,13	4,78	22,70	3,18
0,15	—	—	47,39	7,11	33,00	4,95	—	—
0,16	65,30	10,45	45,68	7,31	31,90	5,10	21,40	3,42
0,17	—	—	44,11	7,50	30,87	5,25	—	—
0,18	60,60	10,90	42,61	7,67	29,90	5,38	20,20	3,64
0,19	—	—	41,20	7,82	28,97	5,50	—	—
0,20	56,50	11,30	39,85	7,97	28,10	5,62	19,10	3,82
0,21	—	—	38,56	8,10	27,27	5,73	—	—
0,22	52,70	11,60	37,32	8,21	26,47	5,82	18,13	3,98
0,23	—	—	36,22	8,33	25,74	5,92	—	—
0,24	49,45	11,87	35,13	8,43	25,04	6,01	17,53	4,20
0,25	—	—	34,11	8,53	24,38	6,10	—	—
0,26	46,40	12,07	33,16	8,62	23,75	6,18	16,70	4,34
0,27	—	—	32,25	8,71	23,17	6,26	—	—
0,28	43,78	12,26	31,40	8,79	22,62	6,33	15,85	4,44
0,29	—	—	30,59	8,87	22,09	6,41	—	—
0,30	41,40	12,40	29,87	8,96	21,61	6,48	15,15	4,55
0,31	—	—	29,14	9,03	21,15	6,56	—	—
0,32	39,30	12,58	28,49	9,12	20,72	6,63	14,70	4,70
0,33	—	—	27,86	9,19	20,32	6,71	—	—
0,34	37,40	12,70	27,29	9,28	19,95	6,78	14,27	4,85
0,35	—	—	26,75	9,36	19,61	6,86	—	—
0,36	35,80	12,90	26,22	9,44	19,28	6,94	13,89	5,00
0,37	—	—	25,74	9,52	18,97	7,02	—	—
0,38	34,35	13,05	25,29	9,61	18,69	7,10	13,55	5,15

D	Виды движения							
	аварийное (наибольшие возможные значения)		аварийное (средние значения)		нормальное		комфортное	
	σ	φ	σ	φ	σ	φ	σ	φ
0,39	—	—	24,88	9,70	18,43	7,19	—	—
0,40	33,10	13,25	24,48	9,79	18,19	7,28	13,27	5,31
0,41	—	—	24,10	9,88	17,96	7,36	—	—
0,42	32,00	13,44	23,78	9,99	17,76	7,46	13,05	5,48
0,43	—	—	23,43	10,07	17,55	7,55	—	—
0,44	30,95	13,60	23,14	10,18	17,37	7,64	12,85	5,66
0,45	—	—	22,83	10,27	17,19	7,74	—	—
0,46	30,00	13,80	22,55	10,37	17,03	7,83	12,70	5,85
0,47	—	—	22,32	10,49	16,90	7,94	—	—
0,48	29,20	14,07	22,07	10,59	16,76	8,04	12,49	5,99
0,49	—	—	21,84	10,70	16,62	8,14	—	—
0,50	28,45	14,20	21,62	10,81	16,50	8,25	12,45	6,22
0,51	—	—	21,39	10,91	16,38	8,35	—	—
0,52	27,75	14,42	21,21	11,03	16,28	8,47	12,38	6,44
0,53	—	—	21,00	11,13	16,17	8,57	—	—
0,54	27,10	14,63	20,80	11,23	16,05	8,67	12,29	6,63
0,55	—	—	20,63	11,35	15,97	8,78	—	—
0,56	26,45	14,80	20,43	11,44	15,86	8,88	12,21	6,85
0,57	—	—	20,26	11,55	15,77	8,99	—	—
0,58	25,81	15,00	20,07	11,64	15,67	9,09	12,15	7,05
0,59	—	—	19,91	11,75	15,58	9,19	—	—
0,60	25,20	15,10	19,72	11,83	15,48	9,29	12,05	7,23
0,61	—	—	19,52	11,90	15,37	9,38	—	—
0,62	24,60	15,25	19,36	12,00	15,28	9,47	12,00	7,44
0,63	—	—	19,14	12,06	15,16	9,55	—	—
0,64	24,00	15,35	18,99	12,15	15,07	9,64	11,90	7,62
0,65	—	—	18,78	12,21	14,95	9,72	—	—
0,66	23,34	15,40	18,57	12,26	14,83	9,79	11,80	7,80
0,67	—	—	18,37	12,31	14,71	9,85	—	—
0,68	22,65	15,40	18,16	12,35	14,59	9,92	11,67	7,93
0,69	—	—	17,96	12,39	14,46	9,98	—	—
0,70	21,95	15,43	17,72	12,40	14,31	10,02	11,55	8,08
0,71	—	—	17,47	12,40	14,16	10,05	—	—
0,72	21,55	15,50*	17,20	12,42*	14,02	10,09	11,37	8,18
0,73	—	—	16,99	12,40	13,85	10,11	—	—
0,74	20,42	15,10	16,73	12,39	13,67	10,12	11,13	8,24
0,75	—	—	16,48	12,36	13,51	10,13*	—	—
0,76	19,70	14,97	16,20	12,31	13,32	10,12	10,92	8,30
0,77	—	—	15,91	12,25	13,12	10,10	—	—
0,78	18,86	14,70	15,62	12,18	12,92	10,08	10,65	8,30*
0,79	—	—	15,32	12,10	12,70	10,03	—	—
0,80	18,0	14,40	15,00	12,00	12,48	9,98	10,36	8,29

D	Виды движения							
	аварийное (наибольшие возможные значения)		аварийное (средние значения)		нормальное		комфортное	
	v	q	v	q	v	q	v	q
0,81	—	—	14,66	11,87	12,24	9,91	—	—
0,82	17,05	14,00	14,39	11,80	12,00	9,84	10,02	8,20
0,83	—	—	13,98	11,60	11,74	9,74	—	—
0,84	16,10	13,51	13,64	11,46	11,48	9,64	9,63	8,10
0,85	—	—	13,31	11,31	11,24	9,55	—	—
0,86	15,13	13,00	12,91	11,10	10,93	9,40	9,23	7,94
0,87	—	—	12,51	10,88	10,63	9,25	—	—
0,88	14,10	12,40	12,13	10,67	10,34	9,09	8,78	7,73
0,89	—	—	11,72	10,43	10,02	8,92	—	—
0,90	13,05	11,75	11,31	10,18	9,70	8,73	8,30	7,47
0,91	—	—	10,89	9,91	9,37	8,53	—	—
0,92	12,01	11,10	10,52	9,68	9,08	8,35	7,80	7,18
0,92	—	8,50	—	8,50	—	—	—	—
Через проемы								
0	111,80	0	98,01	0	65,78	0	41,45	0
0,01	—	—	94,75	0,95	63,76	0,64	—	—
0,02	104,30	2,08	91,66	1,84	61,81	1,24	39,55	0,79
0,03	—	—	88,62	2,66	59,92	1,80	—	—
0,04	97,40	3,90	85,76	3,42	58,10	2,32	37,50	1,50
0,05	—	—	82,87	4,15	56,30	2,82	—	—
0,06	90,90	5,45	80,15	4,82	54,60	3,28	35,50	2,13
0,07	—	—	77,60	5,44	52,97	3,71	—	—
0,08	84,75	6,78	75,04	6,00	51,36	4,11	33,83	2,71
0,09	—	—	72,67	6,55	49,84	4,49	—	—
0,10	79,30	7,93	70,29	7,03	48,34	4,83	31,70	3,17
0,11	—	—	68,02	7,48	46,91	5,16	—	—
0,12	74,20	8,90	65,94	7,90	45,53	5,46	30,30	3,64
0,13	—	—	63,77	8,28	44,19	5,74	—	—
0,14	69,35	9,70	61,78	8,65	42,90	6,01	28,75	4,02
0,15	—	—	59,85	8,98	41,68	6,25	—	—
0,16	64,93	10,39	57,92	9,27	40,45	6,47	27,30	4,37
0,17	—	—	56,16	9,55	39,30	6,68	—	—
0,18	61,00	11,00	54,45	9,80	38,21	6,88	25,80	4,65
0,19	—	—	52,81	10,04	37,14	7,06	—	—
0,20	57,20	11,45	51,25	10,25	36,14	7,23	24,60	4,92
0,21	—	—	49,70	10,44	35,15	7,38	—	—
0,22	53,70	11,81	48,22	10,60	34,20	7,52	23,40	5,15
0,23	—	—	46,90	10,78	33,33	7,66	—	—
0,24	50,50	12,11	45,57	10,94	32,48	7,80	22,40	5,37
0,25	—	—	44,28	11,07	31,65	7,91	—	—

D	Виды движения							
	аварийное (наибольшие возможные значения)		аварийное (средние значения)		нормальное		комфортное	
	v	q	v	q	v	q	v	q
0,26	47,70	12,40	43,07	11,20	30,85	8,02	21,42	5,58
0,27	—	—	41,93	11,32	30,12	8,13	—	—
0,28	45,15	12,65	40,82	11,42	29,41	8,23	20,60	5,77
0,29	—	—	39,78	11,54	28,72	8,33	—	—
0,30	42,70	12,80	33,79	11,64	28,07	8,42	19,63	5,89
0,31	—	—	37,83	11,73	27,45	8,51	—	—
0,32	40,50	12,95	36,92	11,81	26,85	8,59	19,05	6,10
0,33	—	—	36,02	11,89	26,27	8,67	—	—
0,34	38,60	13,10	35,21	11,97	25,74	8,75	18,40	6,25
0,35	—	—	34,43	12,04	25,24	8,83	—	—
0,36	36,80	13,24	33,67	12,12	24,76	8,91	17,80	6,40
0,37	—	—	32,95	12,19	24,28	8,98	—	—
0,38	35,20	13,39	32,24	12,26	23,83	9,06	17,30	6,57
0,39	—	—	31,58	12,33	23,39	9,13	—	—
0,40	33,70	13,47	30,97	12,39	23,01	9,20	16,80	6,72
0,41	—	—	30,37	12,45	22,63	9,28	—	—
0,42	32,30	13,57	29,82	12,52	22,27	9,35	16,36	6,87
0,43	—	—	29,24	12,58	21,90	9,42	—	—
0,44	31,00	13,64	28,72	12,64	21,56	9,49	15,92	7,00
0,45	—	—	28,17	12,68	21,21	9,55	—	—
0,46	29,80	13,70	27,67	12,72	20,90	9,61	15,57	7,16
0,47	—	—	27,24	12,78	20,62	9,69	—	—
0,48	28,72	13,79	26,75	12,84	20,31	9,75	15,23	7,31
0,49	—	—	26,32	12,89	20,03	9,81	—	—
0,50	27,70	13,85	25,87	12,94	19,75	9,88	14,90	7,45
0,51	—	—	25,43	12,98	19,47	9,94	—	—
0,52	26,80	13,93	25,06	13,03	19,23	10,00	14,62	7,60
0,53	—	—	24,66	13,07	18,98	10,06	—	—
0,54	25,85	13,97	24,25	13,11	18,71	10,12	14,31	7,74
0,55	—	—	23,89	13,14	18,49	10,17	—	—
0,56	25,00	14,00*	23,51	13,16	18,25	10,22	14,05	7,87
0,57	—	—	23,14	13,20	18,01	10,27	—	—
0,58	24,10	13,98	22,76	13,21	17,77	10,31	13,78	8,00
0,59	—	—	22,42	13,23	17,54	10,35	—	—
0,60	23,30	13,95	22,07	13,24	17,32	10,39	13,50	8,10
0,61	—	—	21,70	13,24	17,09	10,42	—	—
0,62	22,50	13,94	21,39	13,25	16,88	10,46	13,25	8,22
0,63	—	—	21,03	13,25	16,65	10,49	—	—
0,64	21,75	13,90	20,74	13,27*	16,46	10,53	13,00	8,32
0,65	—	—	20,37	13,25	16,22	10,55	—	—
0,66	20,95	13,82	20,02	13,21	15,99	10,55	12,70	8,38
0,67	—	—	19,66	13,19	15,74	10,56	—	—

D	Виды движения							
	аварийное (наибольшие возможные значения)		аварийное (средние значения)		нормальное		комфортное	
	v	q	v	q	v	q	v	q
0,68	20,18	13,72	19,32	13,16	15,52	10,57	12,41	8,45
0,69	—	—	19,04	13,13	15,33	10,57	—	—
0,70	19,40	13,58	18,71	13,10	15,11	10,58	12,20	8,55
0,71	—	—	18,39	13,07	14,90	10,58	—	—
0,72	18,77	13,50	18,11	13,04	14,71	10,59*	11,92	8,59
0,73	—	—	17,78	12,98	14,49	10,58	—	—
0,74	18,00	13,31	17,47	12,92	14,27	10,56	11,62	8,60
0,75	—	—	17,18	12,87	14,08	10,55	—	—
0,76	17,35	13,18	16,87	12,82	13,37	10,54	11,37	8,63
0,77	—	—	16,55	12,76	13,64	10,52	—	—
0,78	16,65	12,98	16,25	12,67	13,44	10,48	11,10	8,65*
0,79	—	—	15,93	12,59	13,21	10,44	—	—
0,80	15,95	12,76	15,61	12,49	12,99	10,39	10,78	8,63
0,81	—	—	15,27	12,38	12,75	10,33	—	—
0,82	15,21	12,48	14,97	12,27	12,53	10,27	10,47	8,57
0,83	—	—	14,63	12,14	12,28	10,19	—	—
0,84	14,70	12,18	14,29	12,01	12,03	10,11	10,10	8,50
0,85	—	—	13,98	11,85	11,81	10,02	—	—
0,86	13,75	11,82	13,62	11,72	11,53	9,92	9,75	8,39
0,87	—	—	13,25	11,53	11,26	9,80	—	—
0,88	12,98	11,42	12,89	11,34	10,99	9,67	9,33	8,21
0,89	—	—	12,52	11,14	10,70	9,52	—	—
0,90	12,20	10,97	12,14	10,93	10,41	9,37	8,90	8,00
0,91	—	—	11,75	10,71	10,11	9,22	—	—
0,92	11,40	10,49	11,42	10,50	9,85	9,06	8,48	7,80
> 0,92	—	8,50	—	8,50	—	—	—	—

По лестнице вниз

0	79,60	0	60,21	0	49,76	0	37,82	0
0,01	—	—	59,48	0,59	49,16	0,49	—	—
0,02	77,50	1,55	58,75	1,17	48,55	0,97	36,91	0,74
0,03	—	—	57,98	1,74	47,92	1,44	—	—
0,04	75,25	3,05	57,21	2,29	47,28	1,89	35,90	1,48
0,05	—	—	56,13	2,81	46,39	2,32	—	—
0,06	72,45	4,34	55,18	3,92	45,60	2,74	34,67	2,08
0,07	—	—	54,17	3,79	44,77	3,13	—	—
0,08	69,50	5,55	53,20	4,26	43,97	3,52	33,36	2,96
0,09	—	—	52,13	4,69	43,08	3,88	—	—
0,10	66,50	6,65	51,04	5,11	42,18	4,22	32,07	3,21

D	Виды движения							
	аварийное (наибольшие возможные значения)		аварийное (средние значения)		нормальное		комфортное	
	v	q	v	q	v	q	v	q
0,11	—	—	49,92	5,49	41,26	4,54	—	—
0,12	63,45	7,61	48,76	5,86	40,30	4,84	30,60	3,67
0,13	—	—	47,65	6,20	39,38	5,12	—	—
0,14	60,26	8,45	46,54	6,51	38,46	5,38	29,22	4,10
0,15	—	—	45,40	6,81	37,52	5,63	—	—
0,16	57,25	9,16	44,27	7,08	36,59	5,85	27,80	4,45
0,17	—	—	43,10	7,32	35,62	6,05	—	—
0,18	54,10	9,73	41,96	7,55	34,68	6,24	26,35	4,74
0,19	—	—	40,91	7,77	33,81	6,42	—	—
0,20	51,20	10,24	39,82	7,96	32,91	6,58	25,00	5,00
0,21	—	—	38,77	8,14	32,04	6,73	—	—
0,22	48,32	10,63	37,70	8,30	31,16	6,86	24,0	5,28
0,23	—	—	36,66	8,43	30,30	6,97	—	—
0,24	45,52	10,93	35,60	8,54	29,42	7,06	22,38	5,37
0,25	—	—	34,63	8,65	28,62	7,15	—	—
0,26	42,90	11,17	33,65	8,75	27,81	7,23	21,15	5,50
0,27	—	—	32,66	8,82	26,99	7,29	—	—
0,28	40,38	11,29	31,73	8,88	26,22	7,34	19,93	5,58
0,29	—	—	30,79	8,93	25,45	7,38	—	—
0,30	37,90	11,36	29,94	8,98	24,74	7,42	18,80	5,64
0,31	—	—	29,08	9,01	24,03	7,45	—	—
0,32	35,65	11,40	28,23	9,04	23,33	7,47	17,61	5,64
0,33	—	—	27,44	9,05	22,68	7,48	—	—
0,34	33,55	11,40*	26,62	9,05*	22,00	7,48*	16,70	5,68*
0,35	—	—	25,85	9,04	21,36	7,47	—	—
0,36	31,53	11,36	25,11	9,04	20,75	7,47	15,76	5,67
0,37	—	—	24,38	9,01	20,15	7,45	—	—
0,38	29,60	11,21	23,63	8,98	19,53	7,42	14,84	5,64
0,39	—	—	22,97	8,95	18,98	7,40	—	—
0,40	27,85	11,14	22,30	8,92	18,43	7,37	14,00	5,60
0,41	—	—	21,64	8,87	17,89	7,33	—	—
0,42	26,10	10,97	20,97	8,81	17,33	7,28	13,17	5,53
0,43	—	—	20,34	8,75	16,81	7,23	—	—
0,44	24,48	10,77	19,74	8,69	16,31	7,18	12,40	5,36
0,45	—	—	19,12	8,60	15,80	7,11	—	—
0,46	23,00	10,58	18,59	8,54	15,36	7,06	11,67	5,36
0,47	—	—	18,04	8,47	14,91	7,00	—	—
0,48	21,52	10,33	17,44	8,37	14,41	6,92	10,95	5,26
0,49	—	—	16,89	8,28	13,96	6,84	—	—
0,50	20,10	10,05	16,35	8,18	13,51	6,76	10,27	5,13

D	Виды движения							
	аварийное (наибольшие возможные значения)		аварийное (средние значения)		нормальное		комфортное	
	v	q	v	q	v	q	v	q
0,51	—	—	15,79	8,06	13,05	6,66	—	—
0,52	18,75	9,75	15,27	7,94	12,62	6,56	9,60	5,00
0,53	—	—	14,79	7,84	12,22	6,48	—	—
0,54	17,53	9,47	14,31	7,73	11,83	6,39	9,00	4,86
0,55	—	—	13,83	7,61	11,43	6,29	—	—
0,56	16,30	9,14	13,37	7,49	11,05	6,19	8,40	4,71
0,57	—	—	12,93	7,37	10,69	6,09	—	—
0,58	15,23	8,83	12,54	7,27	10,36	6,01	7,87	4,55
0,59	—	—	12,12	7,15	10,02	5,91	—	—
0,60	14,20	8,52	11,72	7,03	9,69	5,81	7,36	4,42
0,61	—	—	11,35	6,92	9,38	5,72	—	—
0,62	13,28	8,24	10,99	6,81	9,08	5,63	6,90	4,28
0,63	—	—	10,60	6,68	8,76	5,52	—	—
0,64	12,40	7,93	10,30	6,58	8,51	5,44	6,47	4,14
0,65	—	—	9,98	6,49	8,25	5,36	—	—
0,66	11,60	7,67	9,66	6,38	7,98	5,27	6,06	4,00
0,67	—	—	9,34	6,26	7,72	5,17	—	—
0,68	10,84	7,37	9,05	6,15	7,48	5,08	5,69	3,87
0,69	—	—	8,82	6,07	7,29	5,02	—	—
0,70	10,10	7,08	8,57	6,00	7,08	4,96	5,38	3,77
0,71	—	—	8,35	6,93	6,90	4,90	—	—
0,72	9,65	6,95	8,11	5,83	6,70	4,82	5,10	3,67
0,73	—	—	7,88	5,75	6,51	4,75	—	—
0,74	9,13	6,75	7,70	5,70	6,36	4,71	4,84	3,58
0,75	—	—	7,54	5,65	6,23	4,67	—	—
0,76	8,72	6,62	7,37	5,60	6,09	4,63	4,63	3,52
0,77	—	—	7,21	5,55	5,96	4,59	—	—
0,78	8,35	6,51	7,08	5,52	5,85	4,56	4,45	3,47
0,79	—	—	6,96	5,49	5,75	4,54	—	—
0,80	8,03	6,43	6,84	4,47	5,65	4,52	4,29	3,44
0,81	—	—	6,73	5,45	5,56	4,50	—	—
0,82	7,77	6,38	6,63	5,43	5,48	4,49	4,17	3,43
0,83	—	—	6,55	5,43	5,41	4,49	—	—
0,84	7,57	6,36	6,47	5,43	5,35	4,49	4,07	3,42
0,85	—	—	6,41	5,43	5,30	4,49	—	—
0,86	7,35	6,33	6,32	5,42	5,22	4,48	3,97	3,41
0,87	—	—	6,22	5,41	5,14	4,47	—	—
0,88	7,14	6,30	6,14	5,41	5,08	4,47	3,86	3,40
0,89	—	—	6,10	5,41	5,04	4,48	—	—
0,90	6,98	6,28	6,03	5,41	4,98	4,48	3,78	3,40
0,91	—	—	5,93	5,40	4,90	4,46	—	—
0,92	6,68	6,15	5,86	5,38	4,84	4,45	3,68	3,39

D	Виды движения							
	аварийное (наибольшие возможные значения)		аварийное (средние значения)		нормальное		комфортное	
	v	q	v	q	v	q	v	q
>0,92	—	5,38	—	5,38	—	—	—	—

По лестнице вверх

0	73,80	0	56,39	0	44,75	0	36,70	0
0,01	—	—	55,24	0,55	43,84	0,44	—	—
0,02	70,33	1,41	53,99	1,08	42,85	0,86	35,10	0,70
0,03	—	—	52,69	1,58	41,82	1,25	—	—
0,04	66,50	2,66	51,29	2,05	40,71	1,63	33,35	1,40
0,05	—	—	49,83	2,49	39,55	1,98	—	—
0,06	62,40	3,74	48,35	2,90	38,37	2,30	31,43	1,89
0,07	—	—	46,81	3,28	37,15	2,60	—	—
0,08	58,00	4,64	45,23	3,62	35,90	2,87	29,43	2,35
0,09	—	—	43,66	3,93	34,65	3,12	—	—
0,10	53,80	5,38	42,01	4,20	33,34	3,33	27,35	2,73
0,11	—	—	40,38	4,44	32,05	3,52	—	—
0,12	49,40	5,93	38,75	4,65	30,76	3,69	25,20	3,01
0,13	—	—	37,27	4,85	29,58	3,85	—	—
0,14	45,28	6,34	35,70	5,00	28,33	3,97	23,20	3,25
0,15	—	—	34,22	5,13	27,16	4,07	—	—
0,16	41,30	6,61	32,76	5,24	26,00	4,16	21,32	3,41
0,17	—	—	31,42	5,34	24,94	4,24	—	—
0,18	37,61	6,77	30,14	5,43	23,92	4,31	19,60	3,53
0,19	—	—	28,90	5,49	22,94	4,36	—	—
0,20	34,70	6,95	27,80	5,56	22,06	4,41	18,10	3,61
0,21	—	—	26,74	5,62	21,22	4,46	—	—
0,22	32,08	7,06	25,74	5,66	20,43	4,49	16,75	3,69
0,23	—	—	24,85	5,71	19,72	4,53	—	—
0,24	29,72	7,13	24,04	5,77	19,08	4,58	15,63	3,75
0,25	—	—	23,28	5,82	18,48	4,62	—	—
0,26	27,92	7,26	22,59	5,87	17,93	4,66	14,70	3,82
0,27	—	—	21,99	5,93	17,45	4,71	—	—
0,28	26,25	7,35	21,43	6,00	17,01	4,76	13,95	3,91
0,29	—	—	20,93	6,07	16,61	4,82	—	—
0,30	25,00	7,50	20,50	6,15	16,27	4,88	13,34	4,00
0,31	—	—	20,12	6,24	15,97	4,95	—	—
0,32	23,98	7,68	19,77	6,32	15,69	5,02	12,85	4,11
0,33	—	—	19,43	6,41	15,42	5,09	—	—
0,34	23,13	7,86	19,15	6,51	15,20	5,17	12,47	4,24
0,35	—	—	18,93	6,63	15,02	5,26	—	—
0,36	22,45	8,09	18,71	6,74	14,85	5,35	12,17	4,37
0,37	—	—	18,50	6,84	14,68	5,43	—	—

D	Виды движения							
	аварийное (наибольшие возможные значения)		аварийное (средние зна- чения)		нормальное		комфортное	
	σ	ρ	σ	ρ	σ	ρ	σ	ρ
0,38	21,92	8,33	18,32	6,98	14,54	5,53	11,92	4,53
0,39	—	—	18,16	7,08	14,41	5,62	—	—
0,40	21,40	8,56	17,99	7,19	14,28	5,71	11,70	4,68
0,41	—	—	17,83	7,31	14,15	5,80	—	—
0,42	20,95	8,80	17,70	7,43	14,05	5,90	11,51	4,84
0,43	—	—	17,55	7,55	13,93	5,99	—	—
0,44	20,50	9,02	17,44	7,67	13,84	6,09	11,35	5,00
0,45	—	—	17,30	7,80	13,73	6,19	—	—
0,46	20,10	9,25	17,16	7,90	13,62	6,27	11,10	5,11
0,47	—	—	17,06	8,01	13,54	6,36	—	—
0,48	19,70	9,45	16,91	8,11	13,42	6,44	11,00	5,28
0,49	—	—	16,77	8,22	13,31	6,52	—	—
0,50	19,30	9,65	16,66	8,33	13,22	6,61	10,84	5,42
0,51	—	—	16,51	8,42	13,10	6,68	—	—
0,52	18,90	9,83	16,39	8,53	13,01	6,77	10,68	5,53
0,53	—	—	16,25	8,62	12,90	6,84	—	—
0,54	18,45	9,95	16,10	8,69	12,78	6,90	10,47	5,65
0,55	—	—	15,98	8,78	12,68	6,97	—	—
0,56	18,02	10,10	15,83	8,86	12,56	7,03	10,30	5,76
0,57	—	—	15,71	8,96	12,47	7,11	—	—
0,58	17,66	10,25	15,57	9,03	12,36	7,17	10,12	5,88
0,59	—	—	15,45	9,11	12,26	7,23	—	—
0,60	17,28	10,38*	15,31	9,19*	12,15	7,29*	9,96	5,98*
0,61	—	—	15,04	9,17	11,94	7,28	—	—
0,62	16,60	10,30	14,80	9,17	11,75	7,28	9,63	5,97
0,63	—	—	14,55	9,17	11,55	7,28	—	—
0,64	15,97	10,21	14,31	9,16	11,36	7,27	9,30	5,95
0,65	—	—	14,07	9,15	11,17	7,26	—	—
0,66	15,33	10,11	13,82	9,12	10,97	7,24	9,00	5,94
0,67	—	—	13,58	9,10	10,78	7,22	—	—
0,68	14,70	10,00	13,34	9,07	10,59	7,20	8,67	5,90
0,69	—	—	13,12	9,05	10,41	7,18	—	—
0,70	14,15	9,90	12,88	9,01	10,22	7,15	8,39	5,87
0,71	—	—	12,65	8,98	10,04	7,13	—	—
0,72	13,57	9,76	12,44	8,95	9,87	7,10	8,10	5,83
0,73	—	—	12,21	8,91	9,69	7,07	—	—
0,74	13,02	9,64	11,98	8,87	9,51	7,04	7,80	5,78
0,75	—	—	11,79	8,85	9,36	7,02	—	—
0,76	12,50	9,50	11,58	8,79	9,19	6,98	7,53	5,72
0,77	—	—	11,38	8,76	9,03	6,95	—	—
0,78	12,00	9,35	11,16	8,71	8,86	6,91	7,27	5,67

D	Виды движения							
	аварийное (наибольшие возможные значения)		аварийное (средние зна- чения)		нормальное		комфортное	
	v	q	v	q	v	q	v	q
0,79	—	—	10,96	8,66	8,70	6,87	—	—
0,80	11,45	9,16	10,77	8,62	8,55	6,84	7,00	5,60
0,81	—	—	10,56	8,56	8,38	6,79	—	—
0,82	11,00	9,01	10,37	8,51	8,23	6,75	6,75	5,54
0,83	—	—	10,18	8,44	8,08	6,70	—	—
0,84	10,53	8,85	9,98	8,38	7,92	6,65	6,50	5,46
0,85	—	—	9,80	8,33	7,78	6,61	—	—
0,86	10,08	8,60	9,59	8,25	7,61	6,55	6,24	5,36
0,87	—	—	9,37	8,15	7,44	6,47	—	—
0,88	9,68	8,52	9,17	8,06	7,28	6,40	5,97	5,24
0,89	—	—	8,95	7,96	7,10	6,32	—	—
0,90	9,10	8,20	8,76	7,88	6,95	6,25	5,70	5,13
0,91	—	—	8,51	7,74	6,75	6,14	—	—
0,92	8,43	7,77	8,30	7,64	6,59	6,06	5,40	4,87
> 0,92	—	7,64	—	7,64	—	—	—	—

ПРИЛОЖЕНИЕ II

ПРОГРАММА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ
ЛЮДСКОГО ПОТОКА «ПОТОК-1»

```

begin integer n, i, j, k, номер;
array v, q [1:4, 1:92], qmax, qdmax [1:5]; real v5;
p0042(v, q);
p1041(v, q);
p0042(qmax, qdmax);
p1041(qmax, qdmax);
p0042(v5);
p1041(v5);
p0042(n);
p1041(n);
begin real v1, v2, t, to, d, m, al; boolean da;
array qx, vx, dx, qm, c, s, sh, tau, a, l, b [1:n]; integer
array tip [1:n], h[1:1];
procedure tabl (i, j); value i, j; integer i, j;
begin integer k;
k:=tip [i];
vx [i]:=v [k, j-1]+(v[k, j]-v[k, j-1])×(qx[i]-q[k,
j-1]/(q[k, j]-q[k, j-1]));

```



```

dx[i]:=qx[i]/vx[i];
end;
p0042(m, d, to);
p1041(m, d, to);
p0042(tip, l, b);
p1041(tip, l, b);
c[1]:=0; s[1]:=to;
for i:=1 step 1 until n do tau[i]:=0;
for i:=1 step 1 until n do sh[i]:=0;
for i:=1 step 1 until n do a[i]:=0;
i:=1;
if tip[i]=5 then
begin vx[i]:=v5; qx[i]:=vx[i]×d; dx[i]:=d;
go to m1;
end;
vx[i]:=v[tip[i], (d×100)]; qx[i]:=vx[i]×d;
dx[i]:=d; qm[i]:=qx[i]×b[i];
t:=l[i]/vx[i]; c[i]:=c[i]+t; s[i]:=s[i]+t;
i:=i+1; da:=false; qx[i]:=qm[i-1]/b[i];
if qx[i]>qmax[tip[i]] then
begin qx[i]:=qmax[tip[i]]; da:=true;
if tip[i]=2 then
begin dx[i]:=0.92; vx[i]:=9.74;
go to m2;
end;
if tip[i]=5 then
begin vx[i]:=v5; dx[i]:=qx[i]/vx[i];
go to m2;
end;
end else
if tip[i]=5 then
begin vx[i]:=v5; dx[i]:=qx[i]/vx[i];
go to m2;
end;
for j:=1, j+1 while j<92 do
if qx[i]<q[tip][i, j] then
begin nomer:=j;
go to vih;
end;
vih: tabl(i, nomer);
m2: t:=l[i]/vx[i]; qm[i]:=qx[i]×b[i];
if da then
begin v1:=(qx[i]×b[i]/b[i-1]-qx[i-1])/(dx[i]-dx[i-1]);
v1:=abs(v1); v2:=b[i]×vx[i]/b[i-1];
a[i-1]:=abs(m×v1×vx[i-1]/(qm[i-1]×(vx[i-1]+v1)));
sh[i-1]:=((l[i-1]-a[i-1])/vx[i-1]);
a[i-1]:=abs(l[i-1]-a[i-1]);
tau[i-1]:=m×(1/qm[i]-1/qm[i-1]);
s[i-1]:=s[i-1]+tau[i-1];
end;
c[i]:=c[i-1]+t; s[i]:=s[i-1]+t;
if i<n then go to start;
h[1]:=n;
p0165(1, 't — время движения по участку');
p1041(t);

```

```

p0165(1, 'с — время движения головной части потока');
p1041(c);
p0165(1, 's — время движения замыкающей части потока');
p1041(s);
p0165(1, 'tau — время задержки');
p1041(tau);
p0165(1, 'sh — координата точки с по оси x');
p1041(sh);
p0165(1, 'a — координата точки с по оси y');
p1041(a);
p0165(1, 'qx — интенсивность на участке');
p1041(qx);
p0165(1, 'vx — скорость движения на участке');
p1041(vx);
p0165(1, 'dx — плотность на участке');
p1041(dx);

```

end;

ПРОГРАММА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ КОММУНИКАЦИОННЫХ ПОМЕЩЕНИЙ «ПОТОК-2»

```

begin integer i, j, n, k, m, p;
  real t, c, s, to, do, bo, bn, qtip, dx, qx, vx, ux, v5, q5;
  p0042(q, v);
  p1041(q, v);
  p0042(qmax, v5, q5);
  p1041(qmax, v5, q5);
  d[i]:=d[93]:=d[185]:=d[277]:=0.01;
  for i:=2 step 1 until 92 do
  begin d[i]:=d[92+i]:=d[184+i]:=d[276+i]:=d[i-1]+
    +0.01;
  end;
  p0042(n, to, do);
  p1041(n, to, do);
  begin integer array tip [1:n]; array l, b, u[1:n];
  p0042(tip, l, b);
  p1041(tip, l, b);
  p0165(1, 'tip, l, b');
  for j:=1 step 1 until n do
  begin for i:=1 step 1 until 4 do
  if tip [j]=5 then
  begin vx:=v5; qx:=u[j-1]/b[j]; dx:=qx/vx;
  if qx q5 then
  begin t:=1[j]/vx; c:=c+t; s:=s+t. ux:=qx×b[j];
  end else
  begin bn:=u[j-1]/q5
  if bn>1.8 then bn:=2.4 else bn:=1.2
  end;
  end else
  if tip [j]=i then
  begin m:=(1+(i-1)×92); qtip:=qmax [i];
  end else j:=j;
  bn:=b[j];
  if j=1 then
  begin c:=0; s:=to; qx:=q[m+do×100];
  vx:=v[m+do×100]; ux:=u[j]:=qx×bn;

```

```

dx: d[m+do×100];
end else qx:= u[j-1]/bn;
if qx<qtip then
begin if j≠1 then
begin for k:=m, k+1 while qx-q[k]>0 do p:=k;
dx:=d[p]+0.01×(qx-q[p])/(q[p+1]-q[p]);
vx:= (v[p]-v[p+1]) × (1-(qx-q[p])/(q[p+1]-q[p]))+
+v[p+1];
ux:= u[j]:= qx×bn;
end;
t:= l[j]/vx; c:= 0+t; s:=s+t;
p1041(t, c, s);
p0165(1, 't, c, s');
p1041(dx, vx, qx, ux);
p0165(1, 'dx, vx, qx, ux');
end else
begin bn:= entier(u[j-1]/qtip×5)/5+0.2;
p1041(bn);
p0165(1, 'bn');
qx:= u[j-1]/bn;
go to n2;
end;
end;
end;
end;

```

ОСНОВНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

Номера формул в тексте	Значение	Формула	Величина и размерность
(3.1)	Площадь горизонтальной проекции человека, м ²	$f = \frac{\pi}{4} a c$	<i>a</i> — ширина горизонтальной проекции; <i>c</i> — толщина горизонтальной проекции
(3.3)	Длина наклонного пути, м	$L = \frac{L'}{\cos \alpha}$	<i>L'</i> — горизонтальная проекция наклонного пути; <i>α</i> — угол наклона к горизонту
(3.4в)	Плотность людского потока, м ² /м ²	$D = \frac{\Sigma f}{\delta l} = \frac{N f}{\delta l}$	<i>N</i> — количество людей в потоке, или сумма горизонтальных проекций, м ² ; <i>δ</i> — ширина потока; <i>l</i> — длина потока

Номера формул в тексте	Значение	Формула	Величина и размерность
(3.6)	Максимальная плотность потока	$D_{\text{макс}} = 0,92$	—
(3.7)	Физический предел плотности	$D_{\text{ф.п}} = 1,15$	—
(3.12)	Пропускная способность пути, м ² /мин	$Q = D v \delta$	v — скорость движения, м/мин
(3.13)	Интенсивность движения потока	$q = v D$	—
(4.5)	Интенсивность движения на последующем участке пути $(n+1)$, м/мин	$q_{n+1} = q_n \frac{\delta_n}{\delta_{n+1}}$	—

(4.9)	Интенсивность движения на последующем участке пути ($n+1$) при слиянии потоков, м/мин	$q_{n+1} = \frac{\Sigma Q_n}{\delta_{n+1}}$	ΣQ — сумма пропускных способностей сливающихся потоков перед участком $n+1$, м ² /мин
(4.13)	Скорость движения границы между двумя потоками (разной плотности), следующими по одному пути, при $v_1 < v_2$, м/мин	$v' = \frac{q_1 - q_2}{D_1 - D_2}$	Индексы при v , q и D означают первый и второй потоки по ходу движения
(4.15)	То же, при $v_1 > v_2$, м/мин	$v' = \frac{q_2 - q_1}{D_2 - D_1}$	—
(5.3)	Максимальная интенсивность движения потока и скопление людей перед границей смежных участков	$q_{n+1} = q_n \frac{\delta_n}{\delta_{n+1}} > q_{\text{макс}}$	$q_{\text{макс}}$ — максимальное значение интенсивности движения потока для данного вида пути, м/мин
(5.8)	Скорость движения границы скопления людей, м/мин	$v'_c = \frac{q_1 \frac{\delta_1}{\delta_2} - q_2}{D_1 - D_2}$	—

Номера формул в тексте	Значение	Формула	Величина и размерность
(5.9)	Скорость рассасывания скопления, м/мин	$v_c = v_1 \frac{\delta_1}{\delta_2}$	—
(5.10)	Время задержки движения при скоплении людей, мин	$\tau = N \left(\frac{1}{Q_{n+1}} - \frac{1}{Q_n} \right)$	N — количество людей Σf , вы- раженное в m^2
(5.11)	Отрезок пути, на который распро- страняется скопление людей, м	$l_c = \frac{N}{Q_n} \frac{v'_c v_n}{v_n + v'_c}$	—
(5.12)	Максимальное количество людей, образующих скопление, m^2	$N_c = D_c \delta_n l_c$	D_c — плотность в скоплении
(5.14)	Ширина пути для беспрепятствен- ного движения, м	$\delta_{n+1}^{греб} = \frac{q_n \delta_n}{q_{\max}}$	—

(5.16)	Доля участия сливающихся потоков в формировании объединенного потока	$\gamma_1 = \frac{\delta_{n_1}}{\sum \delta_n}$ $\gamma_2 = \frac{\delta_{n_2}}{\sum \delta_n}$ <p style="text-align: center;">и т. д.</p>	$\delta_{n_1}, \delta_{n_2}$ и т. д. — ширина пути движения первого, второго и последующих потоков, м; $\sum \delta_n$ — сумма ширины путей движения всех сливающихся потоков
(5.17)	Ширина пути для беспрепятственного движения при слиянии, м	$\delta_{n+1}^{\text{треб}} = \frac{\sum Q_n}{q_{\text{макс}}}$	—
(6.4)	Расчетная производительность эскалатора, чел.-ч	$Q_p = 3600 \frac{1}{t_{\text{ст}}} n v \varphi$	$t_{\text{ст}} = 0,4$ м — ширина ступени; n — число пассажиров на одной ступени; v — скорость движения полотна эскалатора, м/с; φ — коэффициент заполнения полотна эскалатора
(6.7)	Пропускная способность эскалатора, м ² /мин	$Q_0 = D_0 v_0 \delta_1$	D_0 — расчетная плотность на эскалаторе; δ_1 — ширина полотна

Номера формул в тексте	Значение	Формула	Величина и размерность
(6.10)	Площадь для движения пересекающихся потоков, м ²	$F_{\text{пп}}^{\text{треб}} = \frac{N_{\text{р}}}{D_{\text{оп}}}$	<p>$N_{\text{р}}$ — расчетное количество людей;</p> <p>$D_{\text{оп}}$ — оптимальная плотность при пересечении потоков</p>
(7.7)	Время движения людского потока в проходе зрительного зала, мин	$t = \frac{l}{q_{\text{ср}}} \left[\frac{D_i}{\Delta q} \times \right. \\ \left. \times (q_{\text{ср}} - q_{i-1}) + \sum_1^{i-1} D \right] + \\ + \frac{N}{q_{\text{ср}} \delta}$	<p>l — ширина ряда;</p> <p>$q_{\text{ср}}$ — средняя интенсивность, при которой стабилизируется процесс, м/мин;</p> <p>D_i — плотность потока в i-м ряду;</p> <p>Δq — разность интенсивности движения в проходе, м/мин;</p> <p>q_{i-1} — интенсивность движения в проходе на уровне $(i-1)$-го ряда;</p> <p>δ — ширина прохода</p>

(8.3)	Расчет по первому предельному состоянию (в развернутом виде)	$t = \sum \frac{l}{v} \frac{1}{\mu \eta} + \sum \frac{N}{\mu \eta} \times$ $\times \left(\frac{1}{Q_{n+1}} - \frac{1}{Q_n} \right) < t_{\text{доп}}$	μ, η — коэффициенты условий движения; $t_{\text{доп}}$ — предельное время продолжительности движения
(8.4)	Расчет по второму предельному состоянию (в развернутом виде)	$D = \frac{Q}{v \delta} \frac{1}{\mu \eta} < D_{\text{доп}}$	$D_{\text{доп}}$ — предельно допустимая плотность потока
(8.8)	Требуемая ширина для обеспечения заданной плотности $D_{\text{доп}}$, м	$\delta_{n+2}^{\text{треб}} = \frac{q_n \delta_n}{q_{D_{\text{доп}}}}$	—

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев Ю. В. Определены маршруты движения людей в залах театров и кинотеатров после окончания зрелищ. ЦНИИС Госстроя СССР. Новости технической литературы, 1976, № 6.
2. Алексеев Ю. В. Инженерный метод расчета движения людских потоков в залах театров и кинотеатров. ЦНИИС Госстроя СССР. Новости технической литературы, 1976, № 6.
3. Беллев С. В. Эвакуация. М.: Стройиздат, 1938.
4. Бовин Г. М., Кошкин Н. М., Олейник А. М. Эвакуаторы. М., 1956.
5. Григорьев Р. Г. Методика оценки загрузки торговых помещений крупных универсальных магазинов. Изв. высш. учеб. заведения. Строительство и архитектура, 1975, № 1.
6. Дувидзон Р. М. Методика определения параметров путей движения при наличии большого количества потоков на участке ограниченной длины (трибуны спортивных сооружений). Сб. научных трудов ТИСИ, т. XIV, Томск, 1968.
7. Дувидзон Р. М. Приближенный метод расчета движения людей на трибунах спортивных сооружений. Сб. научных трудов ТИСИ, т. XIV, Томск, 1968.
8. Ермищев М. А., Протечинский В. М., Холщеников В. В. Нормирование коммунальных путей учебных помещений школ. — Жилищное строительство, 1977, № 10.
9. Калинин В. А. Комплексное решение вопросов зрительного восприятия и движения людей в залах кинотеатров. — Архитектура СССР, 1965, № 11.
10. Копылов В. А. Исследование закономерностей движения при предельных плотностях людских потоков. ВШ МВД СССР. Сб. статей. Ленинград и конскатели, вып. 3, М., 1973.
11. Милинский А. В. К вопросу об исследовании процессов эвакуации. Информационный сб. ЦНИИО, М., 1950.
12. Протечинский В. М. Об учете движения людских потоков в зданиях массового назначения. Изв. высш. учеб. заведения. Строительство и архитектура, 1958, № 7.
13. Протечинский В. М. Людские потоки в зданиях. Справ. и учебник «Архитектура гражданских и промышленных зданий», т. 11, Основы проектирования, М., 1974.
14. Протечинский В. М., Алексеев Ю. В. Эвакуация зрителей

из различных помещений: оптимальная ширина проходов — Строительная архитектура Москвы, 1970, № 8.

15. Предтеченский В. М., Буря П. Г. Определение параметров движения людских потоков на эскалаторах. ГОСНИТИ, Информационный листок № 587—72.

16. Предтеченский В. М., Буря П. Г. О новых принципах нормирования эвакуации людей из зданий. — Пожарное дело, 1974, № 6.

17. Предтеченский В. М., Гусидяков В. С. Расчет пропускной способности участка пути. — Метрострой, 1977, № 4.

18. Предтеченский В. М., Коллежников В. В., Буря П. Г. Методы динамических наблюдений процесса движения людских потоков из зданий: учет заведений. Строительство и архитектура, 1973, № 5.

19. Предтеченский В. М., Коллежников В. В. Структурирование здания с учетом организации движения людских потоков. Строительство, 1969.

20. Предтеченский В. М., Ройтман М. Я., Коллежников В. В. К вопросу исследования параметров движения людских потоков при вынужденной эвакуации. Труды ВИА МВД СССР, 1972, № 33.

21. Предтеченский В. М., Горасов Г. А. Движение людей при вынужденной эвакуации. — Пожарное дело, 1966, № 7.

22. Предтеченский В. М., Фалькович Ж. О нормировании эвакуации людей из производственных зданий. — Промышленное строительство, 1973, № 2.

23. Предтеченский В. М., Коллежников В. В. Расчет перфорирования людских потоков в условиях ограниченной длины. Иллюстрированный учебный материал. Строительство и архитектура, 1971, № 4.

24. Предтеченский В. М., Коллежников В. В., Гусидяков В. Г. Движение и материально существующих людских потоков. — Жилищное строительство, 1971, № 5.

25. Ройтман М. Я. Эвакуация людей из производственных и гражданских зданий на случай пожара. М., 1968.

26. Ройтман М. Я. Общие принципы нормирования процесса вынужденной эвакуации людей. М., 1963.

27. Ройтман М. Я. Вынужденная эвакуация людей из зданий. М., 1966.

28. Ройтман М. Я. Основы противопожарного нормирования в строительстве. М., 1969.

29. Коллежников В. В. Моделирование движения людских потоков и оптимизация коммуникационных путей в жилищно-коммунальном хозяйстве и научно-технический прогресс. М., 1974.

30. Коллежников В. В., Гусидяков В. С. Автоматизация проектирования коммуникационных помещений метрополитана. В кн.

функциональные и технические проблемы архитектуры. Сб. трудов МИСИ им. Куйбышева. М., 1977.

31. *Bascom J. E.* Traffic Engineering Handbook. Institute of Traffic Engineers, Washington, D. C., 1955.

32. *Henderson J. E.* *The theory of human crowd.* New Tokyo, 1973.

33. *Kennedy N., Kell J. H., Hohburger W. S.* Fundamentals of traffic engineering. 7th edition. The Institute of Transportation and Traffic Engineering, University of California, 1969.

34. *Navin Francis P. D., Wheeler R. J., Pedestrian flow characteristics.* Traffic Engineering, nr 7, 19, 1969.

35. *Oeding D.* Verkehrsbelastung und Dimensionierung von Gehwegen und anderen Anlagen des Fussgängerverkehrs. Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 29, Bonn, 1983.

36. Engineering News Record, vol. 111, 1933.

37. *Reimer K.* Die Bewegung der Menschenmassen in Verkehrsräumen. Glasser Annalen, Nr. 71, Heft 7, 1947, Berlin.

38. *Schmitz W.* Menschengedänge im Bahnhofs-Habitat. Habilitationsschrift, Fakultät für Bauwesen, Technische Hochschule Aachen, 1966.

39. *Scholz G.* Geschwindigkeit und Energieaufwand beim Gehen. Diss., Technische Hochschule Hannover, 1952.

40. *Schubert H.* Berücksichtigung des Fussgängers in der Verkehrsplanung. Zeitschrift der Städtebau, Heft 2, 1966.

41. *Speiser R. A., Reissard W. G.* Evacuation d'immeubles en cas d'urgence. Bulletin technique de la Suisse romande, n° 21, 1971, Lausanne.

42. *Turner F.* Preliminary planning for a new tube railway across London. Proc. of the Institution of Civil Engineers, nr 22, 1952.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	6
1. Функциональные основы проектирования	6
2. Движение людей как функциональный процесс	13
РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И РАСЧЁТ ДВИЖЕНИЯ ЛЮДСКИХ ПОТОКОВ	19
Глава 1. Исследования движения людских потоков	19
1. Общие сведения о движении людей	19
2. Основные положения, понятия и величины	21
3. Исследования Института архитектуры Всероссийской Академии художеств и Высшей школы МВД СССР	23
4. Исследования Всесоюзного научно-исследовательского института противопожарной обороны	27
5. Исследования Московского инженерно-строительного института им. В. В. Куйбышева	28
6. Данные зарубежных исследований	32
Глава 2. Виды и особенности движения людей	31
1. Классификация видов движения	34
2. Психологические особенности движения людских потоков в нормальных и аварийных ситуациях	37
3. Структура людского потока и виды поточного движения в зданиях	41
Глава 3. Параметры движения людских потоков	44
1. Размеры людей и расчётные характеристики путей движения	44
2. Методика натуральных наблюдений для оценки плотности и скорости движения людских потоков	49
3. Плотность людских потоков	53
4. Скорость движения людских потоков и коэффициенты условий движения	58
5. Пропускная способность пути и интенсивность движения людских потоков	71
6. Оценка параметров движения и расчётные значения	73
Глава 4. Основные расчётные случаи движения людских потоков	79
1. Графическое изображение движения людских потоков	79
2. Движение людских потоков через границы смежных участков пути	82
3. Слияние и расчленение потоков	88
4. Переформирование и растекание людских потоков	95
Глава 5. Движение людских потоков с высокими плотностями	103
1. Возникновение скоплений при движении через границы смежных участков пути	103

2. Разуплотнение людского потока	107
3. Процесс образования и рассасывания скоплений людей	111
4. Особенности движения через проёмы	120
5. Условия беспрепятственного движения	126
6. Образование скоплений при слиянии людских потоков	129
Глава 6. Особые случаи движения людских потоков	134
1. Движение по путям с переменной шириной	134
2. Движение людских потоков на эскалаторах	140
3. Пересекающиеся людские потоки	147
4. Прочие случаи движения людских потоков	155
Глава 7. Формирование и движение людских потоков в проходах зрелищных помещений	159
1. Общие положения	159
2. Примеры формирования и движения людских потоков в проходах постоянной ширины без образования скоплений и задержек движения	162
3. Закономерности формирования людских потоков в проходах зрелищных помещений и определение времени движения	168
4. Формирование и движение людских потоков в проходах зрительных залов с образованием скопления и задержки движения	175
5. Приближённые формулы для определения времени движения в проходах зрительных залов	184
6. Людские потоки в проходах переменной ширины и определение времени движения	190
РАЗДЕЛ ВТОРОЙ. ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ С УЧЁТОМ ДВИЖЕНИЯ ЛЮДСКИХ ПОТОКОВ	206
Глава 8. Расчётные предельные состояния и методика определения времени движения людских потоков и размеров коммуникационных помещений	206
1. Расчётные предельные состояния	206
2. Предпосылки для определения $t_{доп}$ и $D_{доп}$	208
3. Методика расчёта движения людских потоков и определение размеров коммуникационных помещений	212
4. Пример расчёта движения людских потоков и размеров коммуникационных помещений по первому предельному состоянию	215
5. Особенности методики расчёта по второму предельному состоянию	244
6. Принципы автоматизации расчётов движения людских потоков	248
Глава 9. Коммуникационные помещения	264
1. Коридоры и проходы	264
2. Лестницы и пандусы	268
3. Прочие виды коммуникационных помещений	272
Глава 10. Конструктивные элементы и специальные устройства, связанные с движением людских потоков	278
1. Двери	278
2. Полы	282

3. Аварийные лестницы	286
4. Аварийные спуски	289
Глава 11. Основы нормирования параметров коммуникационных помещений	293
1. Состояние вопроса и основные предпосылки	293
2. Обеспечение вынужденной эвакуации людей на основе расчёта времени движения	297
3. Обеспечение вынужденной эвакуации людей на основе нормирования их предельного удаления от выходов и пропускной способности путей эвакуации	303
Глава 12. Особенности проектирования общественных зданий	309
1. Учебные здания	309
2. Торговые здания	321
3. Зрелищные здания и сооружения	327
4. Промышленные здания	329
5. Спортивные сооружения	342
Приложение	350
Список литературы	370

BOOKS.PROEKTANT.ORG

**БИБЛИОТЕКА ЭЛЕКТРОННЫХ
КОПИЙ КНИГ**

**для проектировщиков
и технических специалистов**

**ВСЕВОЛОД МИХАЙЛОВИЧ ПРЕДТЕЧЕНСКИЙ,
АНАТОЛИЙ ИВАНОВИЧ МИЛЦЕНСКИЙ**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗДАНИЙ С УЧЕТОМ
ОРГАНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ЛЮДСКИХ ПОТОКОВ**

Научный редактор Н. Г. Буга

Редакция литературы по градостроительству и архитектуре
Зав. редакцией Г. П. Федоров
Редактор Н. Л. Глущенко
Мл. редактор И. Н. Камынина
Нашее оформление художника В. А. Кошлякова
Технический редактор Н. В. Василькина
Корректор Н. С. Фронова

МБ 187*

Книжка в набор 2808.78	Издательство «Строиздат» 30,11.78	Г. 10598
Формат 84x108/32	Бумага 70x90/32	Гарнитура «Литературная»
Полость оклеена	Усл. печ. л. 16,74	Уч.-изд. л. 20,85
Тираж 15 000 экз.	Изд. № А1-5168	Зак. 508
		Цена 1 р. 30 к.

Строиздат 10142, Москва, Климцевскл., 21а

Подписный филиал ЦО «Периодика» Союзполитграфпрома
при Государственном комитете СССР по делам издательств,
полиграфий и книжной торговли
г. Подольск, ул. Кирова, 26