

## **Глава 2. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЛЮДСКИХ ПОТОКОВ**

### **Введение**

Сформулированные в заключительной части предыдущей главы критерии безопасности людей при эвакуации явились итогом длительных исследований [37] С. В. Беляева [11, 36], А. И. Милинского [30], В. М. Предтеченского [56, 57]. В нормировании они впервые были применены в 1980 г. [19].

Однако для их практической реализации потребовались еще более длительные исследования коллектива научной школы «Теория людских потоков» [58]. Эти исследования дали возможность установить закономерности изменения параметров людских потоков при их движении через границы смежных участков коммуникационных путей и закономерности связи между скоростью и плотностью потока при любом составе людей в потоке и различном уровне их эмоционального состояния. Установленные закономерности обеспечили возможность разработать методы расчета (моделирования) движения людских потоков от участков их формирования до места окончания их движения, как единого процесса.

Корректность открытых закономерностей и разработанных методов моделирования подтверждена результатами многочисленных серий натурных наблюдений и специально организованных экспериментов. Эмпирическая база данных составляет в настоящее время более 40 тыс. одновременных замеров скорости и плотности людских потоков при их движении по всем видам пути в зданиях большинства видов функционального назначения при различных режимах их эксплуатации, а также на городских территориях.

Основные положения закономерностей движения людских потоков и методов расчета процесса эвакуации людей при пожаре вошли в нормативные документы: первоначально СНиП II–2–80 (прил. 1 разд. 1), затем ГОСТ 12.1.004 (прил. 2). На их основе разработаны и нормы проектирования эвакуационных путей и выходов в производственных и общественных зданиях и сооружениях, в метрополитенах. Современная практика проектирования и эксплуатации зданий требует их дальнейшего развития. Рассмотрим установленные закономерности.

## 2.1. КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЛЮДСКИХ ПОТОКОВ

### 2.1.1. Движение через границы смежных участков пути

В простейшем случае движения людских потоков имеем следующую ситуацию. По участку  $i$ , имеющему ширину  $\delta_i$ , к границе со следующим участком ( $i+1$ ), имеющему ширину  $\delta_{i+1}$ , подошел людской поток численностью  $N$  человек. По прошествии времени  $t$  весь поток перешел на участок  $i+1$  и занял часть его длины  $\Delta l_{i+1}$ . Именно эти случаи были объектами (рис. 2.1) первых же обширных натуральных наблюдений [30].

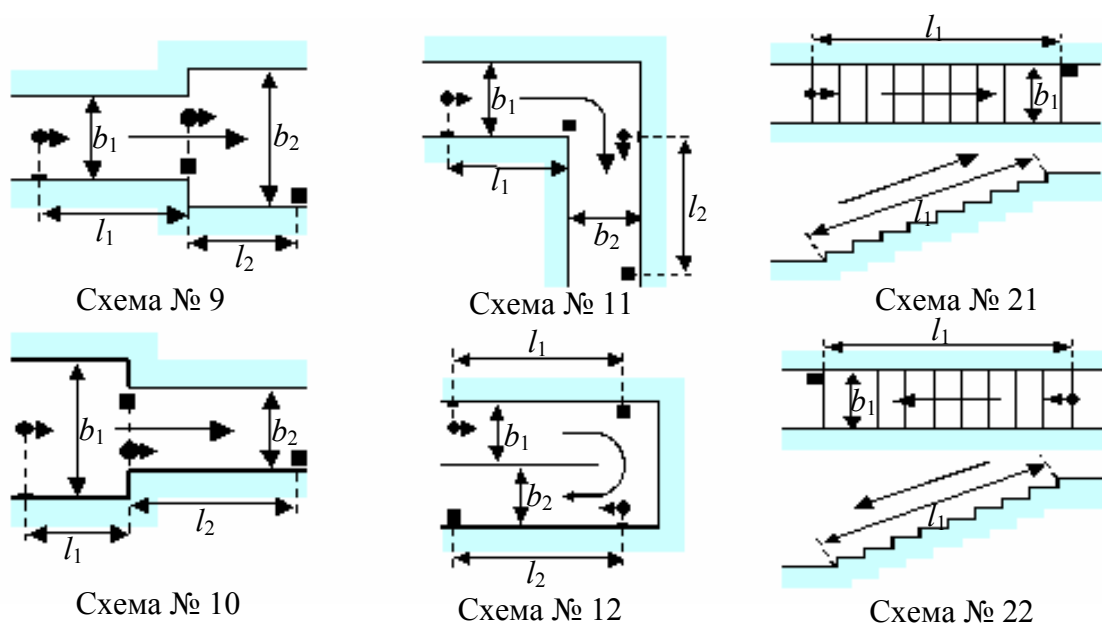


Рис. 2.1. Схемы движения одного людского потока через границы смежных участков коммуникационных путей. Квадратами обозначены наблюдатели, кругами – наблюдаемые в потоке люди

Спрашивается, с какими же значениями параметров двигался поток по участку  $i+1$ ? Для облегчения понимания процесса перехода была принята упрощенная модель людского потока. Упрощение состояло в том, что «поскольку количество людей, составляющих головную и замыкающую части, относительно невелико по сравнению с основной массой, то вполне возможно показать поток в виде прямоугольника» [37]. (Однако, в реальности, «в аварийных... условиях движения... головная, уходящая с большей скоростью вперед, часть потока будет по длине и количеству людей возрастать, а остающаяся, замыкающая часть, наоборот, уменьшаться. Поэтому для аварийных условий необходимо обязательно учитывать так называемое растекание потока и, следовательно, постепенное изменение его плотности»). Размещение людей в потоке на занятом им участке  $\Delta l_{i+1}$  принимается равномерным, а ширина потока  $b$  равной ширине участков, по которым он

перемещается, т. е., соответственно,  $\delta_i$  и  $\delta_{i+1}$ . При этих упрощениях рассматриваемая ситуация изображена на рис. 2.2.

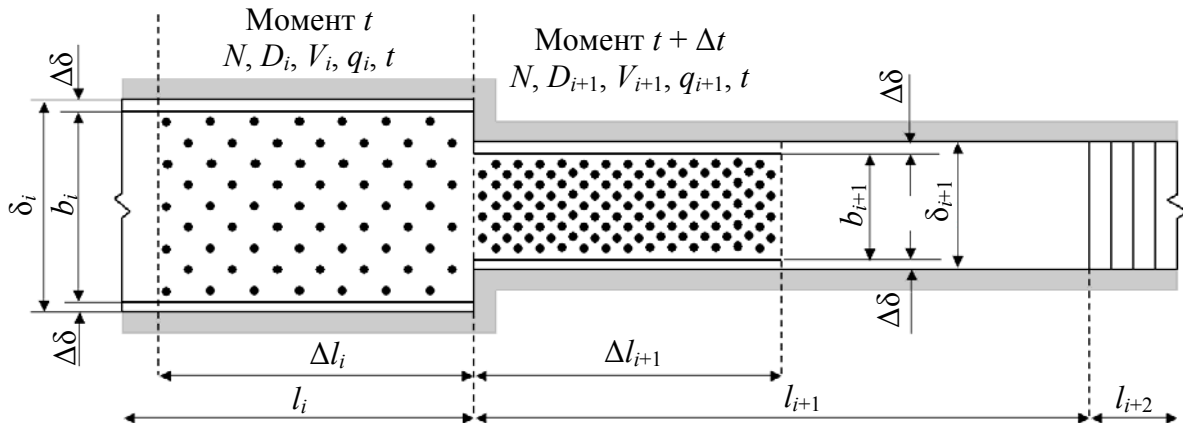


Рис. 2.2. Движение людского потока через границу смежных участков пути

Впервые этот вопрос было предложено решить следующим образом [30, С. 138]: «Если известна плотность  $D_1$  потока на данном участке пути шириною  $\delta_1$ , то его плотность  $D_2$  на следующем по ходу движения участке шириной  $\delta_2$  определяется из выражения

$$D_2 = D_1 \delta_1 / \delta_2. \quad (2.1)$$

Однако предположим, что людской поток численностью  $N$  человек и с плотностью  $D_1$  движется по горизонтальному участку постоянной ширины  $\delta_1$ , разделенному проемом шириной  $\delta_0$ . «Следовательно, плотность в проеме будет равна

$$D_0 = D_1 \delta_1 / \delta_0, \text{ чел./м}^2.$$

Соответственно плотность, чел./м<sup>2</sup>, на последующем после проема участке пути:

$$D_1 = D_0 \delta_0 / \delta_1, \text{ чел./м}^2.$$

Из расчета следует, что плотность на участках перед проемом и после проема при равной ширине участков оказывается одинаковой даже в том случае, когда пропускная способность проема меньше пропускной способности предшествующего проему участка. Очевидно, что пропускная способность участка не может быть больше пропускной способности предшествующего ему проема. Иначе говоря, участок не может пропустить большее количество людей, чем на него поступает за то же время с предыдущего участка.

Из расчета также следует, что движение через проем протекает при постоянной плотности... Следовательно, при одном и том же количестве людей, но при разных ширинах предшествующего проему участка, плотность в проеме не меняется. Однако при большей ширине участка и, следовательно, при меньшей плотности скорость будет больше, то есть количество подходящих к проему людей в единицу времени будет больше...

По-видимому, предпосылку расчета, вытекающую из выражения (2.1) следует признать неточной» [56].

Вернемся к схеме на рис. 2.2. Возможны два случая: первый – поток переходит через границу участков без задержки; второй – перед границей следующего участка происходит задержка людей.

В первом случае, если задержки движения на границе участков не происходит, то время, которое потребуется потоку для окончания движения по участку  $i$  (пройти оставшийся отрезок длиной  $\Delta l_i = N / D_i \delta_i$ ), составит

$$t_i = \Delta l_i / V_i = N / V_i D_i \delta_i. \quad (2.2)$$

Ясно, что это время движения замыкающей плоскости потока по участку  $i$ .

За это же время поток пройдет по участку  $i+1$  отрезок пути длиной  $\Delta l_{i+1}$  при неизвестной плотности  $D_{i+1}$  и неизвестной скорости движения  $V_{i+1}$ . Длина этого отрезка составит  $\Delta l_{i+1} = N / D_{i+1} \delta_{i+1}$ , а время

$$t_{i+1} = \Delta l_{i+1} / V_{i+1} = N / V_{i+1} D_{i+1} \delta_{i+1}.$$

Но поскольку  $t_i = t_{i+1}$ , то, следовательно,  $D_i V_i \delta_i = D_{i+1} V_{i+1} \delta_{i+1}$ . Обозначим величину  $DV$  через  $q$ , тогда можно записать:

$$q_{i+1} = q_i \delta_i / \delta_{i+1}. \quad (2.3)$$

Это соотношение впервые было установлено (иным способом) лишь в 1957 г. [56]. Позже величина  $q$  была названа интенсивностью движения людского потока, «так как значения  $q$ , не зависящие от ширины пути, характеризуют кинетику процесса движения людского потока. Значения интенсивности движения соответствуют значениям пропускной способности пути шириной 1 м» [37]. (Следует отметить, что величина «интенсивность движения», обозначаемая также через  $q$ , используется и в теории транспортных потоков, хотя и имеет несколько иную интерпретацию, например, [59]).

Каждому значению интенсивности движения соответствует определенное значение плотности потока, поэтому по найденному (2.3) значению интенсивности движения по участку  $i+1$  всегда можно определить соответствующее ему значение плотности  $D_{i+1}$ , а по нему – значение скорости  $V_{i+1}$ .

Каков же характер кинетики людского потока, характеризуемый интенсивностью его движения?

Поскольку эта величина является произведением двух величин, при возрастании одной из которых ( $D$ ) вторая ( $V$ ) снижается, то при любом виде зависимости  $V = \varphi(D)$ , это произведение должно иметь максимум,  $q_{\max}$ . Положение и значение максимума зависит от вида функции  $V = \varphi(D)$  и от ее конкретных значений. Для примера в табл. 2.1 приведены значения  $V$  и  $q$  при зависимости, выраженной полиномом четвертой степени  $V^{**} = 112D^4 - 380D^3 + 434D^2 - 217D + 57$  и при линейной зависимости между ее крайними значениями  $V^* = 57 - 5,256D$ . Графики зависимости  $q = \varphi(D)$  при соответствующих значениях  $V^*$  и  $V^{**}$  приведены на рис. 2.3.

**Изменение значений интенсивности людского потока  $q$   
от вида зависимостей скорости его движения от плотности потока**

Плотность $D$ , чел./м <sup>2</sup>	Скорость $V^*$ , м/мин	Интенсивность $q^* = DV^*$ , чел./(м·мин)	Скорость $V^{**}$ , м/мин	Интенсивность $q^{**} = DV^{**}$ , чел./(м·мин)
0	57,00	0,00	57,00	0,00
1	51,70	51,70	39,27	39,30
2	46,49	92,98	28,10	56,20
3	41,23	123,70	21,60	64,80
4	35,97	143,90	18,20	72,80
5	30,72	153,60	16,50	82,50
6	25,47	152,80	15,48	92,90
7	20,21	141,46	14,31	100,20
8	14,95	119,62	12,48	99,80
9	9,70	87,30	9,70	87,30

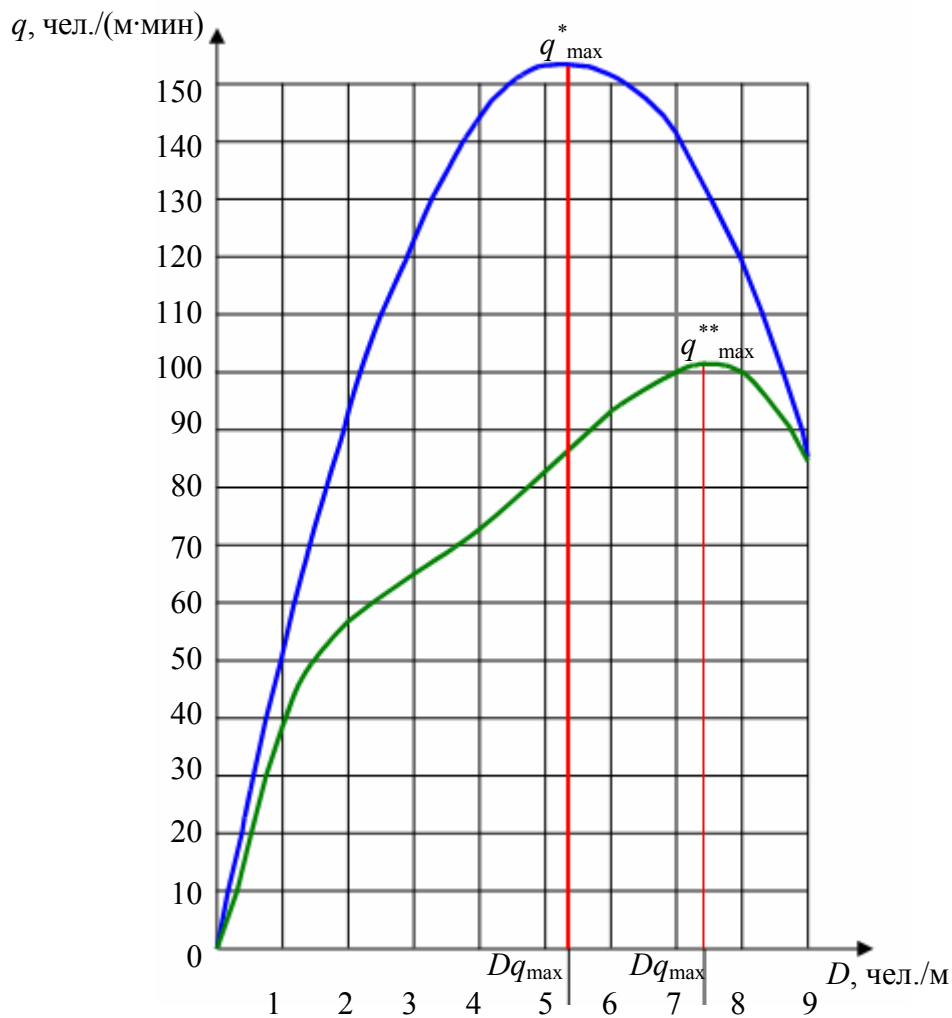


Рис. 2.3. Графики функции  $q = \varphi(D)$  в зависимости от выражения функции  $V$ :  
 $q^* = V^* D$ ,  $q^{**} = V^{**} D$

Поскольку произведение интенсивности движения на ширину участка показывает количество людей, проходящих в единицу времени через поперечное сечение участка пути, занятого потоком, то величина людского потока  $P$ , чел./мин, (см. определение в гл. 1) равна

$$P = qb. \quad (2.4)$$

Здесь  $b$  – именно ширина потока, которая в данном случае ограничена конструкциями пути эвакуации; это хорошо понятно в случае движения людского потока по участку неограниченной ширины (см. рис. 1.16), когда ширина потока и ширина участка пути (вестибюля) не совпадают. Можно сказать, что геометрия путей движения деформирует поток, вынуждая его принимать различную ширину и длину; величина же потока, как показывает соотношение (2.3), остается, при обеспечении беспрепятственности его движения, неизменной:

$$q_{i+1}\delta_{i+1} = q_i\delta_i.$$

Иная ситуация складывается во втором случае движения людского потока через границы смежных участков пути, когда недостаточная ширина последующего участка ( $i+1$ ) заставляет поток двигаться с интенсивностью больше максимальной (значение  $q_{i+1}$ , определенное по формуле (2.3), больше значения  $q_{\max}$  для данного вида пути), что невозможно. Поэтому часть людей не может перейти на последующий участок пути и скапливается перед его границей, в чрезвычайных ситуациях – при максимальной плотности  $D_{\max}$ . Продолжающие подходить к скоплению люди надавливают на находящихся в нем людей. В следующий момент времени они сами оказываются под давлением вновь подошедших людей. Плотность в скоплении может достичь физического предела. Давление людей друг на друга продолжает расти и никто из них уже не может его регулировать, а оно достигает таких величин, которых не может выдержать человеческий организм длительное время. Спустя 3–4 минуты в нем уже возникают процессы компрессионной асфиксии, сопровождающиеся тканевым и костным травматизмом. Как показали специальные натурные наблюдения в условиях, приближенных к аварийным ситуациям [42], высокие плотности в скоплениях перед проемами с недостаточной пропускной способностью возникают очень быстро, через 5–7 с, после начала их образования.

Очевидная опасность таких ситуаций определила большое внимание к их исследованиям в местах наиболее вероятного образования – в дверных проемах [30, 42, 60]. Схемы проведенных натурных наблюдений приведены на рис. 2.4.

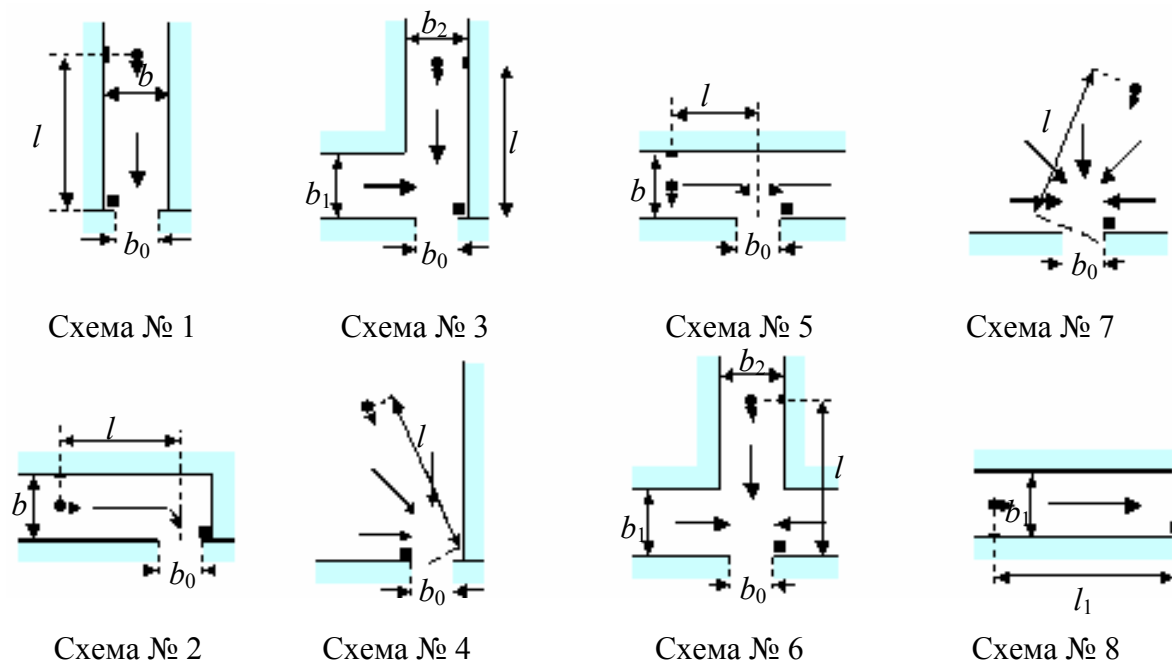


Рис. 2.4. Схемы проведенных натуральных наблюдений движения людских потоков через проем

Эти исследования показали, что люди, подходя к более узкому участку пути, в частности, к проему, заранее несколько корректируют направление своего движения к центру. В результате происходит взаимное сближение человеческих тел и соответствующее уплотнение потока. При этом взаимное расположение тел приближается по виду к непрерывной вогнутой цепи. Чем меньше ширина проема, тем ближе люди в этой цепи вынуждены прижиматься друг к другу. В проеме люди образуют своего рода арку, пяты которой упираются в дверную коробку, причем выпуклость арки направлена в сторону, противоположную направлению движения, рис. 2.5 а.

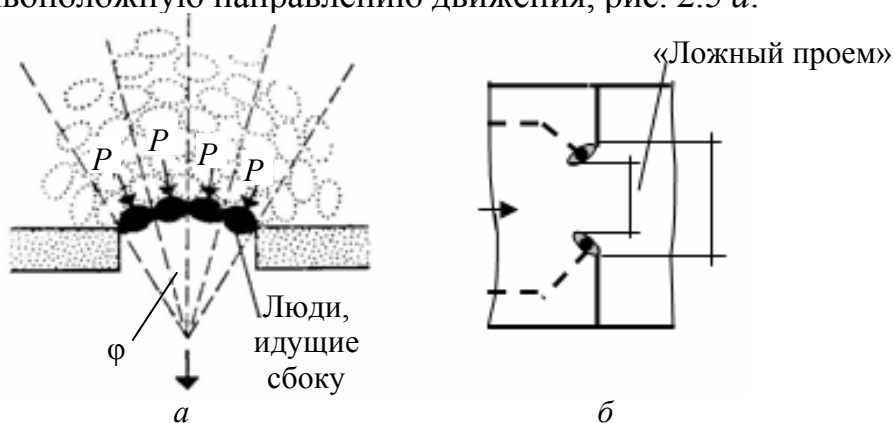


Рис. 2.5. Движение людского потока через проемы при их недостаточной пропускной способности:  
а – схема образования арки; б – эффект «ложного проема»

Явление возникновения арки тесно связано с возникновением эффекта «ложного проема». При проходе через дверной проем люди стремятся избежать быть прижатыми к косяку проема. Для этого люди, идущие с боков,

отталкиваются от косяка к центру проема. Они на короткое время уменьшают действительную ширину проема, создавая тем самым «эффект ложного проема», рис. 2.5 б. Одновременно люди, идущие ближе к оси проема, оказываются в зазоре между людьми, идущими с боков, и при определенных условиях как бы заклинивают проем, образуя арку.

Существование арки носит пульсирующий характер, устойчивое ее положение – явление редкое. Причем арки редко возникают в проемах шириной 1,2 м и практически не образуются в проемах шириной более 1,6 м [42].

На рис. 2.5 буквой  $P$  обозначена сила, сообщаемая звену арки толпой людей. Эта сила в арке раскладывается на систему сил, вызывающих и боковые давления на торцы элементов арки (плечи людей). Торцовые силы могут быть вычислены по формуле  $T = P / 2\sin 0,5\varphi$ , из которой видно, что силы, которыми человек зажат с боков, тем больше, чем значительнее сила давления на арку ( $P$ ) со стороны толпы и меньше угол  $\varphi$ . Сила  $P$  складывается из усилий, оказываемых людьми, оказавшимися в каждом секторе толпы, опирающемся на человека в образовавшейся арке. Такие усилия создаются людьми сознательно или бессознательно, когда они смещают центр тяжести своего тела в сторону арки и отставляют ногу в противоположном направлении для упора. Расчеты [30] показывают, что силы  $P$  могут составлять более 100 кг, а  $T$  – более 150 кг. При таких силах сдавливания человеку трудно самостоятельно вырваться из арки и если арка не разрушается, то их воздействие может привести к увечьям и даже смерти (*компрессионная асфиксия* – см. гл. 1). Печальные последствия их практического подтверждения давно известны. Так, в результате образования скоплений перед выходами во время паники в театре Броклона (г. Нью-Йорк) в 1879 г. погибло 283 человека. К сожалению, такое происходит и в наше время.

Оставаясь в рамках модели с равномерным распределением людей по длине потока, следует считать, что образование скопления начинается сразу, как только передняя граница потока на участке  $i$  достигнет границы с участком  $i+1$ . Перед этой границей образуется скопление с плотностью  $D_{\max}$ , состоящее из людей, не успевших перейти ее до подхода следующей части потока с плотностью  $D_i$ . Таким образом, образуется поток, состоящий из двух частей с разными плотностями. Поскольку скопление растет, то граница между этими частями потока перемещается в направлении, противоположном направлению движения потока.

Интенсивность движения в скоплении ( $q_{D_{\max}}$ ) определяет и величину людского потока на последующем участке пути, т. е. то количество людей, которое может перейти на него из скопления перед его границей за единицу времени:  $P = q_{D_{\max}}\delta_{i+1}$ . При этом возможны два варианта развития процесса



движения людского потока по участку  $i+1$ . Первый вариант: поток продолжает движение при плотности  $D_{\max}$ . Второй вариант: люди, переходя на участок  $i+1$ , имеют перед собой пространство свободное для движения, поэтому они увеличивают скорость до значения  $V_{i+1}$ , соответствующего значению интенсивности движения в скоплении  $q_{\max}$ , но при значении плотности в интервале до  $D$  при  $q_{\max}$ , (см. рис. 2.6).

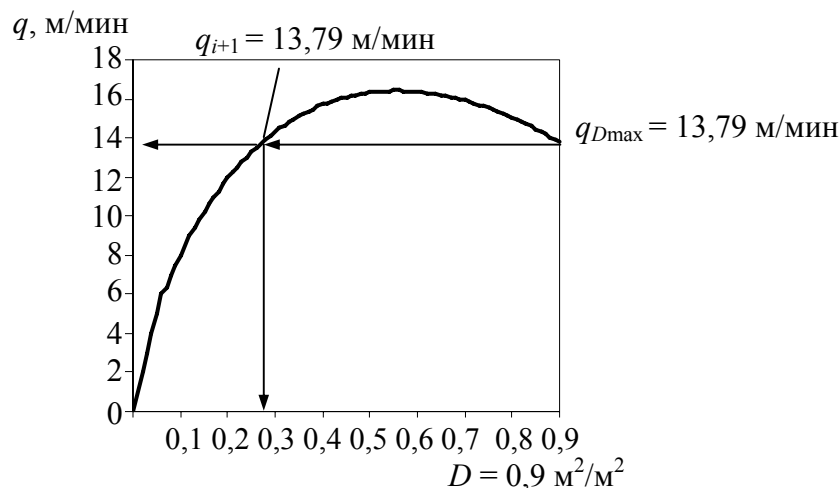


Рис. 2.6. Пример определения плотности потока на последующем участке пути

В соответствии с принятой для нормирования «жесткой» моделью, ГОСТ 12.1.004 принимает первый вариант: «При невозможности выполнения условия  $q_i \leq q_{\max}$  интенсивность и скорость движения определяются при значении  $D = 0,9$  и более» [5].

### 2.1.2. Слияние людских потоков

Слияние людских потоков может происходить на участках пути, где соединяются несколько путей и идущие по ним потоки, слившись в общий поток, затем идут по общему пути (рис. 2.7).

Таким образом, процесс слияния всегда сопровождается процессом движения потоков через границы смежных участков пути. Только в отличие от рассмотренного выше, в данном случае участку общего пути движения ( $i+1$ ) будет предшествовать не один, а несколько, по крайней мере, два или три ( $i_1$ ,  $i_2$  и  $i_3$ ) участка. И здесь так же возможны два случая: беспрепятственное движение через границу смежных участков пути или образование скопления людей перед границей участка  $i+1$ .

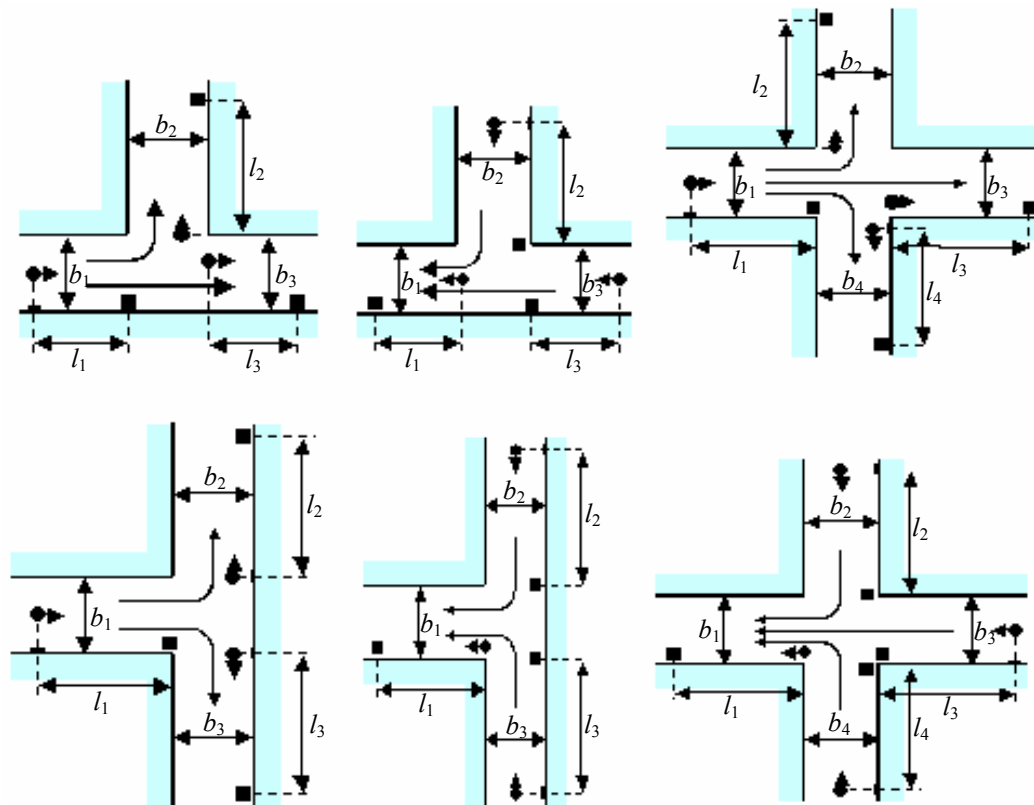


Рис. 2.7. Схемы проведенных натуральных наблюдений слияния и разделения людских потоков

Очевидно, что одновременный подход головных частей потоков к месту слияния в практике встречается редко. Как правило, люди из боковых проходов выходят либо в общий проход без слияния, либо вклиниваясь в поток идущих людей (рис. 2.8). Слияние людских потоков происходит при выполнении условия слияния потоков: передний фронт потока  $i_1$  должен подойти к месту слияния до того, как последний человек из потока  $i_2$  пройдет место слияния потоков, т. е.:

$$t_{i1} \leq t_{i2}. \quad (2.5)$$

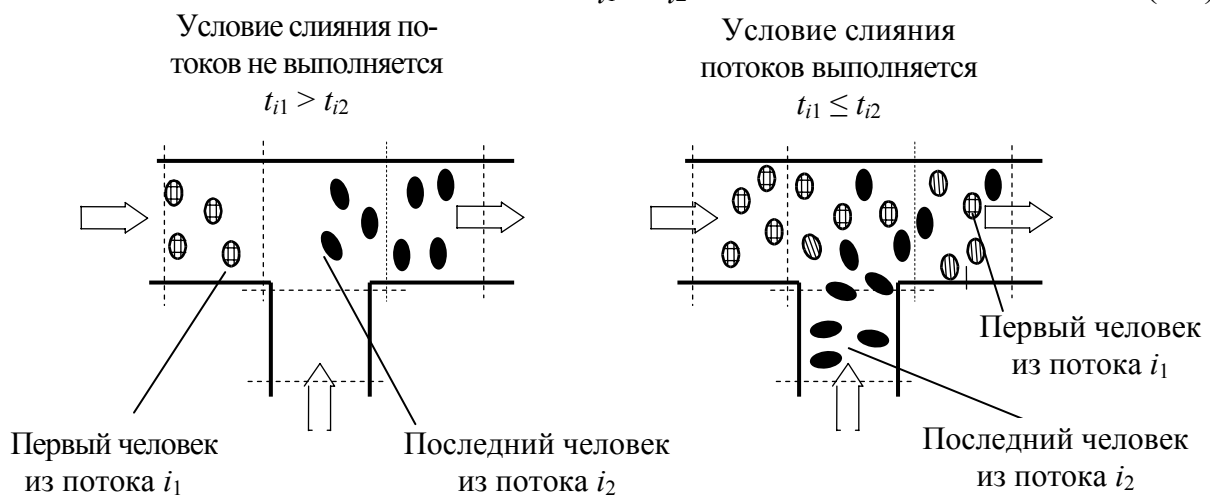


Рис. 2.8. Слияние людских потоков

Если слияние потоков происходит, то величина объединенного потока равна сумме величин сливающихся потоков, если ширина участка, на границе которого они сливаются, достаточна для его беспрепятственного движения, т. е. соблюдается условие, аналогичное (2.3):

$$q_{i+1} = \sum q_i \delta_i / \delta_{i+1}. \quad (2.6)$$

Если же пропускная способность последующего участка пути недостаточна, то перед его границей с участками  $i_1$  и  $i_2$  на этих участках образуются скопления людей с максимальной для данных условий плотностью, а поток, переходящий на участок  $i+1$ , будет иметь параметры движения, соответствующие  $q$  при  $D_{\max}$ .

### 2.1.3. Переформирование и растекание людского потока

При движении людских потоков по участкам пути весьма вероятны случаи, когда объединенный людской поток имеет несколько частей с различной плотностью (рис. 2.9). Например, при неодновременном слиянии двух потоков в объединенном потоке образуются три части: первая часть – с параметрами потока, первым прошедшем место слияния, вторая – с параметрами слившихся потоков, третья – с параметрами потока, последним миновавшем участок слияния. Переформирование людского потока – процесс выравнивания параметров движения в различных частях потока. В результате, вне зависимости от исходных параметров, каждая часть потока приобретает параметры впереди идущей части. Скорость переформирования  $V^1$  – скорость движения границы увеличения впереди идущей части – определяется скоростью перемещения границы между частями потока с различной плотностью.

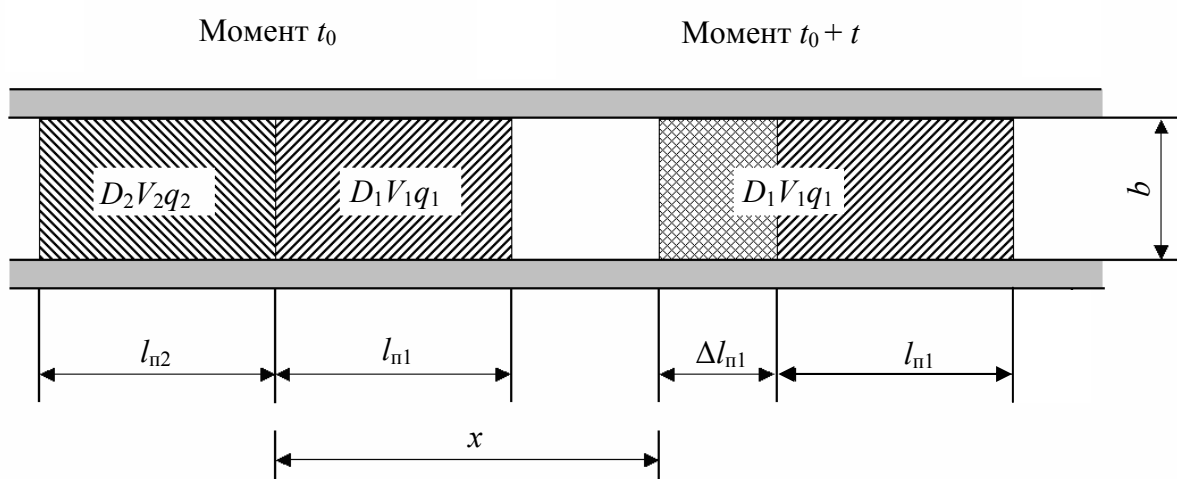


Рис. 2.9. Схема процесса переформирования людского потока

К началу процесса переформирования люди в арьергарде второй части потока, имеющей плотность  $D_2$ , идут со скоростью  $V_2$  и размещаются вплотную к первой части, имеющей плотность  $D_1$  и скорость  $V_1$ . По прошествии времени  $t$  все люди из второй части потока разместятся на участке  $\Delta l_{п1}$  с плотностью  $D_1$  в конце впереди идущей части, образуя единый поток с этой плотностью  $D_1$ . Если  $D_1 \geq D_2$ , то  $\Delta l_{п1} \leq l_{п2}$  и  $\Delta l_{п1} = l_{п2} D_2 / D_1$ .

На рис. 2.9 видно, что за время  $t$  люди, замыкающие первую часть потока, а вместе с ними и люди из примыкающего арьергарда второй части проходят расстояние  $x + \Delta l_{п1} = V_1 t$ . Люди же из замыкающей части второго потока проходят расстояние  $x + l_{п2} = V_2 t$ . Исходя из приведенных соотношений можно записать:  $(x + l_{п1} D_2 / D_1) / V_1 = (x + l_{п2}) / V_2$  и, преобразовав, получим

$$x(1 - V_1 / V_2) = \Delta l_{п1} (q_1 / q_2 - 1). \quad (2.7)$$

Поскольку скорость переформирования потока, т. е. скорость приобретения второй частью потока плотности первой части, неизвестна, то обозначим ее  $V^1$ . Тогда можно записать  $x = V^1 t$ . Но:  $x + l_{п2} D_2 / D_1 = V_1 t$  и после алгебраических преобразований имеем

$$V^1 = (q_1 - q_2) / (D_1 - D_2). \quad (2.8)$$

Подобным образом может быть выведена и формула для расчета времени переформирования потока

$$t^1 = \Delta l_{п1} (D_1 - D_2) / D_2 (V_2 - V_1) = l_{п2} (D_1 - D_2) / D_1 (V_2 - V_1). \quad (2.9)$$

Пока рассматривалась ситуация, в которой плотность людского потока в его впереди расположенной части выше плотности сзади расположенной части, и, следовательно,  $V_1 \leq V_2$ . Считается [37], что и в случае  $V_1 \geq V_2$  также происходит переформирование людского потока: люди из второй части потока, идущие с меньшей скоростью, увеличивают скорость и продолжают движение со скоростью первой части. Если головная часть потока имеет плотность свободного движения, то и весь поток, со временем, будет идти со скоростью свободного движения, т. е. с максимальной при данном уровне эмоционального состояния людей. Происходит *растекание потока*. Расчет процесса растекания потока производится по формулам (2.7)–(2.9), принимая  $V_1 = V_0$  и  $D_1 = D_0$ , т. е. равные значениям при свободном движении людей в потоке.

Однако очевидно, что для этого все люди в потоке должны иметь одинаковые физические возможности или стимулировать свою подвижность, переходя на более высокий уровень эмоционального состояния. Такое наиболее вероятно в чрезвычайных ситуациях. Частичное растекание потока ежедневно наблюдается в часы пик на пешеходных коммуникациях

станций и пересадочных узлах метрополитена. Но здесь же мы наблюдаем и образование групп более медленно идущих, не так торопящихся, пожилых людей.

Процесс образования скопления ( $D_c$ ) людей на границе участков с недостаточной пропускной способностью также «можно рассматривать, как частный случай переформирования...»:

$$V^1 = (q_c - q_2) / (D_c - D_2) \gg [37]. \quad (2.8a)$$

Тогда, соответственно, и

$$\begin{aligned} t^1 &= \Delta l_{п2}(D_c - D_2) / D_2(V_2 - V_c) = \\ &= l_{п2}(D_c - D_2) / D_1(V_2 - V_c). \end{aligned} \quad (2.9a)$$

#### 2.1.4. Одновременное слияние и переформирование людских потоков на участках ограниченной длины

Наиболее наглядно этот процесс проявляется в проходах зрелищных залов театров, кинотеатров, концертных залов, цирков, трибун спортивно-зрелищных сооружений. В магистральных проходах, объединяющих проходы между рядами зрительных мест, при эвакуации образуется людской поток, плотность которого, как правило, увеличивается со временем и по длине магистрального прохода в направлении выхода из него. Сложность процесса определила необходимость его многократных исследований, наиболее обширными из которых выполнены в МИСИ (МГСУ) в период с 1965 по 1985 гг. [47, 61–65].

Установлено, что при формировании и движении людских потоков в магистральных проходах зрелищных помещений (рис. 2.10) процесс складывается из следующих элементов:

- движение в рядах;
- изменение параметров движения при переходе из рядов в магистральный проход;
- одновременное слияние нескольких потоков из рядов на ограниченных по длине участках магистрального прохода между рядами;
- многократное переформирование потока при его движении по магистральному проходу;
- разуплотнение и растекание;
- возможное образование и рассасывание скоплений людей в рядах и в магистральном проходе.

Особенности развития процесса зависят от системы выходов из рядов (одно- или двусторонняя система), вида пути, числа мест в ряду и количества рядов, выходящих в магистральный проход, его ширины и ширины проходов в рядах.

Замечено, что при достижении некоторого значения плотности потока в магистральном проходе движение в нем как бы стабилизируется. Причем при большом количестве рядов, выходящих в магистральный проход, плотность стабилизирующегося потока достигает значений, превышающих  $D$  при  $q_{\max}$ . Таких значений плотности стабилизации не наблюдается при коротких рядах и магистральных проходах. При стабилизации процесса выход людей из рядов и движение в магистральном проходе замедляется, а иногда и совсем прекращается. По мере продвижения объединенного потока к выходу из прохода плотность потока то уменьшается, то увеличивается.

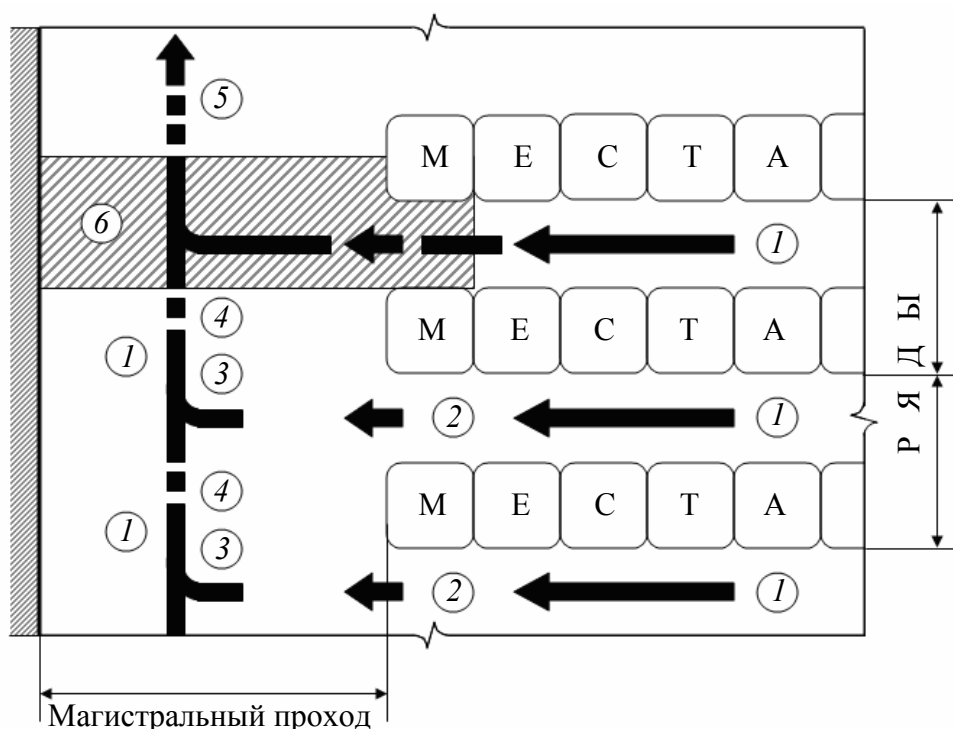


Рис. 2.10. Элементы процесса формирования и движения людских потоков в проходах зрелищных помещений: 1 – движение; 2 – переход через границы; 3 – слияние; 4 – переформирование; 5 – растекание и разуплотнение; 6 – скопление

Пользуясь установленными закономерностями переформирования, слияния, изменения параметров при переходе через смежные участки пути можно очень скрупулезно описать и этот сложный процесс эвакуации. Суммарное время движения потока из первого до  $i$ -го ряда составляет

$$\sum t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_i = l(D_1 - D_0) / (q_1 - q_0) + l(D_2 - D_1) / (q_2 - q_1) + l(D_3 - D_2) / (q_3 - q_2) + \dots + l(D_i - D_{i-1}) / (q_i - q_{i-1}).$$

Это выражение преобразуется в формулу:

$$t = l / q_{\text{ср}} [D_i(q_{\text{ср}} - q_{i-1}) / \Delta q + \sum_1^{i-1} D] + N / \delta q_{\text{ср}}. \quad (2.10)$$

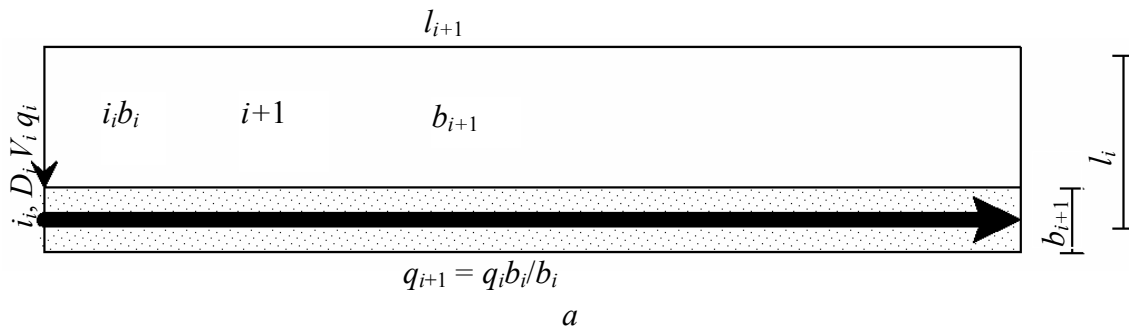
Пользоваться этими выражениями весьма трудоемко, поскольку необходимо определять параметры потока в магистральном проходе на уровне каждого ряда. Поэтому установлена [65] более простая расчетная формула:

$$t = mn / \delta q_{\text{ср}} + l D_1 (k + 1)(2k + 1) / 6q_1, \quad (2.11)$$

где  $m$  – число рядов;  $n$  – количество зрительских мест в ряду;  $\delta$  – ширина магистрального прохода;  $l$  – расстояние между боковыми выходами (рядами);  $D_1$  и  $q_1$  – соответственно плотность потока и интенсивность движения в магистральном проходе на уровне первого ряда, при величине потока из ряда  $P_p$  значение  $q_1 = P_p / \delta$ ;  $q_{\text{ср}}$  – интенсивность движения на выходе из магистрального прохода после момента стабилизации, принимается равной  $q_{\text{ср}} = mP_p / \delta$ , если она меньше  $q_{\text{max}}$ ;  $q_{\text{ср}}$  равна интенсивности движения при  $D_{\text{ср}} = P_p t_p / l \delta$ , если она больше  $q_{\text{max}}$ , а  $D_{\text{ср}} \leq D_c$  (при скоплении),  $q_{\text{ср}}$  равна интенсивности движения при плотности скопления  $D_c$ , если она больше  $q_{\text{max}}$  и  $D_{\text{ср}} \geq D_c$ ;  $k$  – целая часть от деления  $q_{\text{ср}}$  на  $q_1$ .

Рассматриваемый процесс не является спецификой зрелищных помещений. Они фактически стали «полигоном» изучения этого общего процесса, соответствующего наиболее общей схеме РЭП (рис. 2.11). А эта схема – и коридор, и лестница. Большая населенность этажей многоэтажных и особенно высотных общественных зданий определяет аналогичное развитие процесса, несмотря на, казалось бы, большое расстояние между выходами с этажей [66, 67].

Изложенные закономерности движения людских потоков не зависят от вида зависимостей между их параметрами и описывают только их кинематику. Однако описывающие их формулы и графики показывают, что конкретные, количественные показатели процесса движения людских потоков зависят от вида и количественного выражения входящих в них зависимостей между параметрами людского потока.



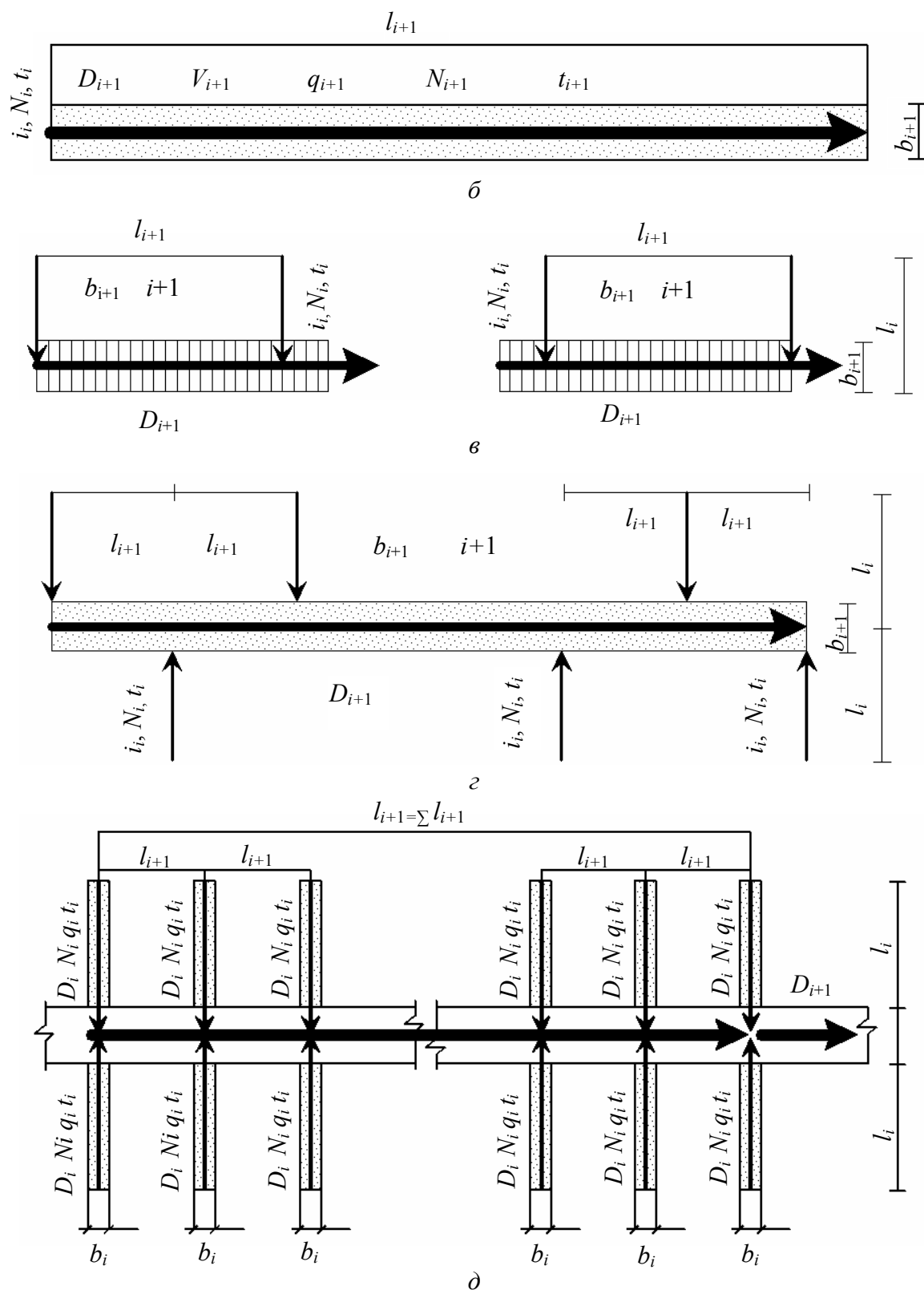


Рис. 2.11. Общая расчетная схема путей движения людских потоков и ее модификации:  
 а – один источник; б – поток на общем участке; в – одностороннее расположение источников; г – двустороннее несимметричное расположение источников; д – двустороннее симметричное расположение источников (общая расчетная схема)



## **2.2. ПСИХОФИЗИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ СВЯЗИ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ ЛЮДСКИХ ПОТОКОВ**

### **2.2.1. Эмпирические данные и зависимости**

Основной зависимостью, определяющей динамику людского потока, является зависимость между скоростью его движения и плотностью. От нее зависит время движения людского потока по участкам маршрута эвакуации и величина потока, поскольку именно вид этой зависимости определяет интенсивность его движения, что наглядно демонстрируют графики на рис. 2.3. Факт общей качественной зависимости скорости от плотности общеизвестен: при увеличении плотности скорость снижается. Однако общая известность такого факта лишь подтверждает подмеченный исследователями парадокс: «Этот факт не получил научного объяснения потому, что он слишком известен» [68]. Существование зависимости скорости людского потока от его плотности, как имеющей какой-то закономерный характер, впервые установлено лишь в начале 30-х гг. прошлого столетия [36]. Результаты подобных исследований на горизонтальных путях, выполненных сотрудниками одного из университетов Японии под руководством К. Kimura и S. Ihara, опубликованы в университетском издании приблизительно в то же время [69]. Японские исследования оставались неизвестными в СССР, в Европе и в Америке в течение почти 50-ти лет.

Во всех последующих работах, проводимых в России, исследованию этой зависимости уделялось пристальное внимание, прежде всего потому, что в каждой из них количественные выражения получаемых зависимостей отличались от установленных в предыдущих работах. К концу 70-х гг. прошлого века общий объем эмпирических данных [46, 70] составил 24 478 одновременно фиксируемых значений скорости и плотности людских потоков в 69 сериях натуральных наблюдений в зданиях различного назначения, в сооружениях метрополитена, на городских территориях, во внеуличных переходах и в экспериментах (рис. 2.12–2.14). В настоящее время этот объем достиг более 40 тыс. замеров.

Скорость движения людей в потоке и потока в целом зависит не только от плотности потока, но и от вида пути, и от физических возможностей людей, составляющих поток, и от их эмоционального состояния, определяемого как индивидуальными особенностями каждого из участников движения, так и общим психологическим настроением массы людей, оказавшихся по стечению обстоятельств в одной толпе. Чем выше плотность потока и психологическая напряженность ситуации, тем больше превалирует над индивидуальным сознанием общий психический настрой массы, как стихийного образования, как единого социального организма, возникшего на короткое время [71, 72].

$V$ , м/мин

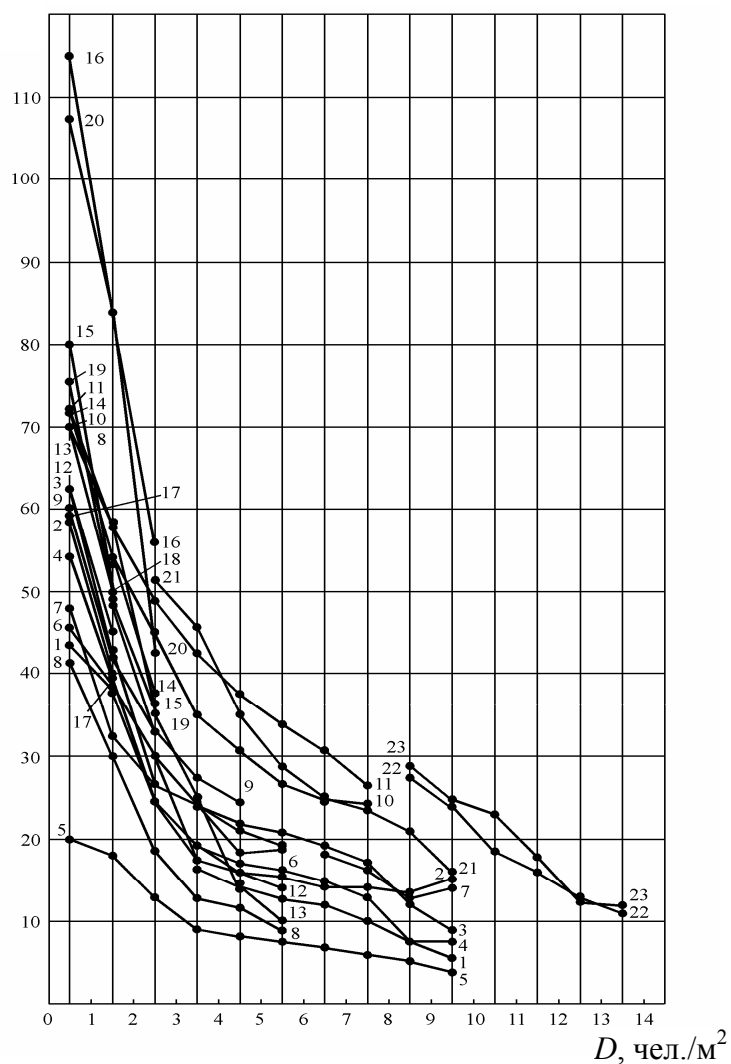


Рис. 2.12. Эмпирические зависимости скорости людского потока от его плотности при движении по горизонтальным путям здания: 1, 5 – театры, кинотеатры, 2 – университеты, 3 – промышленные, 4, 13, 14 – транспортные, 6 – спортивно-зрелищные, 7 – различные, 8 – торговые; школы: 9 – старшая группа, 10 – средняя, 11 – младшая; улицы: 12 – торговый центр, 15, 16, 18 – транспортный узел, 19 – промышленный узел, 20, 21 – метрополитен, 22, 23 – эксперимент

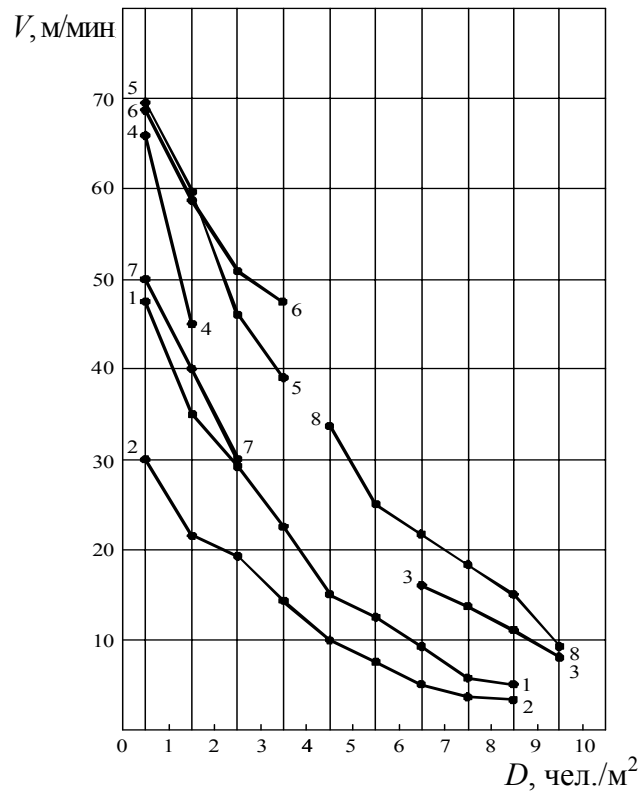


Рис. 2.13. Эмпирические зависимости скорости людского потока от его плотности при движении по лестнице вниз: здания: 1 – различного назначения, 2, 3 – спортивно-зрелищные, 4 – университет; школы: 5 – средняя группа, 6 – младшая; 7 – транспортный узел; 8 – эксперимент

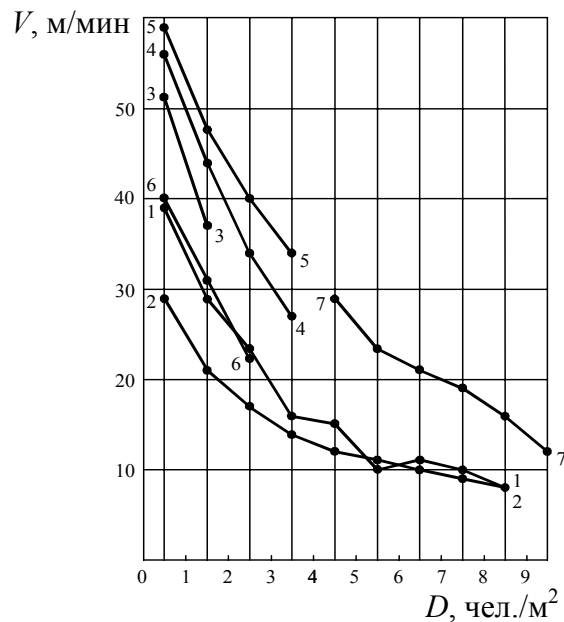


Рис. 2.14. Эмпирические зависимости скорости людского потока от его плотности при движении по лестнице вверх: здания: 1 – различного назначения, 2, 3 – спортивно-зрелищные, 3 – университет; школы: 4 – средняя группа, 5 – младшая; 6 – транспортный узел; 7 – эксперимент

Многофакторность формирования наблюдаемой скорости потока стала очевидной достаточно скоро, но долго не удавалось хотя бы «нащупать» и понять ее явно психологические и физические механизмы. Поэтому каждый раз построенные по эмпирическим данным зависимости сравнивались с другими, полученными таким же образом, или с некой, выбранной почему-то в качестве основной, зависимостью [37]. Однако их растущее множество стало тормозом практического применения этой основополагающей связи между параметрами людского потока, поскольку не давало возможности использования ни одной из них в качестве общей, расчетной закономерности, необходимой для нормирования.

Физическое достижение той или иной скорости движения человека зависит от двух факторов: длины шага и частоты шагов (темпа движения). Плотность потока (окружающие люди), с этой точки зрения, влияет тем, что лишает пешехода пространства, необходимого для полношагового движения. Однако если проанализировать расстояние между людьми и плотность потока, то становится видно, что при плотности до 2–2,5 чел./м<sup>2</sup> физические расстояния для полношагового (при среднем шаге 0,7 м) движения есть, а человек идет со скоростью меньшей скорости свободного движения. В этом интервале плотности на снижение скорости влияет расстояние между людьми не из-за физической возможности широко шагать, а из-за ограничения возможности маневрировать при движении. То есть имея перед собой человека, скажем, на расстоянии 1 м, и не имея возможности его обогнать, пешеход начинает уменьшать скорость, чтобы избежать столкновения. Если же он решил обогнать впереди идущего человека, то ему придется либо резко увеличивать скорость движения, либо, наоборот, резко притормаживать, то уклоняться от столкновений, то, наоборот, идти на них, что вызывает и физический и психологический отпор со стороны окружающих, да и самому не доставляет удовольствия. Становится очевидным, что плотность потока человек воспринимает не просто как ограничение физического пространства для движения, а гораздо сложнее – как комплекс физических и психических факторов, интенсивность воздействия которых на человека с увеличением плотности потока растет, и неизвестно, в какой степени. Влияние опасности, определяющей психологические условия, в которых происходит движение, более очевидно. Поэтому практически всеми постулируется, как сама собой разумеющаяся, психологическая и физиологическая обусловленность скорости людского потока, но нет ни одной работы, в которой раскрывались бы механизмы этой обусловленности, определяющие форму и вид ее проявления в наблюдаемых зависимостях.

В исследованиях людских потоков отмечается, что в чрезвычайных ситуациях, «когда психологический фактор играет большую роль, скорость

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 способствуют согласованности движения... Аналогичная картина наблюдается и при комфортных условиях с той лишь разницей, что общий психологический «настрой» людей обуславливает снижение скорости движения потока» [37]. Этот общий психологический настрой теоретиками психологии масс формулируется как «взаимное усиление эмоций, взаимное заражение» [71].

Такое почти дословное совпадение определений объектов исследований в теории людских потоков и в теории психологии масс не просто любопытно, но и показывает, что людской поток можно рассматривать как один из видов в типологии масс. Воспользуемся этим, чтобы словами психологов следующим образом выразить общую концепцию: «...отдельный человек, индивид, и массы – это как бы два противоположных полюса на шкале социально-психологического знания. Соответственно, между ними существует множество различий, так как масса представляет собой некое новое целое, несводимое к сумме входящих в нее людей... система не равна сумме своих составляющих» [71]. И еще: «Индивид, даже не испытывая на себе психического давления со стороны других, лишь на основе восприятия их поведения заражается этим поведением, подчиняется и следует ему» [72].

### **2.2.2. Стохастичность людского потока**

Но это «некое новое целое» не есть нечто постоянное, неизменное. Наоборот, в нем все постоянно изменяется: не только состав людей в наблюдаемых потоках, но и их взаимное влияние друг на друга и влияние на них на всех окружающих, в котором они находятся в различных ситуациях. Поэтому не только скорость людского потока в каждом интервале плотности в каждой серии наблюдений является случайной величиной (рис. 2.15), но и характер изменения этой величины от одного интервала плотности к другому в каждой серии зависит от стечения многих обстоятельств.

Здесь случайность – форма естественного проявления процесса, а потому должна быть и формой его математического описания. Поэтому зависимость между скоростью и другими параметрами потока (плотностью, эмоциональным состоянием людей, видом пути и т. д.) является случайной функцией, которая в каждой серии наблюдений или экспериментов проявляется как одна из возможных ее реализаций. Только совокупность реализаций и дает представление о существующей закономерности изменений случайного процесса. Следовательно, для установления существующей

закономерности необходимо рассмотрение всей совокупности зафиксированных ее реализаций и соответствующий статистический анализ представляющих их эмпирических данных. Однако такой статистический анализ впервые был выполнен лишь в конце 70-х гг. в связи с необходимостью разработки СНиП II-2-80: «Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений». Его результаты опубликованы позже [73].

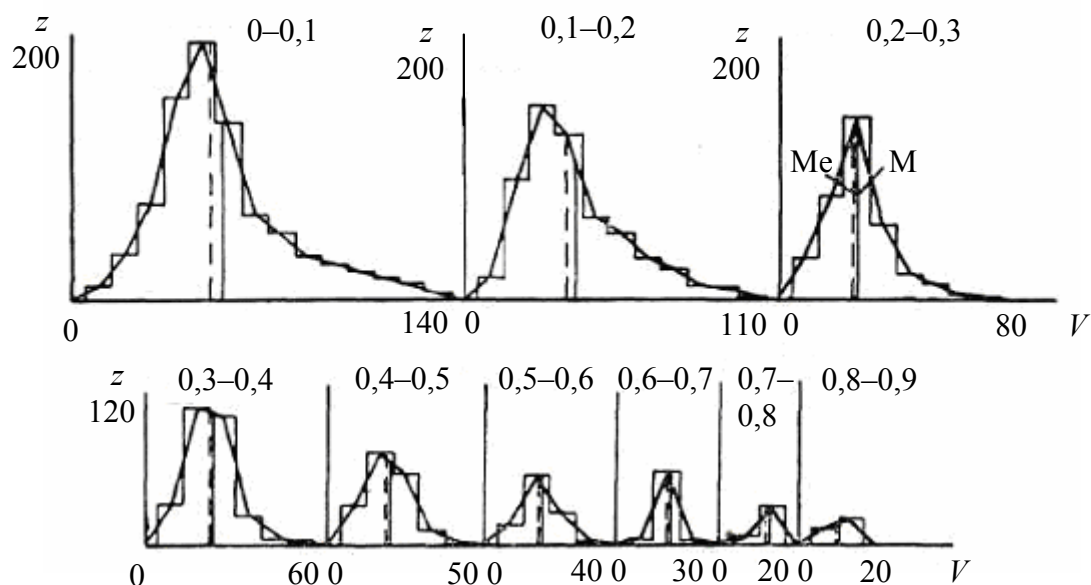


Рис. 2.15. Гистограммы и полигоны распределения значений скорости людей в потоке при движении по горизонтальным путям [1] для различных интервалов плотности потока:  $V$  – скорость движения, м/мин;  $z$  – количество замеров

Проведенный статистический анализ позволил выделить однородные по статистическим показателям группы серий проведенных к тому времени натурных наблюдений и экспериментов. Результаты анализа подтвердили корректность классификации этих серий по видам пути, но в то же время показали существование в каждом из этих классов нескольких групп, однородных по наблюдаемым значениям скорости движения, для которых межгрупповое объединение неправомерно. Причину столь значимых различий логично было объяснить влиянием различных уровней психологического воздействия на людей условий, в которых происходило движение наблюдаемых потоков людей. Основанием для такого логического постулата являлось и то, что оценить количественно влияние психологического фактора на величину скорости движения людского потока по тому или иному виду пути никогда ранее не удавалось. Для этого были естественные причины: любое наблюдаемое значение скорости движения каждого человека в потоке по конкретному виду пути – результат одновременного совместного влияния плотности потока и психологического воздействия среды, в которой происходит наблюдаемое движение.

### 2.2.3. Закономерность изменения скорости от плотности

В то же время, длительными наблюдениями установлено, что до достижения определенных значений плотности ее влияние на свободу движения человеком не ощущается. Поэтому и выделен интервал индивидуального, свободного движения (гл. 1, табл. 1.4). Точные значения порога  $D_0$ , при достижении которого плотность становится фактором, вызывающим изменение скорости движения людей в потоке, не были известны, но было очевидно, что они находятся в интервале плотности до 1 чел./м<sup>2</sup>, в котором наблюдается скорость свободного движения  $V_0$ , можно сказать, скорость при нулевом влиянии плотности. В последующих интервалах плотности она уже влияет на скорость движения человека в потоке и, следовательно, всего потока, поэтому обозначим соответствующую скорость при плотности  $D$ , как  $V_D$ . Тогда степень влияния плотности на скорость легко установить по изменениям  $\Delta V_D$  средней скорости движения людей в потоке (скорости потока) той или иной плотности  $V_D$  в сравнении со скоростью свободного движения  $V_0$

$$\Delta V_D = V_0 - V_D. \quad (2.10)$$

Чтобы исключить влияние психологической напряженности ситуации, возьмем эти значения из одной и той же серии наблюдений и соотнесем полученные значения  $\Delta V_D$  со значением  $V_0$ , т. е. построим функцию

$$R = \Delta V_D / V_0 = \varphi(D). \quad (2.11)$$

Очевидно, что эта функция описывает общую тенденцию влияния именно плотности людского потока на его скорость, поскольку во всем остальном условия наблюдений были одни и те же или идентичны (вид пути, вид здания и режим его эксплуатации, состав потока). Такие функции были получены для всех серий натуральных наблюдений, графики которых представлены на рис. 2.12–2.14, в которых имелись значения  $V_0$ . Они были объединены по видам пути. Полученные значения  $R$  приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

**Значения функции  $R$  при средних значениях плотности  $D$  в интервалах ее изменения**

Плотность людского потока $D$ , чел./м <sup>2</sup>		1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5
Средние значения $R$ по эмпирическим данным для видов пути	Горизонтальных в зданиях	0,270	0,434	0,555	0,610	0,655	0,705	0,750	0,789
	Горизонтальных вне зданий	0,304	0,528	0,668	0,770	0,838	–	–	–
	Лестница вниз	0,214	0,386	0,529	0,672	0,761	0,799	0,841	0,895
	Лестница вверх	0,232	0,413	0,512	0,595	0,655	0,681	0,724	0,779
	Проем	0,320	0,454	0,541	0,609	0,655	0,701	0,737	0,780

Методология математической статистики четко, как аксиому, формулирует, что математическая формула только тогда получает реальное значение, когда она адекватна внутренним отношениям между явлениями или, во всяком случае, отражает эти отношения с достаточной степенью приближения. Поэтому необходимо выбрать вид аппроксимирующей функции, способной отобразить психофизическую суть описываемой взаимосвязи между интенсивностью воздействия плотности и реакцией на него человека, выражающейся в изменении скорости его движения.

В психофизике известно несколько законов, описывающих отображение внешних воздействий в сенсорном пространстве человеке [74]. Их анализ показал [46, 73], что устанавливаемой взаимосвязи в наибольшей степени может соответствовать так называемый всеобщий психофизический закон Вебера – Фехнера. О высокой степени соответствия выполненной аппроксимации свидетельствует пример, представленный на рис. 2.16.

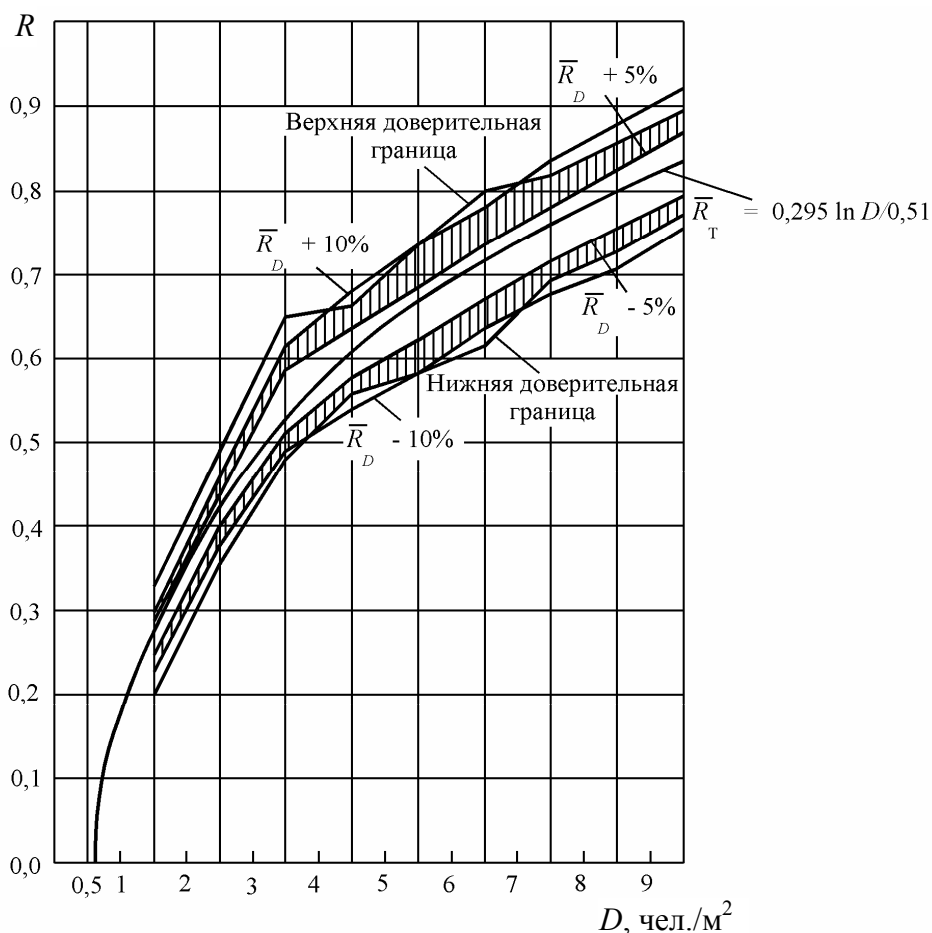


Рис. 2.16. Пример аппроксимации зависимости  $R_T$  для горизонтальных путей в зданиях:

- — установленная теоретическая функция  $\bar{R}_T = f(D)$ ;
- ▨ — область допустимых отклонений от  $\bar{R}_D$



Из найденного соотношения  $R_{Dj} = (V_{0j}^{\mathcal{E}} - V_{Dj}^{\mathcal{E}}) / V_{0j}^{\mathcal{E}}$  следует формула для определения скорости движения людского потока

$$\bar{V}_{Dj}^{\mathcal{E}} = \bar{V}_{0j}^{\mathcal{E}} \left( 1 - a_j \ln \frac{D_i}{D_{0j}} \right), \quad (2.12)$$

где  $\bar{V}_{0j}^{\mathcal{E}}$  – случайная величина скорости свободного движения (при отсутствии влияния окружающих людей), зависящая от вида пути  $j$  и уровня эмоционального состояния  $\mathcal{E}$  людей;

$a_j$  – коэффициент, определяющий степень влияния плотности потока при движении по  $j$ -му виду пути;

$D_i$  – текущее значение плотности потока;

$D_{0j}$  – пороговое значение плотности потока, по достижении которого плотность становится фактором, влияющим на скорость движения.

Поскольку в этой формуле величина  $R_{Dj}$  не зависит от уровня эмоционального состояния, то его влияние отображается величиной скорости свободного движения  $V_{0j}^{\mathcal{E}}$ . Кроме того, функция, стоящая в скобках этой формулы, является неслучайной функцией. Поэтому и случайность индивидуальных скоростей движения людей в потоке также отображается этой случайной величиной. Функция, которая представляет собой произведение случайной величины на неслучайную функцию, в теории вероятностей называется элементарной случайной функцией. Очевидно, что такое описание закономерностей изменения скорости людского потока в зависимости от его плотности отвечает стохастической природе процесса. Коэффициенты, характеризующие коэффициенты формулы (2.12) приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

**Значения коэффициентов  $a_j$  и  $D_{0j}$  в зависимости от вида пути**

Вид пути	$a_j$	$D_0$ , чел./м <sup>2</sup>
Горизонтальный вне зданий	0,407	0,69
Горизонтальный в зданиях	0,295	0,51
Проем	0,295	0,65
Лестница вниз	0,400	0,89
Лестница вверх	0,305	0,67

#### 2.2.4. Закономерность влияния эмоционального состояния

Уровень эмоционального состояния изменяется от комфортного до стрессового. Шкала уровней может быть выражена в относительных единицах (от 0 до 1). Такая шкала имеет следующее содержательное описание [75]. Выделяются три стадии развития отрицательного эмоционального состояния. Первая стадия ( $0 < \mathcal{E} < 0,3$ ) связана с появлением слабых

сигналов о возможности опасности. В этом состоянии происходит своеобразная настройка организма, подготовка его к встрече с ожидаемой опасностью. Вторую стадию ( $0,3 < \mathcal{E} < 0,7$ ) следовало бы назвать «активные действия», поскольку этой стадии соответствует состояние повышенной активности организма, сопровождающее целесообразное поведение, направленное на устранение опасности. Когда устранить опасность не удается и возникает чувство бессилия справиться с угрожающей опасностью, тогда наступает третья стадия ( $0,7 < \mathcal{E} < 1$ ), которая характеризуется резким спадом активности и переходом в зону запредельного торможения.

Уровень эмоционального состояния различным образом влияет на функционирование подсистем центральной нервной системы человека, активность которых описывается графиками на рис. 2.17 [75].

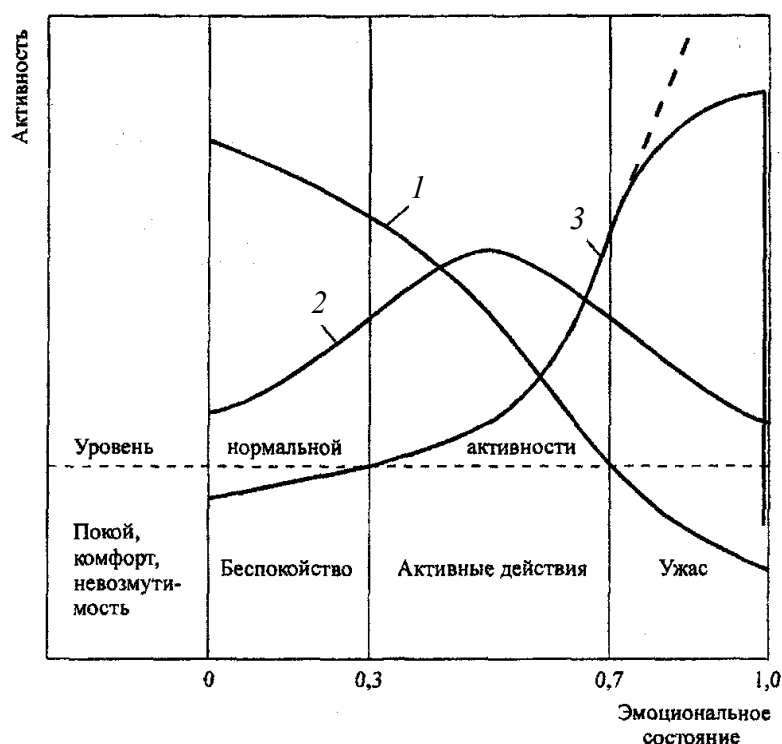


Рис. 2.17. Влияние эмоционального состояния на уровень активности:  
1 — внимания; 2 — управления; 3 — движения

Как видно, двигательная активность при увеличении уровня эмоционального состояния возрастает. Учитывая этот факт и то, что значения скоростей движения людей в повышенном эмоциональном состоянии являются крайними членами в статистических распределениях значений скоростей свободного движения, по данным натурных наблюдений были установлены категории движения и соответствующие им скорости свободного движения по видам пути. Графики полученных зависимостей представлены на рис. 2.18.

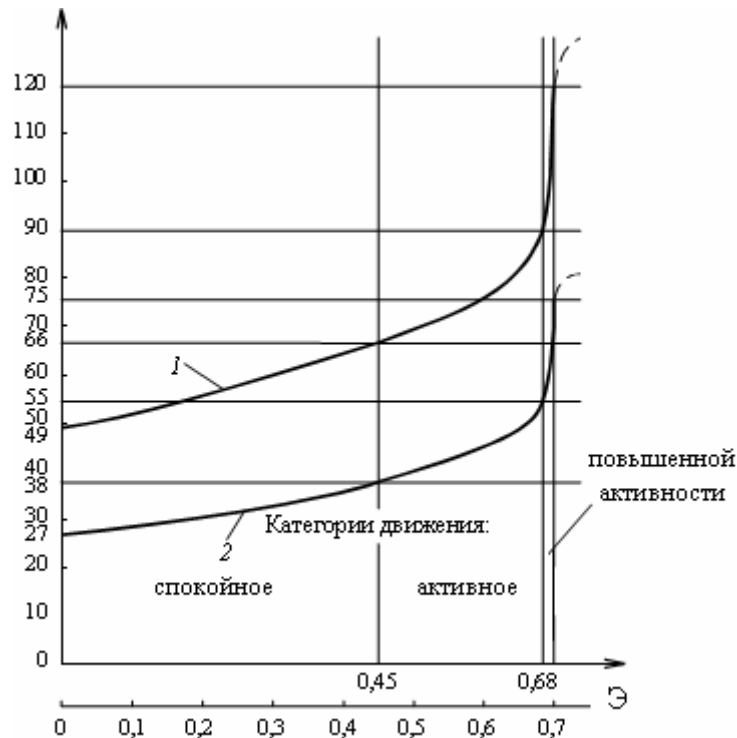


Рис. 2.18. Зависимость скорости свободного движения людей в потоке от уровня эмоционального состояния при движении:

1 – по горизонтальному пути, через проем, по лестнице вниз; 2 – по лестнице вверх

Таким образом, по данным статистической совокупности всех серий проведенных натуральных наблюдений и экспериментов была получена возможность определить конкретные значения всех членов формулы, описывающей закономерность связи между параметрами людских потоков (2.12) [76]. Они приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

**Значения скоростей свободного движения людей в потоке при различных категориях движения**

Категории движения	Скорость свободного движения $\bar{V}_0$ по видам пути, м/мин	
	Горизонтальный, лестница вниз, проем	Лестница вверх
Комфортное	< 49,0	< 27,0
Спокойное	49,0–66,0	27,0–38,0
Активное	66,0–90,0	38,0–55,0
Повышенной активности	90,0–120,0	55,0–75,0

Теперь все части общего выражения закономерностей (2.12) изменения скорости движения людского потока определены для всех видов пути ( $j$ ) и уровней эмоционального состояния людей. Поскольку скорость движения людского потока – величина случайная, то в каждом интервале плотности потока ее значения имеют распределения, дисперсия которых с

ростом плотности уменьшается, что соответствует данным натуральных наблюдений (рис. 2.15). Среднее значение  $\bar{V}_D$  (математическое ожидание) вычисляется по формуле (2.15), а дисперсия  $S_{V_0}^2$  – по формуле

$$S_{V_D}^2 = S_{V_0}^2 \left( 1 - a \ln \frac{D_i}{D_0} \right)^2. \quad (2.13)$$

Представленные формулы позволяют определить минимальные и максимальные значения скорости движения в зависимости от плотности и состава людского потока. Пример построения диапазона отклонений для горизонтального пути от средних значений представлен на рис.2.19.

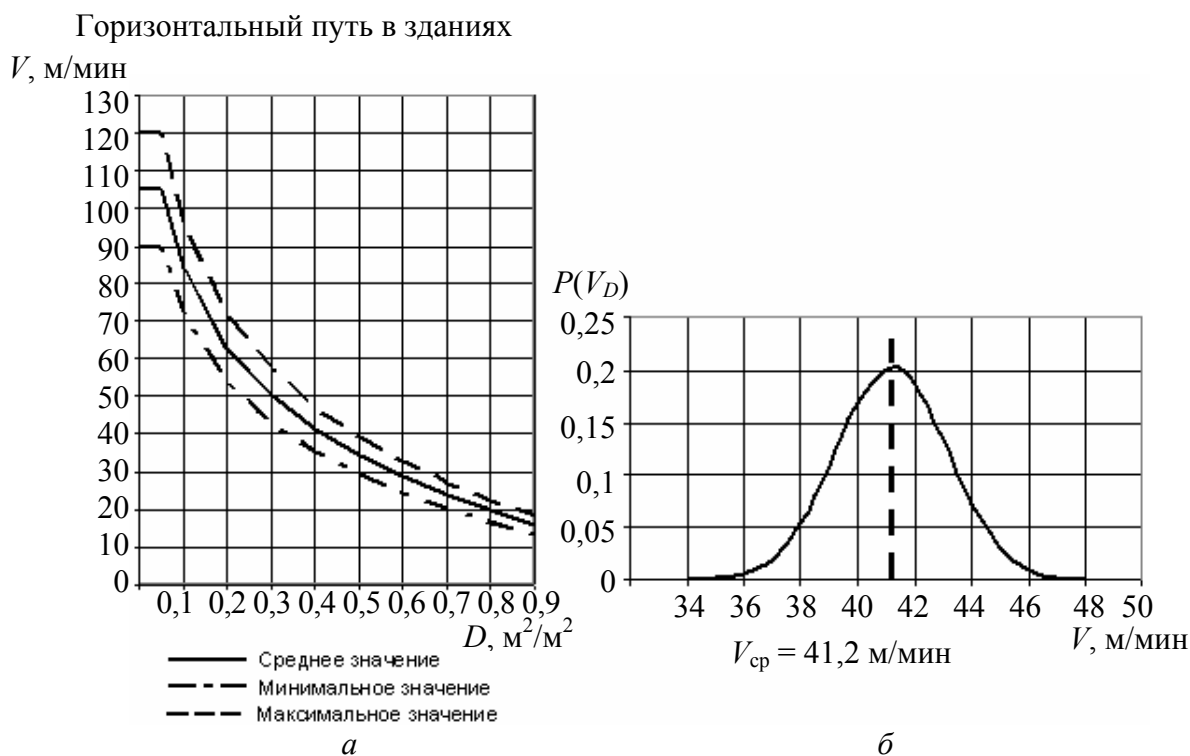


Рис. 2.19. Распределение вероятных значений скорости людей в потоке при категории движения «повышенная активность» по горизонтальному участку пути:

- а – при изменении плотности людского потока;
- б – при фиксированном значении плотности потока, например,  $D_i = 0,4 \text{ м}^2/\text{м}^2$

Зависимость  $V = f(D)$  определяет моноэкстремальный характер изменения интенсивности движения  $q = VD$ . Максимум этой функции достигается при значении плотности

$$D_{q_{\max}} = e^{(1/a_j - 1 + \ln D_{0j})}, \quad (2.14)$$

поскольку при этом значении первая производная функция  $q_j = D \bar{V}_{0j}^{\exists} (1 - a_j \ln(D / D_{0j}))$  равна 0. Как видно, положение максимума не зависит от скорости свободного движения, а следовательно, и уровня эмоционального состояния, но зависит от величин, характеризующих плотность и вид пути.

Корректность положения максимумов интенсивности движения подтверждается натурными наблюдениями.

Наличие максимума в функции, описывающей зависимость интенсивности движения от плотности людского потока, является критерием оценки приемлемости видов функций, предлагаемых для описания зависимости  $V = \varphi(D)$ . Отсутствие максимума функции  $q = f(D)$  означало бы неограниченность пропускной способности ( $Q = qb$ ) поперечного сечения пути шириной  $b$ . Однако это противоречит натурным наблюдениям, которые показывают образование скоплений людей и задержки движения на границах участков пути из-за ограниченности их пропускной способности.

Международным научным сообществом установленная закономерность признана открытием в области социальной психологии [76].

Очевидность повышения психологической напряженности ситуации при возникновении пожара предопределяет выбор категории движения «повышенная активность» (табл. 2.3) в качестве интервала ожидаемых скоростей движения людей в чрезвычайной ситуации.

Кроме влияния физических данных человека, влияния плотности потока и эмоционального состояния, скорость движения зависит также от следующих факторов.

Состояние поверхности эвакуационного пути. Длина шага зависит от силы отталкивания опорной ногой, что, в свою очередь, зависит от коэффициента трения. Площадь контактного пятна при завершении шага определяется площадью пятки ноги, вынесенной вперед. В случае скользкой поверхности, ритм движения замедляется, так как человек с большей осторожностью и с большими потерями времени перемещает тело вперед. В связи с этим, нормы пожарной безопасности США (NFPA 101 Life Safety Code, пункт 7.1.6.4\*) нормируют состояние поверхности эвакуационного пути. Большое внимание этой проблеме также уделялось в работе [37].

Следует иметь в виду, что при эвакуации, например, спортивных учреждений, ввиду дефицита времени, люди могут не иметь возможности переобуться. Скорость движения в специальной спортивной обуви, босиком, или в обуви для купания может существенно отличаться в сторону уменьшения.

Пространство, необходимое для движения можно условно разделить на две зоны: зона движения и зона восприятия. *Зона движения* – это зона, необходимая для выполнения шага. *Зона восприятия* – информационное пространство, необходимое для движения. Пешеход с помощью органов зрения отслеживает скорости и траектории движения окружающих людей, оценивает расстояния до объектов и предметов и корректирует скорость своего движения для избежания столкновений и выполнения маневров.

Специальные исследования показали, что люди с плохим зрением, практически не могут принимать равноценного участия в движении. При возникновении ЧС, в условиях плохой видимости (нарушение освещения, задымление и т. п.) скорость свободного движения существенно снижается и может достигать значений 20 м/мин. Интересно отметить, что при скорости встречного воздушного потока 6,5 м/с и более, например, при работе системы противодымной защиты, скорость движения человека также снижается.

В большинстве зданий люди находятся в составе семейной или социальной группы. Как показывают натурные наблюдения, в таком случае люди будут эвакуироваться в составе группы, скорость движения которой будет определяться скоростью движения самого медленно идущего члена группы.

### **2.3. ОСОБЕННОСТИ ЭВАКУАЦИИ МАЛОМОБИЛЬНЫХ И НЕМОБИЛЬНЫХ ЛЮДЕЙ**

Очевидно, что в определенных типах зданий (больницы, интернаты для престарелых и т. п.), а также в общественных и промышленных зданиях различного назначения могут находиться люди с нарушением функций организма. Согласно СНиП 35–01–2001 [77] к категории маломобильных людей относятся люди, испытывающие затруднения при самостоятельном передвижении, получении услуги, необходимой информации или при ориентировании в пространстве – это инвалиды, люди с временным нарушением здоровья, беременные женщины, люди старших возрастов, люди с детскими колясками и т. п. По данным [78] в России насчитывается 12 млн инвалидов. Причем 80 % из их числа – инвалиды I и II групп.

К отличительным особенностям эвакуации людей с ограничениями функций организма относятся:

1. Низкая скорость передвижения.
2. Использование при движении вспомогательных средств (костыли, палки, протезы, рамы, инвалидные коляски).
3. Увеличенные по сравнению со здоровыми людьми размеры эргонометрического пространства, необходимого для осуществления движения.
4. Пониженная «устойчивость» инвалидов в движущемся людском потоке, так как при высоких плотностях потоков и обгонах не исключены физические контакты между людьми, обусловленные пересечением эргонометрических зон близко расположенных людей.
5. Пониженная маневренность в движении по сложным участкам эвакуационного пути (повороты, сужения, места слияний потоков).
6. Трудности при преодолении преград в пути (открывание дверей и т. п.).

Кроме того, по данным специальных исследований [79] такие люди имеют сложности с чтением указателей эвакуационных выходов, восприятия сигналов системы оповещения, имеют повышенное время подготовки к эвакуации и т. п.

Параметры движения людей с нарушениями функций организма были исследованы в МИСИ (МГСУ) и в Академии ГПС МЧС РФ. Полученные результаты вошли в СНиП 35–01–2001. Согласно СНиП, выделяются 4 группы людей по их мобильности: М1, М2, М3, М4. Характеристика людей по группам мобильности приведена в табл. 2.5.

Таблица 2.5

**Характеристика групп мобильности**

Группа мобильности	Характеристика людей в группе	Площадь горизонтальной проекции человека, м <sup>2</sup>
М1	Люди, не имеющие ограничений по мобильности, в том числе с дефектами слуха	0,1
М2	Немощные люди, мобильность которых снижена из-за старения организма (инвалиды по старости); инвалиды на протезах; инвалиды с недостатками зрения, пользующиеся белой тростью; люди с психическими отклонениями	0,2
М3	Инвалиды, использующие при движении дополнительные опоры (костыли, палки)	0,3
М4	Инвалиды, передвигающиеся на креслах-колясках, приводимых в движение вручную	0,96

Проведенные исследования [80, 81] показали, что изменение скорости движения маломобильных людей в зависимости от плотности имеет те же закономерности, что и описываемые ранее. Значение величин, входящих в формулу (2.12) для перечисленных групп мобильности в СНиП 35–01–2001 приведены в табл. 2.6. Следует учитывать, что приведенные параметры относятся к однородным по мобильным качествам группам людей. Данные, приведенные в таблице, позволяют заключить, что скорость потоков маломобильных людей значительно ниже, чем скорость движения здоровых людей. Наиболее низкие скорости наблюдаются у людей группы мобильности М2.

Очевидной отличительной особенностью немобильных людей является отсутствие возможности самостоятельного передвижения, необходимость помощи со стороны окружающих и значительные размеры эвакуационных путей для маневрирования при использовании носилок или кроватей-каталок. Эвакуация немобильных людей представляет наиболее сложную задачу. Данные исследований [82] говорят о том, что средние значения скорости переноски человека на носилках физически здоровыми мужчинами составляют: по горизонтали – 95 м/мин, по лестнице вниз – 65 м/мин, по лестнице вверх – 45 м/мин. Скорость беспрепятственного передвижения на кроватях-каталках – 80 м/мин. При этом, ввиду значительных физических нагрузок, после 1 минуты работы скорости передвижения снижаются

приблизительно на 10 %. Приведенные данные получены с участием физически развитых молодых мужчин, поэтому отражают наиболее оптимистичные данные для расчета процесса эвакуации немобильных людей. В табл. 2.7 отражены данные о скорости движения (перемещения) людей с физическими ограничениями, полученные корейскими исследователями [83].

Таблица 2.6

**Значения параметров уравнения скорости движения для маломобильных групп людей по видам пути**

Группы мобильности	Значения параметров	Величина параметров по видам пути (j)				
		горизонтальный	лестница вниз	лестница вверх	пандус вниз	пандус вверх
M1	$V_{0,j}$	100	100	60	115	80
	$D_{0,j}$	0,051	0,089	0,067	0,171	0,107
	$a_j$	0,295	0,400	0,305	0,399	0,399
M2	$V_{0,j}$	30	30	20	45	25
	$D_{0,j}$	0,135	0,139	0,126	0,171	0,146
	$a_j$	0,335	0,346	0,348	0,438	0,384
M3	$V_{0,j}$	70	20	25	105	55
	$D_{0,j}$	0,102	0,208	0,120	0,122	0,136
	$a_j$	0,350	0,454	0,347	0,416	0,446
M4	$V_{0,j}$	60	–	–	115	40
	$D_{0,j}$	0,135	–	–	0,146	0,150
	$a_j$	0,400	–	–	0,424	0,420

Таблица 2.7

**Скорость движения маломобильных и немобильных людей**

Категория эвакуирующихся	Средняя скорость движения, м/мин
С капельницей (перевязанный)	43,2
На кресле-коляске	49,8
На кресле-коляске с помощником	54,6
На кровати	
с помощью 1 человека	36,0
с помощью 2 человек	60,0
С помощью медперсонала	37,8
Передвигающийся с помощью дополнительных опор	34,2

При эвакуации по вертикальным эвакуационным путям решающее значение оказывают размеры лестничной площадки: чем шире, тем быстрее проходит разворот, уменьшая тем самым общее время движения. При ширине лестничного марша менее 1,2 м стандартные носилки (длиной 2,1 м) развернуть крайне сложно. Как показывает практика, существуют и применяются другие способы [84] эвакуации немобильных людей, приведенные в прил. 2.2. Приведенные данные описывают практически всю совокупность способов эвакуации немобильных пациентов больниц. Английские исследователи предлагают использовать следующие способы в зависимости от сценария развития пожара:



1. Пожар в отделении. Эвакуация пациентов должна быть осуществлена в кратчайшие сроки. Для эвакуации через задымленный коридор авторы рекомендуют использовать способы эвакуации, обеспечивающие как можно более низкое расположение пациента относительно пола. В таком случае, однако, скорости движения будут невысокими.

2. Пожар в корпусе. Ввиду отсутствия, как правило, сильного задымления путей эвакуации, могут быть использованы другие методы эвакуации, в частности те, которые позволяют развить большую скорость при транспортировке. Достаточно эффективным способом эвакуации является эвакуация на кроватях, в том числе эвакуация нескольких пациентов на одной кровати. При таком способе эвакуации на первое место выходит возможность маневрирования на путях эвакуации. В дальнейшем эвакуацию по лестнице можно продолжить, используя различные хваты и подручные материалы.

3. Пожар в смежном корпусе. Рекомендуется использовать кровати и кресла-коляски. Ввиду сложности процесса вертикальной эвакуации, многие авторы советуют ограничиться заранее спланированной и организованной горизонтальной эвакуацией. В табл. 2.8. приведены рекомендуемые способы эвакуации в зависимости от сценария пожара: 1, 2 или 3.

Таблица 2.8

**Способы эвакуации немобильных пациентов  
в зависимости от сценария развития пожара**

Тип и состояние путей эвакуации	Номер сценария развития пожара и способ* эвакуации		
	Пожар в отделении	Пожар в корпусе	Пожар в смежном корпусе
1. Горизонтальные без препятствий	4	5	5
	14	17	17
	5		
2. Эвакуационные пути загромождены или не имеют достаточной ширины (не включают лестницы)	4	17	17
	14	12	15
		6	16
		10	3
			6
		10	
3. Лестницы и лестничные клетки	4	13	6
	14	6	3
		10	10
		4	

\*Примечание. Пояснения к способам эвакуации приведены в прил. 2.2.

Авторы отмечают, что наибольших усилий требуют различные хваты, наименьших – перетаскивание пациента по полу и использование кроватей на колесах и кресел-каталок. Наиболее сложной является эвакуация больничных комплексов. Согласно имеющимся данным ([85], прил. 2.1) наиболее

опасным будут отделения для новорожденных (до 100 % немобильных пациентов), протезные отделения (20 % мобильных, 40 % маломобильных и 40 % немобильных пациентов), а также хирургические отделения, отделения для тяжелобольных и психиатрические больницы.

### **Заключение**

1. Первые научные исследования [11, 36] эвакуации из зданий с массовым пребыванием людей выявили: «При неорганизованном движении, имеющем место при эвакуации... скорость становится неопределенной, что затрудняет не только установление связи между плотностью и пропускной способностью, но и разрешение вопроса о том, увеличивает или уменьшает пропускную способность уплотнение потоков. Между тем, выявление этой связи необходимо для разрешения основных задач эвакуации... Первое и основное условие безопасности вынужденной эвакуации – ее кратковременность» [36].

2. Выявление этой связи потребовало проведения многочисленных и трудоемких натурных наблюдений и экспериментов, разработки новых методов их осуществления, но обеспечило накопление крупнейшей в мире статистической базы эмпирических данных.

3. Философия естествознания говорит, что если бы форма проявления и сущность вещей непосредственно совпадали, то всякая наука была бы излишней. В исследованиях людских потоков прослеживается общая последовательность развития науки: от эмпирической стадии к формированию отдельных теоретических конструкций и затем к теории. Основопологающим для теории людских потоков стало установление кинематических закономерностей движения и психофизиологически обоснованной закономерности связи между параметрами людских потоков.

4. Установление этих закономерностей позволяет разработать методы расчета различных проектных ситуаций и моделирования людского потока как непрерывного процесса при эвакуации людей из зданий и сооружений, а затем приступить к обоснованному нормированию размеров эвакуационных путей и выходов. Поэтому рассмотрение методов расчета движения людских потоков является темой следующей главы.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2.1

### Состав пациентов отделений больниц по мобильности

Таблица П2.1

#### Распределение пациентов различных отделений больниц по мобильности [85]

Учреждения здравоохранения	Состав пациентов по способности к передвижению, %		
	Способные к самостоятельному передвижению	С ограниченной способностью к передвижению	Не способные к самостоятельному передвижению
1. Гигиеническая поликлиника	100	–	–
2. Районный медпункт			
2.1. Детская часть	60	40	–
2.2. Остальные медицинские отделения	90	10	–
3. Поликлиники (см. пункт 4 б)			
4. Больницы с поликлиникой			
а) стационарная часть			
4.1. Терапевтическое отделение	40	40	20
4.2. Хирургическое отделение	40	30	30
4.3. Гинекологическое отделение	60	20	20
4.4. Детское отделение	20	40	40
4.5. Неврологическое отделение	50	30	20
4.6. Психиатрическое отделение	–	95	5
4.7. Кожное отделение	80	10	10
4.8. Ортопедическое отделение	40	30	30
4.9. Урологическое отделение	40	30	30
4.10. Глазное отделение	40	40	20
4.11. Ларингологическое отделение	70	20	10
4.12. Стоматологическое отделение	90	5	5
4.13. ТВС и респираторное отделение	90	5	5
4.14. Инфекционное отделение	60	20	20
4.15. Радиотерапевтическое отделение	40	30	30
4.16. Отделение ядерной медицины	80	10	10
4.17. Отделение профессиональных заболеваний	90	5	5
4.18. Анастезиологическо-реанимационное и подразделение интенсивного ухода	–	–	–
б) поликлиническая часть			
4.19. Детское отделение	60	40	–
4.20. Взрослое отделение	100	–	–
4.21. Остальные отделения	90	10	–

Учреждения здравоохранения	Состав пациентов по способности к передвижению, %		
	Способные к самостоятельному передвижению	С ограниченной способностью к передвижению	Не способные к самостоятельному передвижению
с) общие осмотровые и лечебные службы			
4.22. Отделение клинической биохимии	100	–	–
4.23. Радиодиагностическое (рентгеновское) отделение	80	10	10
4.24. Восстановительное отделение	80	10	10
4.25. Протезионное отделение	20	40	40
4.26. Отделение переливания крови	100	–	–
4.27. Отделение клинической гематологии	100	–	–
5. Специальные учебные учреждения			
5.1. Лечебные заведения для тяжело больных	10	40	50
5.2. Лечебницы ТВС и респираторных больниц	80	10	10
5.3. Психиатрические больницы	–	70	30
5.4. Лечебно-восстановительные учреждения	10	50	40
5.5. Курортные лечебницы для взрослых с болезнями двигательного аппарата	30	60	10
5.6. Остальные курортные лечебницы	70	30	–
5.7. Курортные лечебницы для детей и молодежи с болезнями двигательного аппарата	20	50	30
5.8. Остальные детские курортные	60	40	–
5.9. Санатории для взрослых	90	10	–
5.10. Санатории для детей и молодежи	80	20	–
5.11. Ночные санатории	100	–	–
6. Специальные детские учреждения			
6.1. Учреждения для новорожденных	–	–	100
6.2. Детские дома (дети до 3 лет)	–	–	100
6.3. Ясли	–	–	100

**ПРИЛОЖЕНИЕ 2.2**  
**Способы и параметры эвакуации немобильных**  
**пациентов больниц**

Таблица П2.2

**Среднее время эвакуации немобильных пациентов различными способами [39]**

Способ эвакуации пациента (см. рис. П.2.1)	Время подготовки, с	Скорость свободного движения, м/мин		Время восстанов- ления, мин
		Горизонтальная	Вертикальная	
1. Английское одеяло	46	26,1	28,6	6,12
2. Одеяло с завязками	64	19,4	26,1	6,12
3. Матрас	95	11,8	10,9	6,15
4. Одеяло	38	24,0	–	5,12
5. Кровать-каталка	13	54,5	–	3,08
6. Хват двумя руками	12	66,7	75,0	3,08
7. Хват тремя руками	17	46,2	–	3,12
8. Хват четырьмя руками	14	60,0	75,0	–
9. Австралийский хват	14	50,0	–	4,15
10. Хват за грудь и бедра	21	60,0	70,6	6,05
11. Костыли	–	–	–	–
12. Хват через предплечья	9	60,0	–	3,08
13. Хват за бедра	10	46,2	–	4,07
14. Пижама	12	27,3	–	4,18
15. Стул	13	27,3	–	4,08
16. Кресло	11	33,3	–	4,12
17. Кресло-коляска	10	46,2	–	2,07
18. Амбулаторный стул	19	50,0	34,3	4,05

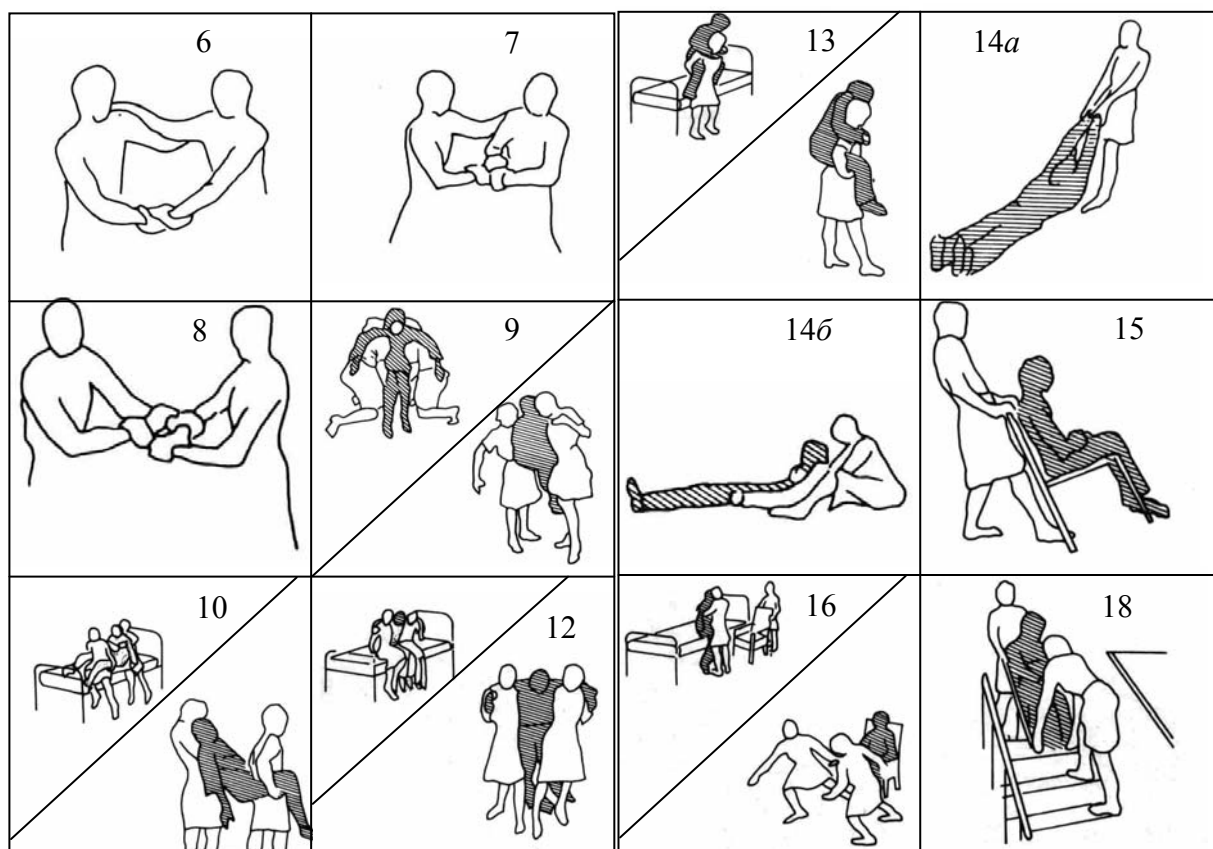
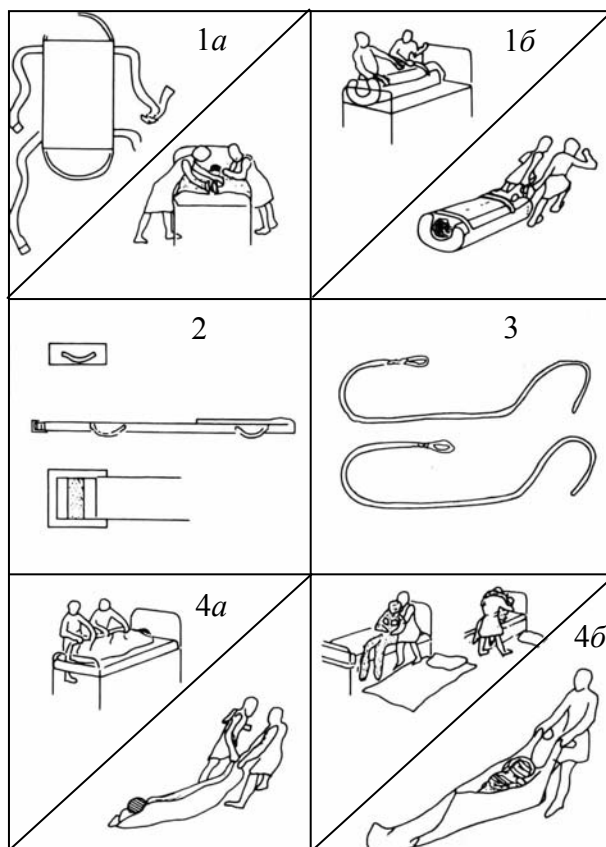


Рис. П2.1. Иллюстрация способов эвакуации немобильных людей