

### Имитационно-стохастическая модель движения людских потоков

Множество людей, одновременно идущих в одном направлении по общим участкам пути, образуют людской поток. Участками формирования людских потоков в помещениях следует принимать проходы между оборудованием. Для последующих участков эвакуационных путей они представляют собой первичные источники людских потоков. Распределение  $N_i$  человек на участках формирования, имеющих ширину  $b_i$  и длину  $l_i$ , принимается равномерным. Поэтому в начальный момент  $t_0$  на каждом элементарном участке  $\Delta l_i$ , занимаемом потоком, плотность потока  $D_i^{t_0}$  определяется по формуле:

$$D_i^{t_0} = N_i^{t_0} / b_i \cdot \Delta l_i \text{ чел./м}^2 . \quad (\text{П4.1})$$

При дальнейшем движении людских потоков из первичных источников по общим участкам пути происходит их слияние. Образуется общий поток, части которого имеют различную плотность. Происходит выравнивание плотностей различных частей людского потока – его переформирование. Следует учитывать, что его головная часть, имеющая перед собой свободный путь, растекается – люди стремятся идти свободно при плотности  $D_0$ . За интервал времени  $\Delta t$  часть людей переходит с этих элементарных участков на последующие и происходит изменение состояния людского потока, его движение.

Скорость движения людского потока при плотности  $D_i$  на  $i$ -ом отрезке участка пути  $k$ -го вида следует считать случайной величиной  $V_{D,k}$ , имеющей числовые характеристики:

математическое ожидание (среднее значение)

$$\begin{aligned} V_{D,k} &= V_{0,k} \cdot (1 - a_k \cdot \ln D_i / D_{0,k}) \cdot m \quad \text{при } D_i > D_{0,k} , \\ V_{D,k} &= V_{0,k} \quad \text{при } D_i \leq D_{0,k} , \end{aligned} \quad (\text{П4.2})$$

среднее квадратичное отклонение

$$\sigma(V_{D,k}) = \sigma(V_{0,k}) \cdot (1 - a_k \cdot \ln D_i / D_{0,k}) , \quad (\text{П4.3})$$

где  $V_{0,k}$  и  $\sigma(V_{0,k})$  - математическое ожидание скорости свободного движения людей в потоке (при  $D_i \leq D_{0,k}$ ) и ее среднее квадратичное отклонение, м/мин;

$D_{0,k}$  – предельное значение плотности людского потока, до достижения которого возможно свободное движение людей по  $k$ -му виду пути (плотность не влияет на скорость движения людей);

$a_k$  – коэффициент адаптации людей к изменениям плотности потока при движении по  $k$ -му виду пути;

$D_i$  – значение плотности людского потока на  $i$ -ом отрезке ( $\Delta l$ ) участка пути шириной  $b_i$ , чел./м<sup>2</sup>;

$m$  – коэффициент влияния проема.

Значения перечисленных параметров следует принимать по таблице П4.1.

Таблица П4.1

Вид пути, $k$	$V_{0,k}$ м/мин	$\sigma(V_{0,k})$ м/мин	$D_{0,k}$ чел./м <sup>2</sup>	$a_k$	$m$
Горизонтальный в здании	100	5	0,51	0,295	1
Горизонтальный вне здания	100	5	0,70	0,407	1
Проем*	100	5	0,65	0,295	1,25-0,05D, при $D \geq 5$
Лестница вниз	80	5	0,89	0,400	1
Лестница вверх	50	5	0,67	0,305	1

\* При  $D = 9$  чел./м<sup>2</sup> значения  $q_i = V_i \cdot D_{0,k}$  определяются по формуле  $q_i = 10 \cdot (3,75 + 2,5 \cdot b_i)$ , м/мин.

При любом возможном значении  $V^{t_0}$  люди в количестве  $N^{t_0}_i$ , находящиеся в момент  $t_0$  на  $i$ -ом элементарном участке, двигаются по нему и начинают переходить на последующий участок ( $i+1$ ) (рис. П4.1). На участок  $i$  в свою очередь переходит часть людей с предыдущего ( $i-1$ ) элементарного участка и из источника  $j$ .

По прошествии времени  $\Delta t$  к моменту  $t_1 = t_0 + \Delta t$  только часть людей  $N^{t_0}_{i,i+1}$  с участка  $i$  успеет перейти на участок ( $i+1$ ). К этому моменту времени из  $N^{t_0}_i$  людей, бывших на участке  $i$  в момент  $t_0$ , останется  $(N^{t_0}_i - N^{t_0}_{i,i+1})$  людей. Их число пополняется за счет людей, успевших за этот интервал времени перейти на него с предыдущего участка –  $N^{t_0}_{i-1,i}$  и из источника  $N^{t_0}_{j,i}$ . Тогда плотность потока на участке  $i$  в момент  $t_1$  будет равна:

$$D^{t_1}_i = (N^{t_0}_i - N^{t_0}_{i,i+1} + N^{t_0}_{i-1,i} + N^{t_0}_{j,i}) / b_i \cdot \Delta l. \quad (\text{П4.4})$$

Скорость движения людей, оказавшихся на участке  $i$  в момент  $t_1$ , определяется по формуле:

$$V^{t_1}_i = V_{0,k} (1 - a_k \cdot \ln D^{t_1}_i / D_{0,k}). \quad (\text{П4.5})$$

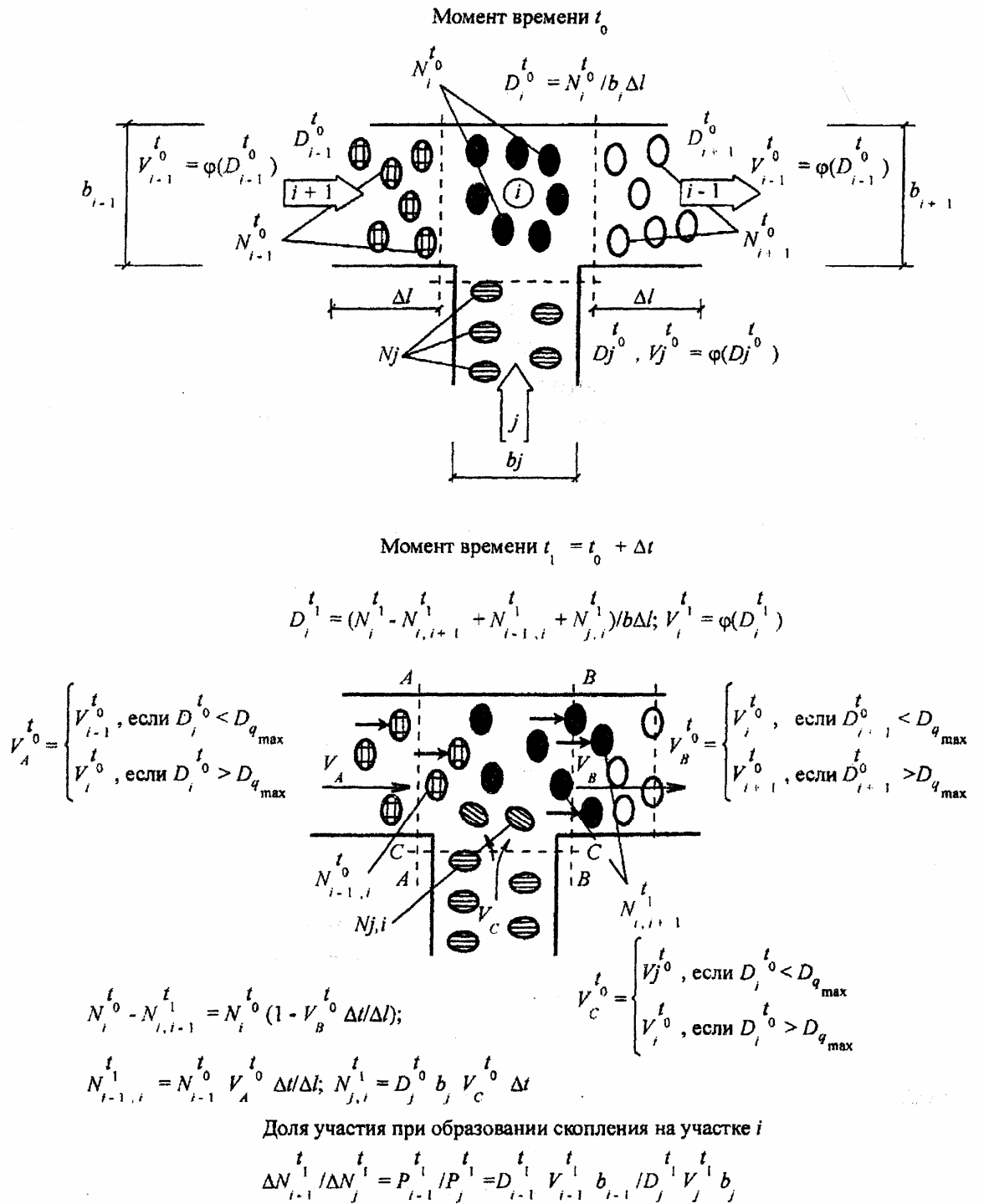


Рис. П4.1. Изменения состояния потока в последовательные моменты времени

Следует учитывать, что изменение плотности потока на каждом участке в различные моменты времени отражает процесс переформирования различных частей потока, и как частный случай, процесс растекания потока.

Изменение плотности потока на каждом из элементарных участков в последовательные моменты времени зависит от количества людей, переходящих через границы участков. В общем случае количество людей, переходящих за интервал времени  $\Delta t$  с участка  $i$  на последующий участок  $i+1$ , составляет:

$$N_{i,i+1}^{t1} = D_i^{t0} \cdot b_i \cdot \Delta l \cdot V_{\text{пер}} \cdot \Delta t. \quad (\text{П4.6})$$

Скорость перехода  $V_{\text{пер}}$  через границы смежных элементарных участков следует принимать, руководствуясь следующими формулами:

$$V_{\text{пер}} = \begin{cases} V_i^{t0}, & \text{если } D_{i+1}^{t0} \leq D \text{ при } \max V_{D_{i,k}} \cdot D = q_{\text{max}} \\ V_{i+1}^{t0}, & \text{если } D_{i+1}^{t0} > D \text{ при } \max V_{D_{i,k}} \cdot D = q_{\text{max}}. \end{cases} \quad (\text{П4.7})$$

Следует учитывать, что в тот момент времени  $t_n$ , когда плотность потока на участке  $i$  достигла максимальной величины, на этот участок не может прийти ни один человек, ни с предшествующего участка, ни из источника. В результате перед участком  $i$  задерживается соответственно  $\Delta N_{i-1}^{tn}$  и  $\Delta N_{j,i}^{tn}$  людей. В следующий момент времени  $t_{n+1}$  часть людей с участка  $i$  переходит на участок  $i+1$ , плотность людского потока на нем уменьшится и часть скопившихся перед его границей людей сможет перейти на него. Доля их участия в пополнении людьми участка  $i$  в момент  $t_{n+1}$  определяется формулой:

$$\Delta N_{i-1}^{tn, tn+1} / \Delta N_{j,i}^{tn, tn+1} = D_{i-1}^{tn, tn+1} \cdot V_{i-1}^{tn, tn+1} \cdot b_{i-1} / D_j^{tn, tn+1} \cdot V_j^{tn, tn+1} \cdot b_j. \quad (\text{П4.8})$$

Формулы (П4.4) - (П4.8) полностью описывают состояние людского потока на элементарных участках и их переходы в последовательные моменты времени. Совокупность значений расчетного времени эвакуации, полученных при различных значениях  $V_{0,k}$ , формирует эмпирическое распределение вероятностей значений  $\Sigma t_p$ . По этому распределению следует рассчитывать значение времени завершения эвакуации, соответствующее вероятности  $P(t_{p,эв}) = 0,999$ .