

## ПРЕДИСЛОВИЕ

**П**ринятый в декабре 2011 г. Федеральный Закон РФ «О водоснабжении и водоотведении» (№ 416-ФЗ) в ст. 4 и 38 освещает порядок и требования по развитию (в том числе проектированию) схем водоснабжения и водоотведения, где в качестве некоторых базовых задач поставлены вопросы строительства, модернизации и реконструкции трубопроводного транспорта. Таким образом, вопросы эффективной работы систем водоснабжения и водоотведения приобретают статус приоритетных и государственных.

Важнейшим положением данного закона является создание электронных моделей водоснабжения и водоотведения (п. 3 раздела «Требования к схемам водоснабжения и водоотведения»). В том же разделе (п. 4.5 «Предложения по строительству, реконструкции и модернизации линейных объектов централизованных систем водоснабжения») отмечается необходимость включения в проекты сведений о реконструируемых участках сети, подлежащих замене в связи с исчерпанием эксплуатационного ресурса, а также речь идет об обязательном решении задачи, связанной с заменой всех стальных трубопроводов без наружной и внутренней изоляции на трубопроводы из некорродирующих материалов, либо их санации в случаях, где она возможна в соответствии с действующими строительными нормами и правилами. В качестве мероприятия, направленного на совершенствование проектирования, рассматривается необходимость включения в текстовую часть электронных моделей описания программ моделирования, их структуры, алгоритмов расчетов, возможностей и особенностей.

Настоящее учебное пособие предназначено для студентов магистратуры технических вузов, изучающих дисциплину «Теоретические основы и методы проектирования

трубопроводных систем водоснабжения», в частности, для ознакомления и использования в учебной и последующей практической деятельности ряда программ автоматизированного сопровождения научных исследований и проектных разработок, что является первым шагом создания комплексных электронных моделей проектирования трубопроводных систем водоснабжения и водоотведения, которые способны решать задачи гидравлического и прочностного расчета сетей, моделирования их работы и др. Это позволит пользователям программ (обучающимся) достичь качественно нового подхода при решении актуальных задач проектирования, связанных с вопросами строительства, модернизации и реновации выходящих из строя инженерных трубопроводных коммуникаций.

Представленный в учебном пособии материал является результатом десятилетней работы автора в составе коллектива преподавателей и научных работников кафедр МГСУ «Водоснабжение» (канд. техн. наук, доцент Е. В. Орлов) и «Информатика и прикладная математика» (канд. техн. наук, профессор С. П. Зоткин). Автор выражает благодарность коллективу за замечания и пожелания при подготовке рукописи, а также за помощь в описании информационно-поисковых систем.

Необходимо отметить, что до настоящего времени обобщающего методического материала для студентов магистратуры не выпускалось. Автор выражает надежду, что материал пособия будет полезен для подготовки высококвалифицированных кадров, владеющих соответствующими знаниями в области проектирования, строительства, модернизации, эксплуатации трубопроводных сетей и будет эффективно использован ими на практике. При этом эффективность восприятия студентами магистратуры представленного в пособии материала напрямую связана с реальным доступом к описанным автоматизированным программам и самостоятельным использованием ими.

Изложение материала в пособии базируется на логической последовательности и взаимосвязи:

- освоение общих вопросов, связанных с проектированием трубопроводных сетей, прочностными характеристиками и гидравлическим расчетом напорных и безнапорных трубопроводов наружных сетей систем водоснабжения и водоотведения, изготовленных из различных материалов;
- освоение работы наиболее значимых автоматизированных программ сопровождения научных исследований и проектных разработок в области трубопроводного транспорта (строительство, реновация и т. д.).

В результате изучения материалов пособия студент магистратуры должен изучить:

- общие вопросы проектирования трубопроводных сетей, подходы к оптимизации существующих и проектируемых трубопроводных систем;
- методики выполнения гидравлических и прочностных расчетов с использованием современных средств проектирования, а также подходы к моделированию трубопроводных систем;
- подходы к работе с вычислительной техникой, компьютерными технологиями и способами их применения в профессиональной проектной деятельности;
- методологию осуществления научного поиска в выборе оптимальных проектных решений;
- подходы к разработке и использованию новых методов решения задач проектирования трубопроводных систем.

Для закрепления полученных теоретических знаний и практических навыков в учебном пособии приведены тесты для самоконтроля с ответами.

## ВВЕДЕНИЕ

**В** настоящий момент в строительной отрасли при решении вопросов, связанных с проектированием, модернизацией, реконструкцией и эксплуатацией объектов насыщенной наземной и подземной городской инфраструктур, к которым в полной мере можно отнести трубопроводные коммуникации различного назначения, остро встают вопросы оперативного принятия решения и анализа ситуации. В данном случае подспорьем могут выступать автоматизированные комплексы, которые не только ускоряют принятие тех или иных проектных решений, но и являются своеобразным «советчиком» инженера, ответственного за конечный результат соответствующих разработок.

Говоря о морально и физически устаревших (свыше 60% износа) инженерных сетях систем водоснабжения и водоотведения, уже невозможно представить себе отсутствие современных методов проектирования, моделирования, компьютерной обработки научных экспериментов и получения оптимальных решений, позволяющих исследователю (пользователю) и проектировщику найти наиболее правильные пути решения проблем или предложить широкую или узкую гамму специфических технически и экологически приемлемых и наиболее экономичных решений.

Богатый современный строительный рынок периодически предлагает широкий спектр исходных ремонтных материалов для строительства и реновации трубопроводных сетей в виде полимерных труб, бандажей из трубных модулей, тонкослойных отверждаемых на месте защитных покрытий, клеевых составов, органических смол и т. д.,

которые могут рассматриваться специалистами в качестве эффективных внутренних защитных оболочек (облицовок) трубопроводов, локализирующих различного рода дефекты на трубопроводных сетях (например, свищи, трещины, нарушения в стыках и т. д.) и предотвращающих явления инфильтрации грунтовых вод и эксфильтрации транспортирующихся жидкостей в природную среду, вызывающих массовое подтопление территорий.

Перед проектировщиком и эксплуатационным персоналом водоканалов часто встают проблемы выбора наиболее ущербного из числа неудовлетворительно работающих участков трубопроводной сети, а также оптимального метода его восстановления, в том числе с помощью современных бестраншейных технологий реновации трубопроводов и сооружений на сети. К актуальным вопросам следует отнести также определение толщины стенки проектируемых и ресурса эксплуатирующихся в течение нескольких лет (даже десятилетий) трубопроводов не только с точки зрения прочности, но и с учетом окружающей природной и техногенной среды.

Заслуживают внимания и вопросы применения новых ремонтных материалов на трубопроводных сетях, которые на данный момент могут быть недостаточно изученными в плане исследования их реальных гидравлических характеристик и оценки эффективности совместной работы со старыми участками трубопроводных сетей, пока не подвергнутых реновации.

Для многих из перечисленных задач в материалах пособия предоставлена соответствующая трактовка решения.

Материалы учебного пособия могут быть полезны проектировщикам, строителям и эксплуатационному персоналу водоканалов, перед которыми стоят задачи нового строительства трубопроводного транспорта, оперативной реновации и модернизации ветхих подземных трубопроводных коммуникаций, а также оптимизации принимаемых решений на базе гидравлических, прочностных и экономических расчетов.

## ГЛАВА 1

# ВОДОПРОВОДНЫЕ И ВОДООТВОДЯЩИЕ СЕТИ КАК ОБЪЕКТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ

### 1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТРУБАХ И ТРУБОПРОВОДАХ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВОДООТВЕДЕНИЯ

**Т***рубы*, используемые в системах водоснабжения и водоотведения, в зависимости от материала изготовления делятся на металлические (например, стальные, чугунные и т. д.) и неметаллические (железобетонные, керамические, асбестоцементные, пластмассовые и т. д.). Вид материала труб определяет их эксплуатационные характеристики, долговечность, методы монтажа и стоимость. Для рационального выбора материала труб для сетей водоснабжения и водоотведения необходимо руководствоваться конкретными условиями эксплуатации и технико-экономическими расчетами. Для обеспечения надежности и прочности материала труб должны быть определены оптимальные условия эксплуатации по давлению, температуре, характеру транспортируемой среды, а также по условиям прокладки трубопроводов, возможности подвижки грунтов, их коррозионной активности, наличия подземных вод и т. д.

Трубы, соединительные части и арматура должны отвечать требованиям государственных стандартов (ГОСТ), а в случаях отклонения от них — техническим условиям (ТУ).

*Трубопроводы* представляют собой некоторое количество взаимосвязанных, плотно соединенных между собой элементов:

- труб определенного диаметра, длины, толщины стенки, химического состава материала и качества поверхности;
- соединительных (фасонных) частей;
- арматуры, служащей для изменения и регулирования количества транспортируемого вещества;
- сооружений на сети (например, смотровых колодцев на трубопроводных сетях).

Трубопроводы классифицируют как напорные и безнапорные. Напорные трубопроводы транспортируют вещество под определенным давлением (напором), безнапорные — самотеком. Напорные трубопроводы всегда работают полным сечением, а безнапорные — при частичном заполнении живого сечения труб (0,6–0,9). Напорные трубопроводы могут прокладываться с любым уклоном, а самотечные — с определенными уклонами в сторону перемещения транспортируемого вещества. Безнапорный режим течения воды при частичном наполнении, характерный для отвода бытовых сточных вод, обладает рядом преимуществ перед напорным режимом. При транспортировке бытовых сточных вод обеспечивается некоторый резерв в живом сечении трубопровода, необходимый для пропуска расхода больше расчетного, который может наблюдаться в пределах часа с максимальным расходом. Кроме того, через свободную от воды верхнюю часть сечения трубы осуществляется вентиляция всей разветвленной трубопроводной системы. При этом из трубопроводов непрерывно удаляются выделяющиеся из воды газы, которые вызывают коррозию трубопроводов и сооружений на них, осложняют эксплуатацию водоотводящих сетей. И, наконец, при безнапорном режиме движения жидкости улучшаются условия транспортирования с водой нерастворенных примесей и самоочищение трубопроводов от отложений.

На практике встречаются также комбинированные трубопроводы: с самотечными и напорными участками. Примером могут служить водоотводящие коллекторы, пересекающие водные протоки по их дну (дюкеры).

Все трубопроводы должны сооружаться по заранее разработанной технической документации и установленным правилам и обладать надлежащей герметичностью и надежностью. Перед сдачей в эксплуатацию трубопроводы подвергаются испытанию.

Основные материалы для изготовления напорных труб — сталь, чугун, бетон (железобетон), асбестоцемент (хризотилцемент); безнапорных — керамика, чугун, асбестоцемент и др. В последние десятилетия для строительства и реконструкции напорных и безнапорных трубопроводов стали применять полимерные трубы, обладающие рядом преимуществ.

Внутреннее сечение (диаметр) труб, соединительных частей, арматуры и других элементов трубопроводов измеряется в миллиметрах и называется условным проходом  $D_y$ .

Прочность труб и их соединительных частей должна соответствовать условному (номинальному) давлению  $P_y$  транспортируемой среды. Под условным давлением понимается избыточное давление, измеряемое в паскалях (Па) при температуре 293 К (20°C), при котором обеспечивается длительная работа трубопроводов, соединительных частей и арматуры. Численное значение условного давления указывается в ГОСТ на каждый вид изделия.

Обычно рабочая (фактическая) температура транспортируемой среды отличается от 20°C в значительных пределах. Наибольшее давление транспортируемой среды при рабочей температуре, при которой обеспечивается длительная работа арматуры и соединительных частей, называется рабочим давлением  $P_{\text{раб}}$ .

Плотность, а также прочность труб, соединительных частей и арматуры проверяют пробным (испытательным) давлением  $P_{\text{пр}}$ , величина которого больше рабочего давления. Испытания проводят водой при температуре не менее 278 К (5°C) и не более 343 К (70°C). Соотношения между  $P_y$ ,  $P_{\text{раб}}$  и  $P_{\text{пр}}$  для труб, соединительных частей и арматуры из стали, чугуна и бронзы нормируются ГОСТ 356-80. Зная рабочее давление и температуру, можно



для соответствующего материала труб определить условное и пробное давления.

Основными параметрами работы трубопроводов являются *гидравлические, термические и механические*.

К основным гидравлическим параметрам работы трубопроводов относятся: расход ( $Q$ ), скорость течения ( $V$ ) и давление (напор) ( $P$ ). Расход  $Q$  транспортируемого вещества выражается в единицах объема, деленных на единицу времени (например, м<sup>3</sup>/с, м<sup>3</sup>/ч, л/с и т. д.), и измеряется специальными устройствами — водомерами. Скоростью  $V$  вещества, протекающего по трубопроводу, называется путь в метрах, проходимый веществом в секунду (м/с). Скорость (средняя скорость в сечении трубы) равна секундному объему протекающего по трубе продукта (в м<sup>3</sup>), деленному на площадь поперечного (живого) сечения трубы  $\omega$  (в м<sup>2</sup>):

$$V = \frac{Q}{\omega}, \text{ м/с.}$$

В напорных трубопроводах давление измеряется в паскалях, однако на практике для удобства часто используют метр водяного столба (0,01 МПа = 1 м вод. ст.) или технические атмосферы (давление в кг/см<sup>2</sup>), 0,1 МПа = 1 атм. Давление измеряют манометрами. Потеря давления (напора) вызывается сопротивлением, возникающим от трения движущегося вещества о внутреннюю поверхность трубопровода. С возрастанием скорости перемещения вещества увеличиваются потери напора.

В период длительной эксплуатации трубопровода, независимо от материала его изготовления, может произойти изменение гидравлических параметров по причине зарастания внутренней поверхности или ее разъедания.

Зарастание трубопроводов, при котором на внутренней поверхности труб, фасонных частей и арматуры образуются различного рода бугристые отложения, происходит под влиянием коррозии материала, скопления в донной части песка и других случайных примесей, образования на стенках биообрастаний, выпадения минеральных веществ и т. д. Разъедание трубопроводов происходит

в результате воздействия на стенки труб транспортируемого продукта, а также окружающей среды. Поэтому для трубопровода рекомендуется подбирать такой материал, на который транспортируемое вещество не оказывает вредного воздействия. Поддержание требуемой проектом пропускной способности действующих трубопроводов достигается периодической чисткой их внутренней поверхности механическим, гидropневматическим, химическим и др. способами и нанесением защитных покрытий.

Необходимо отметить, что неровность поверхности внутренних стенок трубопроводов определяется степенью ее *шероховатости*, которая может быть отнесена к важнейшим гидравлическим свойствам материалов трубопроводов. Шероховатость в общем и целом оценивается как неровность внутренней поверхности труб в виде выступов, которые могут быть, например, *угловыми* или *волнистыми*. Причиной шероховатости служит степень обработки внутренней поверхности материалов трубопроводов (естественная шероховатость) и появление с течением времени различного рода наростов и каверн в результате воздействия большого числа факторов (приобретенная шероховатость).

Шероховатость измеряется профилометром. Форма и размеры коррозионных отложений на внутренней поверхности труб могут быть весьма разнообразны: каплевидные; шишко-, волно-, лепешко- и сосулькообразные. Размер коррозионных отложений колеблется в широких пределах. Если даже принять, что стенки трубы покрыты совершенно одинаковыми элементами шероховатости, то сопротивление, оказываемое такой стенкой движению жидкости, зависит не только от формы и высоты элементов шероховатости, приходящихся на единицу поверхности, но и от группировки их по поверхности трубы.

Шероховатость вызывает *потери энергии (напора воды)* при движении потока жидкости в трубопроводах независимо от материала их изготовления.

Для описания *напорного режима движения жидкости* существуют понятия *эквивалентной* (или равномерно

зернистой), *относительной*, а для *безнапорного режима* — *приведенной линейной шероховатости*.

Под эквивалентной (равномерно зернистой) ( $k_z$ , мм) шероховатостью понимают такую высоту выступов шероховатости, сложенной из песчинок одинакового размера, которая дает при подсчете одинаковую с заданной шероховатостью величину коэффициента гидравлического трения (или сопротивления по длине трубы)  $\lambda$ .

Под относительной шероховатостью понимается величина  $k_z/d$  (где  $d$  — внутренний диаметр трубопровода, мм). Понятия эквивалентной и относительной шероховатостей в основном относятся к описанию напорных режимов течения жидкости в трубопроводах. Под приведенной линейной шероховатостью понимается величина  $\epsilon$ , мм.

Важнейшей характеристикой потока является *режим движения жидкости* (*турбулентный* — вихревой с большими скоростями или *ламинарный* — параллельно-струйный с малыми скоростями), который определяется безразмерным *числом Рейнольдса*:

$$Re = \frac{vl}{\nu},$$

где  $v$  — характерная скорость потока, м/с;  $l$  — характерный поперечный линейный размер потока, м;  $\nu$  — кинематический коэффициент вязкости,  $\text{с/м}^2$ .

Вязкость жидкости зависит от температуры (например, принимается равной  $\nu = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  при температуре воды  $10^\circ\text{C}$ ).

Число Рейнольдса зависит от шероховатости стенок трубы и формы сечения. На основании опытов в круглых трубах турбулентный режим движения наступает при  $Re > 2300$ , а ламинарный — при меньших значениях числа Рейнольдса.

Сопротивление движению жидкости в *турбулентном* (вихревом) потоке может рассматриваться в следующих основных случаях: *области гидравлически гладких труб*, *переходной области* и *области шероховатых труб*.

*Гидравлически гладкими* трубами принято называть трубы, в которых толщина ламинарной пленки у стенок полностью перекрывает все выступы шероховатости.

*Гидравлически шероховатыми* трубами называются трубы, в которых толщина ламинарного слоя меньше средней высоты выступов шероховатости.

Гладкие трубы имеют гладкую поверхность, а шероховатые — зернистую, бугристую, остроконечную (зубчатую).

Для *гидравлически гладких труб* величина  $\lambda$  является функцией критерия режима движения  $Re$ , а для гидравлически шероховатых труб зависит от относительной шероховатости и не зависит от  $Re$ .

В переходной области на величину  $\lambda$  влияет как шероховатость стенок, так и вязкость жидкости. В системах водоснабжения трубы обычно работают в переходной области и области квадратичной зависимости. Вследствие своей сложности турбулентный поток не поддается теоретическому анализу, и поэтому гидравлический расчет труб производится по эмпирическим формулам.

**Термические параметры** трубопроводов. К ним относится термическое расширение, т. е. величина, на которую удлиняется трубопровод при увеличении или уменьшении температуры окружающей среды. Данный параметр характеризуется величиной коэффициента линейного расширения материала и не зависит от диаметра труб. Коэффициентом линейного расширения называют величину удлинения при нагревании материала на  $1^\circ\text{C}$ , деленную на длину образца. Величины термического расширения для некоторых труб, выполненных из различных материалов, представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1

**Коэффициент термического (линейного) расширения  
труб из различных материалов**

Материал труб	Коэффициент линейного расширения, $\times 10^{-5}$ м/(м·°C)
Сталь	1,15
Чугун	1,04
Полипропилен	18
Винипласт	8
Полиэтилен	22
Сшитый полиэтилен	22

Продолжение табл. 1.1

Материал труб	Коэффициент линейного расширения, $\times 10^{-5}$ м/(м $\cdot$ °С)
Свинец	2,9
Медь	1,6
Стекло	0,1–0,4

Для определения удлинения трубопровода при нагревании коэффициент линейного расширения умножают на расчетную длину трубопровода и значение температурного перепада (разность температур). Например, если требуется определить удлинение ( $K$ ) полиэтиленового трубопровода длиной 100 м, транспортирующего воду при повышении температуры от 10 до 20°С, то расчетная формула будет иметь вид:

$$K = 0,00022 \cdot (20 - 10) \cdot 100 = 0,22, \text{ м.}$$

Возможные термические удлинения (укорочения) на отдельных участках трубопроводов могут ослабить или разрушить некоторые части трубопроводов (в первую очередь, стыковые соединения) и поэтому учитываются при монтаже путем устройства компенсаторов.

**Механические параметры трубопроводов** и материалов для их изготовления: способность сопротивляться внутренним напряжениям, деформациям (изменению формы или размеров) и разрушению под действием внешних нагрузок. К механическим свойствам материалов для изготовления труб относятся: *прочность, пластичность, твердость, вязкость* (ударная), *усталость, ползучесть и истираемость*. Наибольшее значение для надежной и эффективной работы трубопроводов в течение срока эксплуатации имеют такие свойства материалов, как прочность и истираемость.

Под *прочностью* понимается способность материалов трубопровода воспринимать, не разрушаясь, различные виды нагрузок, вызывающих внутренние напряжения и деформации. Деформации, которые исчезают после снятия нагрузки на трубопровод, принимающий при этом первоначальную форму, называют *упругими*, а деформации, которые остаются после снятия нагрузки, называют

*остаточными (пластическими)*. Кроме того, в зависимости от характера действия приложенных к образцу или изделию сил (нагрузок) различают деформации сжатия, растяжения, изгиба, сдвига (среза) и кручения.

Под *истираемостью* понимается устойчивость материала трубопровода к абразивному износу. Испытания на истираемость проводятся на образцах материалов в виде открытого желоба (половины трубы) длиной порядка 1 м, который помещается на специальную установку, работающую по типу качелей (рис. 1.1). На установке имитируется процесс истирания с использованием кварцевого гравия определенного гранулометрического состава (средний размер зерен 6 мм). При этом используемый для испытаний гравий должен быть природным и не бывшим в употреблении. Количество гравия подлежит расчету и должно быть таким, чтобы имитировался процесс истирания стенок трубопровода в реальных условиях эксплуатации. Образец подвергается нагрузке порядка 100–200 тыс. циклов качения после чего на внутренней поверхности желоба специальными стрелочными приборами (цена деления шкалы 0,01 мм) измеряются высоты образовавшихся углублений (царапин)  $a_m$ . Результатом испытания является рассчитанное по данным отдельных измерений максимальное углубление  $a_m$ , полученное после 100–200 тыс. циклов, в сравнении с исходным состоянием поверхности желоба.



Рис. 1.1

Установка по исследованию истираемости трубопровода методом Дармштадта — Киршмера

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)