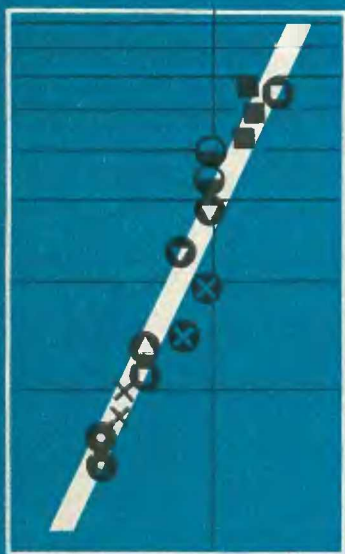


А. Я. Добромыслов

# РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ СИСТЕМ КАНАЛИЗАЦИИ ЗДАНИЙ



МОСКВА  
СТРОИИЗДАТ  
1978

А. Я. ДОБРОМЫСЛОВ

РАСЧЕТ  
И КОНСТРУИРОВАНИЕ  
СИСТЕМ  
КАНАЛИЗАЦИИ  
ЗДАНИЙ



МОСКВА СТРОИЗДАТ 1978

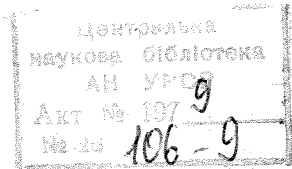
*scan: The Stainless Steel Cat*

Печатается по решению секции литературы по инженерному оборудованию редакционного совета Стройиздата.

**Добромыслов А. Я.** Расчет и конструирование систем канализации зданий. М., Стройиздат, 1978, 120 с.

Изложена новая теория, объясняющая причины возникновения разрежений в канализационном стояке. Рассмотрены зависимости для расчета конструкций систем канализации с учетом основных параметров. Приведен расчет самотечных канализационных трубопроводов. Освещены вопросы конструирования вытяжных частей канализационных стояков.

*Книга предназначена для научных и инженерно-технических работников научно-исследовательских и проектных организаций.*



## ПРЕДИСЛОВИЕ

В нашей стране в грандиозных масштабах осуществляется строительство жилых и общественных зданий как в городах, так и в сельских населенных местах. В подавляющем большинстве эти здания оборудуются всем комплексом удобств, в числе которых системы канализации занимают важное место. При этом в крупных городах все чаще возводятся высотные здания и сооружения, а сельские населенные места характеризуются малоэтажной застройкой.

Конструкции систем канализации должны отражать специфику строящихся объектов. Неправильная оценка этой специфики приводит, с одной стороны, к неоправданному увеличению материалоемкости систем, а с другой — к снижению их надежности. Создание более совершенных систем канализации должно способствовать практическому решению поставленных XXV съездом КПСС задач по повышению эффективности капитальных вложений, повышению качества жилищного строительства, улучшению комфортности жилищ.

Одним из важнейших направлений для достижения поставленной задачи является внедрение в строительство результатов научных исследований (статья 26 Конституции СССР), позволяющих выбирать оптимальные решения в зависимости от специфики каждого конкретного объекта.

Настоящая работа содержит результаты аналитических и экспериментальных исследований пропускной способности канализационных стояков, надежности их вытяжных частей, гидравлических закономерностей в канализационных выпусках из зданий. Эти исследования, выполненные в 1965—1976 гг. в НИИ санитарной техники и ЦНИИЭП инженерного оборудования, позволили обосновать новые теоретические предпосылки к объяснению причин возникновения разрежений в канализационном стояке, разработать методику расчета и принципы конструирования надземной и подземной частей систем канализации зданий, внести уточнения в гидравлический расчет канализационных выпусков из зданий.

Учитывая, что рекомендуемые в книге некоторые технические решения по проектированию приводятся впервые (невентилируемые канализационные стояки, возмож-

пость отказа от вытяжной части группы объединяемых поверху стояков, гидравлический расчет вентиляционных стояков), автор счел необходимым привести подробное аналитическое рассмотрение условий надежности систем канализации, равно как и пояснение условий и результатов экспериментальных исследований.

Автор выражает искреннюю благодарность канд. техн. наук [С. П. Казакову], докторам технических наук А. И. Жукову и И. А. Шепелеву, инж. Г. А. Синицыну за большую помощь при выполнении настоящей работы, а также канд. техн. наук В. С. Кедрову — за ценные замечания при рецензировании рукописи.

## ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМ КАНАЛИЗАЦИИ ЗДАНИЙ И ИХ НАЗНАЧЕНИЕ

### 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Системы канализации зданий предназначены для отвода в наружную канализационную сеть сточной жидкости, поступающей от ее приемников, санитарно-технических приборов и производственного оборудования.

По назначению системы канализации разделяются на бытовую, производственную и дождевую.

Бытовые сточные воды образуются в результате хозяйственной деятельности людей и загрязнены жирами, мылом, пищевыми отходами и т. п., а также выделениями человеческого организма. Производственные сточные воды образуются в процессе того или иного производства. Дождевые сточные воды представляют собой атмосферные осадки и талые воды.

Бытовые и производственные сточные воды отличаются друг от друга по составу. Системы бытовой и производственной канализации зданий по конструкции мало отличаются и могут рассчитываться по одним и тем же закономерностям<sup>1</sup>.

Системы канализации зданий состоят из следующих элементов:

1. Санитарных приборов, предназначенных для гигиенических процедур, туалетных и хозяйственных нужд, а также приемников сточных вод, устанавливаемых у производственного и другого оборудования; санитарные приборы и приемники сточных вод оборудуются гидравлическими затворами.

2. Канализационной сети — системы трубопроводов, принимающих сточные воды и отводящих их в наружную канализационную сеть.

3. Местных насосных и очистных установок (если они требуются по особым условиям; в массовом строительстве применяются сравнительно редко).

<sup>1</sup> Системы внутренних водостоков, предназначенные для отвода атмосферных и талых вод с кровли зданий, имеют ряд специфических особенностей и в данной работе не рассматриваются.

Устройству и применению санитарно-технических приборов посвящен ряд работ (Н. Н. Репин и Л. А. Шопенский «Санитарно-техническое оборудование и газоснабжение зданий», В. С. Кедров «Санитарно-техническое оборудование зданий» и др.). Здесь мы подробно рассмотрим назначение и режим работы гидравлических затворов как одного из наиболее ответственных элементов систем канализации зданий.

Система трубопроводов, транспортирующих стоки от санитарно-технических приборов в наружную канализационную сеть, представлена на рис. 1 и включает: горизонтальные поэтажные трубопроводы 1, отводящие стоки от санитарных приборов в канализационный стояк; узлы 2 присоединения поэтажных трубопроводов к стояку; вертикальный трубопровод — канализационный стояк 3, который в нижнем гйбе 5 переходит в канализационный выпуск из здания 6. Участок канализационного стояка, выводимый выше кровли здания, — вытяжная часть 4.

## 2. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ЗАТВОРЫ

Каждый санитарно-технический прибор оборудован гидравлическим затвором. В отдельных случаях допускается устройство одного гидравлического затвора у нескольких санитарно-технических приборов. Гидравлический затвор представляет собой U-образную трубку, заполненную водой (рис. 2). Одна ветвь гидравлического затвора, расположенная со стороны помещения (например, ванной, туалетной, кухонной комнаты), постоянно находится под атмосферным давлением  $p_a$ , а вторая, присоединенная к стояку, — под давлением  $p$  в стояке.

Гидравлический затвор предназначен для предотвращения поступления канализационных газов из наружной сети канализации в помещения ванных, туалетных комнат, кухонь и т. п. Высота гидравлических затворов  $h_3$  — высота столба воды в одной из его ветвей, препятствующая прониканию канализационных газов со стороны канализационного стояка, — у отечественных санитарно-технических приборов равна 50, 60 или 70 мм (у большинства приборов — 60 мм).

В тех случаях, когда давление в канализационном стояке становится ниже атмосферного на величину  $h$  ( $h < h_3$ ), происходит понижение уровня воды в гидрав-

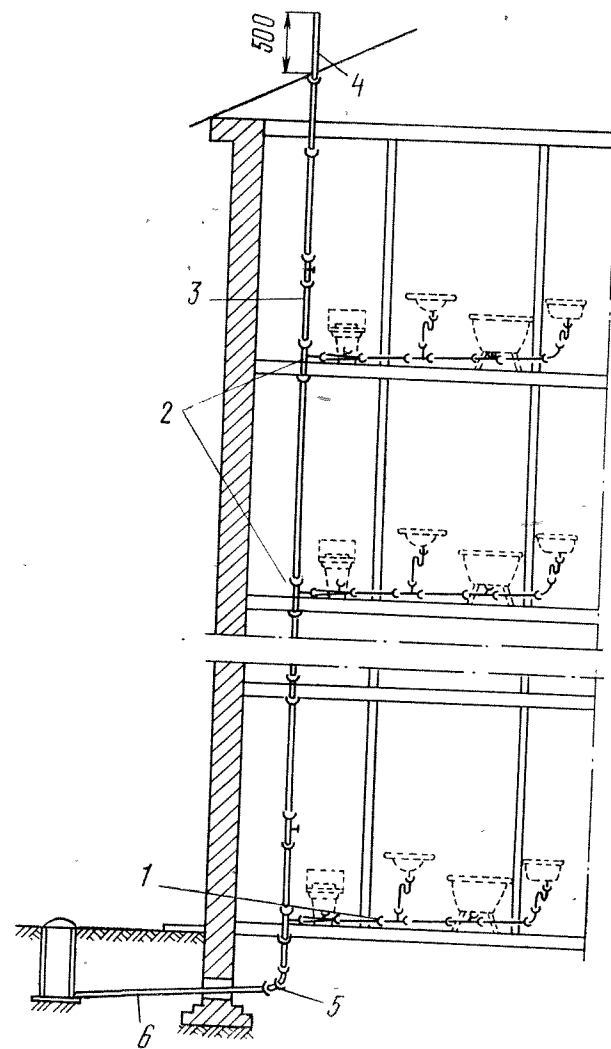


Рис. 1. Система канализации типового жилого здания

лическом затворе (в той его ветви, которая находится под атмосферным давлением) на такую же величину  $h$ . При этом из второй ветви гидравлического затвора в канализационный стояк выплескивается определенный объ-

ем воды. Если же давление в канализационном стояке становится ниже атмосферного на величину, несколько превышающую высоту гидравлического затвора, уровень воды в правой его ветви понижается на такую же величину. При этом из ветви, сообщающейся с атмосферой, происходит прорыв воздушного пузыря, который выплескивает в стояк воду, заполняющую левую ветвь гидравлического затвора. Второй, третий и последующие воздушные пузыри, которые следуют за первым с интервалом в несколько секунд, способствуют полному опорожнению гидравлического затвора. Явление безвозвратного уноса в стояк воды, заполняющей гидравлический затвор, называется срывом гидравлического затвора.

В результате срыва гидравлического затвора канализационным газам открывается беспрепятственный доступ в помещения, где пребывают люди. Известно, что канализационные газы в больших концентрациях токсичны и взрывоопасны. Поэтому системы канализации следует рассчитывать и конструировать таким образом, чтобы была гарантирована устойчивость гидравлических затворов у санитарных приборов данной системы.

Нами экспериментально установлено, что срыв гидравлического затвора высотой 60 мм происходит, когда разрежение в канализационном стояке составляет  $65 \text{ кгс/м}^2$  (65 мм вод. ст.; 637 Па), срыв гидравлического затвора высотой 80 мм — при разрежении в стояке, равном  $90 \text{ кгс/м}^2$  (90 мм вод. ст.). При меньших значениях разрежений гидравлический затвор не может быть сорван. Таким образом, чем больше высота гидравлического затвора, тем большее разрежение допускается в канализационном стояке. Высота гидравлического затвора — основной параметр, от которого зависит конструкция надземной части системы канализации зданий.

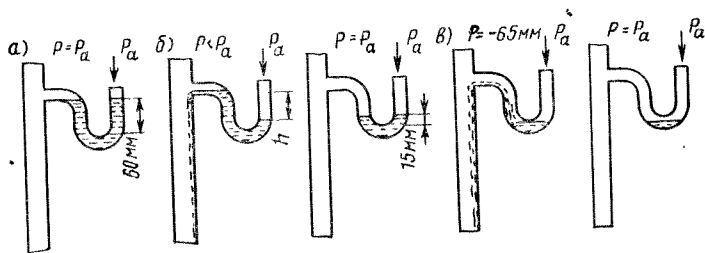


Рис. 2. Заполнение гидравлического затвора при различном давлении в стояке  
 а — давление в стояке равно атмосферному; б — разрежение в стояке меньше критического; в — срыв затвора при критическом разрежении в стояке

Надежность системы канализации обеспечивается устойчивостью против срыва гидравлических затворов санитарно-технических приборов, присоединенных к расчетному стояку.

Гидравлические затворы, как правило, изготавливают отдельно от санитарно-технических приборов и соединяют с ними при установке. Исключение составляют трапы и все типы унитазов, которые имеют встроенные гидравлические затворы, а также некоторые санитарные приборы, выпускаемые как с гидравлическим затвором, так и без него (например, писсуар).

Гидравлические затворы выполняют из различных материалов (чугун, цветные металлы, резина, пластмасса); они имеют гладкую внутреннюю поверхность, исключаящую налипание на нее осадков из сточной жидкости.

Чугунные гидравлические затворы (ГОСТ 6924—54) по конструкции разделяют на гидравлические затворы с ревизиями и с пробками, а по направлению отводного патрубка — на прямые, косые и двухоборотные. Эти гидравлические затворы устанавливают с раковинами и мойками. Для умывальников в настоящее время применяют, в большей части, бутылочные гидравлические затворы, изготавливаемые по ГОСТ 8246—56.

Под ваннами устанавливают напольный гидравлический затвор.

Подробно конструкции гидравлических затворов рассматриваются в работе [17].

### 3. ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ ТРУБОПРОВОДЫ

Назначение поэтажных трубопроводов — прием сточной жидкости от санитарно-технических приборов и транспортирование ее в канализационный стояк. Канализационный выпуск из здания транспортирует стоки от стояков в колодец дворовой канализации.

Для обеспечения надежности систем канализации здания должны быть исключены засоры канализационных трубопроводов. Однако статистика показывает, что засоры имеют массовый характер. Очевидно, что при этом резко снижается комфортность зданий, а ликвидация засоров требует определенных затрат.

Обследования находящихся в эксплуатации систем канализации в 96 жилищно-эксплуатационных конторах Москвы позволяют сделать вывод о том, что засоры в

подавляющем большинстве случаев происходят в горизонтальных канализационных трубопроводах (поэтажных, канализационных выпусках, дворовой сети) из-за попадания в них посторонних, не являющихся компонентами сточной жидкости предметов (ветошь, строительный мусор, пищевые отходы и т. п.).

Горизонтальные канализационные трубопроводы при проектировании рекомендуется рассчитывать из условия обеспечения в них самотечного режима движения жидкости. Для уменьшения вероятности образования засоров в этих трубопроводах необходимо обеспечение самоочищающей скорости течения жидкости, т. е. такой скорости, при которой из сточной жидкости в осадок не выпадают ее компоненты. Для трубопроводов систем внутридомовой канализации величина самоочищающей скорости составляет 0,7 м/с.

До 1 июля 1977 г. нормативными документами помимо скорости нормировались наполнение трубопровода, т. е. отношение высоты протекающего слоя жидкости к диаметру трубопровода, а также величины так называемых нормальных и минимальных уклонов трубопровода (табл. 1).

Таблица 1. Уклоны и допускаемые наибольшие наполнения трубопроводов бытовой канализации

Диаметр труб, мм	Наполнение, не более	Уклоны	
		нормальные	минимальные
50	0,5 диаметра трубы	0,035	0,025
100		0,02	0,012
125		0,015	0,01
150	0,6 диаметра трубы	0,01	0,007
200		0,008	0,005

Примечания: 1. Для трубопроводов диаметром 50 мм, отводящих стоки от ванн, допускаемое наполнение следует принимать равным 0,8;

2. Отводные трубопроводы от группы умывальников и питьевых фонтанчиков до общего гидравлического затвора допускается прокладывать с уклоном 0,01.

Кроме того, в нормах предусматривалась необходимость гидравлического расчета канализационных выпусков из зданий по формулам Шези — Павловского.

Скорость течения жидкости, м/с, по Шези:

$$v = C \sqrt{Ri}, \quad (1)$$

где  $C$  — коэффициент Шези;  $R$  — гидравлический радиус, м;  $i$  — уклон трубопровода.

По Павловскому:

$$C = \frac{1}{n} R^y, \quad (2)$$

$$\text{где } y = 2,5 \sqrt{n} - 0,13 - 0,75 \sqrt{R} (\sqrt{n} - 0,1), \quad (3)$$

$n$  — коэффициент шероховатости материала труб;

$$R = \omega / \chi, \quad (4)$$

здесь  $\omega$  — площадь живого сечения жидкости, м<sup>2</sup>;  $\chi$  — смоченный периметр трубопровода, м.

Расчеты по формулам (1) — (3) показывают, что изменение коэффициента шероховатости только на 0,001 требует изменения уклона трубопровода на 20%. Анализ данных табл. 1 позволяет установить, что значения минимальных уклонов соответствуют трубам с коэффициентом шероховатости  $n = 0,014$ . На этом основании можно сделать вывод, что и нормальные уклоны, приведенные в табл. 1, вычислены при указанном значении  $n$ . Располагая этими данными, можно вычислить значение скоростей течения жидкости, соответствующих нормальным уклонам. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Скорость течения жидкости при допускаемых уклонах и наполнении трубопроводов бытовой канализации

Диаметр труб, мм	Наполнение, не более	Уклон		Скорость течения, м/с, при уклоне	
		нормальный	минимальный	минимальном	нормальном
100	0,5 диаметра трубы	0,02	0,012	0,67	0,87
150 } 200 }		0,6 диаметра трубы	0,01	0,007	0,73
			0,008	0,005	0,74

Таким образом, минимальные уклоны трубопроводов с  $n = 0,014$  примерно соответствуют самоочищающей скорости жидкости. Эта скорость будет обеспечена только в одном случае течения, а именно: при верхнем пре-

деле наполнения трубопровода, который при прочих равных условиях является функцией расхода сточной жидкости и однозначно увеличивается или уменьшается при увеличении или уменьшении расхода. В частности, данные табл. 2 справедливы лишь при одном (для каждого диаметра и уклона) значении расхода жидкости, приведенном в табл. 3.

Таблица 3. Расходы сточной жидкости, обеспечивающие нормативные параметры ее течения

Диаметр труб, мм	Расход сточной жидкости, л/с, при уклоне	
	минимальном	нормальном
100	2,65	3,42
150	8,06	9,63
200	14,6	18,5

Таким образом, требования норм распространяются на один случай, соответствующий указанным расходам жидкости. Кроме того, необходимо отметить, что канализационные выпуски из зданий устраиваются, как правило, из чугунных канализационных труб, расчетный коэффициент шероховатости которых  $n=0,013$ .

Отсюда становится очевидной необходимость гидравлического расчета канализационных выпусков из зданий в каждом конкретном случае.

Однако в существующих типовых проектах жилых и общественных зданий во всех случаях уклон труб без расчета принимается равным 0,02 для диаметра 100 мм и 0,01 — для диаметра 150 мм.

#### 4. КАНАЛИЗАЦИОННЫЕ СТОЯКИ И ИХ ВЫТЯЖНЫЕ ЧАСТИ

Сточная жидкость от санитарно-технических приборов по горизонтальным поэтажным трубопроводам поступает в канализационный стояк — вертикальный трубопровод. В процессе транспортирования сточной жидкости в канализационном стояке возникают разрежения, влияющие на устойчивость гидравлических затворов санитарно-технических приборов.

Помимо транспортирования сточной жидкости через канализационные стояки осуществляется воздухообмен в наружной сети. Этот процесс протекает при отсутствии в стояке расхода сточной жидкости, а также при небольших ее расходах (0,05—0,3 л/с в зависимости от диаметра стояка и параметров воздуха). Движущей силой является гравитационное давление воздуха  $p$ , кгс/м<sup>2</sup>

$$p = H(\gamma_n - \gamma_b), \quad (5)$$

где  $H$  — высота стояка, м;  $\gamma_n$  — объемная масса наружного воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $\gamma_b$  — объемная масса загрязненного воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Скорость воздушного потока  $v_b$ , м/с:

$$v_b = \sqrt{\frac{2gp}{\gamma_n - \gamma_b}}. \quad (6)$$

Анализ уравнений (5) и (6) показывает, что кратность воздухообмена в наружной канализационной сети должна увеличиваться с увеличением высоты стояка, а также при понижении температуры наружного воздуха (при прочих равных условиях).

Высота вытяжной части над кровлей здания регламентирована действующими нормами и равна 0,5 м; на эксплуатируемых кровлях — не менее 3 м. Стояк, имеющий вытяжную часть, называется вентилируемым.

При движении по стояку сточная жидкость увлекает за собой из атмосферы воздух [3, 4, 6 и др.], который поступает в стояк через вытяжную часть. Способность жидкости при своем движении увлекать воздух называется эжектирующей способностью. Если через вытяжную часть в стояк поступает воздух в количестве, соответствующем величине эжектирующей способности жидкости, то в стояке не возникает дефицита воздуха и давление в нем равно атмосферному. Если же через вытяжную часть в стояк поступает меньшее количество воздуха, то это приводит к образованию дефицита воздуха и возникновению разрежения в стояке.

В том случае, когда вытяжная часть по какой-либо причине выходит из строя (например, вследствие обмерзания или попадания посторонних предметов), стояк становится неветилируемым. При этом пропускная способность стояка резко уменьшается.

В настоящее время применяют в основном два конструктивных решения вытяжных частей: первое — каж-

дый канализационный стояк имеет собственную вытяжную часть, которая может быть прямолинейной или криволинейной; второе — вытяжная часть объединяет по верху группу канализационных стояков.

До 1970 г. в отечественной практике строительства являлось обязательным увеличение диаметра выводимой выше кровли вытяжной части на 50 мм по сравнению с диаметром стояка. На трубы вытяжных частей, расположенных в неотапливаемых чердаках, должна была наноситься теплоизоляция, а устья вытяжек — оборудоваться так называемыми флюгарками (дефлектор — простой колпак). При этом предполагалось, что указанные мероприятия гарантируют трубы вытяжных частей от полного обмерзания.

Однако исследования причин обмерзания вытяжных частей стояков, а впоследствии и способов борьбы с их обмерзанием, выполненные в 1966—1973 гг. в климатических условиях Москвы и Челябинска, позволили скорректировать требования норм к конструированию вытяжных частей стояков (см. гл. V).

## Глава II

### ГИДРАВЛИКА КАНАЛИЗАЦИОННОГО СТОЯКА

#### 1. КРАТКИЙ ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТ, ВЫПОЛНЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ ИССЛЕДОВАТЕЛЯМИ

Срыв гидравлических затворов является следствием возникновения разрежений в канализационном стояке, поэтому прежде всего необходимо установить причины их возникновения, а также параметры, от которых зависит величина разрежений.

До настоящего времени не существует единой точки зрения относительно режимов течения сточной жидкости и причин возникновения разрежений в канализационном стояке.

До 1970 г. рядом исследователей указывалось [22, 24], что течение сточной жидкости по стояку сопровождается периодическим образованием на отдельных его участках водяных «поршней», движущихся с большой

скоростью и вызывающих резкие колебания давлений. В соответствии с этой точкой зрения величина разрежений зависит от скорости падающей жидкости, а скорость является функцией высоты стояка, критическое значение которой составляет 50 м. При падении жидкости с указанной высоты ее скорость достигает 4 м/с, что сопровождается возникновением разрежений критической величины, вызывающих срыв гидравлического затвора.

Такая скорость наблюдается в стояках высотой не более 50 м при следующих расходах: 2 л/с — для диаметра 50 мм; 9 л/с — для диаметра 100 мм; 20 л/с — для диаметра 150 мм [22]. В зданиях, в которых высота стояков превышает 50 м, рекомендуется устройство двухтрубной системы канализации. Конструктивная особенность двухтрубной системы заключается в устройстве вентиляционного стояка, присоединяемого через этаж перемычками к канализационному стояку.

Следует отметить, что данные работы [22] получены аналитически без учета затрат энергии жидкостью на эжекцию из атмосферы воздуха. В соответствии с исследованиями, проведенными в Ленинграде на стояках диаметрами 100 и 125 мм высотой 41 м [10], рекомендуется критическими расходами жидкости считать 4,4 л/с для стояка диаметром 100 мм и 6,98 л/с — для стояка диаметром 125 мм, что в 2 раза меньше нагрузок, рекомендуемых работой [22]. Более поздние экспериментальные исследования (табл. 4), выполненные за рубежом [31, 37], подтвердили данные работы [10].

Таблица 4. Пропускная способность канализационных стояков по данным [10] и [31, 37]

Диаметр стояка, мм	Расход сточных вод, л/с, по данным		
	А.И. Карпинской (СССР)	К. Bösch (Швейцария)	Н. Schellenberg (Франция)
50	—	0,75	1,1
60	—	1,5	1,6
70	—	2	2,17
80	—	3	2,83
100	4,4	4,5	4,42
125	6,98	6	6,83
150	—	10	10

На основании экспериментальных данных некоторые исследователи объясняют возникновение разрежений в канализационном стояке образованием «гидравлического водовоздушного поршня» — слоя воды, перекрывающего сечение стояка на уровне присоединения к нему поэтажного отвода. Так, в работах [33] и [34] указывается, что гидравлический поршень высотой 20—50 см создается в стояке на уровне входа в него жидкости и препятствует поступлению в него воздуха из атмосферы. При дальнейшем движении вниз поток жидкости стабилизируется и образует на внутренней поверхности стояка кольцеобразный слой. При этом отмечается, что скорость жидкости достигает своего максимального значения на сравнительно короткой длине: по данным работы [34], через 15—20 м от точки входа в стояк; по данным работы [36], через 1—2 этажа, т. е. через 3—6 м. Приведенные данные существенно отличаются от данных работы [22].

С повышением этажности застройки все большее внимание уделяется специалистами оптимизации систем канализации зданий. На основании многочисленных экспериментов специалисты в ФРГ приходят к выводу о возможности устройства одностояковых (однотрубных) систем канализации в зданиях повышенной этажности [35]. Это послужило толчком к постановке исследований в США, где применялись, как правило, двухтрубные системы канализации. Так, по данным работы [40], в 69-этажном здании в Нью-Йорке (Рокфеллер-центр) двухтрубная система канализации включает канализационный и вентиляционный стояки (соединенные перемышками) диаметром 12 дюймов ( $\approx 300$  мм) каждый.

На основании экспериментальных исследований, выполненных в 60-х годах, американские специалисты сделали вывод о том, что срыв гидравлического затвора происходит вследствие нескольких следующих друг за другом опорожнений в стояк. Однако это суждение нельзя признать достаточно обоснованным, так как гидравлический затвор не может быть сорван при разрежении, величина которого меньше высоты затвора, сколько бы раз это разрежение не возникало.

Американские исследователи считают, что нарушение гидравлического затвора является почти неизбежным следствием неправильного подбора диаметра стояка. Такие явления, как попадание сточной жидкости из кана-

лизации в приборы, расположенные в нижних этажах, kloкочущие звуки в канализационных трубопроводах и т. п., встречаются реже и не столь опасны, как срыв гидравлических затворов.

Исследования, выполненные в основном в Швейцарии и частично в США [31, 36, 38, 39], позволили сделать вывод о том, что для расчета канализационных систем необходимо определить расход воздуха в соответствии с расходом воды.

В 1965 г. канд. техн. наук С. П. Казаков опубликовал экспериментальные данные, свидетельствующие о наличии эжектирующей способности у воды, движущейся сверху вниз в вертикальном трубопроводе (водосточном стояке, работающем с подпором) [8]. В соответствии с этими данными, расход воздуха, увлекаемого из атмосферы в стояк водой, сначала увеличивается, достигает максимальной величины при определенном расходе воды, а затем начинает убывать.

В результате захвата воздуха водой, движущейся в стояке, в нем образуется двухфазная (вода + воздух) смесь. По данным работы [33], наличие в сточной жидкости третьей фазы (фекалии, бумага и т. п.) незначительно повышает разрежение в стояке. Поэтому движение сточной жидкости в стояке можно рассматривать как движение двухфазной водовоздушной смеси.

При движении водовоздушной смеси на образование различных режимов течения с присущими им структурами основное влияние оказывают объемное расходное газосодержание  $\beta$ :

$$\beta = u_0'' / (u_0' + u_0'') = Q_0'' / (Q_0' + Q_0'') \quad (7)$$

и газонасыщенность смеси  $\alpha$  [3, 12] — мгновенное значение доли сечения потока, занятого газовой фазой, т. е. истинное газосодержание двухфазного слоя толщиной  $d_n$ , ( $n$  — нормаль к поверхности жидкости)

$$\alpha = \frac{1}{w} \sum_i \omega_i'' \quad (8)$$

где  $u_0'$ ,  $u_0''$  — приведенная скорость соответственно жидкой и газовой фаз;  $Q_0'$ ,  $Q_0''$  — расход соответственно жидкой и газовой фаз;  $\omega$  — площадь поверхности жидкости;  $i$  — число отдельных образований рассматриваемой фазы в данном сечении и в данный момент времени.

В работе [3] описывается стержневой характер опускного движения водовоздушной смеси в вертикальной трубе: вода омывает внутреннюю поверхность трубы, а внутри потока воды в виде стержня движется воздух.

По данным работы [41], в нижнем гйбе канализационного стояка происходит изменение режимов течения: если в стояке вода омывает его внутреннюю поверхность, а внутри потока воды движется воздух, то в канализационном выпуске вода движется по нижней стенке трубы, а над ней свободно течет воздух. В гидравлике газожидкостных систем такое течение называется разделенным.

Таким образом, на основе данных различных исследователей можно представить следующую модель течения водовоздушной смеси в канализационном стояке.

При истечении из поэтажного отвода в стояк вода перекрывает его сечение (образует замкнутый водовоздушный поршень) на уровне присоединения отвода к стояку (рис. 3). На небольшом расстоянии от места входа в стояк течение водовоздушной смеси стабилизируется: вода движется по внутренней поверхности стояка, а внутри потока воды течет воздух.

Можно полагать, что величина эжектирующей способности зависит от параметров жидкости и воздуха и условий входа жидкости в стояк. Несоответствие между величиной эжектирующей способности жидкости и количеством воздуха, поступающим в стояк из атмосферы, приводит к образованию дефицита воздуха ниже сжатого сечения стояка (т. е. ниже водовоздушного поршня). Очевидно, что чем больше это несоответствие, тем больше величина разрежения в стояке.

Величина эжектирующей способности жидкости является функцией скорости ее движения. В соответствии с имею-

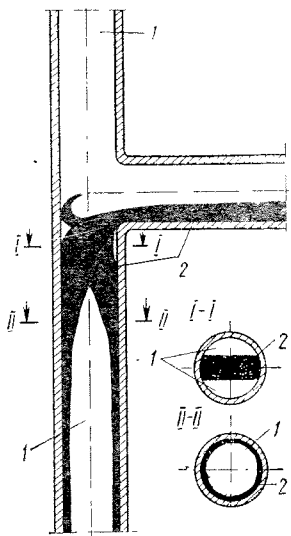


Рис. 3. Схема истечения воды из поэтажного отвода в стояк (разрез по оси стояка)  
1 — воздух; 2 — вода

щимися экспериментальными данными скорость движения жидкости достигает максимального значения через 6—15 м падения. Отсюда можно заключить, что величина эжектирующей способности жидкости стабилизируется на этом же расстоянии от точки входа в стояк.

Величина разрежений в стояке является также функцией количества воздуха, поступающего из атмосферы через вытяжную часть стояка. Если вытяжная часть перестает функционировать (например, вследствие полного обмерзания), то стояк становится неventилируемым и его пропускная способность уменьшается.

## 2. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ РАЗРЕЖЕНИЙ В КАНАЛИЗАЦИОННОМ СТОЯКЕ-

Наличие эжектирующей способности у жидкости, движущейся в безнапорном режиме сверху вниз в вертикальном трубопроводе, можно объяснить взаимодействием жидкости и воздуха, которое является следствием молекулярного смачивания воздуха жидкостью, либо трением между ними; не исключается также наличие обоих факторов.

По данным канд. техн. наук И. В. Мазюкевича, исследовавшего эжектирующие свойства поверхности стекающей жидкостной пленки, взаимодействие такой пленки с окружающей газобразной средой [15] зависит от скорости жидкости на поверхности пленки, величины поверхности пленки, а также разности плотностей газовой среды в пограничном слое и на некотором расстоянии от него.

Рассмотрим механизм движения жидкости и воздуха в канализационном стояке на модели, представленной на рис. 3. Как уже установлено, сечение стояка на уровне присоединения отвода остается «сжатым» жидкостью до тех пор, пока не прекратится истечение жидкости из отвода. На некотором расстоянии от места входа происходит беспорядочное движение жидкости вниз по стояку. Затем жидкость попадает на стенки стояка и ее движение начинает стабилизироваться.

По данным Г. Рихтера [18], по мере движения жидкость прилипает к стенке трубопровода, что приводит сначала к образованию тонкого слоя, в котором скорость очень быстро снижается до нуля.

Известно, что при тчении жидкости в круглой трубе

постоянного диаметра (при полном заполнении) профиль скоростей движений имеет форму параболы с вершиной на оси трубы [1, 2, 13, 29].

При стержневом режиме течения в вертикальной трубе профиль скоростей движения жидкости, по-видимому, имеет вид параболы, не замкнутой на оси трубы, т. е. при неполном заполнении трубопровода ядро течения жидкости отсутствует.

По данным Л. Шиллера [29], по мере продвижения жидкости (в горизонтальном трубопроводе с полным заполнением) ее пограничный слой вследствие трения утолщается и замедляет свое движение. На определенном расстоянии от входа в трубу, называемом начальным участком, пограничный слой захватывает все течение и эпюра скоростей принимает свою окончательную форму.

В вертикальной трубе с неполным заполнением в результате взаимодействия между жидкостью и воздухом на внешней поверхности жидкости образуется пограничный слой воздуха. Жидкость передает часть количества движения воздуху, вследствие чего воздух начинает двигаться в том же направлении, что и жидкость. При этом скорость воздуха является функцией скорости жидкости.

По данным Г. Шлихтинга [30], движение в пограничном слое остается ламинарным вплоть до значений числа Рейнольдса  $5 \cdot 10^5 - 10^6$ .

По данным И. К. Ротта [20], задача количественного расчета турбулентного пограничного слоя, образующегося на стенке при заданных условиях, на современном уровне знаний может решаться только полуэмпирическими методами.

При решении аналитической задачи о величине эжектирующей способности жидкости примем для простоты, что движение жидкости в стояке ламинарное и равномерное, т. е. силы инерции равны нулю. Примем также, что скорость движения частиц жидкости зависит только от расстояния  $X$  по нормали к поверхности течения. Дифференциальное уравнение равновесия сил, действующих в стекающей пленке, в этом случае имеет вид:

$$\frac{d\tau}{dX} + \gamma_{ж} = 0, \quad (9)$$

где  $\tau = \mu_{ж} \frac{du_{ж}}{dX}$  — касательное напряжение, кгс/м<sup>2</sup>;  $\gamma_{ж}$  — удельный вес жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_{ж}$  — коэффициент динамической вязкости жидкости, кг·с/м<sup>2</sup>;  $u_{ж}$  — местная скорость движения жидкости, м/с.

Интегрируя уравнение (9) при граничных условиях: при  $X=0$   $u_{ж}=0$  и при  $X=\delta_{ж}$   $\tau=0$  — получим выражение, описывающее изменение скорости частиц в плоскости живого сечения пленки жидкости:

$$u_{ж} = \frac{\gamma_{ж}}{\mu_{ж}} \left( \delta_{ж} X - \frac{X^2}{2} \right), \quad (10)$$

где  $\delta_{ж}$  — толщина пограничного слоя жидкости, м.

Скорость на внешней поверхности пленки при  $X=\delta_{ж}$  достигает максимального значения

$$u_{ж.макс} = \frac{\gamma_{ж}}{2\mu_{ж}} \delta_{ж}^2. \quad (10a)$$

Средняя скорость движения жидкости в живом сечении пленки равна:

$$\bar{u}_{ж} = \frac{1}{\delta_{ж}} \int_0^{\delta_{ж}} u_{ж} dX. \quad (11)$$

Используя выражение (10):

$$\bar{u}_{ж} = \frac{\gamma_{ж}}{3\mu_{ж}} \delta_{ж}^2. \quad (12)$$

Из (10a) и (12):

$$\bar{u}_{ж} = \frac{2}{3} u_{ж.макс}. \quad (13)$$

Объемный расход жидкости, м<sup>3</sup>/с, в пленке, стекающей по поверхности трубы (без учета ее кривизны), определяется уравнением

$$Q_{ж} = \pi D \delta_{ж} \bar{u}_{ж} = \pi D \frac{\gamma_{ж}}{3\mu_{ж}} \delta_{ж}^3, \quad (14)$$

где  $D$  — диаметр трубы, м.

Отсюда толщина стекающей пленки

$$\delta_{ж} = \sqrt[3]{\frac{3 Q_{ж} \mu_{ж}}{\pi D \gamma_{ж}}}. \quad (15)$$

Из (12) и (15) средняя скорость движения в живом сечении пленки жидкости

$$\bar{u}_{ж} = \sqrt[3]{\frac{1}{3} \left( \frac{Q_{ж}}{\pi D} \right)^2 \frac{\gamma_{ж}}{\mu_{ж}}}. \quad (16)$$

Скорость движения газового слоя на внешней границе стекающей жидкостной пленки в плоскости его живого сечения неодинакова и подчиняется сложной зависимости [15]. На границе раздела жидкости и газа скорость движения газа равна скорости движения жидкости.

В первом приближении можно считать, что скорость движения газа изменяется линейно, т. е. величина касательных напряжений постоянна по ширине слоя.

Дифференциальное уравнение равновесия сил, действующих в газовом слое, имеет вид:

$$\mu_B \frac{d^2 u_B}{d\delta_{B.H}^2} = 0, \quad (17)$$

где  $\mu_B$  — коэффициент динамической вязкости воздуха, кг·с/м<sup>2</sup>;  $u_B$  — местная скорость движения в газовом слое, м/с;  $\delta_{B.H}$  — расстояние (по нормали) от поверхности пленки в плоскости живого сечения газового слоя, м.

По данным канд. техн. наук И. В. Мазюкевича [15], местная скорость движения в газовом слое может быть определена из выражения:

$$u_B = u_{ж.макс} \left( 1 - \frac{\delta_{B.H}}{\delta_B} \right), \quad (18)$$

где  $\delta_B$  — толщина газового слоя, м.

Граничные условия: при  $\delta_{B.H} = 0$   $u_B = u_{ж.макс}$ ; при  $\delta_{B.H} = \delta_B$   $u_B = 0$ .

Средняя скорость движения в плоскости живого сечения газового слоя

$$\bar{u}_B = \frac{1}{\delta_B} \int_0^{\delta_B} u_B d\delta_{B.H} = u_{ж.макс}/2. \quad (19)$$

Таким образом, средняя скорость движения в плоскости живого сечения газового слоя является функцией максимальной скорости жидкости.

Выше отмечалось, что скорость жидкости достигает своего максимального значения в момент установления окончательной формы эпюры скоростей, т. е. в конце начального участка. По данным Л. Шиллера [29], оконча-

тельная форма эпюры скоростей устанавливается при значении

$$L / \frac{D}{2} Re = 0,115, \quad (20)$$

где  $L$  — длина начального участка, м;  $D$  — диаметр трубопровода, м;  $Re$  — число Рейнольдса.

Л. Шиллер рекомендует при турбулентном режиме принимать

$$L = 100D. \quad (21)$$

По данным Г. Рихтера [18], длина начального участка трубопровода круглого сечения определяется из выражения

$$L = c_{стаб} ReD, \quad (22)$$

где  $c_{стаб}$  — коэффициент стабилизации.

По данным Буссинеска [29],  $c_{стаб} = 0,065$ , откуда (при  $Re = 1000$ )  $L/D = 65$ .

По данным Г. Шлихтинга [30], при ламинарном режиме  $L = (100 \div 200)D$  в зависимости от числа Рейнольдса.

Академик Б. Н. Юрьев рекомендует при определении длины начального участка пользоваться формулой

$$L = D/\lambda, \quad (23)$$

где  $\lambda$  — коэффициент сопротивления Дарси.

Все рекомендации по определению длины начального участка, приведенные выше, относятся к горизонтальным трубопроводам с полным заполнением. Аналогичных рекомендаций для опускного течения двухфазной смеси в вертикальной трубе в технической литературе не содержится. Однако несомненно, что и в интересующем нас случае длина начального участка является функцией диаметра трубы. Можно также предполагать, что в вертикальном трубопроводе течение стабилизируется раньше, чем в горизонтальном.

Поскольку от длины начального участка трубопровода зависит скорость движения жидкости, постольку от нее же зависит и скорость движения, а следовательно, и объемный расход эжектируемого воздуха. Отсюда следует, что с уменьшением (в пределах длины начального участка) высоты канализационного стояка связано также

уменьшение величины эжектирующей способности жидкости; в то же время очевидно, что в канализационном стояке, высота которого равна длине начального участка или превышает ее, величина эжектирующей способности максимальна и постоянна.

Объемный расход воздуха, поступающего в стояк, может быть определен следующим образом:

$$Q_B = \pi D' \delta_B \bar{u}_B, \quad (24)$$

где  $D'$  — диаметр газового слоя по внешней поверхности пленки жидкости, м.

Очевидно, что в случае течения на плоской пластине толщина газового слоя не может быть определена однозначно, так как влияние трения в пограничном слое уменьшается по мере удаления от стенки асимптотически. Согласно данным Г. Шлихтинга [30], за толщину газового слоя принимается то расстояние от внешней границы жидкостной пленки, на котором скорость составляет 99% максимальной. При этом условии:

$$\delta_B = 5 \sqrt{\frac{Lv_B}{u_{ж, макс}}}, \quad (25)$$

где 5 — коэффициент Блазиуса;  $v_B$  — кинематическая вязкость воздуха,  $m^2/c$ .

Пользуясь уравнениями (12), (16), (19) и (25), можно определить объемный расход,  $m^3/c$ , воздуха, увлекаемого поверхностью жидкостной пленки:

$$Q_B = 2,5\pi D (Lv_B)^{1/2} \left(\frac{Q_{ж}}{\pi D}\right)^{1/3} \left(\frac{\gamma_{ж}}{\mu_{ж}}\right)^{1/6}. \quad (26)$$

При выводе формулы (26) принято, что  $D' = D$  ввиду малого значения толщины жидкостной пленки по сравнению со значением диаметра трубы.

Последнее выражение дает возможность определить объемный расход воздуха, который движущаяся жидкость стремится увлечь за собой в стояк. Следует подчеркнуть, что такое количество воздуха поступало бы в стояк при отсутствии на пути воздуха гидравлических сопротивлений, т. е. величиной  $Q_B$  характеризуется величина эжектирующей способности жидкости.

Однако в соответствии с принятой моделью течения на уровне присоединения поэтажного отвода к стояку на пути движения воздуха имеется местное гидравлическое

сопротивление большой величины в виде водовоздушного поршня. В результате в стояк из атмосферы поступает количество воздуха, меньшее величины эжектирующей способности, что обуславливает возникновение дефицита воздуха (или разрежения) ниже сжатого поршнем сечения стояка.

Расход воздуха,  $m^3/c$ , определяют по формуле

$$Q_B = \mu \omega_B \sqrt{\frac{2g}{\gamma_B} \Delta p}, \quad (27)$$

где  $\mu$  — коэффициент расхода;  $\omega_B$  — площадь живого сечения воздуха в сжатом сечении стояка,  $m^2$  (см. рис. 3);  $g$  — ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ;  $\gamma_B$  — удельный вес воздуха,  $kg/m^3$ ;  $\Delta p$  — перепад давлений,  $kgc/m^2$ .

Решая уравнения (26) и (27) совместно относительно  $\Delta p$ , имеем:

$$\begin{aligned} \Delta p &= \frac{[2,5\pi D (Lv_B)^{1/2} (Q_{ж}/\pi D)^{1/3} (\gamma_{ж}/\mu_{ж})^{1/6}]^2 \gamma_B}{\mu^2 \omega_B^2 2g} = \\ &= \frac{1}{\mu^2} \frac{Q_B^2}{2g\omega_B^2} \gamma_B = \zeta \frac{v^2}{2g} \gamma_B, \end{aligned} \quad (28)$$

где  $\zeta$  — коэффициент местного сопротивления;  $v$  — скорость воздуха в сжатом сечении стояка,  $m/c$ .

Полученное выражение дает возможность проанализировать влияние основных параметров течения жидкости и воздуха на величину разрежений в канализационном стояке.

Величина разрежений увеличивается с ростом расхода жидкости. При увеличении расхода жидкости возрастает величина ее эжектирующей способности, площадь живого сечения воздуха в сжатом сечении стояка  $\omega_B$  уменьшается. При увеличении  $\omega_B$  в 2 раза  $\Delta p$  уменьшается в 4 раза. Отсюда следует вывод о необходимости увеличения площади сечения воздуха в сжатом сечении стояка, что может быть достигнуто изменением условий входа жидкости в стояк, а именно уменьшением диаметра и угла присоединения к нему поэтажных трубопроводов.

Величина разрежений в стояке стремится к бесконечности при  $\omega_B \rightarrow 0$ , что может быть, например, при обмерзании вытяжной части стояка.

В то же время увеличение диаметра вытяжной части по сравнению с диаметром стояка малоэффективно, так

как расход воздуха будет лимитироваться диаметром стояка.

Из формулы (28) следует, что величина разрежений достигает максимума в конце длины начального участка  $L$ . Дальнейшее увеличение высоты стояка не оказывает влияния на величину разрежения; уменьшение высоты стояка способствует повышению его пропускной способности.

С увеличением шероховатости материала трубопровода уменьшается длина начального участка (при прочих равных условиях) и, следовательно, уменьшается величина возникающих в стояке разрежений. Таким образом, пропускная способность стояка из шероховатых труб больше, чем из гладких. Поэтому нельзя подтвердить правильность существовавшего мнения о возможности замены чугунных канализационных труб диаметром 100 мм с коэффициентом шероховатости 0,013 полиэтиленовыми диаметром 75 мм с коэффициентом шероховатости 0,01.

Величина эжектирующей способности жидкости — числитель формулы (28) — увеличивается с увеличением диаметра стояка. Тот факт, что стояк большего диаметра имеет все же большую пропускную способность, объясняется существенным уменьшением площади живого сечения воздуха в сжатом сечении стояка большего диаметра при одинаковом расходе жидкости. Кроме того, следует отметить, что изменение удельного веса жидкости практически весьма невелико. С повышением температуры стоков величина разрежений в стояке несколько уменьшается.

Наличие компонентов твердой фазы в сточной жидкости не оказывает практического влияния на пропускную способность стояка. Так, по данным Н. Ф. Федорова [25], удельный вес бытовых сточных вод практически не отличается от удельного веса чистой воды. По данным М. В. Мальцева, гидравлические потери при движении трехфазных смесей (вода + воздух + твердое) в вертикальных трубах определяются потерями, обусловленными движением жидкой фазы [16]. Этот вывод значительно облегчает проведение экспериментальных исследований, освобождая от необходимости моделировать сточную жидкость.

Анализ выражения (28) также показывает, что изменение параметров воздуха незначительно влияет на ве-

личину разрежений в канализационном стояке и при расчете ими можно пренебречь (в числитель указанного выражения кинематическая вязкость  $\nu_v$  и удельный вес воздуха  $\gamma_v$  входят в первой степени и изменяются обратно пропорционально).

Следует, однако, указать, что расчет по формуле (28) осложняется из-за отсутствия данных о величине площади живого сечения воздуха в сжатом сечении стояка  $\omega_v$ , неизвестна также величина коэффициента расхода  $\mu$ . Кроме того, формулой (28) не учитываются условия входа жидкости в стояк. Следовательно, расчет надземной части систем канализации зданий должен базироваться на экспериментальных исследованиях.

### Глава III

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ НАДЗЕМНОЙ ЧАСТИ СИСТЕМ КАНАЛИЗАЦИИ ЗДАНИЙ

### 1. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СТЕНДЫ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования пропускной способности канализационных стояков выполнялись на двух лабораторных стендах — большом и малом.

Большой стенд высотой 18,53 м, построенный на территории Экспериментальной базы Московского научно-исследовательского института типового и экспериментального проектирования (МНИИТЭП). Главного архитектурно-планировочного управления Москвы, включал три стояка диаметрами 57, 79 и 106 мм. На отметках 0,5; 4,03; 7,31; 10,25; 13,01; 15,9 и 18,53 м к стояку под углом 90° были присоединены горизонтальные отводы, с помощью которых в каждом этаже к стояку присоединялись ванна емкостью 140 л и унитаз с низкорасположенным смывным бачком («Компакт») емкостью 6,5 л.

Диаметр выбранных для эксперимента отводных труб от ванн — 57 мм. Уклон поэтажных трубопроводов — 0,02 в сторону стояка.

Для возможности визуального наблюдения потоков воды и воздуха все трубопроводы были смонтированы из



та был выбран 19-этажный жилой дом с высотой стояка около 60 м (Москва, Ленинский просп., дом № 102, корп. 10). Система внутренней канализации названного дома включает канализационный стояк из чугунных канализационных труб (ГОСТ 6942—63) диаметром 100 мм, к которому в каждом этаже под углом 90° присоединены мойка, умывальник и ванна типа ПВ-0 с помощью труб диаметром 50 мм, а также унитаз «Компакт» (самостоятельное присоединение к стояку).

Расход воды обеспечивался одновременным опорожнением трех и четырех ванн, установленных в верхних этажах здания.

Эксперименты выполнены при отрицательной температуре наружного воздуха ( $-4^{\circ}\text{C}$ ). На лабораторных стендах работы проводились при температурах воздуха плюс  $15-25^{\circ}\text{C}$ .

Целью выполненных экспериментальных исследований являлось установление причин возникновения вакуума в канализационном стояке и разработка методики для определения величины этого вакуума в зависимости от основных параметров. Один из таких параметров — расход транспортируемой по стояку жидкости.

Следует отметить, что в натуральных условиях, а также на большом экспериментальном стенде (где условия течения максимально приближены к натурным) измерение секундного расхода жидкости представляет определенные трудности.

При выполнении исследований на большом стенде замер секундных расходов жидкости осуществлялся с помощью специально изготовленного гидрометрического лотка Паршала малых размеров, а при работе со стояком диаметром 57 мм — также с помощью водомера СВШ-5-16/40.

Измерения с помощью лотка Паршала позволили установить, что максимальный секундный расход жидкости, поступающей в канализационный стояк при одновременном опорожнении нескольких ванн, можно определить по формуле

$$q = 0,9mq_1, \quad (29)$$

где  $m$  — число одновременно действующих ванн;  $q_1$  — максимальный секундный расход от одной ванны, равный  $\sim 1,1$  л/с; 0,9 — коэффициент, учитывающий несовпадение в стояке пиковых расходов жидкости при одновременном опорожнении  $m$  ванн.

Полученная зависимость (29) весьма облегчает проведение экспериментов в натуральных условиях в жилых зданиях, в которых необходимый расход жидкости может задаваться определенным количеством одновременно действующих ванн. В частности, при проведении экспериментов в указанном 19-этажном доме расход жидкости задавался одновременным опорожнением трех и четырех ванн, максимальный секундный расход жидкости при этом составил соответственно около 3 и 4 л/с.

При работе на малом стенде расход жидкости измерялся с помощью треугольного водослива, предварительно оттарированного (по уровню) объемным способом.

При транспортировании жидкости по стояку происходят колебания давлений в стояке и в горизонтальных поэтажных отводах, что приводит к снижению высоты гидравлических затворов. Величина, на которую снижается высота гидравлического затвора, может быть определена с помощью мановакуумметра двумя способами.

Первый из них заключается в том, что к одному концу мановакуумметра присоединяется гибкий резиновый шланг, свободный конец которого помещается в гидравлический затвор, например, унитаза, присоединенного к экспериментальному стояку. Мановакуумметр устанавливается у основания унитаза. Подсасыванием жидкости в мановакуумметр ее уровень устанавливается на отметке, соответствующей отметке уровня воды в гидравлическом затворе унитаза и принимаемой за нуль отсчета. При понижении или повышении уровня воды в гидравлическом затворе понижается или повышается уровень жидкости в мановакуумметре. Разница между нулевым и установившимся уровнями дает величину изменения высоты воды в гидравлическом затворе.

Следует, однако, отметить, что мановакуумметр является показывающим (а не записывающим) прибором для измерения перепада давлений. Поэтому величина снижения уровня воды в гидравлическом затворе (например, унитаза), замеренная после транспортирования жидкости по стояку, не равна величине разрежений в канализационном стояке. Величина разрежений, возникающих в стояке в процессе транспортирования жидкости, превышает величину снижения высоты гидравлического затвора (см. рис. 2).

При проведении работ на большом стенде величина разрежений фиксировалась по мановакуумметрам, уста-

повленным в каждом «этаже». Эта величина соответствовала максимальному снижению уровня в мерной трубке каждого прибора в процессе транспортирования жидкости по стояку.

При проведении экспериментальных исследований на малом стенде мановакуумметр, заполненный водой до нулевой отметки, присоединялся к экспериментальному стояку на 0,7 м ниже присоединения горизонтального поэтажного отвода, по которому в стояк подавалась вода (см. рис. 4). За величину разрежений принималось максимальное отклонение от нуля уровня воды в мановакуумметре в процессе транспортирования по стояку жидкости.

На малом стенде к экспериментальному стояку помимо мановакуумметра в том же сечении был присоединен гидравлический затвор, в котором измерялось колебание уровня воды и изменение величины разрежения в стояке. Целью этих одновременных замеров являлось установление критической величины разрежений в стояке, соответствующей моменту срыва гидравлического затвора. Исследования выполнены на трех гидравлических затворах, один из которых — стандартный бутылочного типа высотой 60 мм, а два других — прозрачные (выполненные из оргстекла) высотой 60 и 80 мм (второй ставился после срыва первого).

При проведении экспресс-испытаний в натуральных условиях величина разрежений замерялась с помощью мановакуумметров по простому и достаточно надежному первому способу. При проведении длительных исследований в натуральных условиях величина разрежений в экспериментальных стояках и системах определялась с помощью тягонапорометров со шкалой  $\pm 40$  мм вод. ст. и лентопротяжным механизмом.

Расход воздуха, увлекаемого в стояк движущейся в нем сверху вниз жидкостью, определялся по стандартным методикам путем измерения скорости воздуха с помощью крыльчатых анемометров, а также полупроводниковых термометрических анемометров конструкции Ленинградского института охраны труда (ЛИОТ).

Измерение скорости воздуха на большом стенде производилось выше сжатого сечения стояка (т. е. выше места поступления в него жидкости) крыльчатыми анемометрами. Для выравнивания поля скоростей воздушного приточного потока (при замерах на стояках 57 и 79 мм)

применены насадки из кровельной жести. Вода в стояки подавалась по трубопроводам диаметром 40 мм (в стояк диаметром 106 мм) и 57 мм (в стояки диаметром 57 и 79 мм).

Скорости воздуха на малом стенде замерялись полупроводниковыми термоанемометрами как выше, так и ниже сжатого сечения стояка.

Расходы воздуха определялись по максимальному значению их скоростей.

## 2. РЕЖИМЫ ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ И ВОЗДУХА В КАНАЛИЗАЦИОННЫХ СТОЯКАХ

Визуальные наблюдения потоков воды и воздуха в стеклянных трубопроводах на большом стенде подтвердили правильность принятой для аналитических исследований модели течения воды и воздуха (гл. II).

Вода при истечении из горизонтального поэтажного отвода перекрывает сечение стояка, ударяется о его противоположную стенку с образованием вихря, а затем начинает двигаться вниз. При этом сечение стояка на уровне присоединения отводного трубопровода остается сжатым водой до тех пор, пока не прекратится истечение из отвода. Так, например, если опорожнение полностью заполненной ванны емкостью 160—180 л продолжается в течение 180 с, то все это время стояк перекрыт жидкостью. На небольшом расстоянии (30—50 см) от входа в стояк движение водовоздушной смеси стабилизируется: вода в виде пленки движется по внутренней поверхности стояка, а внутри потока воды в виде стержня движется воздух.

До поступления воды в стояк воздух движется в нем снизу вверх. При опускном движении воды по стояку воздух изменяет направление своего движения на противоположное. Отсюда следует однозначный вывод о том, что поступление воздуха из атмосферы в стояк вызвано движением жидкости.

Структура стержневого течения существенно изменяется в зависимости от соотношения фаз в стояке. При практических расходах жидкости, когда истинная доля сечения трубы, занятая газовой фазой, уменьшается, жидкость движется по стенкам стояка сплошным потоком.

Уменьшение расхода воды приводит к увеличению доли сечения стояка, занятой газовой фазой, — происходит

106-9

искривление границы раздела фаз газ — жидкость. Дальнейшее уменьшение расхода жидкости еще более искривляет эту границу раздела и, наконец, при пленочном движении жидкости граница раздела фаз принимает волнообразный характер.

При пленочном движении жидкости может вновь измениться направление движения воздуха, тогда вектор его скорости будет направлен вертикально вверх. В этом случае воздух будет двигаться навстречу движению жидкости. Воздух создает дополнительное сопротивление движению жидкости, и поэтому остаточная жидкость медленно стекает по стенкам стояка.

Пленочное движение жидкости не имеет практического значения для расчета надземной части систем канализации зданий. При больших расходах транспортирование жидкости по стояку обязательно сопровождается поступлением воздуха в стояк из атмосферы.

Все формы стержневого движения жидкости и воздуха в канализационном стояке характеризуются чистой поверхностью раздела фаз и отсутствием пенообразования. Даже при расходах жидкости, значительно превышающих критические, стержневой характер движения не переходит в снарядный, которому присуще наличие газовых пузырей («снарядов»), имеющих длину, равную нескольким десяткам диаметров трубопроводов. Газовые пузыри-снаряды занимают все сечение трубопровода, являясь газовыми пробками, которые снизу и сверху отделяются одна от другой тонким слоем жидкости. При этом резко возрастает эжектирующая способность жидкости, что приводит к возникновению в стояке разрежений большой величины, составляющей до 3500 мм вод. ст., о чем свидетельствуют результаты экспериментальных исследований водосточных стояков, выполненных канд. техн. наук М. А. Гурвицем [4].

Следует, однако, отметить, что в канализационном стояке невозможно достигнуть вакуума указанной величины, так как в отличие от водосточного канализационный стояк является незамкнутой системой, в которой напорный режим течения не может быть создан и при срыве только одного гидравлического затвора происходит также срыв вакуума в стояке.

Жидкость, поступающая в стояк из поэтажного отвода, создает местное сопротивление большой величины для движущегося сверху (из атмосферы) вниз воздуха.

В результате возникает дефицит воздуха. Поэтому, если в стояк воздух из атмосферы будет поступать минуя сжатое сечение (ниже места входа жидкости), то количество воздуха будет соответствовать эжектирующей способности жидкости и дефицита воздуха не возникнет.

Это положение подтверждено исследованиями на малом стенде более чем на десяти системах канализации, отличающихся высотой и диаметром стояков, а также условиями входа в них жидкости. Экспериментальная схема представлена на рис. 5. Расход воздуха определялся по его скорости, замеренной полупроводниковым термоанемометром; величина разрежений фиксировалась мановакуумметром, присоединенным к стояку в одном сечении с местом входа воздуха. Во избежание искажения картины течения в сравнительно коротком стояке, на нем не устраивался нижний гиб.

Одновременно на том же стенде была определена длина начального участка стояка, на которой достигается максимальная величина эжектирующей способности жидкости. Экспериментально начальный участок установлен в результате измерения величины эжектирующей способности жидкости в стояке диаметром 45 мм, к которому под углом 45° присоединен отводной трубопровод такого же диаметра. Рабочая высота стояка последовательно увеличивалась с 2,35 до 5,28 м (с 52,2 до 117,2 диаметра стояка). Результаты эксперимента представлены графиками на рис. 6.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что величина эжектирующей способности возрастает лишь на участке стояка, равном 90 диаметрам от места входа в него жидкости. При увеличении рабочей высоты стояка с 90 до 117,2 его диаметра расход воздуха не изменяется.

Экспериментальные исследования эжектирующей способности жидкости позволили установить следующую зависимость (рис. 7) ее от основных параметров системы канализации здания:

$$Q_B = \frac{24,5 q_{ж}^{0,333} D_{ст}^{1,75} (D_{ст}/d_{отв})^{0,12}}{\sqrt{90 D_{ст}/L} (1 + \cos \alpha)^{0,177}}, \quad (30)$$

где  $Q_B$  — величина эжектирующей способности воды, л/с;  $q_{ж}$  — расход жидкости, л/с;  $D_{ст}$  — диаметр стояка, дм;  $d_{отв}$  — диаметр поэтажного отвода, дм;  $L$  — рабочая высота стояка, дм;  $90 D_{ст}$  — длина начального участка стояка, дм;  $\alpha$  — угол присоединения поэтажных трубопроводов к стояку, град.

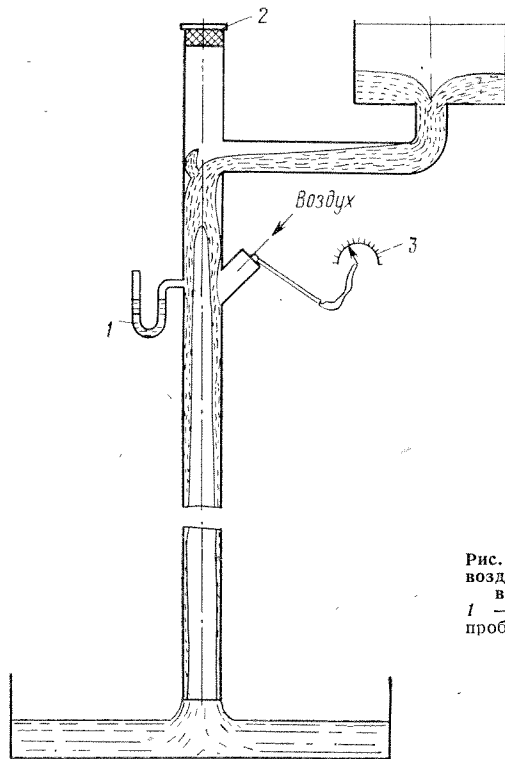


Рис. 5. Схема поступления воздуха в стояк ниже места входа в него жидкости  
1 — мановакуумметр; 2 — пробка; 3 — термоанемометр

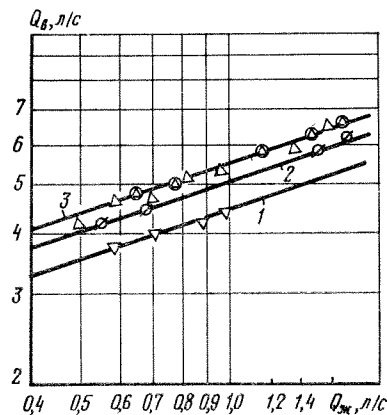


Рис. 6. Зависимость расхода воздуха от расхода воды в стояке диаметром 45 мм различной высоты  
1 —  $L=52,2D_{ст}$ ; 2 —  $L=84,4D_{ст}$ ; 3 —  $L=90D_{ст}$  и  $L=117,2D_{ст}$

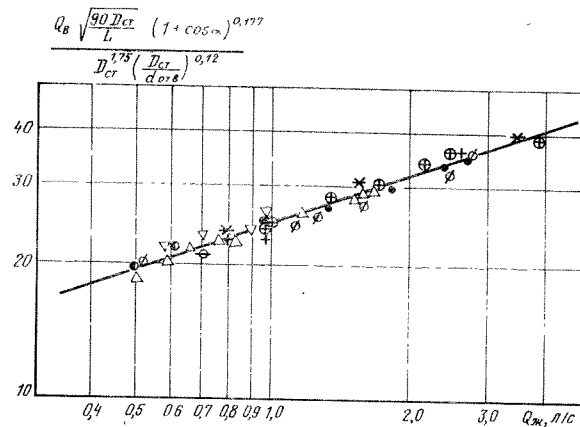


Рис. 7. Зависимость эжектирующей способности жидкости от ее расхода и параметров системы канализации (на графике показаны экспериментальные точки, полученные на восьми различных системах канализации)

Из формулы (30) следует, что за длину начального участка (или длину участка стабилизации эжектирующей способности) стояка принята длина, равная 90 его диаметрам от места входа жидкости. Следовательно, формула (30) верна для стояков, рабочая высота которых  $L \leq 90D_{ст}$ . Для стояков большей высоты определение величины эжектирующей способности жидкости следует производить по формуле (30), исключив из нее множитель  $\sqrt{90D_{ст}/L}$ .

В тех случаях, когда  $D_{ст}=100$  мм (1 дм),  $L \geq 90D_{ст}$ ,  $D_{ст} = d_{отв}$  и  $\alpha=90^\circ$ , формула (30) принимает вид:

$$Q_{в} = 24,5q_{ж}^{0,333} \quad (30, а)$$

Сравнение экспериментальных значений величины эжектирующей способности жидкости с расчетными по формуле (26), в которой коэффициент 2,5 заменен на  $9,5\sqrt{D_{ст}/(1+\cos \alpha)^{0,177}}$ , представленное на рис. 8 (для стояков с  $L \geq 90D_{ст}$ ), позволяет сделать вывод о том, что теоретические предпосылки, положенные в основу разработки этой формулы, правильно отражают физику явлений при течении жидкости и воздуха в вертикальном трубопроводе.

Анализ формулы (30) показывает, что величина эжектирующей способности жидкости, определенная экспериментально, прямо пропорциональна длине начального участка стояка в степени 1/2. Нетрудно видеть, что эта же закономерность отражена в аналитической формуле (26).

Пропорциональность величины эжектирующей способности жидкости длине участка ее стабилизации в степени 1/2 находит обоснование в теории пограничного слоя [30], в которой рассматривается развитие пограничного слоя при течении жидкости вдоль плоской пластины бесконечной длины: «удвоение длины пластины не приводит к удвоению сопротивления, так как толщина пограничного слоя на задней половине пластины (удлиненной в два раза) больше, чем на передней половине, в следст-

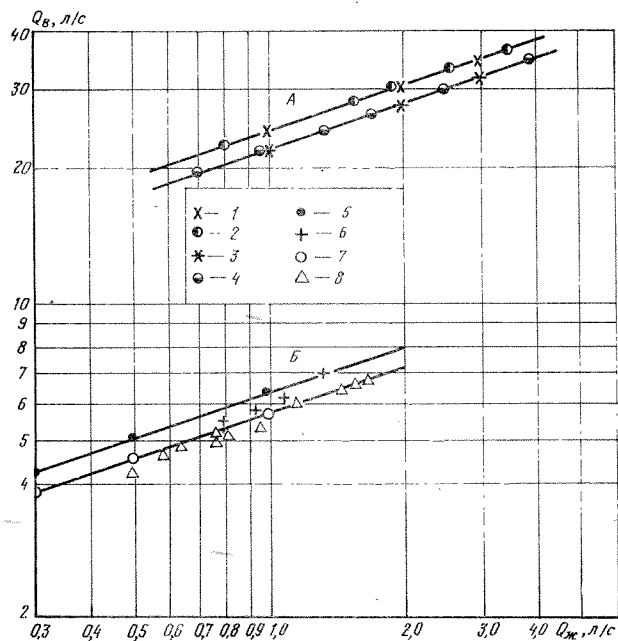


Рис. 8. Эжектирующая способность жидкости при различных параметрах систем канализации по экспериментальным и расчетным данным  
 А — диаметр стояка и отвода 100 мм; Б — то же, 45 мм; 1 —  $\alpha = 90^\circ$  — расчетная; 2 — то же, экспериментальная; 3 —  $\alpha = 45^\circ$  — расчетная; 4 — то же, экспериментальная; 5 —  $\alpha = 90^\circ$  — расчетная; 6 — то же, экспериментальная; 7 —  $\alpha = 45^\circ$  — расчетная; 8 — то же, экспериментальная

вне чего сопротивление трения на задней половине пластины меньше, чем на передней».

Следует подчеркнуть, что зависимости (26) и (30) справедливы только для стержневого режима течения жидкости и воздуха в канализационном стояке. При изменении режима течения эти зависимости нарушаются.

Результаты исследований зависимости фактического расхода воздуха от расхода воды на восьми системах канализации, отличающихся диаметрами и высотой стояков, а также условиями входа в них жидкости, позволяют сделать вывод о том, что при боковом подводе жидкости к стояку расход воздуха, поступающего в стояк выше его сжатого сечения, практически не зависит от угла присоединения поэтажного трубопровода.

На основе комплекса исследований по определению расхода воздуха, поступающего в стояки, установлена следующая зависимость скорости воздуха, м/с, от условной скорости воды, высоты и диаметра стояков, а также диаметра поэтажных трубопроводов (рис. 9):

$$v_B = 2,6 \left( \frac{v_{ж} \frac{D_{ст}}{d_{отв}}}{\sqrt{\frac{90D_{ст}}{L}}} \right)^{0,184} \quad (31)$$

где  $v_{ж}$  — условная скорость жидкости, определяемая как отношение ее расхода к площади сечения стояка, м/с;  $D_{ст}$  и  $d_{отв}$  — диаметры стояка и поэтажного отвода, м.

Из зависимости (31) следует, что и на расход воздуха, поступающего в стояк выше его сжатого сечения, оказывает влияние не вся высота стояка, а лишь длина его начального участка, равная  $90D_{ст}$ .

В случае  $D_{ст} = d_{отв}$  и  $L \geq 90D_{ст}$  формула (31) примет вид:

$$v_B = 2,6 v_{ж}^{0,184} \quad (31, a)$$

Расход воздуха, поступающего в стояк, равен:

$$q_B = \bar{v}_B \omega \quad (32)$$

При известных величинах эжектирующей способности жидкости, определяемой формулой (30), и расхода воздуха, определяемого формулой (32), дефицит воздуха определится из выражения:

$$\Delta q_B = Q_B - q_B \quad (33)$$

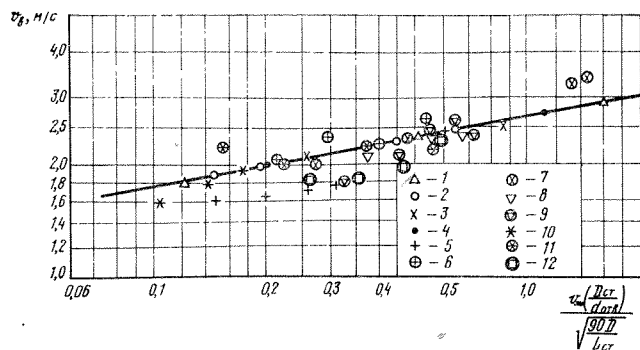


Рис. 9. Зависимость скорости воздуха, поступающего выше сжатого сечения стояка, от основных параметров системы канализации

- 1 —  $D_{СТ} = 100$  мм,  $d_{ОТВ} = 45$  мм,  $\alpha = 90^\circ$ ,  $L = 4,5$  м;
- 2 —  $D_{СТ} = d_{ОТВ} = 100$  мм,  $\alpha = 45^\circ$ ,  $L = 4,5$  м;
- 3 —  $D_{СТ} = d_{ОТВ} = 45$  мм,  $\alpha = 45^\circ$ ,  $L = 4,05$  м;
- 4 —  $D_{СТ} = d_{ОТВ} = 45$  мм,  $\alpha = 90^\circ$ ,  $L = 2,35$  м;
- 5 —  $D_{СТ} = d_{ОТВ} = 57$  мм,  $\alpha = 90^\circ$ ,  $L = 18,5$  м;
- 6 —  $D_{СТ} = 79$  мм,  $d_{ОТВ} = 57$  мм,  $\alpha = 90^\circ$ ,  $L = 18,5$  м;
- 7 —  $D_{СТ} = 106$  мм,  $d_{ОТВ} = 40$  мм,  $\alpha = 90^\circ$ ,  $L = 18,5$  м;
- 8 —  $D_{СТ} = d_{ОТВ} = 45$  мм,  $\alpha = 45^\circ$ ,  $L = 4,75$  м;
- 9 —  $D_{СТ} = d_{ОТВ} = 45$  мм,  $\alpha = 45^\circ$ ,  $L = 4,7$  м;
- 10 —  $D_{СТ} = d_{ОТВ} = 100$  мм,  $\alpha = 90^\circ$ ,  $L = 4,5$  м;
- 11 —  $D_{СТ} = 100$  мм,  $d_{ОТВ} = 45$  мм,  $\alpha = 90^\circ$ ,  $L = 4$  м;
- 12 —  $D_{СТ} = 100$  мм,  $d_{ОТВ} = 45$  мм,  $\alpha = 45^\circ$ ,  $L = 4,5$  м

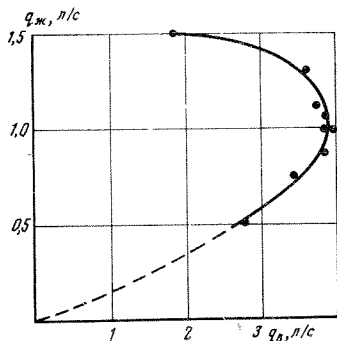


Рис. 10. Зависимость расхода воздуха от расхода воды в стояке диаметром 45 мм

При увеличении расхода жидкости возрастает сопротивление, создаваемое ею в сжатом сечении стояка, а также величина эжектирующей способности жидкости. Однако несмотря на увеличение сопротивлений в сжатом сечении стояка при возрастании расхода жидкости, расход воздуха, поступающего через вытяжную часть в стояк, увеличивается (рис. 10).

Расход воздуха, поступающего в стояк выше его сжатого сечения, увеличивается до определенного предела, соответствующего критическому расходу жидкости, т. е. моменту срыва гидравлического затвора. После этого через сорванный гидравлический затвор в стояк поступает дополнительное количество воздуха и, естественно, что расход воздуха, поступающего выше сжатого сечения стояка, резко уменьшается.

При увеличении расхода жидкости величина ее эжектирующей способности возрастает быстрее, чем расход воздуха, фактически поступающего в стояк, что обуславливает возрастание дефицита воздуха. Это положение иллюстрируется графиками на рис. 11. Кривые 1 и 3 этих графиков рассчитаны по формуле (30), кривые 2 и 4 — по формуле (32).

Формулы (30), (31) и (33) позволяют проанализировать работу телескопических канализационных стояков (стояков с переменным диаметром по высоте), широко применяющихся в практике строительства в США. Увеличение диаметра нижней половины стояка способствует увеличению эжектирующей способности жидкости при неизменном расходе воздуха, поступающего в стояк из атмосферы. Следовательно, в телескопическом стояке увеличивается дефицит воздуха и уменьшается пропускная способность.

Во избежание возникновения дефицита воздуха в стояке, к которому на различных отметках присоединяются поэтажные отводные трубопроводы (т. е. образование сжатого сечения возможно на разных отметках стояка), необходима подача воздуха в этот стояк ниже точек присоединения к нему поэтажных трубопроводов. Наилучшим образом это может быть достигнуто устройством второго, вентиляционного, стояка, который соединяется перемычками со сточным стояком либо объединяет поэтажные трубопроводы (рис. 12). Последняя схема исследована нами на большом стенде (диаметр сточного стояка и поэтажных отводных трубопроводов —

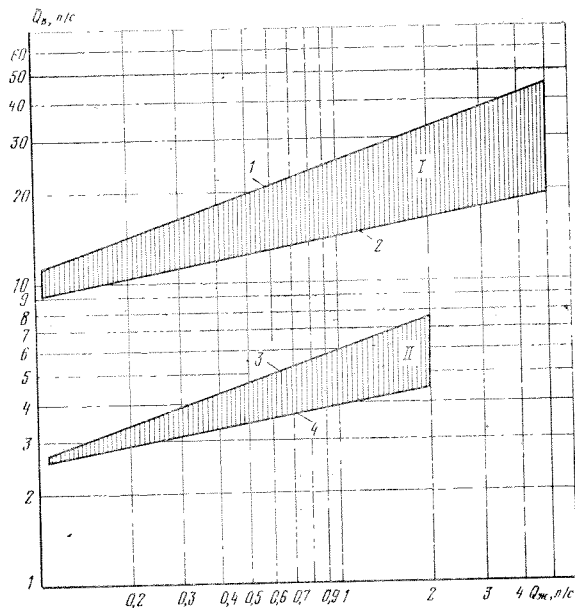


Рис. 11. Области дефицита воздуха в стояках при увеличении расхода жидкости  
 I — область дефицита воздуха в стояке,  $D_{ст}=100$  мм; II — то же, в стояке,  $D_{ст}=45$  мм; 1 и 3 — эжектирующая способность воды; 2 и 4 — расход воздуха при вентиляции через вытяжную часть

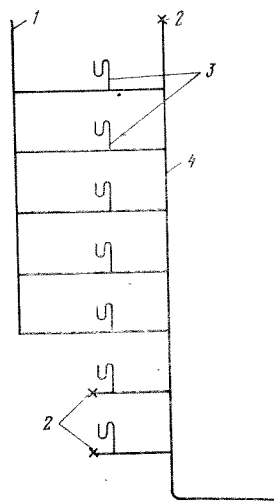


Рис. 12. Экспериментальная схема системы канализации с вентиляционным стояком  
 1 — вентиляционный стояк,  $D_{ст}=51$  мм;  
 2 — заглушка; 3 — гидравлический затвор;  
 4 — сточный стояк,  $D_{ст}=57$  мм

57 мм, диаметр вентиляционного стояка — 51 мм, угол присоединения отводов к сточному стояку —  $90^\circ$ ). Замерялась скорость воздуха, поступающего в вентиляционный стояк; при этом вытяжная часть сточного стояка была заглушена, отводные трубопроводы в первом и втором «этажах» не вентилировались.

Проведенный эксперимент показывает, что при отсутствии сопротивлений большой величины расход воздуха, поступающего в систему канализации, увеличивается во всем диапазоне увеличения расхода жидкости. График зависимости расхода воздуха, поступающего по вентиляционному стояку, от расхода воды представлен на рис. 13, кривая 1. Для сравнения на графике приведены кривая 2, которая показывает изменение расхода воздуха в той же системе, не имеющей вентиляционного стояка, при поступлении воздуха через вытяжную часть сточного стояка, и кривая 3, рассчитанная по формуле (30). Небольшой дефицит воздуха в исследуемой системе (область между кривыми 1 и 3) объясняется потерями напора воздушной струи на вход, трение и в местных сопротивлениях в гидравлическом тракте, по которому движется воздух. Кроме того, диаметр вентиляционного стояка несколько меньше диаметра сточного стояка. Возникновение дефицита воздуха небольшой величины обуславливает образование разрежения в системе канализации. При расходе воды 1,665 л/с величина разрежения составила лишь 32 мм вод. ст. (314 Па), в то время как без вентиляционного стояка в той же системе при расходах жидкости 0,8—1 л/с величина разрежений достигает 60—65 мм вод. ст., т. е. приводит к срыву гидравлического затвора высотой 60 мм.

Несмотря на отсутствие вентиляции двух нижних отводных трубопроводов, срыва гидравлических затворов, присоединенных к ним, не происходит. Это объясняется изменением режимов течения жидкости и воздуха в нижнем гйбе сточного стояка со стержневого на вертикальном участке на разделенное в канализационном выпуске — вода омывает нижнюю стенку трубы, а над ней свободно течет воздух (рис. 14). Изменение режимов течения характеризуется резким снижением скорости воздуха, что сопровождается повышением статического напора над точкой перегиба стояка.

Повышение статического напора воздуха сопровождается не снижением, а повышением уровня воды в гидрав-

### 3. РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ НАДЗЕМНОЙ ЧАСТИ СИСТЕМ КАНАЛИЗАЦИИ С ВЕНТИЛИРУЕМЫМИ СТОЯКАМИ

Расчет системы канализации здания из условия устойчивости гидравлических затворов заключается в определении величины разрежения, которое может возникнуть в канализационном стояке.

Основные исследования по определению величины разрежений в канализационном стояке выполнены на малом стенде, где работа проводилась в стационарном режиме течения жидкости, а конструкция стенда позволяла очень просто варьировать геометрическими параметрами экспериментальных систем. На большом стенде выполнены исследования на стояках, к которым поэтажные отводы присоединены под углом  $90^\circ$ . Кроме того, эксперименты выполнены на канализационном стояке из чугунных труб диаметром 100 мм в 19-этажном жилом доме (высота стояка около 60 м).

Результаты экспериментальных исследований на восьми системах канализации, отличающихся диаметром и высотой стояков, а также условиями входа в них жидкости (рис. 15), свидетельствуют о том, что пропускная способность канализационных стояков зависит от условий входа жидкости в стояк — угла присоединения поэтажных отводов к стояку и отношения  $D_{ст}/d_{отв}$ .

Кривые 1 и 3 графика построены для стояков диаметром 45 мм высотой от 90 до 117,2 диаметра. Эти кривые подтверждают, что длина начального участка вертикального трубопровода, работающего в стержневом режиме движения жидкости и воздуха, равняется примерно 90 диаметрам стояка. Ранее было показано, что величина эжектирующей способности жидкости стабилизируется на этом участке стояка, величина разрежения принимает максимальное значение. Это положение подтверждается кривыми 1—4, характеризующими зависимость величины разрежений от расходов воды и условий ее входа в стояки высотой 52,2  $D_{ст}$  и более 90  $D_{ст}$ . При уменьшении высоты стояка с 4,05 до 2,35 м его пропускная способность возрастает в среднем на 15%, что объясняется уменьшением эжектирующей способности воды при уменьшении высоты стояка (при прочих равных ус-

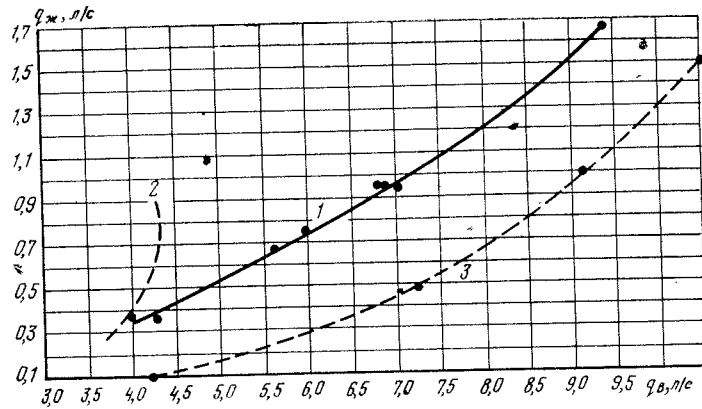


Рис. 13. Зависимость расхода воздуха, поступающего по вентиляционному стояку, от расхода воды

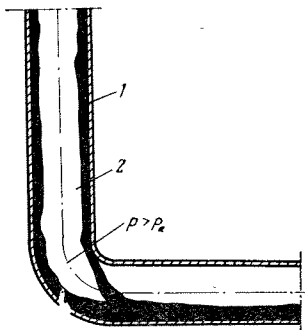


Рис. 14. Изменение стержневого режима течения жидкости и воздуха на разделенное в нижнем гйбе стояка  
1 — вода; 2 — воздух

лических затворах санитарно-технических приборов, присоединенных к стояку в нижних этажах. Следует подчеркнуть, что выброс воды, заполняющей эти гидравлические затворы, в чашу санитарно-технических приборов происходит только в том случае, когда сечение трубопровода канализационного выпуска не менее чем на  $\frac{3}{4}$  сужено, например, вследствие частичного засора.

ловиях). Когда рабочая высота стояка становится равной 90 его диаметрам, пропускная способность становится минимальной и не изменяется при последующем увеличении высоты стояка. Это также подтверждают ре-

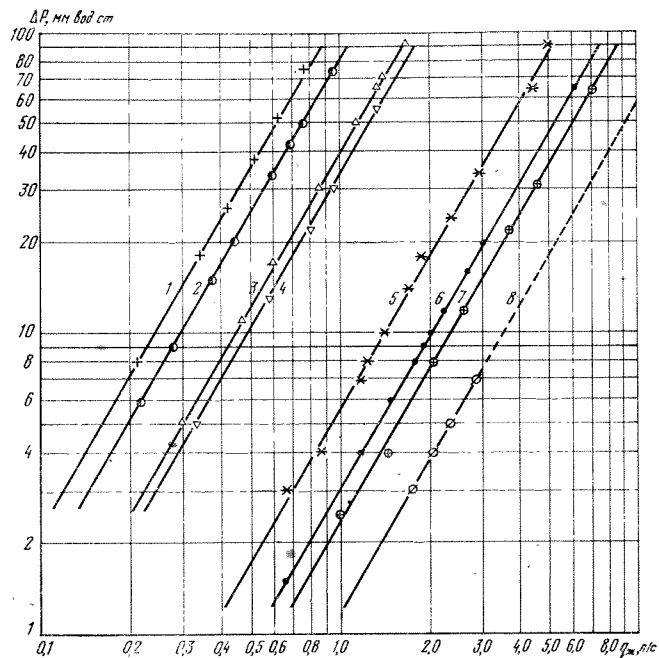


Рис. 15. Зависимость величины разрежений от расхода жидкости для различных систем канализации

- 1 —  $D_{CT} = d_{OTB} = 45$  мм,  $\alpha = 90^\circ$ ,  $L = 4,5$  м;
- 2 —  $D_{CT} = d_{OTB} = 45$  мм,  $\alpha = 90^\circ$ ,  $L = 2,35$  м;
- 3 —  $D_{CT} = d_{OTB} = 45$  мм,  $\alpha = 45^\circ$ ,  $L = 2,35$  м;
- 4 —  $D_{CT} = d_{OTB} = 45$  мм,  $\alpha = 45^\circ$ ,  $L = 4,5$  м;
- 5 —  $D_{CT} = d_{OTB} = 100$  мм,  $\alpha = 90^\circ$ ,  $L = 4,5$  м;
- 6 —  $D_{CT} = 100$  мм,  $d_{OTB} = 45$  мм;  $\alpha = 90^\circ$ ,  $L = 4,5$  м;
- 7 —  $D_{CT} = d_{OTB} = 100$  мм,  $\alpha = 45^\circ$ ,  $L = 4,5$  м;
- 8 —  $D_{CT} = 100$  мм,  $d_{OTB} = 45$  мм,  $\alpha = 45^\circ$ ,  $L = 4,5$  м

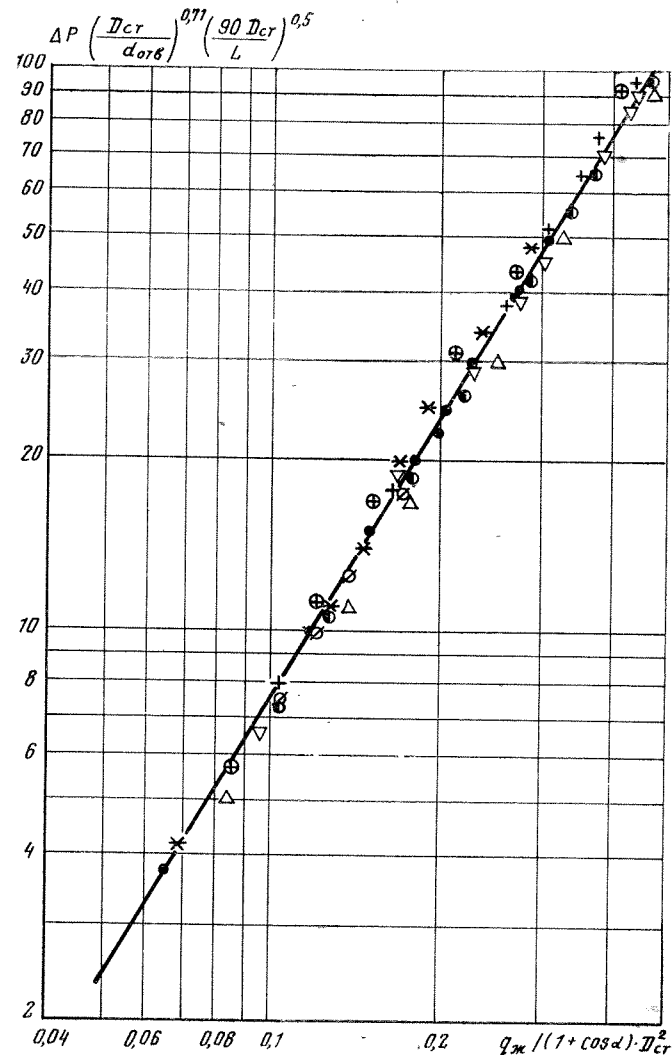


Рис. 16. Зависимость величины разрежений в стояке от расхода жидкости и основных параметров системы канализации (на графике показаны экспериментальные точки, полученные на восьми различных системах канализации)

зультаты экспериментов на большом стенде и в 19-этажном жилом доме.

Особо следует отметить влияние угла входа воды в стояк на его пропускную способность.

Сравнение между собой аналогичных систем канализации, отличающихся только углом присоединения поэтажных отводов к стояку (кривые 1 и 3, 2 и 4, 5 и 7, 6 и 8 на рис. 15), показывает, что при уменьшении этого угла с 90 до 45° пропускная способность стояков возрастает в 1,7 раза. Сравнивая между собой кривые 5 и 6, а также 7 и 8, видно, что при уменьшении диаметра поэтажных отводных трубопроводов от 100 до 45 мм (при прочих равных условиях) достигается увеличение пропускной способности стояка примерно на 20—25%.

При уменьшении угла входа воды в стояк увеличивается площадь живого сечения воздуха в сжатом сечении  $\omega_{\text{в}}$ , что приводит к уменьшению величины разрежений  $\Delta p$ .

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что пропускная способность канализационного стояка, не имеющего дополнительной вентиляции, и площадь живого сечения стояка для прохода воздуха из атмосферы будут максимальными при вертикальном входе в него жидкости.

На основе исследований, проведенных на малом и большом стендах, а также в натуральных условиях, получена следующая зависимость величины разрежения, мм вод. ст., от расхода жидкости и основных параметров канализационных систем (рис. 16):

$$\Delta p = \frac{366 [q_{\text{ж}} / (1 + \cos \alpha) D_{\text{ст}}^2]^{1,677}}{(D_{\text{ст}} / d_{\text{отв}})^{0,71} \sqrt{90 D_{\text{ст}} / L}}, \quad (34)$$

где  $q_{\text{ж}}$  — расход стоков, м<sup>3</sup>/с;  $\alpha$  — угол присоединения поэтажных трубопроводов к стояку, град;  $D_{\text{ст}}$  — диаметр стояка, м;  $d_{\text{отв}}$  — диаметр поэтажных отводных трубопроводов, м;  $L$  — рабочая высота стояка, м.

Формула (34) рекомендуется для определения величины разрежений в канализационных стояках, рабочая высота которых  $L \leq 90 D_{\text{ст}}$ . Для стояков большей высоты множитель в знаменателе формулы (34)  $\sqrt{90 D_{\text{ст}} / L}$  не следует учитывать при расчетах, и формула принимает вид:

$$\Delta p = \frac{366 [(q_{\text{ж}} / (1 + \cos \alpha) D_{\text{ст}}^2]^{1,677}}{(D_{\text{ст}} / d_{\text{отв}})^{0,71}}. \quad (35)$$

В том случае, когда  $\alpha = 90^\circ$  и  $D_{\text{ст}} = d_{\text{отв}}$ , формула (35) значительно упрощается:

$$\Delta p = 366 (q_{\text{ж}} / D_{\text{ст}}^2)^{1,677}. \quad (35, а)$$

В связи с тем, что формулы (34) и (35) сложно использовать для расчетов, рекомендуется пользоваться при конструировании системы канализации данными табл. 5, рассчитанными по формуле (35).

Таблица 5. Критические расходы жидкости для канализационных систем различных конструкций

Диаметр поэтажных отводов, мм	Угол присоединения поэтажных отводов к стояку, град	Критический расход жидкости, л/с, при диаметре стояка, мм					
		45	50	85	100	125	150
45	90	0,72	0,94	3,36	5	8,56	13,4
	60	1,1	1,39	5	7,45	12,85	19,9
	45	1,3	1,6	5,7	8,56	14,6	22,9
50	90	—	0,885	3,22	4,8	8,15	12,7
	60	—	1,35	4,8	7,1	12,2	18,9
	45	—	1,55	5,48	8,2	13,9	21,7
85	90	—	—	2,56	3,8	6,5	10,2
	60	—	—	3,92	5,7	9,8	15,3
	45	—	—	4,63	6,5	11	17,4
100	90	—	—	—	3,54	6,12	9,45
	60	—	—	—	5,41	9,18	14,25
	45	—	—	—	6,1	10,4	16,1
125	90	—	—	—	—	5,54	8,7
	60	—	—	—	—	8,47	13,1
	45	—	—	—	—	10	14,9
150	90	—	—	—	—	—	8
	60	—	—	—	—	—	12,2
	45	—	—	—	—	—	14

В таблице приведены критические расходы, т. е. расходы, соответствующие моменту срыва гидравлического затвора высотой 60 мм. Если же высота гидравлического затвора равна 50 мм, то критическая величина расчетного расхода должна быть уменьшена на 20%; при высоте 70 мм — увеличена на 20%.

Данные, приведенные в табл. 5, справедливы для стояков, рабочая высота которых превышает 90 диаметров стояка. Для стояков меньшей высоты табличные значе-

ния критических расходов сточной жидкости должны быть увеличены в  $\sqrt[3]{90D_{ст}/L}$  раз.

Систему канализации зданий следует рассчитывать по величине допустимого расхода жидкости, которая не вызывает срыва гидравлического затвора. В качестве допустимого принимается расход, составляющий 0,9 критического. Поэтому, например, систему канализации с  $D_{ст}=100$  мм,  $d_{отв}=100$  мм,  $\alpha=90^\circ$  можно принять только в том случае, когда расчетная величина расхода стоков не превышает  $3,54 \cdot 0,9=3,2$  л/с.

Независимо от расчетов, диаметр канализационного стояка конструктивно не может быть меньше диаметра поэтажного отвода, присоединяемого к этому стояку. Кроме того, канализационный стояк по всей высоте должен быть одного диаметра.

Для того чтобы оценить точность формул (34) и (35), проанализируем результаты двух экспериментов в 19-этажном жилом доме, проведенных в марте 1968 г. (рис. 17). Максимальное разрежение возникло в стояке непосредственно под его сжатым сечением. Например, при опорожнении трех ванн, установленных на 18, 17 и 16-м этажах, максимальная величина разрежений составила 30 мм вод. ст. (294 Па) на 15-м этаже. При опорожнении четырех ванн, установленных на 19, 18, 17 и 16-м этажах, максимальная величина разрежений составила 53 мм вод. ст. также на 15-м этаже.

При расчете по формуле (35) при расходе жидкости 3 л/с величина разрежения составляет 30,5 мм вод. ст., а при расходе 4 л/с — 49,8 мм вод. ст., т. е. результаты расчетов хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований.

Полученные зависимости по экспериментальным данным зарубежных исследователей проанализировать сложнее, поскольку в технической литературе не приводятся фактические параметры систем. Так, например, в работе [31] приводятся результаты исследований пропускной способности канализационного стояка диаметром 100 мм высотой более 25 м. Если предположить, что фактический диаметр экспериментального стояка равнялся не 100, а 102 мм и к нему под углом  $87,5^\circ$  (за рубежом прямые тройники имеют угол не  $90^\circ$ , а  $87,5^\circ$ ) присоединялись поэтажные отводы такого же диаметра, то результаты расчетов по формуле (35) удовлетворитель-

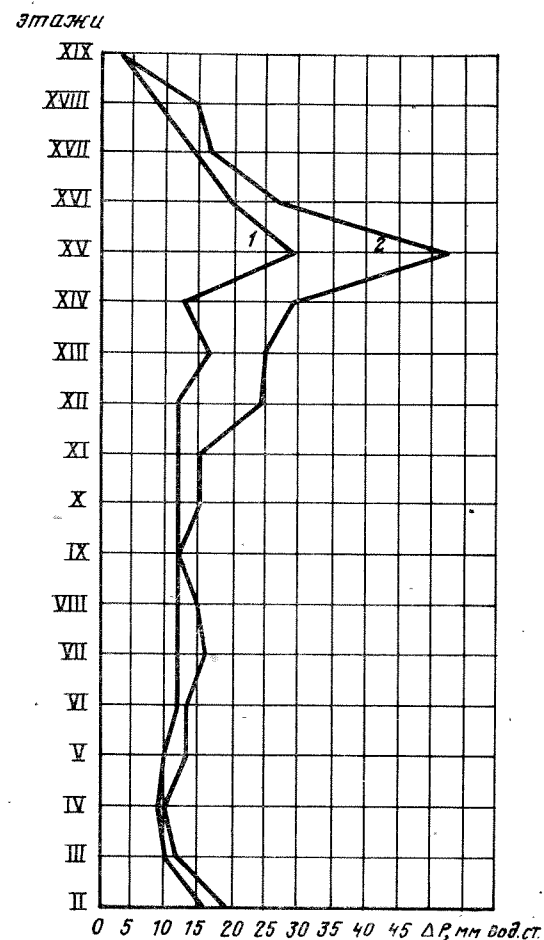


Рис. 17. Разрежение по высоте 60-метрового канализационного стояка  
1 — при расходе жидкости 3 л/с; 2 — то же, 4 л/с

но совпадают с экспериментальными данными, приведенными Бешем (табл. 6).

Для анализа работы канализационного стояка при применении Sorent-системы, воспользуемся данными работы [38], в которой указывается, что при расходе жидкости в количестве около 6 л/с величина разрежений в стояке диаметром 100 мм составляет 125 мм вод. ст.

при традиционной системе канализации, а при применении Sovent-системы — 25 мм вод. ст. Sovent-система обеспечивает вертикальный вход жидкости в стояк, т. е.  $\alpha=0^\circ$  ( $\cos \alpha=1$ ), отношение  $D_{ст}/d_{отв}$  равняется примерно 2. По формуле (35) величина разрежений в стояке диаметром 100 мм при этих условиях составляет около 30 мм вод. ст. (в стояке диаметром 102 мм — около 27 мм вод. ст.), что хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований Sovent-системы. По этой же формуле можно определить, что при расходе жидкости 6 л/с расчетная величина разрежений в традиционной системе канализации составит около 140 мм вод. ст.; в работе [38] — 125 мм вод. ст.

Таблица 6. Экспериментальные и расчетные значения величины разрежений в канализационном стояке

Значения разрежений, мм вод. ст.			
по Бешу	по формуле (35)	по Бешу	по формуле (35)
185—190	190,5	50—55	71,2
155—160	156,5	40—45	50,6
125—130	126,3	20—25	30,17
95—100	96,5	10—15	15,33

Таким образом, формула (35) дает возможность с достаточной точностью определять величину разрежений в канализационных стояках. При пользовании формулой некоторую сложность представляет выбор расчетной величины диаметра поэтажного отвода ( $d_{отв}$ ), если к одному стояку присоединяются отводы разных диаметров. В таких случаях следует ориентироваться на поэтажные трубопроводы, отводящие стоки от санитарно-технических приборов с большой аккумуляющей емкостью, например, от ванны. Действительно, максимальный расход жидкости от ванны равен 1,1 л/с в течение 150—180 с. Максимальный расход от смывного бачка унитаза составляет 1,5—1,6 л/с. Казалось бы, что при расчете систем канализации зданий следует ориентироваться именно на большую величину расхода стоков от унитаза и, следовательно, на диаметр отводного трубопровода, присоединяющего унитаз к стояку. Однако продолжительность опорожнения смывного бачка составляет всего 6 с, а продолжительность расхода стоков в количестве 1,5—

1,6 л/с составляет 1—1,5 с. Вследствие большой аккумуляющей емкости стояка этот расход значительно уменьшится в конце длины начального участка стояка, так что расчет эжектирующей способности жидкости по величине максимального секундного расхода стоков от смывного бачка приведет к неоправданному завышению расчетной величины.

Необходимо отметить, что расход сточной жидкости, поступающей в стояк от смывного бачка, составляет 1,5—1,6 л/с только в том случае, когда унитаз присоединяется непосредственно к стояку. Если же унитаз присоединяется к трубопроводу поэтажного отвода, то в стояк поступает не 1,5—1,6, а только 0,8 л/с (см. главу VII).

Следовательно, расчетная величина диаметра поэтажного отводного трубопровода должна определяться величиной и продолжительностью максимального секундного расхода сточной жидкости, отводимой в канализационный стояк. Поэтому при расчете следует принимать отводы от приборов с большой емкостью (ванна, раковина и т. п.).

Все приведенные здесь рассуждения, связанные с анализом формул (34) и (35), справедливы в отношении прямолинейных канализационных стояков, т. е. стояков, не имеющих на рабочей высоте точек перегиба. Однако, как отмечалось выше, в силу конструктивных особенностей некоторых зданий, на канализационных стояках приходится предусматривать устройство отступов или перекидок. В этом случае изменение режима течения происходит дважды: в первой (по ходу движения стоков) точке перегиба происходит изменение режима течения со стержневого на разделенное, а во второй — с разделенного на стержневое. В результате этого участок стояка, расположенный ниже отступа или перекидки, отсекается сточной жидкостью от вытяжной части, т. е. практически становится неventилируемым. Это сопровождается срывом гидравлического затвора у одного из санитарно-технических приборов, присоединенного по вертикали ближе остальных ко второй точке перегиба стояка. Кроме того, в случае частичного засора наклонного трубопровода, расположенного между двумя точками перегиба стояка, может произойти выброс воды, заполняющей гидравлические затворы санитарно-технических приборов, присоединенных ближе остальных по вертикали к вышерасположенному (относительно отсту-

па или перекидки) участку стояка, в чаши этих приборов.

Во избежание таких нежелательных явлений следует участки стояка, расположенные выше и ниже отступа или перекидки, соединять петлеобразным трубопроводом диаметром 50 мм. Такое решение способствует выравниванию давлений воздуха на этих участках. Петлеобразный трубопровод следует присоединять к стояку на небольшом расстоянии от точек перегиба (на расстоянии одной фасонной части) и таким образом, чтобы исключить попадание в него сточной жидкости.

В скандинавских странах с этой целью применяют канализационные стояки сложной конфигурации (рис. 18).

В некоторых случаях невентилируемые участки канализационного стояка не требуют устройства петлеобразного трубопровода. Этот вопрос подробно рассматривается далее.

При конструировании надземной части систем канализации зданий особое внимание необходимо уделять решению узла присоединения поэтажных отводных трубопроводов к стояку.

В работе [31] представлены шесть типов тройников (см. рис. 18), из которых предпочтение отдается фасонным частям, обеспечивающим вход жидкости в стояк под острым углом.

Наиболее эффективными являются фасонные части, обеспечивающие вертикальный вход жидкости в стояк. Этому назначению отвечают фасонные части «Rehau» [34], «Sovent» [38] и «Sextia» [32].

В отечественной практике поэтажные отводы могут присоединяться к стояку под острым углом только с помощью косых тройников или крестов. В этом случае возникает необходимость еще в одной фасонной части — отводе, например: тройник  $60^\circ$  + отвод  $120^\circ$  или тройник  $45^\circ$  + отвод  $135^\circ$ . Однако применение двух фасонных частей для присоединения к стояку одного поэтажного трубопровода часто осложняется из-за недостаточного места в санитарно-технической шахте, и тогда вынужденным решением является применение прямых тройников или крестов, что ведет к уменьшению пропускной способности стояков. Следует особо подчеркнуть, что смежное присоединение (в одном сечении) двух квартир к одному канализационному стояку с помощью прямых кре-

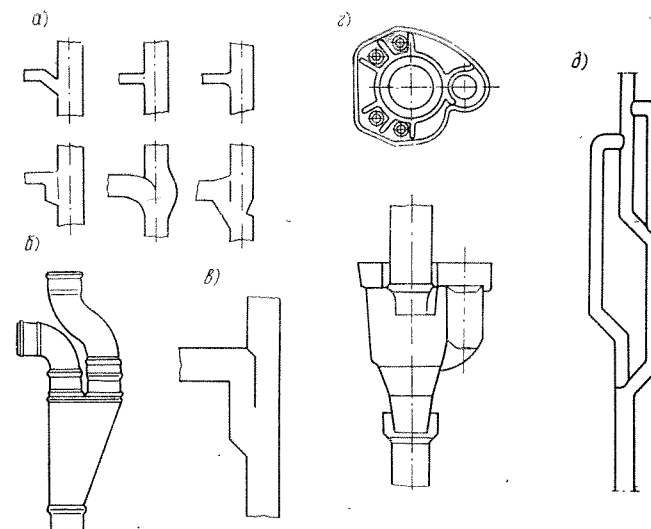


Рис. 18. Фасонные части и стояки сложной конфигурации  
*a* — экспериментальные фасонные части (Швейцария); *b* — фитинг Sovent-система (Швейцария); *c* — стык Rehau (Скандинавские страны); *z* — фасонная часть Sextia (Франция); *d* — стояк сложной конфигурации (Дания)

стов недопустимо. При таком решении опорожнение ванны в одной квартире сопровождается поступлением сточной жидкости по поэтажному отводу в ванну смежной квартиры. Когда присоединение двух смежных квартир нельзя осуществить с помощью косых крестовин, следует канализационный выпуск из каждой квартиры присоединять к самостоятельному канализационному стояку.

Очень важным при конструировании систем канализации в высотных зданиях является вопрос о необходимости устройства вентиляционного стояка. В зарубежной практике строительства до настоящего времени широко распространены двухтрубные системы канализации. Прокладка второго стояка существенно удорожает строительство и, кроме того, делает невозможным применение типовых санитарно-технических кабин, нашедших широкое распространение в массовом строительстве. Поэтому следует тщательно проанализировать условия, при которых становится необходимым устройство вентиляционных стояков.

Вентиляционный стояк должен устанавливаться в тех случаях, когда потери напора воздушного потока в сточном стояке по расчету достигают критической величины (например, 65 мм вод. ст. для гидравлических затворов высотой 60 мм), что возможно, когда величина расчетного расхода сточной жидкости превышает критическую, указанную в табл. 5, или когда высота сточного стояка превышает допустимую.

Что касается величины расчетных расходов сточной жидкости, то едва ли максимальный расход, приведенный в табл. 5 и равный 9,45—16,1 л/с, достижим для одного стояка. Если это рассуждение справедливо, то наиболее простым представляется решение, в соответствии с которым устраняется однотрубная система с канализационным стояком диаметром 150 мм. Кроме того, можно рекомендовать устройство нескольких сточных стояков с уменьшенными нагрузками на каждый из них.

Допустимая высота стояков должна быть определена расчетом, исходя из величины удельной потери напора воздуха (при критическом расходе жидкости) и минимальной высоты гидравлического затвора, присоединяемого к расчетному стояку.

Величина удельной потери напора воздуха определяется по его скорости, а скорость — по формуле (31). Данные, представленные в табл. 7, рассчитаны по формуле (31) с использованием данных табл. 5.

Величины удельных потерь напора воздуха на трение взяты из справочника [21]. Данных о потерях напора воздуха в местных сопротивлениях при его движении в канализационном стояке в настоящее время не имеется. Ориентировочно их можно принять равными 50% потерь на трение. Так, для стояка диаметром 100 мм максимальная величина удельных потерь напора воздуха составит примерно 0,23 мм/м, для стояка диаметром 150 мм — 0,14 мм/м. Отсюда критическая высота канализационного стояка в зависимости от высоты гидравлических затворов (50, 60 или 70 мм) может быть равна: для стояков диаметром 100 мм — 220, 260 или 300 м; для стояков диаметром 150 мм — 350, 430 или 500 м. Однако в приведенном расчете не учитываются потери напора воздуха в сжатом сечении стояка, так как мы рассматривали движение воздуха на участке стояка, расположенном выше входа в него жидкости.

Таблица 7. Основные параметры для расчета вентиляционных стояков

Диаметр поэтажных отводов, мм	Скорость воздуха, м/с, для стояков диаметром, мм		Угол присоединения поэтажных отводов к стояку, град	Удельная потеря напора воздуха на трение, мм/м, для стояков диаметром, мм:	
	100	150		100	150
45	2,88	2,91	90	0,15	0,09
	2,9	2,93	60		
	2,91	2,94	45		
50	2,87	2,9	90	0,15	0,09
	2,89	2,92	60		
	2,9	2,93	45		
85	2,34	2,86	90	0,12	0,09
	2,53	2,88	60		
	2,59	2,89	45		
100	2,25	2,5	90	0,11	0,09
	2,43	2,87	60		
	2,48	2,87	45		
150	—	2,24	90	—	0,07
	—	2,44	60	—	
	—	2,49	45	—	

Можно рекомендовать и другой метод определения допустимой высоты канализационного стояка, исходя из расчетного расхода сточной жидкости и основных параметров системы канализации здания. Располагая этими данными, по формуле (35) определяется максимальная величина потерь напора воздуха в сжатом сечении стояка (например, 30 мм вод. ст.). Таким образом, величина напора воздуха, которая может быть «потеряна» на трение и в местных сопротивлениях на участке стояка, расположенном выше входа жидкости в стояк, составит разницу между минимальной высотой гидравлического затвора (например, 50 мм) и величиной уже потерянного напора (30 мм вод. ст.), т. е. 20 мм вод. ст. Далее по формуле (31) необходимо определить скорость воздуха, поступающего в стояк, и в зависимости от скорости воздуха (предположим, 2,5 м/с) и диаметра стояка — удельную потерю напора воздуха на трение (предположим,

0,11 мм/м) и в местных сопротивлениях (50% потерь на трение, т. е. 0,055 мм/м). Суммарная величина удельных потерь напора составит при этом 0,165 мм/м. Допустимая высота канализационного стояка:  $20 : 0,165 \approx 120$  м.

Рассмотренный пример со всей очевидностью показывает, что допустимая высота канализационного стояка данного диаметра тем меньше, чем больше величина расчетного расхода сточной жидкости. Действительно, с увеличением расхода стоков растет величина потерь напора воздуха в сжатом сечении стояка и одновременно уменьшается величина, которую «может потерять» воздух на трение и местные сопротивления стояка.

Математически для условий течения воздуха в сточном стояке указанное положение можно выразить в виде:

$$Li + h_{сж.с} = h_3 = \text{const}, \quad (36)$$

где  $L$  — полная высота стояка (включая вытяжную часть), м;  $i$  — удельные потери напора на трение и в местных сопротивлениях, мм/м;  $h_{сж.с}$  — потери напора воздуха в сжатом сечении стояка, мм;  $h_3$  — высота гидравлического затвора, мм.

В том случае, когда сумма потерь напора воздуха превышает высоту гидравлического затвора, требуется дополнительная вентиляция стояка, при этом совершенно не обязательно устройство второго — вентиляционного — стояка. Простейшим решением является увеличение диаметра сточного стояка. Такое мероприятие при постоянном расходе сточной жидкости обеспечивает уменьшение обоих слагаемых, входящих в левую часть уравнения (36).

Если же в располагаемом сортаменте канализационных труб не имеется труб большего диаметра и не представляется возможным устройство двух сточных стояков с уменьшенными нагрузками, необходимо предусматривать устройство вентиляционного стояка.

Диаметр и допустимая высота вентиляционного стояка должны быть рассчитаны из условия устойчивости гидравлических затворов данной системы. Следует подчеркнуть, что в двухтрубной системе канализации весь воздух, эжектируемый из атмосферы жидкостью, движется только по вентиляционному стояку. Это объясняется увеличенными сопротивлениями в сточном стояке, которые возникают в его сжатом сечении. Вентиляционный стояк не занят жидкостью, и естественно, что весь воздух поступает в систему по нему.

Расход воздуха, поступающего в систему канализации, минуя сжатое сечение стояка, соответствует величине эжектирующей способности жидкости и может быть определен по формулам (30) и (26). Этот расход больше, чем расход воздуха, фактически поступающего в сточный стояк через его вытяжную часть, и зависит от параметров системы канализации. Расходы воздуха в вентиляционных стояках диаметрами 100 и 150 мм, входящих в конструкции различных систем канализации, приведены в табл. 8. При расчетах использованы данные табл. 5.

Таблица 8. Расход воздуха, м<sup>3</sup>/с, в вентиляционных стояках различных систем канализации

Диаметр поэтажного отвода, мм	Угол присоединения поэтажных отводов к стояку, град	Диаметр вентиляционного стояка, мм					
		100			150		
		Расход воздуха, м <sup>3</sup> /с, в вентиляционном стояке при диаметре сточного стояка, мм					
		100	125	150	100	125	150
45	90	0,046	0,064	0,078	0,046	0,064	0,078
	60	0,048	0,066	0,08	0,048	0,066	0,08
	45	0,05	0,069	0,084	0,05	0,069	0,084
50	90	0,046	0,063	0,076	0,046	0,063	0,076
	60	0,047	0,065	0,079	0,047	0,065	0,079
	45	0,049	0,068	0,082	0,049	0,068	0,082
85	90	0,042	0,058	0,071	0,042	0,058	0,071
	60	0,043	0,06	0,073	0,043	0,06	0,073
	45	0,045	0,062	0,076	0,045	0,062	0,076
100	90	0,037	0,057	0,069	0,037	0,057	0,069
	60	0,039	0,058	0,071	0,039	0,058	0,071
	45	0,04	0,06	0,074	0,04	0,06	0,074
125	90	—	0,05	0,067	—	0,05	0,067
	60	—	0,052	0,07	—	0,052	0,07
	45	—	0,055	0,072	—	0,055	0,072
150	90	—	—	0,059	—	—	0,059
	60	—	—	0,061	—	—	0,061
	45	—	—	0,064	—	—	0,064

Анализ приведенных в табл. 8 данных показывает, что независимо от диаметров вентиляционных стояков в системах канализации одинаковой конструкции при одинаковых диаметре сточного стояка и расходе жидкости величина эжектирующей способности жидкости (т. е. расход воздуха, движущегося по вентиляционному стояку) постоянна.

В табл. 9 приводятся данные о величине скорости и удельных потерях напора на трение воздуха, движущегося по вентиляционным стоякам диаметрами 100 и 150 мм. Скорости воздуха определены как частное от деления величины его расхода на площадь живого сечения вентиляционного стояка соответствующего диаметра. Величины удельных потерь напора воздуха на трение определены в соответствии с данными работы [21]. К этим потерям следует прибавить потери в местных сопротивлениях ориентировочно в размере 50% потерь на трение.

Рассмотрение приведенных данных позволяет сделать вывод о том, что устройство вентиляционного стояка не всегда может быть эффективным. Так, в системе канализации, включающей сточный стояк диаметром 150 мм, к которому под углом, например, 45° присоединяется поэтажный отвод диаметром 100 мм, при критическом расходе жидкости (16,1 л/с) нельзя устраивать вентиляционный стояк диаметром 100 мм. В этом случае удельная потеря напора воздуха только на трение составит 1,2 мм/м, а с учетом местных сопротивлений — 1,8 мм/м. Следовательно, при высоте гидравлических затворов, например, 50 мм допустимая высота вентиляционного стояка в такой системе составит лишь  $50 : 1,8 \approx 28$  м.

Устройство вентиляционного стояка диаметром 150 мм при тех же условиях позволит снизить суммарную величину потерь напора воздуха до 0,255 мм/м. При этом допустимая высота стояка возрастет до  $50 : 0,255 \approx 200$  м.

Следует отметить, что современное массовое строительство не требует устройства вентиляционных стояков в системах канализации.

Проведенные расчеты и результаты экспериментов позволили рекомендовать устройство однотрубной системы канализации со стояком диаметром 100 мм в 25-этажном жилом доме (Москва, просп. Мира, д. 184). Восьми-

Таблица 9. Скорость  $v$ , м/с, и удельные потери напора воздуха на трение  $i$ , мм/м, в вентиляционных стояках различных систем канализации

Диаметр поэтажного отвода, мм	Угол присоединения поэтажных отводов к стояку, град	Диаметр вентиляционного стояка, мм											
		100						150					
		Диаметр сточного стояка, мм			150			Диаметр сточного стояка, мм			150		
		$v$	$i$	$v$	$i$	$v$	$i$	$v$	$i$	$v$	$i$	$v$	$i$
45	90	5,92	0,53	8,13	0,92	1,1	2,63	0,08	3,61	0,14	4,4	0,19	
	60	6,1	0,55	8,43	0,98	1,4	2,7	0,08	3,74	0,14	4,53	0,2	
	45	6,4	0,61	8,76	1,05	1,5	2,82	0,09	3,9	0,16	4,75	0,22	
50	90	5,83	0,515	8	0,9	1,28	2,58	0,08	3,56	0,13	4,32	0,19	
	60	6	0,55	8,3	0,96	1,34	2,66	0,08	3,69	0,14	4,46	0,2	
	45	6,24	0,58	8,64	1,03	1,45	2,77	0,09	3,83	0,15	4,65	0,21	
85	90	5,35	0,45	7,38	0,79	1,11	2,37	0,07	3,27	0,11	3,99	0,16	
	60	5,52	0,47	7,64	0,82	1,18	2,45	0,07	3,39	0,12	4,12	0,17	
	45	5,77	0,51	7,9	0,88	1,3	2,56	0,07	3,5	0,13	4,3	0,18	
100	90	4,74	0,36	7,21	0,75	1,06	2,1	0,05	3,2	0,11	3,88	0,15	
	60	4,94	0,39	7,45	0,8	1,13	2,19	0,06	3,3	0,12	4	0,16	
	45	5,1	0,41	7,58	0,82	1,2	2,26	0,06	3,41	0,12	4,18	0,18	
125	90	—	—	6,34	0,6	1	—	—	2,81	0,08	3,77	0,15	
	60	—	—	6,58	0,64	1,07	—	—	2,92	0,09	3,9	0,16	
	45	—	—	6,94	0,71	1,15	—	—	3,08	0,1	4,07	0,17	
150	90	—	—	—	—	0,81	—	—	—	—	—	—	
	60	—	—	—	—	0,86	—	—	—	—	—	—	
	45	—	—	—	—	0,92	—	—	—	—	—	—	

летняя практика эксплуатации систем канализации в указанном здании полностью подтвердила правильность этой рекомендации.

#### 4. РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ СИСТЕМ КАНАЛИЗАЦИИ С НЕВЕНТИЛИРУЕМЫМИ СТОЯКАМИ

Стояки небольшой высоты, не имеющие вытяжной части, т. е. не сообщающиеся с атмосферой, могут найти широкое применение в малоэтажных зданиях сельских населенных мест, в стилобатах, в спортивных сооружениях, бытовых помещениях, расположенных на первых этажах промышленных предприятий, и т. д.

Пропускная способность неветилируемых канализационных стояков исследовалась нами на малом гидравлическом стенде и в натурных условиях. В последнем

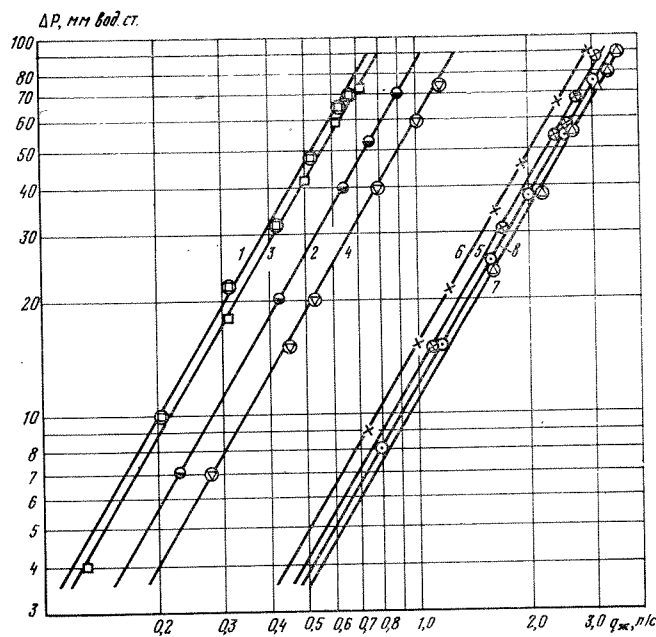


Рис. 19. Зависимость разрежения в неветилируемых стояках от расхода жидкости в различных системах канализации (обозначения на рис. 15)

случае проводились как экспресс-испытания, так и длительные круглосуточные испытания в течение 4—6 недель. Разрежения при этом фиксировались с помощью тягонапорометров с лентопротяжным механизмом, со шкалой от +25 до —80 мм вод. ст.

Стендовые испытания восьми систем канализации с вентилируемыми стояками диаметром 45 и 100 мм позволили получить зависимость разрежений от расхода жидкости и условий ее входа в стояк, а также от диаметра и высоты стояка (рис. 19). Анализ приведенных графиков показывает, что неветилируемый канализационный стояк диаметром 100 мм и высотой 4,5 м пропускает расход жидкости, равный 2,5—2,8 л/с. Такой расход может быть получен, если на расчетном участке установлено более чем 50 санитарно-технических приборов. В то же время стояк высотой 4,5 м может быть смонтирован в здании не выше двух этажей. При этом в жилом здании к стояку может быть присоединено не более четырех квартир, т. е. не более 16 приборов. Следовательно, неветилируемый стояк диаметром 100 мм может вполне надежно работать в двухэтажных жилых домах.

Обработка результатов стендовых исследований позволяет построить зависимость величины разрежений, мм вод. ст., от скорости движения водовоздушной смеси. Зависимость представлена графиком (рис. 20) и имеет вид

$$\Delta p = 0,31 v_{см}^4, \quad (37)$$

где  $v_{см}$  — скорость водовоздушной смеси, м/с:

$$v_{см} = (Q_v + q_{ж}) / \omega, \quad (38)$$

здесь  $Q_v$  — эжектирующая способность воды, м<sup>3</sup>/с, определяемая по формуле (30);  $q_{ж}$  — расчетный расход сточной жидкости, м<sup>3</sup>/с;  $\omega$  — площадь живого сечения, м<sup>2</sup>, канализационного неветилируемого стояка.

Для облегчения расчетов по формулам (30) и (37) канд. техн. наук Л. А. Шоленским построены номограммы, приведенные на рис. 21 и 22. Искомый результат при пользовании номограммой (рис. 21) достигается тремя наложениями линейки: сначала прямой линией соединяются точки, соответствующие расчетному расходу сточной жидкости и диаметру поэтажного отвода, присоединенного к стояку под тем или иным углом; точка пересечения этой прямой линии с «немой» шкалой  $A$  соединяется затем с точкой, соответствующей диаметру сточного стояка. Полученная при этом прямая линия пересекает шкалу  $d_{отв}$ ; точка пересечения соединяется затем с точкой, соответствующей значению рабочей высоты стояка. Точка пере-

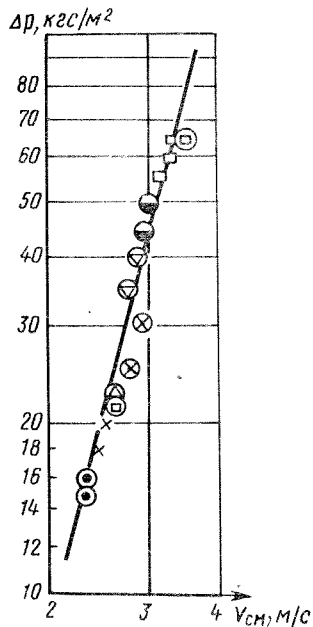
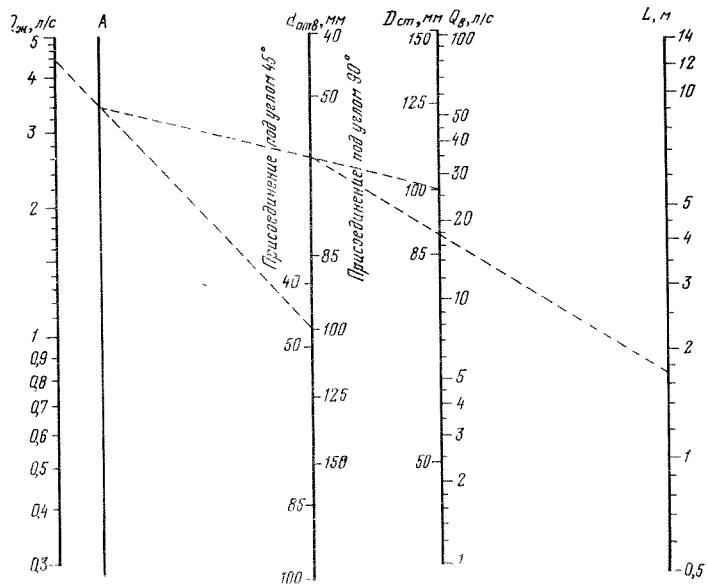


Рис. 20. Зависимость величины разрежений в неветилируемых стояках от скорости водовоздушной смеси (на графике показаны экспериментальные точки, полученные на восьми различных системах канализации)

Рис. 21. Номограмма для определения величины эжектирующей способности жидкости



сечения этой линии со шкалой  $Q_b$  дает искомое значение величины эжектирующей способности жидкости.

Для определения величины  $\Delta p$  необходимо полученное значение  $Q_b$ ,  $m^3/c$ , сложить с величиной расхода жидкости  $q_{ж}$  и разделить на площадь живого сечения стояка. Полученное значение скорости  $v_{см}$  дает возможность по номограмме (рис. 22) найти величину  $\Delta p$ .

В табл. 10 приведены данные по допустимым расходам сточной жидкости, необходимые при конструировании надземной части системы канализации зданий и сооружений с неветилируемым стояком.

Следует указать, что данные табл. 10 рассчитаны применительно к гидравлическим затворам высотой 60 мм. Если минимальная высота гидравлических затворов, присоединенных к неветилируемому стояку, равна 50 мм, приведенные в таблице величины расходов следует уменьшить на 20%, если 70 мм — увеличить на 20%.

Анализ показывает, что пропускная способность неветилируемых стояков с ростом их рабочей высоты уменьшается вплоть до значения этой высоты, равной 90 диаметрам стояка. При этом значении высоты стояка его пропускная способность становится минимальной и не изменяется при дальнейшем увеличении высоты стояка. Указанное позволяет применять неветилируемые канализационные стояки в многоэтажных зданиях для отведения стоков от отдельных санитарно-технических приборов, установленных в верхних этажах, при условии, что величина расхода жидкости в этом случае не превышает табличных значений, соответствующих рабочей высоте, равной 90 диаметрам стояка данного диаметра. Очевидно, что установка отдельных санитарно-технических приборов на

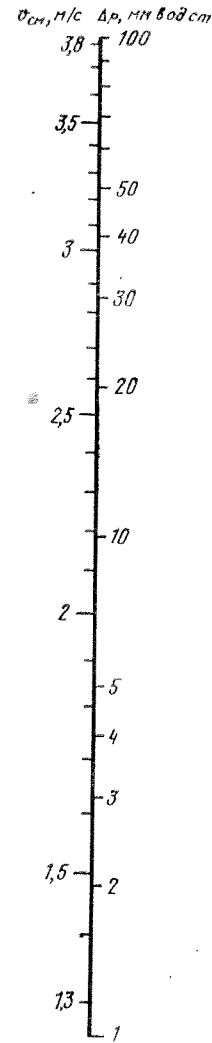


Рис. 22 Номограмма для определения величины разрежений в неветилируемом стояке

Таблица 10. Величины допустимых расходов сточной жидкости для неветилируемых канализационных стояков

Рабочая высота стояка, м	Угол присоединения поэтажных трубопроводов к стояку, град	Расход сточной жидкости, л/с, при диаметре неветилируемого стояка, мм					
		50		100		150	
		при диаметре поэтажных отводов, мм					
		50	50	100	50	100	150
1	45	2,25	3,8	9,8	19,5	21,5	22,5
	60	2,15	3,45	9,4	18,8	20,8	21,8
	90	2	3,0	8,7	17,5	19,4	20,5
2	45	1,4	5,4	6,2	12,0	14,0	15,0
	60	1,33	5,0	5,9	11,3	13,3	14,3
	90	1,2	4,6	5,3	10,0	12,0	13,0
3	45	0,95	3,7	4,5	8,3	9,7	10,6
	60	0,9	3,45	4,2	7,8	9,1	10,0
	90	0,8	3,0	3,7	6,8	8,0	8,8
4	45	0,72	2,8	3,3	6,2	7,3	8,3
	60	0,68	2,6	3,1	6,0	6,8	7,8
	90	0,6	2,2	2,7	4,85	5,9	6,85
5	45	0,65	2,1	2,65	4,75	5,7	5,3
	60	0,6	1,95	2,45	4,4	5,3	5,9
	90	0,5	1,7	2,1	3,7	4,6	5,15
6	45	0,65	1,7	2,2	3,8	4,5	5,2
	60	0,6	1,55	2,0	3,5	4,2	4,95
	90	0,5	1,3	1,7	3,0	3,7	4,2
7	45	0,65	1,4	1,7	3,2	3,55	4,3
	60	0,6	1,3	1,58	2,95	3,35	4,0
	90	0,5	1,1	1,35	2,45	3,0	3,4
8	45	0,65	1,2	1,4	2,7	3,3	3,7
	60	0,6	1,1	1,32	2,5	3,05	3,4
	90	0,5	0,9	1,15	2,05	2,6	2,9
9	45	0,65	1,0	1,2	2,25	2,8	3,2
	60	0,6	0,93	1,05	2,05	2,55	2,95
	90	0,5	0,8	0,95	1,75	2,15	2,5

Продолжение табл. 10

Рабочая высота стояка, м	Угол присоединения поэтажных трубопроводов к стояку, град	Расход сточной жидкости, л/с, при диаметре неветилируемого стояка, мм					
		50		100		150	
		при диаметре поэтажных отводов, мм					
		50	50	100	50	100	150
10	45	0,65	1,0	1,2	1,95	2,4	2,75
	60	0,6	0,93	1,05	1,8	2,2	2,55
	90	0,5	0,8	0,95	1,5	1,9	2,15
11	45	0,65	1,0	1,2	1,75	2,15	2,45
	60	0,6	0,93	1,05	1,6	2,0	2,26
	90	0,5	0,8	0,95	1,3	1,65	1,9
12	45	0,65	1,0	1,2	1,55	1,9	2,15
	60	0,6	0,93	1,05	1,4	1,75	2,0
	90	0,5	0,8	0,95	1,2	1,5	1,7
13	45	0,65	1,0	1,2	1,4	1,8	2,0
	60	0,6	0,93	1,05	1,3	1,6	1,85
	90	0,5	0,8	0,95	1,1	1,4	1,6

верхних этажах редко встречается в практике строительства. Следовательно, системы канализации с неветилируемыми стояками могут применяться в основном для малоэтажных зданий, а также при небольшой рабочей высоте канализационного стояка.

Конструкция системы с неветилируемым стояком представлена на рис. 23. Неветилируемый стояк заканчивается прочисткой в направленном вверх раструбе фасонной части, с помощью которой к стояку присоединяются санитарно-технические приборы, установленные на самой высокой отметке в здании. На неветилируемом стояке небольшой высоты можно не устанавливать ревизии.

Системы с неветилируемыми канализационными стояками значительно экономичнее традиционных. Достаточно сказать, что каждый неветилируемый стояк короче стояка с вытяжной частью минимум на 4—5 м. В практике строительства известны случаи, когда длина вытяжной части канализационных стояков в стилобатах высотных зданий составляет 50—60 м, в то время как

применение неветилируемых стояков в этих зданиях позволило бы избежать совершенно неоправданных затрат материалов. Кроме того, отказ от вытяжной части стояков улучшает эстетический вид и техническое состояние кровли зданий.

Результаты лабораторных исследований неветилируемых канализационных стояков многократно проверены нами на ряде натуральных объектов в режиме эксплуатации. Для примера приведем данные, полученные при длительных испытаниях неветилируемых стояков на двух объектах.

Объект № 1. Москва, Даев пер., д. 7. Квартира расположена на втором этаже двухэтажного дома. Исследования проводились с 30 апреля по 10 мая 1971 г. Система канализации включает два канализационных стояка: один диаметром 50 мм, отводящий стоки от раковины, которая присоединена к стояку с помощью отводного трубопровода диаметром 50 мм под углом 45°; второй — диаметром 100 мм, отводящий сточную жидкость от унитаза с высокорасполагаемым смывным бачком емкостью 7—8 л. Рабочая высота стояков около 5 м. На время испытаний вытяжные части стояков были заглушены.

В результате испытаний установлено, что при опорожнении заполненной раковины средний расход сточной жидкости составил около 1 л/с, а разрежения — превысили 80 мм вод. ст.

При высоте гидравлического затвора раковины 70 мм возникающие разрежения превышают допустимую величину и устройство неветилируемого стояка в данном случае рекомендовать нельзя.

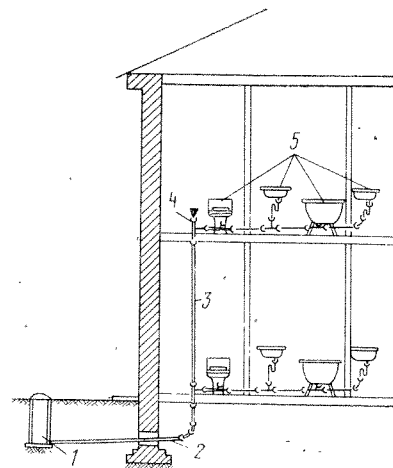
По формулам (30), (37) и (38) было определено, что  $Q_v = 6,5$  л/с,  $q_{см} = 7,5$  л/с,  $v_{см} = 3,83$  м/с и  $\Delta p = 100$  мм вод. ст.

Следует обратить внимание на то, что для стояка диаметром 50 мм длина начального участка равна 4,5 м, т. е. меньше фактической высоты стояка. Следовательно, при расчетах по формуле (30) множитель  $\sqrt{90D_{ст}/L}$  не следует учитывать, а при пользовании номограммой, приведенной на рис. 21, линейку следует накладывать на точку шкалы  $L$  со значением 4,5 м (а не 5 м).

Объект 2. Москва, Сретенский тупик, д. 3. Квартира расположена на втором этаже двухэтажного дома. Исследования проводились с 14 мая по 28 июня 1971 года. Система канализации включает стояк рабочей высотой около 5 м, диаметром 100 мм, к которому под углом 90° присоединен поэтажный отводной трубопровод диаметром 50 мм, отводящий сточную жидкость от умывальника, раковины и ванны емкостью 180 л. Система канализации эксплуатируется с 5 ч 30 мин утра до 24 ч и позже. Для проведения исследований вытяжная часть стояка выше кровли здания была заглушена.

Разрежения в процессе эксплуатации не превышали 10 мм вод. ст. Лишь дважды зафиксировано разрежение 22 мм вод. ст. Согласно расчетам по приведенной методике, разрежение такой величины может возникнуть в неветилируемом стояке данной системы канализации при опорожнении полностью заполненной ванны, максимальный расход стоков от которой составляет 1—1,1 л/с. Величина эжектирующей способности при этом равна 20—21 л/с, расход смеси 21—22,1 л/с, скорость ее движения 2,68—2,82 м/с и разрежение 22—29 мм вод. ст.

Рис. 23. Система канализации с неветилируемым стояком  
1 — канализационный колодец;  
2 — канализационный выпуск;  
3 — неветилируемый стояк;  
4 — прочистка;  
5 — санитарно-технические приборы



Длительные исследования систем канализации с неветилируемыми канализационными стояками показали, что их надежность не уступает надежности традиционных систем, разумеется, в том случае, когда конструкция системы обоснована расчетом. Как и традиционные, системы с неветилируемыми стояками должны быть герметичны при давлении 1 кгс/см<sup>2</sup> (0,1 МПа) во избежание проникания запахов через неплотности труб и стыковых соединений.

При устройстве систем канализации с неветилируемыми стояками возникает вопрос о вентиляции наружной канализационной сети. Этот вопрос подробно рассматривается в главе V.

Необходимо обратить внимание также на предотвращение испарения воды, заполняющей гидравлические затворы санитарно-технических приборов. Выполненные нами исследования позволили установить, что как в зимнее, так и в летнее время в помещении с температурой 18—20°С при относительной влажности воздуха 50—60% интенсивность испарения воды, заполняющей гидравлический затвор унитаза (максимальное зеркало воды по сравнению с гидравлическими затворами других санитарно-технических приборов), равна 1 мм в сутки. Следует заметить, что испарение воды из гидравлических затворов недопустимо и в традиционных системах канализации.

В 1972 г. трестом Южуралсантехмонтаж (Челябинск) внедрены системы канализации с неветилируемыми стояками в шести двухэтажных жилых домах Челябинской области (свыше 30 неветилируемых стояков); в 1973 г. такие системы внедрены в подтрибунных помещениях стадиона в Кишиневе. Эксплуатация этих систем на указанных объектах подтверждает их высокую надежность.

В Москве, начиная с 1970 г., введено в эксплуатацию несколько сот девятиэтажных жилых зданий по типовому проекту серии 1-515/9МА, разработанной Московским научно-исследовательским институтом типового и экспериментального проектирования (МНИИТЭП). Из-за конструктивных особенностей зданий санитарно-технические приборы в квартирах первых этажей не представлялось возможным присоединить к основным канализационным стоякам. Единственным решением явилось устройство неветилируемых стояков для каждой квартиры, расположенной в первом этаже.

В марте 1972 г. нами совместно с представителями эксплуатирующей организации (ЖЭК № 16 Советского района Москвы) осуществлено обследование 90 таких квартир. Данные ЖЭК № 16, опрос жильцов и результаты испытаний еще раз подтвердили надежность систем канализации с неветилируемыми стояками.

На основе исследований, проведенных ЦНИИЭП инженерного оборудования, изданы в 1973 г. «Рекомендации по расчету и проектированию систем канализации зданий и сооружений с неветилируемыми канализационными стояками». Эти рекомендации включены в СНиП II-30-76 «Внутренний водопровод и канализация зданий. Нормы проектирования».

#### Глава IV

### ПРИЛОЖЕНИЕ ТЕОРИИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПОДОБИЯ К РАСЧЕТУ КАНАЛИЗАЦИОННЫХ СТОЯКОВ

Малая изученность закономерностей опускного движения воды и воздуха в вертикальных трубопроводах применительно к системам канализации зданий вынуждает исследователей в различных странах прибегать к строительству дорогостоящих стендов с целью проведе-

ния на них экспериментальных исследований. Примером может служить установка высотой 25,58 м, построенная в Берне (Швейцария) [31]. Совершенно очевидно, что применение принципов гидравлического подобия процессов при указанном виде движения упростило бы конструкцию экспериментального стенда, проведение исследований на нем, а также расчет канализационных стояков.

Основной параметр, необходимый для расчетов,— пропускная способность канализационного стояка, т. е. максимально допустимый расход сточной жидкости, не вызывающий срыва гидравлического затвора, либо критический расход жидкости, соответствующий моменту срыва гидравлического затвора.

Анализ и результаты экспериментальных исследований показывают, что опускное движение водовоздушной смеси в канализационном стояке происходит под действием массы жидкости и обуславливает возникновение разрежений. При гидравлическом моделировании необходимо знать, какая из этих двух сил — масса воды или разрежения — преобладает и оказывает определяющее влияние на процесс движения.

Как известно, первым необходимым условием при гидравлическом моделировании является геометрическое подобие двух систем — модели и натуре, т. е. подобие их конструкций и характерных линейных размеров.

За масштаб моделирования обычно выбирают отношение диаметров натуре и модели:

$$D_n/D_m = \lambda. \quad (39)$$

Тогда отношение площадей их живых сечений:

$$\omega_n/\omega_m = \lambda^2. \quad (40)$$

Этих двух условий недостаточно для моделирования процессов в канализационных стояках. Поскольку установлено, что пропускная способность стояков существенно зависит от условий входа в них жидкости и в определенных пределах от высоты стояков, геометрически подобными системами являются такие, у которых, помимо условий (39) и (40), соблюдаются также следующие:  $(D_{ст}/d_{отв})_n = (D_{ст}/d_{отв})_m$ ,  $\alpha_n = \alpha_m$  и  $L_n/D_n = L_m/D_m$ .

При движении водовоздушной смеси в канализационном стояке вода занимает часть сечения стояка:

$$\omega_{ж} = k\omega_{ст}, \quad (41)$$

где  $k < 1$ ,  $\omega_{ст}$  — площадь сечения стояка.

При этом площадь, занимаемая воздухом:

$$\omega_B = (1-k) \omega_{ст}; \quad (42)$$

площадь, занимаемая смесью вода + воздух, равна площади сечения стояка:

$$\omega_{см} = \omega_{ст}. \quad (43)$$

Из условий неразрывности потока следует:

$$\frac{q_{ж.н}}{q_{ж.м}} = \frac{v_{ж.н} \omega_{ж.н}}{v_{ж.м} \omega_{ж.м}} = \frac{v_{ж.н} k \omega_{ст.н}}{v_{ж.м} k \omega_{ст.м}} = \frac{v_{ж.н}}{v_{ж.м}} \lambda^2; \quad (44)$$

$$\frac{q_{в.н}}{q_{в.м}} = \frac{v_{в.н} \omega_{в.н}}{v_{в.м} \omega_{в.м}} = \frac{v_{в.н} (1-k) \omega_{ст.н}}{v_{в.м} (1-k) \omega_{ст.м}} = \frac{v_{в.н}}{v_{в.м}} \lambda^2; \quad (45)$$

$$\frac{q_{см.н}}{q_{см.м}} = \frac{v_{см.н} \omega_{ст.н}}{v_{см.м} \omega_{ст.м}} = \frac{v_{см.н}}{v_{см.м}} \lambda^2. \quad (46)$$

Уравнения (44) — (46) показывают, что моделирование расходов жидкости, воздуха и смеси (вода + воздух) подчиняется одному закону. Для моделирования этих параметров необходимо отношение скоростей жидкости, воздуха и смеси натуре и модели выразить через масштаб моделирования  $\lambda$ .

Из гидравлики известно, что если движение жидкости происходит под действием ее массы, то отношение инерционных сил к силам тяжести выражается через критерий Фруда:

$$Fr = v^2/gD = idem. \quad (47)$$

Из (47) следует:

$$v_n^2/D_n = v_m^2/D_m \quad (48)$$

или

$$v_n/v_m = \sqrt{D_n/D_m} = \sqrt{\lambda}. \quad (49)$$

С учетом (49) можно установить, что

$$q_{ж.н}/q_{ж.м} = q_{в.н}/q_{в.м} = q_{см.н}/q_{см.м} = \lambda^{2,5}. \quad (50)$$

Если же при движении водовоздушной смеси в канализационном стояке преобладающими являются силы давления, то моделирование осуществляют по «числу Эйлера»:

$$\frac{\Delta p}{v^2 \rho} = Eu = idem, \quad (51)$$

где  $\rho$  — плотность воды (воздуха, смеси);  $\Delta p$  — разрежение в стояке.

Из (51) следует:

$$\Delta p_n / v_n^2 \rho_n = \Delta p_m / v_m^2 \rho_m. \quad (52)$$

При моделировании процессов движения жидкостей с одинаковой плотностью в случае равенства разрежений:

$$v_n/v_m = 1. \quad (53)$$

Тогда уравнения (44) — (46) принимают вид:

$$q_{ж.н}/q_{ж.м} = q_{в.н}/q_{в.м} = q_{см.н}/q_{см.м} = \lambda^2. \quad (54)$$

Справедливость первого отношения в уравнении (54) легко проверить по экспериментальным данным, представленным в табл. 4 и 5. Из (54) следует:

$$q_{ж.н} = q_{ж.м} (D_{ст.н}/D_{ст.м})^2. \quad (55)$$

Экспериментальные данные А. И. Карпинской, швейцарских и французских исследователей хорошо подтверждают результаты расчета по формуле (55).

Например, по А. И. Карпинской (для стояков диаметрами 100 и 125 мм):

$$q_{ж.н} = 4,4 \left( \frac{125}{100} \right)^2 = 6,9 \text{ л/с (экспериментально — 6,93 л/с).}$$

По К. Bösch (для стояков диаметрами 100 и 150 мм):

$$q_{ж.н} = 4,5 \left( \frac{150}{100} \right)^2 = 10,01 \text{ л/с (экспериментально — 10 л/с).}$$

По Н. Schellenberg (для стояков диаметрами 50 и 100 мм):

$$q_{ж.н} = 1,1 \left( \frac{100}{50} \right)^2 = 4,4 \text{ л/с (экспериментально — 4,42 л/с).}$$

По данным табл. 5, для геометрически подобных систем (например,  $D_{ст.н} = d_{отв.м} = 50$  мм;  $D_{ст.м} = d_{отв.н} = 150$  мм,  $\alpha = 90^\circ$ ):

$$q_{ж.н} = 0,885 \left( \frac{150}{50} \right)^2 = 7,97 \text{ л/с (экспериментально — 8 л/с).}$$

Таким образом, преобладающей силой при безнапорном течении водовоздушной смеси в канализационных стояках является разрежение, а не масса жидкости, и моделировать процессы следует по числу Эйлера. Формула (51) дает возможность рассчитать среднюю скорость движения жидкости в стояках различных диаметров, что, безусловно, проще, чем ее экспериментальное определение.

При определении средней скорости воспользуемся следующими зависимостями для среднего динамического

давления при движении двухфазной смеси по вертикальным трубопроводам:

$$p_d = \frac{\gamma_{ж} v_{ж}^2}{2g} (1-\beta) + \frac{\gamma_{в} v_{в}^2}{2} \beta \quad (56)$$

и

$$p_d = \gamma_{см} \frac{v_{см}^2}{2g}, \quad (57)$$

где  $\gamma_{ж}$ ,  $\gamma_{в}$  и  $\gamma_{см}$  — объемная масса соответственно жидкости, воздуха и смеси;

$$\gamma_{см} = \gamma_{в} \beta + \gamma_{ж} (1-\beta), \quad (58)$$

здесь  $\beta$  — объемное расходное газосодержание, определяемое по формуле

$$\beta = \frac{q_{в}}{q_{в} + q_{ж}}.$$

Совместное решение уравнений (56) и (57) дает возможность определить среднюю скорость жидкости, м/с:

$$v_{ж} = \sqrt{\frac{\gamma_{см} v_{см}^2 - \gamma_{в} v_{в}^2 \beta}{\gamma_{ж} (1-\beta)}}. \quad (59)$$

При этом скорость воздуха определяется по формуле (31), его расход — по формуле (32), а скорость смеси — как частное от деления расхода смеси на площадь живого сечения канализационного стояка.

Для расчета числа Эйлера требуется определить плотность водовоздушной смеси:

$$\rho_{см} = \frac{\gamma_{в} \beta + \gamma_{ж} (1-\beta)}{g}, \quad (60)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

Результаты расчетов скоростей жидкости, воздуха и смеси, а также числа Эйлера представлены в табл. 11. Расчеты выполнены по эмпирическим формулам (31) и (35), а также по формулам (51), (59) и (60) для геометрически подобных систем канализации различных конструкций при разрежениях 20, 40 и 65 мм вод. ст.

Приведенные данные подтверждают, что в геометрически подобных системах канализации равные разрежения возникают при одинаковых скоростях движения жидкости, воздуха и смеси и равных значениях чисел

Таблица 11. Значения скоростей жидкости, воздуха, смеси и чисел Эйлера для различных систем канализации

$d_{отв.}$ и $d_{ст.}$ мм	Угол присоединения отводов к стояку, град	$\Delta p$ , мм вод. ст.	$q$ , м <sup>3</sup> /с			$v$ , м/с			Eu
			$q_{ж}$	$q_{в}$	$q_{см}$	$v_{ж}$	$v_{в}$	$v_{см}$	
45 100	90	65	0,0007 0,0035	0,0036 0,018	0,0044 0,0216	2,765 2,75	2,29 2,3	2,76 2,76	0,502 0,502
45 100	90	40	0,0005 0,0027	0,0034 0,0172	0,0039 0,0199	2,59 2,52	2,17 2,19	2,51 2,53	0,455 0,455
45 100	90	20	0,0004 0,0018	0,0032 0,0158	0,0035 0,0176	2,35 2,25	2,01 2,015	2,24 2,25	0,38 0,381
45 100	45	65	0,0013 0,0065	-0,0041 0,0198	0,0054 0,0263	3,38 3,46	2,55 2,525	3,39 3,36	0,231 0,234
45 100	45	40	0,0009 0,0047	0,0039 0,0193	0,0048 0,0239	2,96 2,975	2,44 2,445	3,04 3,05	0,225 0,225
45 100	45	20	0,0006 0,0031	0,0036 0,0177	0,0042 0,0208	2,62 2,635	2,23 2,255	2,62 2,64	0,19 0,19

Эйлера. Значения скоростей воздуха соответствуют течению воздуха в вытяжной части стояка, т. е. выше места входа жидкости в стояк.

Имея данные по расходу воздуха  $q_{в}$ , фактически поступающего в стояк, можно рассчитать скорость воздуха, движущегося в стояке ниже его сжатого сечения, т. е. при наличии жидкостной пленки, омывающей внутреннюю поверхность стояка. Для этого необходимо определить площадь живого сечения воздуха, движущегося на участке стояка ниже места входа в него жидкости.

Рассчитаем площадь живого сечения жидкостной пленки для случая, когда разрежение равно 65 мм вод. ст.

$$\omega_{жк} = q_{жк} / v_{жк} = 0,0007 / 2,765 = 0,000261 \text{ м}^2.$$

Площадь живого сечения воздушного потока определится как разность между площадями живых сечений стояка и жидкостной пленки:

$$\omega_{в} = \omega_{ст} - \omega_{жк} = 0,00159 - 0,000261 = 0,001329 \text{ м}^2.$$

Скорость воздуха, движущегося вместе с жидкостью на участке стояка, расположенном ниже места входа в него жидкости:

$$v_{в} = q_{в} / \omega_{в} = 0,00365 / 0,001329 = 2,75 \text{ м/с},$$

т. е. равна скорости течения жидкости и смеси.

Аналогичные расчеты также показывают, что средняя скорость движения воздуха равняется средней скорости течения жидкости и смеси и для других разрежений.

На основании расчетов можно установить, что при критическом разрежении расход жидкости занимает лишь 16,4% живого сечения стояка (при  $\alpha = 45^\circ$  — примерно 25%).

Все приведенные рассуждения относятся к системам канализации, в конструкцию которых входит один (сточный) стояк. Однако, как было показано выше, при устройстве дополнительной вентиляции в зданиях ограниченной высоты течение жидкости и воздуха в канализационном стояке может практически не сопровождаться возникновением разрежений. В этом случае остается лишь одна сила, под действием которой движется жидкость — масса самой жидкости. Расходы жидкости, воздуха и смеси при этом должны моделироваться по уравнению (50).

Рассмотрим для примера две системы канализации с вентиляционными стояками, обеспечивающими течение жидкости и воздуха без разрежений. Характеристика первой системы, которую мы принимаем за модель:  $D_{ст} = d_{отв} = 50 \text{ мм}$ ,  $L > 90D_{ст}$ ,  $\alpha = 90^\circ$ ; характеристика второй системы («натура»):  $D_{ст} = d_{отв} = 100 \text{ мм}$ ,  $L > 90D_{ст}$ ,  $\alpha = 90^\circ$ .

Допустим, что в первой системе расход сточной жидкости составляет 1 л/с. Следовательно, для обеспечения условия подобия расход жидкости во второй системе должен составлять:

$$q_{жк.н} = q_{жк.м} \left( \frac{D_{н}}{D_{м}} \right)^{2,5} = 1 \left( \frac{100}{50} \right)^{2,5} = 5,64 \text{ л/с}.$$

При движении жидкости и воздуха в канализационном стояке не возникает разрежения, если количество, воздуха, поступающего в стояк, равняется эжектирующей способности жидкости. Таким образом, расход воздуха, поступающего в первую систему:  $Q_{в.н} = 7,31 \text{ л/с}$ ; во вторую систему:  $Q_{в.м} = 43,6 \text{ л/с}$ .

По теории подобия

$$Q_{в.н} = Q_{в.м} \left( \frac{D_{н}}{D_{м}} \right)^{2,5} = 7,31 \left( \frac{100}{50} \right)^{2,5} = 41,4 \text{ л/с}.$$

Относительная ошибка при расчетах по формуле (30) и по теории гидравлического подобия в данном случае  $\sim 5\%$ .

Расход смеси вода + воздух в первой системе равен:

$$q_{см.м} = 1 + 7,31 = 8,31 \text{ л/с};$$

во второй системе

$$q_{см.н} = 5,64 + 43,6 = 49,24 \text{ л/с}.$$

По теории подобия

$$q_{см.н} = q_{см.м} \left( \frac{D_{н}}{D_{м}} \right)^{2,5} = 8,31 \left( \frac{100}{50} \right)^{2,5} = 47 \text{ л/с}.$$

Относительная ошибка в данном случае составляет  $\sim 4,5\%$ .

Таким образом, при течения жидкостей с одинаковой плотностью в канализационных стояках без возникновения разрежений расходы жидкости, воздуха и смеси (вода + воздух) моделируются по уравнению (50); в случае возникновения разрежений одинаковой величины — по уравнению (54).

Необходимо отметить, что все приведенные здесь рассуждения справедливы для канализационных стояков, имеющих вытяжную часть. Для невентилируемых стояков моделирование процессов подлежит дальнейшему анализу в связи с тем, что расход воздуха, увлекаемого в стояк жидкостью, неизвестен. Расчет величины разрежений в таких стояках по эжектирующей способности жидкости условен.

Процессы движения водовоздушной смеси в невентилируемом стояке отличны от процессов в стояках с вытяжной частью. В частности, можно предположить, что при движении жидкости в невентилируемый стояк воздух может поступать снизу вверх, т. е. против движения

воды. В этом случае возникают дополнительные сопротивления движению жидкости и трудно определить, какие силы преобладают. Возможно, что при моделировании процессов в неветилируемом стояке следует одновременно учитывать не один, а несколько критериев гидравлического подобия, поэтому решение задачи резко усложняется.

По результатам экспериментальных исследований, представленным в табл. 10, можно сделать вывод, что расходы жидкости в неветилируемых геометрически подобных стояках моделируются как отношение диаметров этих стояков:

$$q_{ж.п}/q_{ж.м} = D_{ст.п}/D_{ст.м} = \lambda. \quad (61)$$

Кроме того, отношение скоростей смеси вода + воздух в натуре и на модели равно 1 при  $\Delta p = \text{const}$ :

$$v_{см.п}/v_{см.м} = 1, \quad (62)$$

что следует из уравнения (37).

## Глава V

### ИССЛЕДОВАНИЯ, РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ВЫТЯЖНЫХ ЧАСТЕЙ КАНАЛИЗАЦИОННЫХ СТОЯКОВ

Ранее уже указывалось, что через вытяжную часть осуществляется приток воздуха из атмосферы в процессе движения жидкости по стояку. Это способствует снижению в нем дефицита воздуха. В часы минимального водоотведения через вытяжную часть в атмосферу выходит загрязненный воздух из наружной канализационной сети. Таким образом, обеспечивается воздухообмен в последней.

Сравнение величин пропускной способности вентилируемых и неветилируемых канализационных стояков (см. табл. 5 и 10) дает возможность сделать вывод о том, что неветилируемый стояк, рабочая высота которого превышает  $90 D_{ст}$ , пропускает значительно меньшие расходы жидкости.

Вытяжная часть стояка выводится выше кровли здания и, следовательно, подвержена воздействию атмосферных условий. Известно, что в зимнее время вытяж-

ные части стояков в большой степени подвержены обмерзанию. При этом канализационные стояки выходят из строя, резко снижается комфортность зданий и нарушается режим вентиляции наружных сетей канализации.

Поэтому изучение причин снегообразования на внутренней поверхности труб вытяжных частей стояков и разработка способа борьбы с этим нежелательным явлением являются весьма важными задачами.

## 1. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ввиду сложности моделирования процессов обмерзания в лабораторных условиях исследования температурно-влажностного режима в вытяжных частях канализационных стояков проводились на натуральных объектах в климатических условиях Москвы и Челябинска.

На первом этапе исследований (1966—1969 гг.) выявлены причины снегообразования в вытяжных частях, выполненных из труб различных материалов (чугун, асбестоцемент, полиэтилен). Исследования проводились в Москве на 12-этажном односекционном жилом здании серии П-18-01/12, разработанной МНИИТЭП. Здание имеет неотапливаемый чердак высотой 1,4 м; восемь стояков диаметром 100 мм из чугунных канализационных труб, каждый из которых выведен выше кровли здания с помощью вытяжной части диаметром 150 мм. Вытяжные части в пределах чердака обернуты теплоизоляционными матами из минеральной ваты; устья вытяжных частей оборудованы флюгарками из кровельной жести.

При исследованиях определялась интенсивность снегообразования в трубах различных диаметров, выполненных из различных материалов, в зависимости от температурно-влажностного режима воздуха как внутри вытяжной части, так и наружного.

Для записи температур воздуха, выходящего из вытяжных частей, были применены электронный автоматический потенциометр типа ЭПП-09М2 на 24 точки с диапазоном температур от  $-50$  до  $+50^\circ\text{C}$  и хромель-копелевые термомпары. Потенциометр был установлен на чердаке здания.

В период низких наружных температур все трубы вытяжных частей осматривали ежедневно (в отдельные дни — по несколько раз). Температура наружного воз-

духа и внутри чердака замерялась с помощью термометра, толщина снежного слоя, образующегося на внутренней поверхности труб вытяжных частей, — линейкой.

Для исследования вытяжных частей были использованы чугунные трубы диаметром 150 мм и диаметром по раструбу 118,8 мм (ГОСТ 6942—63), асбестоцементные диаметром 102,1 мм (ГОСТ 539—59), полиэтиленовые диаметром 108,2 мм (МРТУ-6 № 05-917-63). Трубы, за исключением труб диаметром 150 мм, не имели теплоизоляции. После полного обмерзания труб диаметром 150 мм они заменялись трубами меньшего диаметра; все экспериментальные трубы были исследованы при работе в различных температурных режимах, характерных для каждого стояка. На внутренней и внешней поверхностях каждой трубы с помощью термопар фиксировались температуры в трех точках: в чердаке, на границе кровли и чердака, выше кровли. Влажность воздуха, выходящего из вытяжных частей стояков, замеряли как с помощью аспирационного психрометра, так и с помощью двух термопар, одна из которых была обернута в батист, смоченный дистиллированной водой, и имитировала мокрый термометр, а вторая фиксировала температуру воздуха внутри вытяжки и имитировала сухой термометр. Скорость воздуха, выходящего из вытяжных частей, замеряли с помощью крыльчатого анемометра.

Аналогичные эксперименты были поставлены на двух зданиях в Челябинске. В исследованиях принимали участие НИИ санитарной техники и Экспериментальная база МНИИТЭП, а также кафедра теплогазоснабжения и вентиляции Челябинского политехнического института и челябинский трест «Южуралсантехмонтаж». Цель этих исследований заключалась в проверке выводов, сделанных по результатам экспериментов в Москве.

Одно из экспериментальных зданий в Челябинске — 9-этажный жилой дом, имеющий непроходной неотапливаемый чердак. На плоской кровле здания размещены 22 вытяжные части из чугунных канализационных труб диаметром 150 мм, оборудованные флюгарками из кровельной жести. Второе здание — пятиэтажное, в первом этаже размещено учреждение, второй — пятый этажи — жилые. На плоской совмещенной кровле здания размещены 12 вытяжных частей из полиэтиленовых труб диаметром 100 мм, оборудованные дефлекторами из полиэтилена.

При выполнении исследований в Челябинске принята та же методика, что и при экспериментах в Москве. С помощью потенциометров фиксировалась температура воздуха в вытяжных частях стояков, а также наружного воздуха. На кровле первого здания эксперименты проводились с пятью вытяжными частями, на кровле второго — с шестью. Остальные вытяжки ежедневно обследовались визуально.

На втором этапе в климатических условиях Москвы и Челябинска проведены исследования вытяжных частей, конструкции которых были предложены как необмерзающие.

## 2. ПРИЧИНЫ ОБМЕРЗАНИЯ ВЫТЯЖНЫХ ЧАСТЕЙ КАНАЛИЗАЦИОННЫХ СТОЯКОВ

Замеры относительной влажности воздуха, выходящего из труб вытяжных частей стояков, показывают, что ее величина составляет, как правило, 100%. Таким образом, если температура внутренней поверхности трубы становится ниже температуры точки росы, избыточная влага из воздуха, соприкасающегося с этой поверхностью, превращается в капельно-жидкое состояние и выпадает в виде конденсата. Очевидно, что при отрицательных температурах эта влага замерзает, превращаясь в иней. Иней смачивается влагой и превращается сначала в рыхлый снег, затем в плотный и, наконец, в лед, и внутри вытяжной части стояка образуются кольцевые слои снега и льда.

Температурный режим в вытяжных частях одиночных стояков, т. е. стояков с самостоятельным выходом на кровлю здания, имеет аналогичный характер в различных климатических условиях (рис. 24). Плоскими линиями на графике показаны температуры внутренней и наружной поверхностей труб: верхние линии — в чердаке, средние — на границе кровли и чердака, нижние — выше кровли. Независимо от материала труб и толщины их стенки температура внутренней и внешней поверхностей отличается не более чем на 1°С (поэтому на графиках показаны одной линией). Пунктирные линии — изменения температур воздуха в вытяжной части стояка. Температурный режим в стояке в течение суток постоянно и резко изменяется, относительно стабильным он становится лишь в ночные часы. При транспортиро-

вашии жидкости по стояку в вытяжную часть устремляется воздух из атмосферы, что особенно характерно для часов максимального водоотведения. Эжекция наружного воздуха в стояк способствует быстрому охлаждению внутренней поверхности трубы.

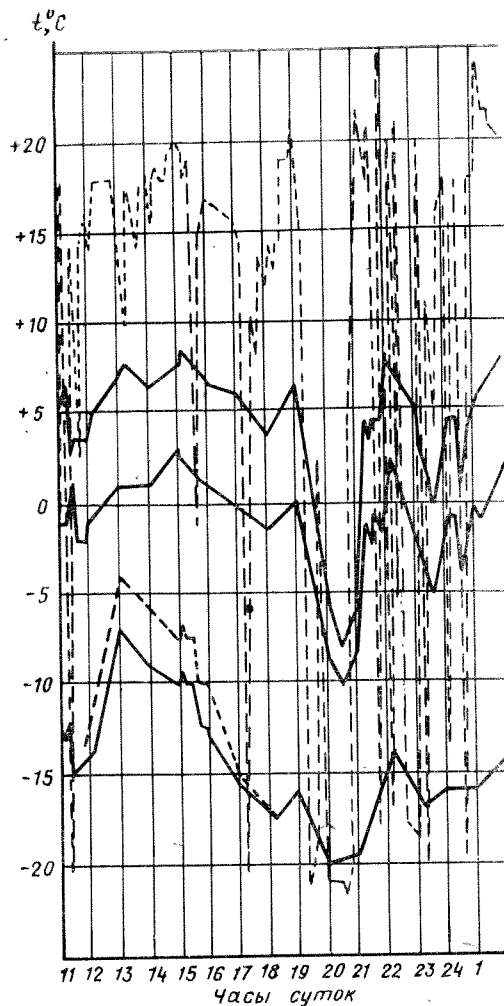


Рис. 24. Изменение температуры воздуха, внутренней и внешней поверхности труб вытяжных частей одиночных стояков в зависимости от режима водоотведения

Совершенно очевидно, что теплоизоляция труб при этих условиях неэффективна.

При проведении экспериментов в климатических условиях Москвы семь из восьми вытяжных частей из чугунных труб диаметром 150 мм, выполненных в соответствии с требованиями Строительных норм и правил, полностью замерзли при температурах наружного воздуха до минус 25°С, после чего они были заменены экспериментальными трубами из других материалов меньших диаметров. При том же температурном режиме эти трубы также полностью замерзли. Следовательно, материал труб не оказывает практического влияния на процесс обмерзания.

Одновременно установлено, что интенсивность снегообразования прямо пропорциональна диаметру вытяжной части стояка. Первоначально (первые 4—6 ч) интенсивность снегообразования  $h_i$  мм/ч, подчиняется зависимости:

$$h_i = \frac{(1 - t_{\text{н}}/t_{\text{в}}) D - 2,4}{0,323}, \quad (63)$$

где  $D$  — диаметр стояка, дм.

Образование снегового слоя на внутренней поверхности труб вытяжных частей, не уменьшая теплопередающей поверхности трубы, изменяет коэффициент теплопроводности труб. В этом случае интенсивность снегообразования отклоняется от линейного закона, выраженного формулой (63). В связи с тем, что интенсивность снегообразования зависит от целого ряда факторов (как, например, толщина снегового слоя, его состояние — иней, рыхлый снег, плотный снег, лед), учесть которые практически невозможно, определение ее значительно усложняется. Однако на основании экспериментальных данных можно сделать вывод о том, что наличие снегового слоя снижает интенсивность снегообразования.

Увеличение интенсивности снегообразования в трубе большего диаметра объясняется следующим образом. Влага, выпавшая из воздуха в виде конденсата на внутренней поверхности трубы, превращается в иней (снег) при отрицательных температурах этой поверхности. В то же время известно [27], что температура внутренней поверхности ограждения равна:

$$t_{\text{в}} = t_{\text{в}} - \frac{t_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{R_0} R_{\text{в}}, \quad (64)$$

где  $t_n$  — температура воздуха, выходящего из стояка, °С;  $t_n$  — температура наружного воздуха, °С;  $R_0$  — сопротивление общей теплопередаче стенки трубы, м<sup>2</sup>·°С·ч/ккал;  $R_n$  — сопротивление тепловосприятию, м<sup>2</sup>·°С·ч/ккал.

Следовательно, при прочих равных условиях температура внутренней поверхности ограждения зависит исключительно от величины сопротивления тепловосприятию  $R_n$ . Для повышения температуры  $t_n$  необходимо уменьшить значение сопротивления тепловосприятию  $R_n$ , которое зависит от скорости движения воздуха около ограждения, уменьшаясь при увеличении этой скорости.

Из условий неразрывности потока следует, что при постоянном расходе воздуха его скорость увеличивается при уменьшении площади сечения стояка.

Наряду с этим количество тепла  $Q$ , проходящее через стенку за время  $Z$  при установившемся тепловом потоке, увеличивается с увеличением площади поверхности трубы  $F$ :

$$Q = (t_n - t_n) F Z \lambda / h, \quad (65)$$

где  $t_n$  — температура наружной поверхности трубы вытяжной части стояка, °С;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности материала трубы, ккал/(м·ч·°С);  $h$  — толщина стенки трубы, м.

Из уравнения (65) следует, что количество тепла, теряемого стенкой трубы, зависит от материала трубы и толщины стенки  $h$ . Однако экспериментально установлено, как отмечалось выше, что в вытяжной части стояка эти параметры не оказывают практического влияния на процесс снегообразования.

Длительное воздействие выходящего воздуха, имеющего 100% -ную влажность, приводит к тому, что из пор материала труб воздух вытесняется влагой, которая при отрицательных температурах наружного воздуха замерзает. В этом случае коэффициент теплопроводности материала труб становится равным коэффициенту теплопроводности льда. У экспериментальных вытяжек толщина стенок труб отличалась не более чем на 2 мм, что не оказало никакого влияния на интенсивность снегообразования.

В результате проведенных исследований в климатических условиях Москвы сделаны следующие выводы:

1. При одинаковой абсолютной величине отношения  $|t_n/t_n|$  интенсивность снегообразования прямо пропорциональна диаметру вытяжной части стояка;

2. При  $|t_n/t_n| < 1$  происходит стаивание снега с внутренней поверхности труб вытяжных частей стояков;

3. При  $1 < |t_n/t_n| < 2$  происходит образование снегового слоя определенной толщины, то его стаивание;

4. При  $|t_n/t_n| > 2$  начинается стабильный процесс снегообразования, который протекает тем интенсивнее, чем больше это отношение;

5. Эжекция холодного воздуха из атмосферы в стояк движущейся в нем жидкостью значительно способствует процессу снегообразования.

Следует указать, что флюгарка — круглый колпак из кровельной жести, который жестко крепится к вытяжной части стояка (по терминологии, принятой в вентиляции, он носит название дефлектор-простой колпак), — также способствует ее обмерзанию. До 1970 г. установка флюгарок была обязательной. Считалось, что устройство флюгарки необходимо для предотвращения попадания в канализационный стояк атмосферных осадков и посторонних предметов. Кроме того, предполагалось, что как и всякий дефлектор, колпак способствует повышению интенсивности вентиляции внутридомовой канализационной сети.

По формулам, применяемым при расчете внутренних водостоков, можно определить количество осадков, л/с, попадающих в открытый сверху канализационный стояк:

$$Q_{расч} = F_{кр} q_{20} / 10\,000,$$

где  $F_{кр}$  — водосборная площадь кровли (площадь живого сечения вытяжной части канализационного стояка), м<sup>2</sup>;  $q_{20}$  — интенсивность дождя, л/с с 1 га, для данной местности продолжительностью 20 мин при периоде однократного превышения расчетной интенсивности, равном 1 году (для Москвы  $q_{20} \approx 81$ ).

Максимальное количество осадков (в условиях Москвы), попадающих в вытяжную часть стояка диаметром 150 мм, составит 0,000143 л/с. Иными словами, в 10 000 канализационных стояков диаметром 150 мм будет поступать расход, равный максимальному секундному расходу жидкости от одного смывного бачка унитаза. Такой небольшой расход не может повлиять на работу наружной канализационной сети.

Для того чтобы колпак работал как дефлектор, необходимо обеспечить расстояние между обрезом трубы и колпаком 0,4 диаметра трубы, т. е. в рассматриваемом случае 60 мм [7]. Очевидно, что указанный зазор не

предотвратит поступления осадков в трубу. Уменьшение же этого зазора с 0,4 до 0,1 диаметра трубы увеличивает сопротивление выходящему потоку воздуха в 4 раза. В то же время колпак, являясь значительным местным сопротивлением на пути выходящего из стояка воздуха и дополнительной поверхностью для снегообразования, весьма способствует обмерзанию вытяжной части.

Следует указать, что открытая труба также является дефлектором [7]. Причем сравнение характеристик дефлектора-простой колпак и дефлектора-открытая труба показывает преимущество второго при направлении ветра, перпендикулярном оси трубы, и при расходах воздуха, характерных для вытяжной части стояков (из стояка выходит не более 150 м<sup>3</sup>/ч воздуха). Вытяжная часть без колпака обмерзает в значительно меньшей степени (при прочих равных условиях).

Исследования, проведенные в климатических условиях Челябинска, полностью подтверждают все ранее сделанные выводы.

Результаты исследований учтены в Строительных нормах и правилах П-30-76 «Внутренний водопровод и канализация зданий. Нормы проектирования».

### 3. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УСТРОЙСТВУ ВЫТЯЖНЫХ ЧАСТЕЙ СТОЯКОВ

Для устранения причин обмерзания вытяжных частей стояков наиболее очевидным представляется увеличение температуры поверхности труб вытяжек с тем, чтобы обеспечить условие  $|t_{вн}/t_{в}| \leq 1$ . Однако обогрев этих труб (например, электрообогрев) в данном случае оказывается неприемлемым по экономическим соображениям из-за большого числа вытяжных частей.

Задача могла бы быть решена снижением влажности воздуха в вытяжной части стояка. Для этого необходимо не допустить поступления загрязненного воздуха из наружной сети канализации в вытяжные части стояков, что достигается устройством гидравлического затвора на канализационном выпуске из здания. Однако при этом повышается вероятность образования засоров в канализационных выпусках и, кроме того, не обеспечивается вентиляция наружной сети.

Наиболее простым мероприятием по ликвидации обмерзания вытяжных частей является уменьшение их теплопередающей поверхности, что достигается уменьшением высоты вытяжных частей над кровлей здания.

Для того чтобы вытяжная часть не работала как водосточная воронка и для соблюдения условий качественной заделки рулонной кровли, высота вытяжной части должна быть не менее 150—200 мм (нормами рекомендуется 500 мм). Неустановившийся характер изменения температур воздуха в вытяжных частях одиночных стояков не позволяет рассчитать высоту вытяжной части с достаточной степенью точности. Поэтому оптимальная высота вытяжной части выявлялась экспериментально на натуральных объектах в климатических условиях Москвы и Челябинска.

В Москве с этой целью на кровле 5-этажного жилого дома были устроены вытяжные части высотой 150, 200 и 250 мм из асбестоцементных труб диаметром 100 мм. Дом имеет совмещенную кровлю. Исследования проводились с января по март 1973 г. при температуре наружного воздуха до  $-30^{\circ}\text{C}$ .

В Челябинске исследовались вытяжные части из полиэтиленовых труб диаметром 100 и высотой 120—150 мм на плоской кровле 9-этажного жилого дома; две экспериментальные вытяжки высотой 120 мм были устроены в 10 см от стенки лифтовой шахты. Дом имеет неотапливаемый чердак. Исследования проводились зимой 1971 и 1972 гг. совместно с трестом Южуралсантехмонтаж при температурах наружного воздуха от  $-30$  до  $-48^{\circ}\text{C}$ .

При исследованиях определялись: интенсивность снегообразования на внутренней поверхности укороченных вытяжных частей, а также влияние снежного покрова на кровле здания на состояние вытяжных частей.

Результаты наблюдений полностью подтвердили сделанный вывод о том, что с уменьшением теплопередающей поверхности вытяжных частей устраняется опасность их обмерзания. Так, за время наблюдений в Москве не отмечено ни одного случая не только снего-, но и инееобразования на внутренней поверхности экспериментальных вытяжных частей; они оставались совершенно чистыми даже при температурах наружного воздуха  $-30^{\circ}\text{C}$ . На торцах труб образуется снежная корона, но живое сечение их не уменьшается. В то же время за указанный период вытяжные части высотой 700 мм на кровле того

же дома находились в стадии обмерзания уже при температуре  $-15^{\circ}\text{C}$ .

Весьма интересные результаты получены в Челябинске в условиях снежной и суровой зимы 1971—1972 гг. В январе 1972 г. температура наружного воздуха лишь в отдельные дни повышалась до  $-25^{\circ}\text{C}$ ; в основном же держалась на отметке  $-30^{\circ}\text{C}$ , а иногда опускалась до  $-48^{\circ}\text{C}$ . Наблюдения показали, что, несмотря на столь суровые условия, экспериментальные вытяжки нормально функционировали (на них не образовался даже иней), в то время как три вытяжные части высотой 700—1700 мм на кровле того же здания полностью замерзли, а остальные находились на разных стадиях обмерзания. При этом экспериментальные вытяжные части, расположенные вдали от ограждающих и выступающих частей кровли, не занесены снегом. Две вытяжные части высотой 120 мм, расположенные около стенки лифтовой шахты, где образовался снежный занос (сугроб) высотой 250—300 мм, находились в его центре, но нормально функционировали. На их внутренней поверхности также не обнаружено даже следов инея.

Устройство вытяжных частей высотой 200 мм можно рекомендовать для зданий с совмещенными кровлями.

Согласно данным СНиП II-A.6-72 «Строительная климатология и геофизика. Основные положения проектирования», в нашей стране лишь в 20 (из 145) краях и областях расчетная зимняя температура ниже, чем в Челябинске ( $-32^{\circ}\text{C}$ ), и только в некоторых районах Якутской АССР средняя температура воздуха в зимнее время ниже  $-40^{\circ}\text{C}$ ; районов с высотой максимального суточного снежного покрова 200 мм и более у нас нет. Кроме того, по нашим шестилетним наблюдениям, на плоских кровлях зданий, вдали от их ограждающих и выступающих частей, снежный покров практически отсутствует.

Приведенные соображения позволяют рекомендовать устройство укороченных вытяжных частей стояков на объектах большей части территории Советского Союза.

Устройство укороченных вытяжных частей стояков нельзя рекомендовать для зданий с эксплуатируемыми кровлями, на которых канализационные газы должны быть удалены из зоны дыхания людей. В соответствии с требованиями СНиП II-30-76 высота вытяжной части на эксплуатируемых кровлях должна быть 3 м, однако вы-

тяжная часть такой высоты имеет чрезмерно большую теплопередающую поверхность.

Следует отметить, что большое количество вытяжных частей ухудшает техническое состояние кровли зданий. В некоторых проектах лечебных зданий на кровле длиной 70 м бывает сосредоточено до 50 вытяжных частей канализационных стояков. Объединение поверху нескольких стояков одной вытяжной частью может исключить поступление наружного воздуха в стояк. Этот вывод основывается на малой вероятности одновременного транспортирования жидкости сразу по всем стоякам, входящим в объединяемую группу. Анализ с помощью закономерностей теории вероятности позволяет сделать вывод о том, что вероятность одновременной работы трех канализационных стояков весьма мала и практически равна нулю при объединении пяти и более стояков одной вытяжной частью. При этом амплитуда отклонения минимальных температур воздуха от средних значений будет тем меньше, чем большее число стояков объединяется одной вытяжной частью. Иными словами, при увеличении числа объединяемых поверху канализационных стояков стабильнее становится температурный режим в объединяющей их вытяжной части, в которой температура воздуха будет стремиться к температуре воздуха в помещении ( $18-20^{\circ}\text{C}$ ).

Экспериментальные исследования вытяжных частей, объединяющих группу стояков, проводились зимой 1971 и 1972 гг. на двух натуральных объектах в Москве. Первый из них — дом гостиничного типа — имеет 16 жилых этажей, эксплуатируемые подвал и технический чердак. Высота канализационных стояков в здании 60 м. Каждая квартира имеет четыре санитарных прибора: унитаз «Компакт», ванну, умывальник и мойку. В техническом чердаке четыре группы канализационных стояков объединены четырьмя вытяжками. Эксперименты проводились с двумя группами стояков, состоящими из 11 стояков, объединенных вытяжной частью диаметром 200 мм, и из пяти стояков, также объединенных одной вытяжной частью диаметром 200 мм.

Второй объект — 14-этажный жилой дом — имеет чердак высотой 1,4 м. В чердаке объединяются: группа из трех канализационных стояков вытяжной частью диаметром 150 мм и отдельно четыре канализационных стояка — такой же вытяжной частью.

В процессе экспериментов фиксировалась температура воздуха в вытяжной части стояка, а также велись наблюдения за процессом снегообразования в экспериментальных вытяжных частях.

На первом объекте запись температур производилась непрерывно с 19 января по 21 февраля 1971 г. (34 сут), с 5 января по 3 февраля и с 25 февраля по 13 марта 1972 г. (48 сут), а на втором — с 7 февраля по 12 марта 1972 г. (35 сут).

Результаты экспериментов в субботние и воскресные дни, характеризующиеся максимальным водоотведением, представлены графиками на рис. 25. Следует подчеркнуть, что графики для всех экспериментальных вытяжных частей, объединяющих группы стояков, носят совершенно аналогичный характер. На этих графиках отсутствуют пики, соответствующие отрицательным температурам, которые характерны для графиков изменения температур воздуха в вытяжных частях одиночных стояков. Приведенные графики свидетельствуют о стабильности температурного режима воздуха в экспериментальной вытяжной части и показывают, что температура в вытяжных частях примерно равна температуре воздуха в помещении. Следует обратить также внимание и на независимость этой температуры от температуры наружного воздуха (кривая 2).

Снегообразования в экспериментальных вытяжных частях не наблюдалось.

Надежная работа экспериментальных систем канализации подтвердила высказанное ранее положение о том, что вероятность одновременного транспортирования жидкости сразу по всем объединяемым стоякам очень мала. Следовательно, расход воздуха, необходимый для компенсации эжектирующей способности жидкости, поступает вслед за этой жидкостью не из атмосферы, а из стояков, которые в данный момент свободны от жидкости. Отсюда следует вывод, что вытяжная часть, объединяющая группу стояков, служит только целям вентиляции наружной сети, и, таким образом, система канализации со стояками, объединенными поверху, может нормально функционировать без вытяжной части.

Для подтверждения этого вывода были проведены в двух режимах экспериментальные исследования пропускной способности одного из 11 объединенных стояков

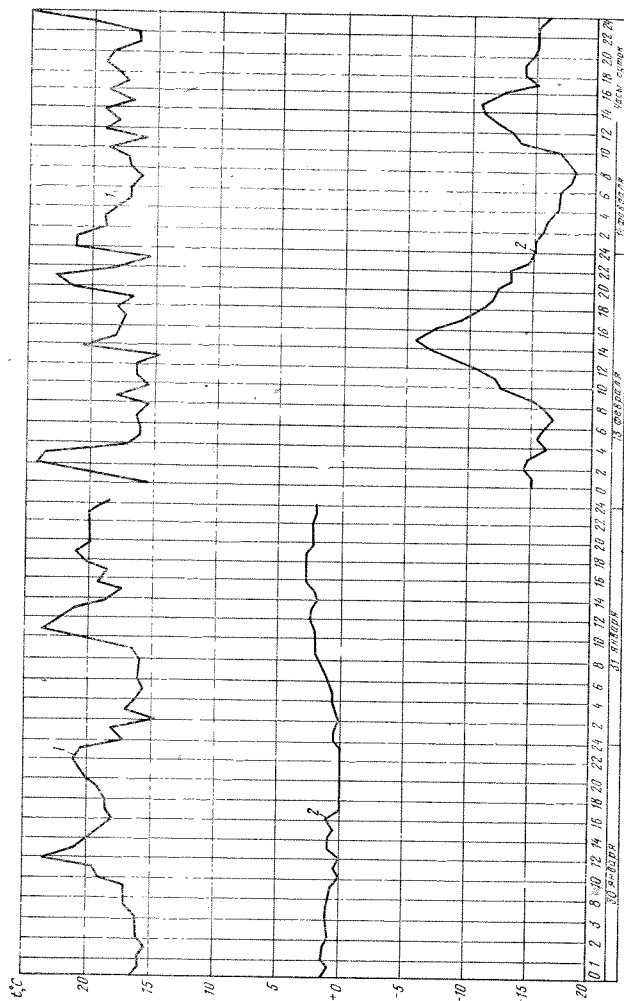


Рис. 25. Температурный режим в вытяжной части, объединяющей 11 канализационных стояков  
1 — температура воздуха на выходе из вытяжной части; 2 — температура наружного воздуха

системы канализации при открытой и при закрытой вытяжной части.

При экспресс-испытаниях расход воды задавался опорожнением в стояк полностью заполненной ванны с расходом жидкости 1,1 л/с. При замере разрежений была учтена установленная закономерность о возникновении максимальных разрежений непосредственно под сжатым сечением стояка, что значительно упрощает проведение экспериментальных работ в натуральных условиях. Максимальные разрежения возникают: при открытой вытяжной части — в сечении стояка, ближайшем по вертикали к точке входа в него жидкости (т. е. в расположенном ниже этаже, см. рис. 17); при закрытой вытяжной части — в верхнем этаже здания. Разрежения замерялись с помощью мановакуумметра по методике, описанной в п. 1 главы III, по понижению уровня воды в гидравлическом затворе унитаза: при открытой вытяжной части — на 15-м этаже при опорожнении ванны на 16-м; при закрытой вытяжной части — на 16-м этаже при опорожнении ванны на этом же этаже.

Чтобы исключить срыв затворов у мойки и умывальника, присоединенных к стояку в том же сечении, чаши этих приборов заполнялись водой. Замеренная величина разрежений в том и другом случаях составила 14—15 мм вод. ст. (137—147 Па).

Если бы экспериментальный стояк работал как неvented, величина разрежений в нем превысила бы 70 мм вод. ст., о чем свидетельствуют данные табл. 10.

Как указано выше, величина разрежений в обоих случаях фиксировалась при опорожнении в стояк ванны, расположенной в 16-м этаже. Однако при этом не исключается возможность сброса сточной жидкости по экспериментальному стояку от приборов, расположенных в других этажах. На это указывает и величина замеренных разрежений (14—15 мм вод. ст.), которая в данной системе канализации соответствует расходу жидкости в количестве 1,5—2 л/с.

Поскольку решение об отказе от вытяжной части для группы объединяемых стояков в системах канализации многоэтажных зданий является весьма серьезным, надежность таких систем исследована нами в режиме длительной эксплуатации в периоды с 30 июня по 9 июля и с 22 по 29 июля 1971 г. Величина разрежений в периоды

исследований записывалась с помощью двух тягонапорометров, присоединенных к сборному трубопроводу.

Максимальная величина разрежений за указанный период не превысила 8 мм вод. ст., максимальная величина давления — 1 мм вод. ст.

На основании результатов исследований можно рекомендовать конструкцию без вытяжной части: для группы объединяемых поверху стояков в зданиях с эксплуатируемыми кровлями; в зданиях каскадной конструкции, когда кровля одной секции расположена под открываемыми окнами и балконными дверями другой, а также в тех случаях, когда невозможно устройство вытяжной части стояка.

Вытяжные части следует устраивать для обеспечения вентиляции наружных сетей канализации. При объединении группы стояков одной вытяжной частью практически исключается возможность ее обмерзания, но даже если такую возможность допустить, надежность системы канализации не уменьшается.

Следует подчеркнуть, что объединению подлежат не менее четырех-пяти стояков; при увеличении их числа надежность системы канализации повышается.

При объединении поверху группы стояков одной вытяжной частью необходимо определить диаметры участков сборного трубопровода, а также выбрать место расположения единой вытяжной части, объединяющей эту группу. Кроме того, дополнительно следует определить влияние такого решения на режим вентиляции наружной канализационной сети.

Вопрос об определении диаметров отдельных участков сборного трубопровода решается следующим образом. Каждый рассматриваемый участок этого трубопровода должен пропустить количество воздуха, необходимое для удовлетворения эжектирующей способности жидкости, движущейся на расчетном участке системы канализации здания. Исходя из этих условий, диаметр участков сборного трубопровода, мм, зависит от величины расчетного расхода сточной жидкости и условий ее входа в канализационные стояки и может быть определен по формуле

$$D = k \sqrt{q_{ж}}, \quad (66)$$

где  $q_{ж}$  — расход сточной жидкости на расчетном участке, л/с;  $k$  — коэффициент, зависящий от угла входа жидкости в стояки; при угле  $90^\circ$   $k=53$ ; при  $60^\circ$   $k=44$ ; при  $45^\circ$   $k=40$ .

Диаметр вытяжной части может быть без расчета принят равным наибольшему диаметру одного из участков сборного трубопровода.

При объединении одной вытяжной частью группы объединяемых поверху стояков необходимо обеспечивать доступ воздуха по кратчайшему пути в любой стояк. Очевидно, что оптимальным вариантом при этом является кольцевание группы стояков сборным трубопроводом. При невозможности кольцевания сборного трубопровода стояки следует объединять в линию и единую вытяжную часть устраивать в центре этой линии. При этом к вытяжной части будет поступать одинаковое количество воздуха с обеих сторон линии, что будет способствовать снижению потерь давления воздуха. Для обеспечения стока конденсата участки сборного трубопровода следует прокладывать с уклоном в сторону канализационных стояков.

Для оценки влияния, которое оказывает объединение группы стояков одной вытяжной частью на режим вентиляции наружных сетей, нами в зимнее и летнее время 1972 г. совместно с отделом инженерного оборудования Экспериментальной базы МНИИТЭП выполнены замеры расходов воздуха в вытяжных частях зданий различной этажности. Расход воздуха определялся по его скорости, замеренной крыльчатым анемометром на струнной оси, и площади живого сечения вытяжной части стояков. Эксперименты проводились в Москве на зданиях высотой 2, 3, 4, 5, 6, 12, 16, 25 и 30 этажей. По их результатам (табл. 12) строились кривые распределения, в соответствии с которыми за характерный принимался среднечасовой расход воздуха, наиболее часто повторяющийся на данном объекте (математическое ожидание расхода).

Таблица 12. Среднечасовые расходы воздуха в вытяжных частях канализационных стояков

Время года	Среднечасовые расходы воздуха, м³/ч, при этажности здания								
	2	3	4	5	6	12	16	25	30
Лето	18	25	22	20	—	23	—	20	—
Зима	43	43	42	25	100	—	90	60	71

Как следует из табл. 12, этажность здания не определяет величину расхода воздуха, выходящего в атмосферу по канализационным стоякам, что, очевидно, является следствием различных величин гидравлических сопротивлений в канализационных системах зданий. Тем не менее общая тенденция, выраженная уравнениями (5) и (6), сохраняется. Следует отметить существенное увеличение расхода воздуха в зимнее время.

В табл. 13 представлены результаты замеров расхода воздуха в вытяжных частях, объединяющих группы канализационных стояков в 16-этажных зданиях. Эти данные свидетельствуют о том, что расход воздуха, проходящего по вытяжной части, объединяющей  $n$  стояков, несущественно меньше расхода, проходящего по  $n$  одиночным стоякам. Следовательно, объединение группы стояков одной вытяжной частью практически не влияет на кратность воздухообмена в наружной сети.

Таблица 13. Среднечасовой расход воздуха, выходящего через вытяжные части, объединяющие группы стояков

Число объединяемых стояков	Расход воздуха, м³/ч	Число объединяемых стояков	Расход воздуха, м³/ч
3	35	5	123
4	60	5	135,5
5	130	5	133
5	120	11	239—280
5	156		

Располагая данными о величинах расхода воздуха, выходящего из вытяжных частей различных конструкций, можно определить число стояков, обеспечивающих с любой кратностью воздухообмен в наружной канализационной сети.

Емкость вентилируемого участка сети с расположенными на нем канализационными колодцами находится из выражения

$$W = k \left( \frac{\pi D_{1c}^2}{4} l_{1c} + \frac{\pi D_{2c}^2}{4} l_{2c} + \dots + \frac{\pi D_{nc}^2}{4} l_{nc} + \dots + \frac{\pi D_{1k}^2}{4} h_{1k} + \frac{\pi D_{2k}^2}{4} h_{2k} + \dots + \frac{\pi D_{nk}^2}{4} h_{nk} \right), \quad (67)$$

где  $D_{1с}, D_{2с}, D_{nc}, l_{1с}, l_{2с}, l_{nc}$  — диаметры и протяженность различных участков вентилируемой сети, м;  $D_{1к}, D_{2к}, D_{nk}, h_{1к}, h_{2к}, h_{nk}$  — диаметры и высота канализационных колодцев, расположенных на вентилируемых участках, м;  $k$  — коэффициент кратности воздухообмена в сети.

Для обеспечения вентиляции расчетного участка сети необходимо следующее количество вытяжных частей стояков:

$$n = W/Q, \quad (68)$$

где  $Q$  — производительность одной вытяжной части данной конструкции, м<sup>3</sup>/сут.

Очевидно, что для расчетов следует принимать минимальную производительность вытяжных частей. Для одиночных стояков  $Q$  принимается равной 18—20 м<sup>3</sup>/ч; для группы из трех стояков — 35 м<sup>3</sup>/ч; из четырех стояков — 60 м<sup>3</sup>/ч; из пяти стояков — 120—155 м<sup>3</sup>/ч; из одиннадцати стояков — 240—280 м<sup>3</sup>/ч. При этом нужно учитывать, что одиночные стояки примерно 16 ч в сутки работают на выброс воздуха в атмосферу и 8 ч в сутки — на приток, а вытяжные части, объединяющие группу стояков, круглосуточно работают в режиме вентиляции сети. Отсюда суточный расход воздуха составляет: для одиночных стояков — 320 м<sup>3</sup>/сут; для группы из 3—4 стояков — 800—1500 м<sup>3</sup>/сут; для группы из 5 стояков и более — 2000 м<sup>3</sup>/сут.

В формуле (67) неизвестной величиной является коэффициент суточной кратности воздухообмена  $k$ . Если принять  $k=100$ , нетрудно рассчитать, что для вентиляции сети диаметром 500 мм длиной 1000 м, на которой расположены 10 колодцев диаметром 1000 мм, высотой 2 м, нужно 12 вытяжных частей одиночных стояков. Этот расчет до известной степени условен. Однако он дает возможность понять, что даже 100-кратный суточный воздухообмен в наружной сети обеспечивается относительно небольшим числом канализационных стояков.

В городских условиях при высокой плотности застройки отказ от устройства вытяжной части (например, в системах с невентилируемыми стояками) или при объединении группы стояков без вытяжной части в системах канализаций отдельных зданий не может существенно повлиять на вентиляцию наружной сети. В сельских населенных местах, где преобладает малозажная застройка и возможно применение только невентилируемых

канализационных стояков, необходимо предусматривать меры по вентиляции канализационной сети. Проще всего в этом случае в каждом типовом здании устраивать по одному стояку, сообщающемуся с атмосферой.

При устройстве укороченных вытяжных частей экономится ~ 0,3 м трубы на каждом стояке. При объединении группы стояков одной вытяжной частью достигается повышение надежности систем канализации зданий; улучшается техническое состояние и эстетический вид кровли здания; более интенсивно протекает процесс вентиляции наружных канализационных сетей; сокращается количество типоразмеров плит перекрытий для устройства кровли здания. Наряду с этим увеличивается протяженность канализационных трубопроводов в чердаке. Удорожание системы при этом зависит от расстояния между объединяемыми стояками и высоты чердака. Анализ 30 каталожных проектов МНИИТЭП, в которых принято решение об объединении поверху канализационных стояков, позволяет сделать вывод о том, что удорожание составляет от 0,95 до 2,6 коп. на 1 м<sup>2</sup> жилой площади. Это удорожание компенсируется снижением затрат на эксплуатацию кровли, а также преимуществами, указанными выше.

## Глава VI

### РАСЧЕТ ПОДЗЕМНОЙ ЧАСТИ СИСТЕМ КАНАЛИЗАЦИИ ЗДАНИЙ

Как уже указывалось, существующие методики для гидравлического расчета самотечных трубопроводов в системах канализации зданий не учитывают некоторых параметров, оказывающих существенное влияние на транспортирующую способность сточной жидкости. Важнейшими из этих параметров являются скорость потока воздуха, движущегося навстречу сточной жидкости из наружной сети канализации к вытяжной части стояка, а также аккумулирующая емкость канализационного трубопровода.

Данные табл. 12 и 13 позволяют рассчитать скорость встречного потока воздуха в канализационных выпусках, объединяющих от 1 до 11 стояков. Величина этой скорости зависит от диаметра выпуска, и максимальное

ее значение может составить около 5 м/с. Очевидно, что такая величина скорости встречного потока воздуха создает большое сопротивление движущейся жидкости. Однако данных для оценки величины этого сопротивления в настоящее время не имеется.

Метод определения расхода сточной жидкости с учетом величины аккумулирующей емкости трубопровода рассматривается ниже.

## 1. ВЛИЯНИЕ АККУМУЛИРУЮЩЕЙ ЕМКОСТИ КАНАЛИЗАЦИОННЫХ САМОТЕЧНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ НА РАСЧЕТНЫЙ РАСХОД СТОЧНОЙ ЖИДКОСТИ

Трубопроводы систем канализации зданий в среднем в течение суток заполнены сточной жидкостью лишь 15—20 мин в 1 ч, а в течение 40—45 мин пусты. В то же время режим водоотведения в зданиях характеризуется большой неравномерностью и залповыми сбросами сточных вод. Поэтому в пустом трубопроводе максимальный секундный расход жидкости быстро уменьшается.

В подтверждение этого положения нами проведены экспериментальные исследования на установке, включающей горизонтальный трубопровод из стеклянных труб диаметром 106 мм, к которому с помощью прямых тройников присоединены четыре унитаза со смывными бачками емкостью 6,5 л. Уклон горизонтального трубопровода  $\sim 0,02$ .

Секундный расход жидкости, вытекающей из трубопровода при опорожнении в него как отдельных смывных бачков, так и различных их сочетаний, определялся с помощью мерной емкости, представляющей собой цилиндр диаметром 2 м, разделенный на 60 секторов и вращающийся с постоянной скоростью около 1 об/мин, так что каждый сектор заполняется в течение  $\sim 1$  с.

Проведенные эксперименты позволили установить, что жидкость, поступающая от унитаза в отводной трубопровод в количестве 1,6 л/с, в первый момент имеет вращательное движение вокруг оси трубопровода, а затем равномерно растекается в обе стороны от выпуска унитаза. При этом максимальный расход стоков, поступающих в канализационный стояк, составляет лишь 0,8 л/с. Исследования на большом стенде позволили установить,

что в 3 м от основания стояка эта величина уменьшается до 0,26 л/с.

Секундный расход сточной жидкости при залповом сбросе стоков от унитаза уменьшается почти в 6 раз по сравнению с расчетным. Основное влияние на образование засоров в канализационных выпусках из зданий оказывают именно стоки от туалетов, так как с этими стоками в систему проникают посторонние предметы, имеющие сравнительно крупные габариты.

Режим водоотведения от полностью заполненных ванн характеризуется меньшей неравномерностью и большими расходами (1,1 л/с), однако ванна используется гораздо реже, чем унитаз.

Чтобы оценить возможные и найти оптимальные гидравлические режимы отведения стоков по канализационной сети, рассмотрим их математическую модель. При построении модели используем конструктивное решение канализационной сети современного жилого дома с торцовым выпуском, а также введем следующие предпосылки к расчету:

расход стоков, поступающих в течение часа наибольшего водоотведения из стояков в сборный трубопровод канализационного выпуска из здания, полностью отводится за рассматриваемый период времени по этому трубопроводу в канализационный колодец;

в сборный трубопровод стоки поступают в случайные моменты времени и в различном количестве, определяемом одновременностью действия санитарных приборов;

отведение стоков из сборного трубопровода осуществляется неравномерно в силу непрерывного изменения гидравлического уклона потока и смоченного периметра трубопровода;

часовой расход отводимых стоков в пределах определяется нормой водоотведения  $Q$ , коэффициентом часовой неравномерности  $K$  и количеством жителей  $U$ .

Примем, что сточная жидкость поступает в горизонтальный трубопровод дискретно, т. е. отдельными порциями, равными  $Q_0$ . Допустим, что величина  $Q_0$  соответствует секунднему поступлению сточной жидкости от санитарного прибора с наибольшим расчетным водоотведением. В данном случае будем предполагать, что каждый прибор из установленного их числа в здании может сбрасывать в канализационную сеть расход сточной жидкости  $Q_0$ . Тогда сборный трубопровод можно рассматри-



Подставив найденное значение  $p_0$  во второе уравнение системы (70), получим:

$$p_1 = a/(a+1)^2.$$

Аналогичным образом находим решение для других значений  $p$ :

$$p_r = ar/(a+1)^{r+1} \text{ при } r < n. \quad (72)$$

Нарушение работы канализационной сети будет наблюдаться в том случае, когда поступление сточной жидкости превысит величину ее отведения, а трубопровод будет работать полным сечением на всей длине, т. е.

$$v = mQ_0. \quad (73)$$

Вероятность этого события:

$$p_m = am/(a+1)^{m+1}, \quad (74)$$

и обеспеченность нормальной работы канализационной сети  $P$  будет определяться разностью

$$P = 1 - p_m. \quad (75)$$

Задавая величиной  $P$  и пользуясь формулами (74) и (75), находим, что требуемый объем трубопровода в единицах  $Q_0$  должен соответствовать

$$m = \ln(1-P)/\ln a - \ln(a+1). \quad (76)$$

Исследования, выполненные канд. техн. наук Л. А. Шопенским и С. П. Казаковым [9], позволяют считать, что вероятность действия санитарных приборов в час наибольшего водоотведения может быть найдена из выражения

$$p = \frac{K_i Q_i U_i}{3600 T_i Q_0 n_i}, \quad (77)$$

где  $K_i$  и  $Q_i$  — коэффициент часовой неравномерности и норма водоотведения (водопотребления), принимаемые в соответствии с действующими нормами;  $U_i$  — число водопотребителей на данном объекте;  $T_i$  — продолжительность периода водопотребления и соответственно водоотведения, относительно которой приняты значения  $K_i$  и  $Q_i$ , ч;  $Q_0$  — норма расхода воды от прибора с наибольшим водоотведением, л/с;  $n_i$  — общее число санитарных приборов на данном объекте.

На основании изложенного средний секундный расход воды в час наибольшего водоотведения для данного объекта составит:

$$q_{cp} = Q_0 n p. \quad (78)$$

Следует отметить, что расход  $q_{cp}$  наиболее часто наблюдается на объекте в течение суток, и поэтому трубопровод, рассчитанный по этой величине расхода жидкости, большую часть суток будет работать в оптимальном режиме. Однако в час наибольшего водоотведения эта величина будет превышена, и, следовательно, при расчете необходимо обеспечить условие, в соответствии с которым в этот час наполнение трубопровода не превысит заданного предела.

Можно допустить, что кратковременное максимальное наполнение составляет 0,9—0,95. Заметим, что СНиП II-32-74 «Канализация. Нормы проектирования» допускают кратковременное полное наполнение уличных и внутриквартальных сетей. Диаметр самотечного трубопровода может быть рассчитан исходя из суммы величин живого сечения потока жидкости, «аккумулирующего» сечения и свободного сечения трубопровода, ограничивающего предел его заполнения.

Живое сечение потока жидкости определяется из условия его неразрывности:

$$\omega_n = q_{cp}/v_{cp}, \quad (79)$$

где  $v_{cp}$  — средняя скорость течения жидкости, принимаемая не менее самоочищающей.

«Аккумулирующее» сечение при постоянном диаметре трубопровода представляет собой частное от деления его аккумулирующей емкости на длину трубопровода  $l$

$$\omega_{a.c} = mQ_0/l; \quad (80)$$

тогда

$$q_{cp}/v_{cp} + mQ_0/l = k_1 d^2, \quad (81)$$

где  $k_1$  — коэффициент, принимаемый по табл. III в работе [26] для расчета диаметра трубопровода  $d$ , при котором в час максимального водоотведения наполнение трубопровода не превысит заданной величины.

Из уравнения (81):

$$d = \sqrt{\frac{q_{cp}}{k_1 v_{cp}} + \frac{mQ_0}{k_1 l}}. \quad (82)$$

Следовательно, диаметр самотечного трубопровода уменьшается с увеличением его длины. Это объясняется тем, что при отсутствии поступления путевого расхода

жидкости в трубопровод большой длины влияние его «аккумулирующего» сечения уменьшается. При  $l \rightarrow \infty$  диаметр трубопровода стремится к постоянной величине, при которой обеспечивается условие  $h/d = f(k_1)$ .

С другой стороны, чем короче трубопровод, тем больше должен быть его диаметр, поскольку в непосредственной близости от нижнегогиба стояка живое сечение потока жидкости увеличивается за счет снижения его скорости по сравнению со скоростью в стояке.

Влияние длины трубопровода на его диаметр во многом зависит от расчетной скорости жидкости и возрастает с увеличением последней. Кроме того, экономически наиболее выгодный диаметр является функцией нижнего предела наполнения трубопровода. Этот предел может быть установлен экспериментально в зависимости от необходимой величины транспортирующей способности потока жидкости, которая является функцией удельного веса транспортируемых компонентов сточной жидкости (в том числе и посторонних предметов), уклона и наполнения трубопровода.

Исследования в этой области выполнены в ЦНИИЭП инженерного оборудования. Представляется очевидным, что не обоснованное расчетом увеличение диаметра трубопровода канализационного выпуска из здания при прочих равных условиях снижает транспортирующую способность потока жидкости и способствует увеличению материалоемкости систем канализации зданий.

## 2. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КАНАЛИЗАЦИОННЫХ ВЫПУСКОВ ИЗ ЗДАНИЙ

В настоящее время нет достоверных формул для расчета самотечных трубопроводов, работающих в переходной области турбулентного течения жидкости. Для этих целей можно рекомендовать обобщенную формулу А. Д. Альтшуля [2], однако в ее структуру входит такой параметр, как уклон трубопровода, который во многих случаях заранее неизвестен. Кроме того, требуемое значение скорости течения и наполнения трубопровода при пользовании этой формулой, как правило, достигается после нескольких итераций, что неудобно для практики проектирования.

Таблицы для гидравлического расчета самотечных трубопроводов [14, 26] не всегда дают возможность про-

извести достаточно точные расчеты. Таблицы в работе [14] составлены только для бетонных и железобетонных труб с шероховатостью  $n=0,014$  и для квадратичной области турбулентного течения жидкости, а таблицы в работе [26] — для чугунных канализационных труб с шероховатостью  $n=0,013$ . Эти данные для переходной области турбулентного течения не дают достоверного результата.

Необходимость гидравлического расчета самотечных трубопроводов в каждом конкретном случае требует упрощения и, самое главное, уточнения методики этого расчета.

Анализ известных зависимостей, в том числе и данных работ [14, 25], позволяет установить, что:

$$\omega_{\text{ж}}/\omega_{\text{тр}} = f(h/d), \quad (83)$$

где  $\omega_{\text{ж}}$  — площадь живого сечения потока жидкости в количестве  $q_{\text{ж}}$ , движущейся со скоростью  $v_{\text{ж}}$ , м<sup>2</sup>;  $\omega_{\text{тр}}$  — площадь живого сечения трубопровода диаметром  $d$ , м<sup>2</sup>;  $h$  — высота протекающего слоя жидкости, м.

Зависимость (83), представленная на рис. 27, может быть аппроксимирована прямыми 1 и 2. Первая из них описывается уравнением

$$\omega_{\text{ж}}/\omega_{\text{тр}} = 1,33 (h/d)^{1,4}, \quad (84)$$

а вторая:

$$\omega_{\text{ж}}/\omega_{\text{тр}} = (h/d)^{0,8}. \quad (85)$$

Из уравнения (84)

$$d = \sqrt{\omega_{\text{ж}}/(h/d)^{0,7}}. \quad (86)$$

Это равенство действительно при  $h/d$  от 0,1 до 0,6 включительно. При  $h/d > 0,6$  диаметр трубопровода можно найти из (85):

$$d = 1,13 \sqrt{\omega_{\text{ж}}/(h/d)^{0,4}}. \quad (87)$$

Для упрощения расчетов по формулам (86) и (87) канд. техн. наук Л. А. Шопенским разработана номограмма (рис. 28).

Следующим важным этапом расчетов является обоснование исходных параметров — наполнения трубопровода и скорости течения жидкости — для определения диаметра и уклона трубопровода.

Отметим, что в настоящее время гидравлический расчет трубопроводов производят по величине максимального

го секундного расхода сточной жидкости. Определение этой величины регламентировано действующими нормами СНиП II-30-76 «Внутренний водопровод и канализация зданий. Нормы проектирования» и базируется на вероятности действия санитарно-технических приборов, что справедливо только для систем водоснабжения, характеризующихся неразрывностью потока воды. Однако в системах канализации зданий преобладают залповые поступления жидкости, трубопроводы же имеют значительную аккумулялирующую емкость, что способствует резкому снижению по длине трубопровода величины секундного расхода жидкости, первоначально поступающей в него.

Экспериментальные исследования влияния аккумулялирующей способности канализационных трубопроводов на формирование секундных расходов жидкости выполнены в ЦНИИЭП инженерного оборудования на гидравличе-

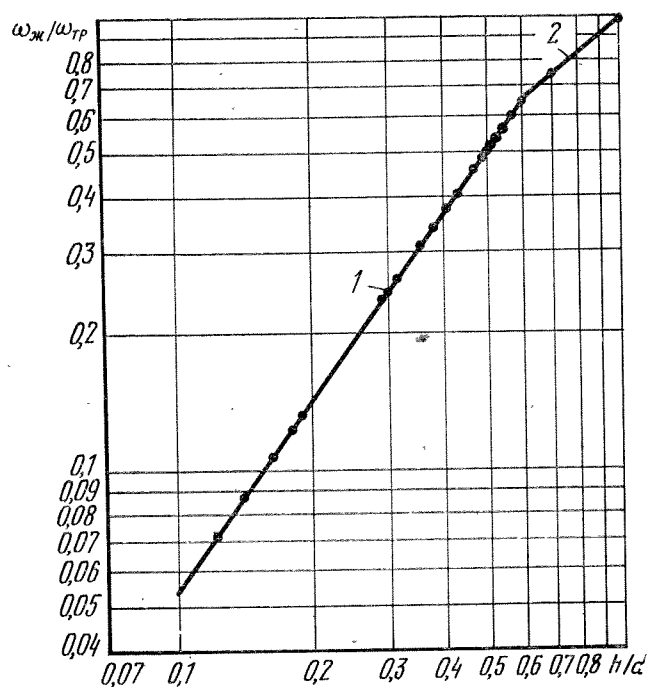


Рис. 27. Зависимость  $\omega_{ж}/\omega_{тр} = f(h/d)$

ском стенде, на котором поочередно монтировались трубопроводы длиной до 15 м из стеклянных труб диаметрами 79 и 104 мм и чугунных битуминизированных труб диаметром 96 мм. Станина стенда имеет опоры, позволяющие изменять уклон трубопровода. Моделирование залповых сбросов сточных вод проводилось с помощью установленных на верхнем участке стенда шести унитазов «Компакт» с бачками емкостью 6,5—7 л. При одновременной работе шести унитазов максимальный секундный расход сточной жидкости составлял 9,6 л/с, что эквивалентно расходу стоков от 210 типовых квартир. Емкость трубопровода постоянного диаметра изменялась путем изменения его длины.

Секундный расход жидкости определялся с помощью мерной емкости, представляющей собой цилиндр диаметром 2 м, разделенный на 60 равных секторов, по методике, изложенной выше.

Экспериментальные исследования подтвердили, что канализационные трубопроводы обладают значительной аккумулялирующей способностью. Так, например, при одновременном опорожнении шести унитазов в отводной горизонтальный трубопровод диаметром 104 мм, проложенный с уклоном 0,026, максимальный расход жидкости в конце участка длиной 11,6 м составил 3,6 л/с вместо 9,6 л/с, который поступал в начале трубопровода.

Зависимости для определения расчетного секундного расхода жидкости  $q_{расч}$ , л/с, получены с учетом таких параметров, как диаметр, длина, шероховатость, уклон трубопровода, угол входа в него жидкости.

При длине трубопровода, равной или более 3 м:

$$q_{расч} = q_{макс} \left[ 1 - \frac{0,15 (100n)^{0,25}}{(1000K)^{0,72} v_{ср}^{1,5}} - 0,04l \right]; \quad (88)$$

при длине трубопровода менее 3 м

$$q_{расч} = q_{макс} \left[ 1 - \frac{0,12 l}{\sqrt{1000K} v_{ср}} \right]; \quad (89)$$

где  $q_{макс}$  — максимальный секундный расход сточной жидкости, определяемый по методике СНиП II-30-76, л/с;  $n$  — коэффициент шероховатости материала трубопровода;  $K$  — параметр, зависящий от наполнения трубопровода и определяемый по табл. 15;  $v_{ср}$  — средняя скорость течения, м/с;  $l$  — длина трубопровода, м.

Таблица 15. Зависимость  $K$  от  $h/d$

$h/d$	$K$	$h/d$	$K$
0,1	0,00295	0,6	0,00043
0,15	0,00178	0,7	0,00039
0,2	0,00128	0,8	0,00038
0,3	0,00081	0,9	0,00039
0,4	0,0006	0,95	0,00043
0,5	0,00049	1	0,00049

Следует отметить, что величина секундного расчетного расхода окончательно формируется на длине трубопровода, примерно равной 110 его диаметрам, т. е. на этой длине секундный расход становится минимальным и постоянным. Поэтому при расчетах по формуле (88) следует принимать  $l$  равной 110 диаметрам трубопровода в тех случаях, когда фактическая длина больше или равна этой величине; если же она меньше  $110 d$ , следует принимать фактическую длину.

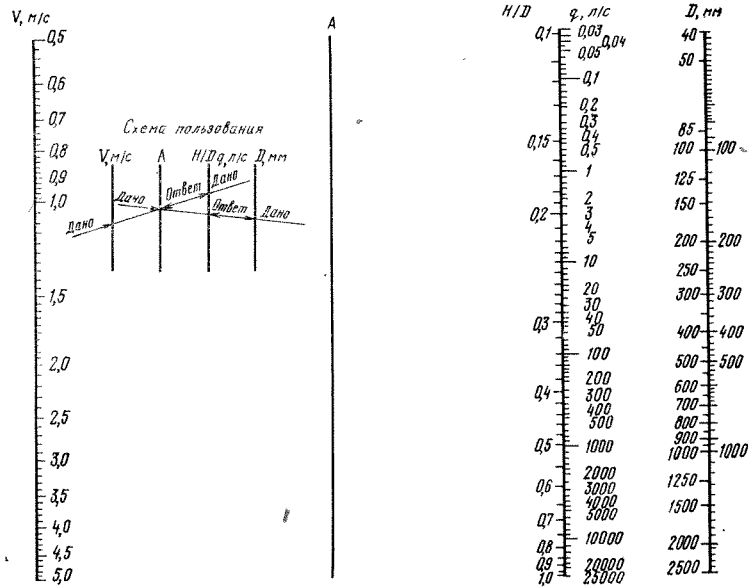


Рис. 28. Номограмма для определения диаметра самотечного трубопровода

Транспортирующая способность жидкости применительно к специфике канализационных выпусков из зданий исследовалась в ЦНИИЭП инженерного оборудования инж. В. Н. Родиным [19]. При исследовании использовались в виде включений структурные и волокнистые материалы различной крупности и плотности. Трубопровод помещался на металлическую станину, уклон которой определялся по нивелиру. Верхний конец трубопровода при помощи мягкой резины был закреплен в патрубке бака емкостью  $0,3 \text{ м}^3$ , установленного на верхнем участке стенда. В этот бак из системы водоснабжения подавалась вода. Из трубопровода вода поступала во второй бак, откуда отводилась на сброс. Исследования проводились на трубопроводах диаметрами 57, 79, 104 мм, проложенных с уклонами в пределах от 0,01 до 0,04. Длина трубопроводов 12 м. Расход воды на выходе из трубопровода определялся объемным способом, высота слоя воды в трубопроводе — с помощью мановакуумметров, установленных через каждые 3 м, а также на выходе из трубопровода (мерным щупом). Средняя скорость течения жидкости определялась из условия неразрывности потока.

Образцы материала, применявшиеся при исследовании транспортирующей способности, помещались в верхнюю часть трубопровода, затем из бака подавалась вода, расход которой увеличивался до того момента, когда образец начинал двигаться. При этом фиксировались расход воды и наполнение трубопровода.

В результате исследований было установлено, что для транспортирования крупногабаритных предметов наполнение трубопровода имеет не меньшее значение, чем скорость течения жидкости. В частности, ветошь (во многих случаях являющаяся причиной засоров во внутридомовых системах канализации) транспортируется, если полностью погружена в воду, хотя скорость течения при этом равна  $0,35\text{—}0,4 \text{ м/с}$ , а песок крупностью  $2,5 \text{ мм}$  — при скорости  $0,6\text{—}0,7 \text{ м/с}$ .

На основе комплекса исследований, а также анализа статистики засоров за 30 лет В. Н. Родиным рекомендовано следующее условие, обеспечивающее нормальную работу канализационных выпусков из зданий:  $v_{\text{ср}} \sqrt{nd} \geq 0,6$ . При этом скорость течения жидкости должна быть не менее  $0,7 \text{ м/с}$ , а наполнение трубопровода — не менее  $0,3$ .

На необходимость увеличения наполнения трубопровода указывает д-р техн. наук Г. Г. Шигорин в работе [28], в которой отмечается, что при недостаточном наполнении трубопровода в нем начинают откладываться в первую очередь крупногабаритные предметы, причем высокие скорости течения жидкости не препятствуют этому процессу. В результате через 4—6 мес образуются засоры на трубопроводах диаметрами 200 и даже 250 мм.

По данным НИИ коммунального водоснабжения и очистки воды Академии коммунального хозяйства им. К. Д. Памфилова, наполнение трубопровода является важным фактором, препятствующим отложению осадка в самотечных трубопроводах. Данные по 17 городам РСФСР представлены в табл. 16.

Таблица 16. Толщина слоя осадка в зависимости от наполнения трубопровода

Диаметр, мм	Уклон 1000 <i>l</i>	Примерное наполнение	Примерная толщина слоя осадка, мм
200	4,5	0,5	45-
200	5	0,75	25—30
250	4	0,5	35—40
250	4	0,8	15
250	3—3,5	0,8	25

Последним этапом расчетов является определение уклона трубопровода.

Исследования позволили нам способом подбора для трубопроводов с  $n=0,012\div 0,014$  аппроксимировать (с точностью в пределах 7—10%) формулы Шези — Н. Н. Павловского зависимостью:

$$i = \frac{K (100n)^{2,8} v_{ср}^2}{d^{1,3}}, \quad (90)$$

где  $K$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от наполнения трубопровода (см. табл. 15).

Однако эта зависимость может быть рекомендована только для квадратичной области турбулентного течения жидкости, когда сопротивление движению пропорционально скорости во второй степени и не зависит от числа Рейнольдса.

Для разработки методики гидравлического расчета самотечных труб и каналов во всей области турбулентного течения жидкости нами выполнены аналитические и экспериментальные исследования. Аналитические исследования базируются на связи между законом гидравлического сопротивления и распределением скоростей по сечению труб и каналов.

Анализ зависимостей Шези — Н. Н. Павловского позволил представить основное уравнение равномерного установившегося движения жидкости

$$\tau_0/\gamma = R_{v_{\max}} i, \quad (91)$$

где  $R_{v_{\max}}$  — гидравлический радиус, соответствующий расстоянию точки потока, движущегося с максимальной скоростью, от стенки, в новой интерпретации

$$\tau_0/\gamma = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^b i R_2 \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^a, \quad (92)$$

здесь  $\tau_0$  — среднее касательное напряжение трения на стенке для данного поперечного сечения канала, кгс/см<sup>2</sup>;  $\gamma$  — объемная масса жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $v_1$  и  $v_2$  — скорости течения жидкости, м/с, — средние при разных наполнениях канала, осредненные — при постоянном наполнении;  $R_1$  и  $R_2$  — гидравлические радиусы, соответствующие точкам потока, в которых скорости равны  $v_1$  и  $v_2$ , м;  $i$  — потери напора;  $b$  — показатель степени, характеризующий режим течения жидкости (для ламинарного режима  $b=1$ ; для переходной области турбулентного режима  $b=1\div 2$ ; в квадратичной области  $b=2$ );  $a$  — показатель степени, характеризующий материал труб и каналов и для безнапорных потоков равный  $2\gamma$  в формуле Н. Н. Павловского (3). Для напорных потоков  $a$  определяется по другой зависимости.

На основе экспериментальных данных Н. Н. Павловского, И. Никурадзе, Ф. А. Шевелева, МИСИ им. В. В. Куйбышева по изменению скоростей в сечениях напорных и безнапорных труб и каналов установлено, что в переходной области турбулентного течения жидкости

$$b = 1 + \frac{\lg Re_{\phi} - \lg Re_{л}}{\lg Re_{кр} - \lg Re_{л}}, \quad (93)$$

где  $Re_{л}$  — максимальное число Рейнольдса при ламинарном режиме ( $Re_{л}=2400$ );

$Re_{кр}$  — критическое число Рейнольдса, соответствующее началу квадратичной области сопротивлений:

$$Re_{кр} = \frac{500 \cdot 4R}{k_0}, \quad (94)$$

здесь  $k_0$  — эквивалентная шероховатость материала труб и каналов, мм (табл. 17);  
 $Re_{\phi}$  — число Рейнольдса, фактическое;

$$Re_{\phi} = \frac{v_{cp} \cdot 4R}{\nu}, \quad (95)$$

здесь  $\nu$  — кинематическая вязкость жидкости,  $m^2/c$ .

Таблица 17. Значения  $n$ ,  $k_0$  и показателя степени  $a$  для трубопроводов из различных материалов

Материал трубопроводов	$n$	$k_0$ , мм	$a$
Пластмасса	0,01	0,0055	0,24
Асфальтированный чугун, сталь	0,012	0,138	0,28
Асфальтированный чугун в эксплуатации	0,013	0,47	0,3
Керамика	0,0134	0,7	0,307
Бетон, железобетон	0,014	1,22	0,317

Совместное решение уравнений (91) и (92) позволяет получить следующие зависимости:

для профиля осредненных скоростей в напорном потоке

$$v/v_{max} = (R/R_{max})^{\lambda}, \quad (96)$$

где  $\lambda$  — коэффициент сопротивления Дарси;

отношение средних скоростей в безнапорном потоке

$$v/v_{\Pi} = (R/R_{\Pi})^{\frac{1+a}{b}}. \quad (97)$$

Формула (96) описывает нижнюю ветвь осесимметричной параболы (профиль скоростей в напорных потоках), имеющей максимум на оси трубы; верхняя ветвь параболы является зеркальным отображением ее нижней ветви.

Формула (97) описывает отношение средних скоростей по всему сечению безнапорного потока, в котором  $v_{\Pi}$  и  $R_{\Pi}$  — скорость течения и гидравлический радиус при полном наполнении.

Точность расчетов по формуле (97) можно проиллюстрировать на примере графика «рыбка», впервые приведенного акад. Н. Н. Павловским и в дальнейшем многократно повторенного в различных курсах и монографиях по гидравлике и канализации (табл. 18).

Таблица 18. Отношение средних скоростей жидкости в круглоцилиндрическом трубопроводе

Наполнение трубопровода	$v/v_{\Pi}$ по Н. Н. Павловскому	$v/v_{\Pi}$ по формуле (97)	Относительная ошибка, %	$v_{cp}$ , м/с
0,1	0,333	0,35	+4,86	0,2528
0,2	0,565	0,5722	+1,26	0,4134
0,3	0,748	0,7473	-0,094	0,5398
0,4	0,889	0,8884	-0,068	0,6418
0,5	1	1	0	0,7224
0,6	1,083	1,083	0	0,7824
0,7	1,137	1,139	+0,175	0,8228
0,8	1,159	1,162	+0,258	0,8394
0,9	1,142	1,144	+0,175	0,8264
1	1	1	0	0,7224

Это отношение средних скоростей не подчиняется закону Шези и, следовательно, может иметь место лишь в переходном режиме турбулентного течения жидкости. В частности, данные табл. 18 рассчитаны для асфальтированного чугунного трубопровода ( $n=0,012$ ,  $a=0,28$ ) диаметром 100 мм при  $b=1,6717$  ( $Re_{\Pi}=72240$ ).

Отметим также, что формула (97) с достаточной степенью точности описывает отношение средних скоростей в самотечных каналах некруглой формы поперечного сечения, а формула (96) — профили осредненных скоростей в напорных потоках, полученные И. Никурадзе, МИСИ им. В. В. Куйбышева, Ф. А. Шевелевым.

Следует указать, что структура формулы для определения коэффициента гидравлического сопротивления самотечных трубопроводов отлична от структуры формул для расчета напорных трубопроводов. Это объясняется тем, что в напорных трубопроводах расчет производят по средней скорости, определяемой как частное от деления величины расхода жидкости на площадь сечения трубопровода. Единственному значению скорости течения соответствует единственное значение коэффициента сопротивления  $\lambda$ , и потери напора определяют по формуле Дарси — Вейсбаха

$$i = \frac{\lambda v_{cp}^2}{2gd}. \quad (98)$$

При безнапорном течении каждому новому наполнению трубопровода соответствуют: новая скорость течения, новый коэффициент  $\lambda$  и новое значение гидравлического радиуса  $R$ , но при этом должно соблюдаться условие

$$i = \frac{\lambda v_{ср}^2}{2g \cdot 4R} = \text{const.} \quad (99)$$

Отсюда закон распределения коэффициента  $\lambda$  по сечению безнапорного трубопровода (канала):

$$\lambda_1/\lambda_2 = R_1/R_2 (v_2/v_1)^2. \quad (100)$$

Этот закон и отношение средних скоростей по сечению канала позволяют получить формулу для определения потерь напора во всей области турбулентного течения жидкости.

На основании анализа для безнапорного течения можно рекомендовать следующую зависимость для определения коэффициента  $\lambda$ :

$$\lambda = 0,2(k_0/4R)^a. \quad (101)$$

Коэффициент 0,2 обеспечивает одинаковое значение эквивалентной шероховатости напорных и безнапорных трубопроводов, выполненных из одного и того же материала.

При подстановке этого значения  $\lambda$  в формулу (98) достигается результат, практически точно совпадающий с результатом расчетов по формулам Шези — Павловского.

Из формулы (101) следует:

$$\lambda_1/\lambda_2 = (R_2/R_1)^a = R_1/R_2 (R_2/R_1)^{1+a}. \quad (102)$$

С учетом (97) уравнение (102) примет вид:

$$\lambda_1/\lambda_2 = R_1/R_2 (v_2/v_1)^b. \quad (103)$$

При  $b=2$  условие (103) отвечает условию (100). Отсюда следует, что в квадратичном режиме учитываются оба названных закона. При  $b \neq 2$  условие (100) не соблюдается, что обуславливает парадоксальное явление, при котором расчетный уклон одного и того же трубопровода изменяется при изменении его наполнения. Проиллюстрируем это на примере расчета стального трубопровода

диаметром 100 мм по формуле СНиП II-32-74 при  $Re_n = 15\ 310$  (табл. 19).

Таблица 19. Зависимость расчетной величины уклона трубопровода от его наполнения

$h/d$	$v_{ср}$ , м/с	$i$	$h/d$	$v_{ср}$ , м/с	$i$
0,1	0,04251	0,001	0,6	0,1689	0,00075
0,2	0,07745	0,00074	0,7	0,1793	0,00075
0,3	0,1073	0,00072	0,8	0,1839	0,00076
0,4	0,1325	0,00072	0,9	0,1805	0,00075
0,5	0,1531	0,00073	1	0,1531	0,00073

Из приведенных в табл. 19 данных следует, что при изменении наполнения трубопровода от 0,1 до 0,4 его расчетный уклон изменяется на 28%. Это указывает на недостоверность расчетной формулы.

Наиболее простым решением для определения потерь напора, учитывающим законы изменения средних скоростей и коэффициента сопротивления по сечению канала, а также режим течения жидкости, является следующая интерпретация уравнения Дарси — Вейсбаха:

$$i = \frac{\lambda v_{ср}^b}{2g \cdot 4R}. \quad (104)$$

Зависимость (104) экспериментально проверена на гидравлическом стенде на трубопроводах из стеклянных и чугунных асфальтированных труб четырех диаметров, уклоны которых изменялись 14 раз. Результаты исследований позволяют констатировать достаточно высокую точность расчетов по формулам (93), (101) и (104) во всей области турбулентного течения жидкости. Эти формулы обеспечивают выполнение условия (99), о чем свидетельствуют данные табл. 20.

Уклон самотечного трубопровода канализационного выпуска из здания может быть определен также по номограмме (рис. 29).

Таким образом, для обеспечения необходимой величины транспортирующей способности потока сточной жидкости в канализационном выпуске из здания, он должен быть запроектирован на основании расчета, который состоит из следующих этапов:

Таблица 20. Результаты расчета уклона самотечного трубопровода по формуле (104)

$h/d$	$v_{\text{ср}}$ м/с	$\lambda$	$i$	$h/d$	$v_{\text{ср}}$ м/с	$\lambda$	$i$
0,1	0,2528	0,0464	0,00935	0,6	0,7824	0,0307	0,00936
0,2	0,4134	0,0388	0,00936	0,7	0,8228	0,0302	0,00937
0,3	0,5398	0,0352	0,00936	0,8	0,8394	0,0299	0,00936
0,4	0,6418	0,0330	0,00936	0,9	0,8264	0,0301	0,00936
0,5	0,7224	0,0316	0,00936	1,0	0,7224	0,0316	0,00936

Примечание. Исходные параметры те же, что и в табл. 18.

1. Определение максимальной величины секундного расхода сточной жидкости по методике СНиП II-30-76;

2. Определение расчетного секундного расхода стоков по формуле (88) либо (89);

3. Выбор величины наполнения трубопровода и скорости течения жидкости из условия  $v_{\text{ср}} \sqrt{h/d} \geq 0,6$ ;

4. Определение диаметра трубопровода по номограмме (см. рис. 28). Если полученное значение диаметра не предусмотрено в сортаменте соответствующих труб, следует по сортаменту принять ближайший больший или меньший к расчетному диаметр и по той же номограмме уточнить величину наполнения трубопровода или скорость течения жидкости;

5. Определение уклона трубопровода на основании имеющихся данных, исходя из величины диаметра, наполнения и шероховатости трубопровода и скорости течения в нем жидкости.

Следует подчеркнуть, что на участках с небольшими расходами сточной жидкости необходимая величина транспортирующей способности потока сточной жидкости не может быть обеспечена. Такие участки канализационных выпусков следует считать безрасчетными, что должно быть отмечено в проекте, и предусматривать на них необходимое количество прочистных устройств. Эти участки должны находиться под постоянным наблюдением эксплуатирующих организаций.

Приведенная методика расчета канализационных выпусков из зданий позволяет снизить материалоемкость собственно выпусков до 40% и значительно уменьшить вероятность образования засоров.

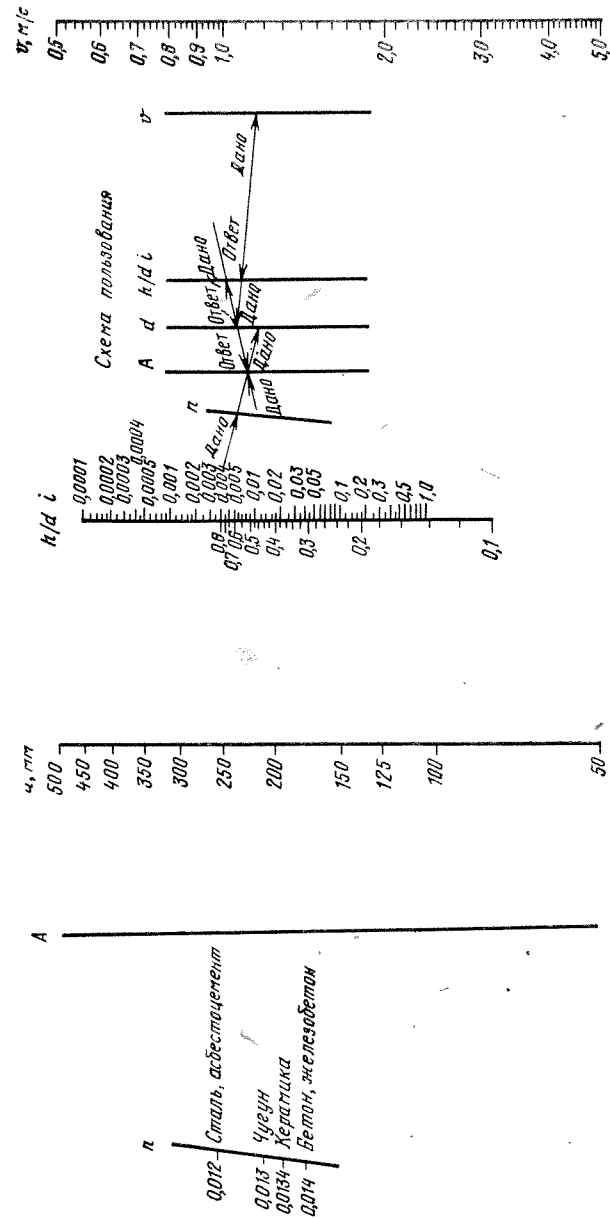


Рис. 29. Номограмма для определения уклона самотечного трубопровода

Снижение стоимости строительства подземной части системы канализации здания может быть также достигнуто устройством торцевого выпуска, т. е. выпуска, объединяющего понизу все канализационные стояки в здании. Такое решение способствует увеличению секундного расхода сточной жидкости в выпуске и позволяет отказаться от устройства дворовой канализационной сети. Диаметр и уклон торцевого выпуска должны быть обоснованы расчетом.

Следует подчеркнуть, что при конструировании канализационных выпусков из зданий должно быть обеспечено максимальное уменьшение протяженности горизонтальных трубопроводов.

1. **Агроскин И. И., Дмитриев Г. Г., Пикалов Ф. И.** Гидравлика. М.—Л., «Энергия», 1964.
2. **Альтшуль А. Д.** Гидравлические сопротивления. М., «Недра», 1970.
3. **Арманд А. А., Невструева Е. И.** Исследование механизма двухфазной смеси в вертикальной трубе. Известия ВТИ, № 2. М., 1950.
4. **Гурвиц М. А., Казаков С. П.** Новый метод расчета внутренних водостоков зданий. — В сб.: «Труды НИИ санитарной техники», № 33. М., ОНТИ НИИСТ, 1970.
5. **Добромыслов А. Я.** Новая интерпретация основного уравнения равномерного установившегося движения жидкости. — В сб. трудов ЦНИИЭП инженерного оборудования № 1. М., ОНТИ ЦНИИЭП инженерного оборудования, 1976.
6. **Добромыслов А. Я., Казаков С. П.** К вопросу о пропускной способности канализационного стояка. — В сб.: «Труды НИИ санитарной техники» № 29. М., ОНТИ НИИСТ, 1969.
7. **Идельчик И. Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М., «Машиностроение», 1975.
8. **Казаков С. П.** К вопросу о гидравлическом расчете гидрозатов (сифонов). — «Водоснабжение и санитарная техника», 1965, № 7.
9. **Казаков С. П., Шопенский Л. А.** Гидравлические характеристики санитарно-технического оборудования и расчет сетей внутренней канализации. — В сб.: «Труды НИИ санитарной техники», № 24. М., ОНТИ НИИСТ, 1967.
10. **Карпинская А. И.** Особенности канализования высотных зданий. — В сб.: «Труды ЛОНИИ оснований и фундаментов». Л., Машстройиздат, 1950.
11. **Корнилов Г. Г., Свиридова А. С., Яблонский В. С.** Экспериментальное исследование движения газожидкостных смесей по трубопроводам. — В трудах НИИ по транспортировке и хранению нефти и нефтепродуктов, вып. 3. М., 1964.
12. **Кутателадзе С. С., Стырикович М. А.** Гидравлика газожидкостных систем. М.—Л., Госэнергоиздат, 1958.
13. **Латышенков А. М., Лобачев В. Г.** Гидравлика. М., Госстройиздат, 1956.
14. **Лукиных А. А., Лукиных Н. А.** Таблицы для гидравлического расчета канализационных сетей и дюкеров по формуле акад. Н. Н. Павловского. М., Стройиздат, 1974.
15. **Мазюкевич И. В.** Об эжектирующих свойствах поверхности стекающей жидкостной пленки. — В трудах «Холодильная техника», т. XI. М., Пищепромиздат, 1956.
16. **Мальцев М. В.** Гидравлические потери при движении многофазных смесей по вертикальным трубопроводам. — В сб. трудов № 45. МИСИ им. В. В. Куйбышева, М., 1963.
17. **Репин Н. Н., Шопенский Л. А.** Санитарно-технические устройства и газоснабжение зданий. М., Стройиздат, 1975.
18. **Рихтер Г.** Гидравлика трубопроводов. Пер. с нем. М.—Л., ОНТИ, Главная редакция энергетической литературы, 1936.
19. **Родин В. Н.** Исследование транспортирующей способности сточной жидкости в самотечных трубопроводах систем канализации