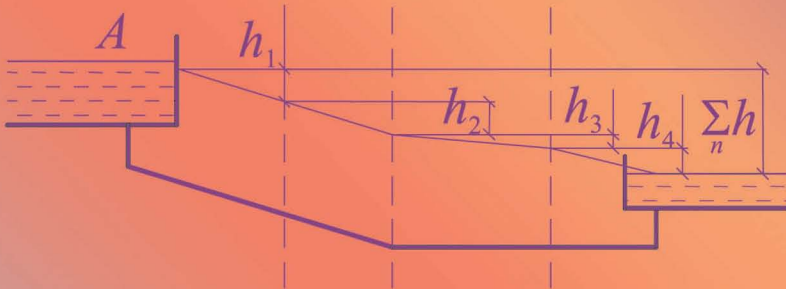


Т.Н. Ильина

# ОСНОВЫ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ИНЖЕНЕРНЫХ СЕТЕЙ



$$H = \frac{8Q^2}{g\pi^2} \left[ \frac{1}{d_1^5} \left( \lambda_1 \frac{\ell_1}{d_1} + \sum \zeta \right) + \frac{1}{d_2^5} \left( \lambda_2 \frac{\ell_2}{d_2} + \sum \zeta \right) + \dots + \frac{1}{d_n^5} \left( \lambda_n \frac{\ell_n}{d_n} + \sum \zeta + 1 \right) \right]$$

**Т.Н. Ильина**

# **ОСНОВЫ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ИНЖЕНЕРНЫХ СЕТЕЙ**

Допущено Министерством образования Российской Федерации  
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных  
заведений, обучающихся по специальностям  
«Теплогазоснабжение и вентиляция»,  
«Водоснабжение и водоотведение»  
направления подготовки дипломированных  
специалистов «Строительство»



Издательство Ассоциации строительных вузов  
Москва 2007

УДК 532.58 (075.8)

ББК 30.123.я7

И64

**Рецензенты:** доктор технических наук, профессор кафедры «Гидравлика» Московского государственного строительного университета *Ляпин В.Ю.*; доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель Российской Федерации, заведующий кафедрой «Технологические комплексы, машины и механизмы» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова *Севостьянов В.С.*

**Ильина Т.Н.**

И64 Основы гидравлического расчета инженерных сетей / Учебное пособие: – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2007. – 192 с., ил.

ISBN 978-5-93093-342-1

В учебном пособии изложены основные положения технической механики жидкости и газа. Освещены законы гидростатики и гидродинамики, рассмотрены виды и расчет гидравлических сопротивлений. Представлена методика гидравлического расчета напорных трубопроводов для капельных и газообразных жидкостей. Изложены зависимости истечения жидкости через отверстия и насадки. В пособии рассмотрены закономерности обтекания твердых тел потоком жидкости и газа, дан расчет гидравлических сопротивлений при относительном движении жидкости и твердого тела. Рассмотрены также основные положения и зависимости при равномерном и неравномерном движении жидкости в потоках со свободной поверхностью. Даны основы моделирования гидроаэродинамических явлений.

Учебное пособие предназначено для студентов строительных специальностей.

Табл. 4, Ил. 75, Библиогр.: 18 назв.

УДК 532.58 (075)

ББК 30.123.я7

ISBN 978-5-93093-342-1

© Издательство АСВ, 2007

© Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (БГТУ), 2007

© Ильина Т.Н., 2007

## ВВЕДЕНИЕ

К инженерным сетям зданий и сооружений относятся сети водоснабжения, водоотведения (канализации), отопления, газоснабжения, вентиляции, кондиционирования и очистки воздуха. Водоснабжение, отопление и газоснабжение основаны на использовании природных ресурсов, запасы которых ограничены, и поэтому требуют к себе экономного хозяйственного отношения. В этой связи очень важна разработка научно обоснованных норм потребления воды, газа, тепла и использование более современного оборудования, обеспечивающего высокий уровень благоустройства жилья и необходимых технологических процессов в промышленности и сельском хозяйстве.

Подбор оборудования инженерных сетей проводится на основании гидравлического расчета трубопроводов различного назначения. Для этого необходимы знания технической гидромеханики (гидравлики), изучающей законы равновесия и движения жидкостей, а также их силовое взаимодействие с твердыми телами.

В технической гидромеханике применяются основные принципы физики и механики, причем полученные выводы согласуются с экспериментальными исследованиями, которые одновременно дополняют и подтверждают эти выводы.

Техническая механика жидкости и газа является одной из основополагающих дисциплин при подготовке инженеров, работающих в области проектирования, строительства и эксплуатации сетей теплогазоснабжения и вентиляции, отопления и водоснабжения.

Ее изучение необходимо для правильного понимания принципов расчета и конструирования трубопроводов, теплообменных и теплоэнергетических аппаратов, отопительных и вентиляционных устройств, водо- и газоочистных аппаратов, котельных агрегатов, печных и сушильных установок и т.п.

## 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

### 1.1. Основные физические свойства жидкости

Основные законы, используемые в гидравлике, те же, что и в механике твердых тел. Однако применение их отличается некоторыми особенностями вследствие различия свойств жидкости и твердых тел.

*Жидкостью* называется агрегатное состояние вещества, сочетающее в себе черты твердого состояния и газообразного. Как и кристаллические тела, жидкости имеют определенный объем, но форма этого объема легко изменяется под действием внешних сил. Жидкости отличаются от твердых тел легкой подвижностью частиц, т.е. текучестью.

По своим механическим свойствам жидкости разделяются на два класса: малосжимаемые (капельные) и сжимаемые (газообразные). Капельные жидкости обладают большим сопротивлением сжатию и совершенно малым сопротивлением растягивающим и касательным усилиям. Капельные жидкости обладают вполне определенным объемом, который практически не изменяется под действием сил. Газы, занимая все предоставленное им пространство, могут значительно изменять объем, сжимаясь или расширяясь под действием сил, т.е. газы легко изменяют как объем, так и форму.

К основным физическим параметрам жидкости относятся: плотность и удельный вес, сжимаемость и температурное расширение, вязкость и поверхностное натяжение.

*Плотностью*  $\rho$  называется масса жидкости, заключенная в единице объема, кг/м<sup>3</sup>:

$$\rho = \frac{m}{W}, \quad (1.1)$$

где  $W$  – объем, м<sup>3</sup>;  $m$  – масса жидкости, кг.

Удельный вес  $\gamma$  – вес единицы объема жидкости, Н/м<sup>3</sup>:

$$\gamma = \frac{G}{W}; \quad (1.2)$$

$$\gamma = \frac{G}{W} = \frac{mg}{W} = \rho g; \quad (1.3)$$

$$\rho = \frac{\gamma}{g}. \quad (1.4)$$

При нагревании жидкость расширяется. Для характеристики расширения вводят *коэффициент температурного расширения*, град<sup>-1</sup>:

$$\beta_t = \frac{1}{W} \cdot \frac{\Delta W}{\Delta t}, \quad (1.5)$$

где  $W$  – первоначальный объем;  $\Delta W$  – изменение объема при изменении температуры  $\Delta t$ , °С.

*Коэффициент сжатия* характеризует свойство жидкости изменять свой объем под действием давления, Па<sup>-1</sup>:

$$\beta_{сж} = \frac{1}{W} \cdot \frac{\Delta W}{\Delta P}, \quad (1.6)$$

где  $\Delta P$  – изменение давления, вызывающее изменение объема  $\Delta W$ .

*Модуль упругости* – величина, обратная коэффициенту сжатия, Па:

$$E_o = \frac{1}{\beta_{сж}}. \quad (1.7)$$

Капельная жидкость отличается от газообразной:  
для капельной жидкости

$$c_t = c_o \frac{1}{1 + \nu_t (t - t_0)}; \quad (1.8)$$

для газообразной жидкости

$$c = \frac{P}{RT}, \quad (1.9)$$

где  $P$  – абсолютное давление, Па;  $R$  – удельная газовая постоянная, Дж/кг·К:

$$R = \frac{\bar{R}}{MM} = \frac{8314}{MM}, \quad (1.10)$$

где  $MM$  – молекулярная масса газа;  $\bar{R}$  – универсальная газовая постоянная, Дж/кмоль·К.

В технических расчетах плотность газа обычно приводят к нормальным условиям ( $P_0 = 101325$  Па;  $T_0 = 273$  К). При других условиях плотность газа определяется по формуле

$$c = c_0 \frac{PT_0}{P_0T}, \quad (1.11)$$

где  $c_0$  – плотность газа при н.у., кг/м<sup>3</sup> (для воздуха  $c_0 = 1,29$  кг/м<sup>3</sup>).

*Вязкость* – свойство жидкостей оказывать сопротивление сдвигу. Все реальные жидкости обладают вязкостью, которая проявляется в виде трения при относительном перемещении частиц (рис. 1.1).

Касательное напряжение между слоями определяется по уравнению, представляющему закон трения Ньютона:

$$\phi = m \frac{dU}{dy}, \quad (1.12)$$

где  $\frac{dU}{dy}$  – градиент скорости сдвига, с<sup>-1</sup>;  $m$  – динамическая вязкость, Па·с:

$$m = \frac{\phi}{dU/dy}.$$

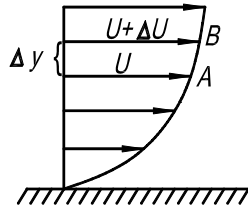


Рис. 1.1. Распределение скоростей при течении жидкости вдоль плоской стенки:

$\Delta U$  – абсолютное приращение скорости;

$\Delta y$  – расстояние между слоями

Сила внутреннего трения в жидкости прямо пропорциональна градиенту скорости, площади трущихся слоев, динамической вязкости, в

то время как в твердых телах сила трения зависит от нормального давления и не зависит от площади трущихся поверхностей.

Наряду с понятием абсолютной или динамической вязкости, в гидравлике находит применение понятие *кинематической вязкости*  $\nu$ , представляющей собой отношение динамической вязкости к ее плотности

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \quad (1.13)$$

кинематическая вязкость измеряется, в квадратных метрах на секунду или стоксах ( $1 \text{ Ст} = 1 \text{ см}^2/\text{с} = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ ).

Вязкость капельных жидкостей с увеличением температуры уменьшается. Вязкость газа с повышением температуры увеличивается и может быть определена по уравнению

$$\mu = \mu_0 \frac{273 + C}{T + C} \cdot \left( \frac{T}{273} \right)^{3/2}, \quad (1.14)$$

где  $\mu_0$  – вязкость газа при н.у.;  $C$  – константа Сюзерленда (для воздуха  $C = 124$ ,  $\mu_0 = 17,3 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$ ).

Для чистой пресной воды зависимость динамической вязкости от температуры определяется по формуле Пуазейля:

$$\mu = \frac{0,00179}{1 + 0,0368t + 0,000221t^2}. \quad (1.15)$$

С увеличением температуры от 0 до  $100^\circ\text{C}$  вязкость воды уменьшается почти в 7 раз. При температуре  $20^\circ\text{C}$  динамическая вязкость воды равна  $0,001 \text{ Па}\cdot\text{с}$  или  $0,01 \text{ П}$  (пуаз).

Вода принадлежит к наименее вязким жидкостям. Лишь немногие из практически используемых жидкостей (например, эфир и спирт) обладают несколько меньшей вязкостью, чем вода. Наименьшую вязкость имеет жидкая углекислота (в 50 раз меньше вязкости воды). Все жидкие масла обладают значительно более высокой вязкостью, чем вода (касторовое масло при температуре  $20^\circ\text{C}$  имеет вязкость в 1000 раз большую, чем вода при той же температуре). В табл. 1.1 приведены значения вязкости некоторых жидкостей.

*Поверхностное натяжение жидкостей.* Молекулы жидкости, расположенные на границе раздела фаз, находятся в условиях, отличных от условий нахождения молекул внутри жидкости. Внутри объема жидкости молекулы окружены со всех сторон такими же молекулами,

на поверхности – лишь с одной стороны. Поэтому энергия поверхностных молекул отличается от энергии молекул внутри жидкости на величину, называемую *поверхностной энергией*

$$\mathcal{E} = \gamma \cdot S, \quad (1.16)$$

где  $\gamma$  – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м.

Таблица 1.1

**Динамическая и кинематическая вязкости капельных жидкостей**

Жидкость	$\text{м} \cdot 10^3, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\text{н} \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$
Вода пресная ( $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ )	1,01	0,1012
Глицерин безводный ( $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ )	512	410
Керосин ( $t = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ )	1,6 – 2,5	2 – 3
Бензин ( $t = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ )	0,6 – 0,65	0,83 – 0,93
Масло ( $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ): касторовое минеральное	972 27,5 – 1290	10,02 0,313 – 14,5
Нефть ( $t = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ , $\delta = 0,86$ )	7 – 8	8,1 – 9,3
Ртуть ( $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ )	1,5	0,111
Спирт этиловый безводный ( $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ )	1,19	1,51

В зависимости от величин коэффициентов поверхностного натяжения на границе раздела фаз существуют смачивающие ( $\theta = 0 \dots 90^\circ$ ) и не смачивающие ( $\theta > 90^\circ$ ) жидкости (рис. 1.2).

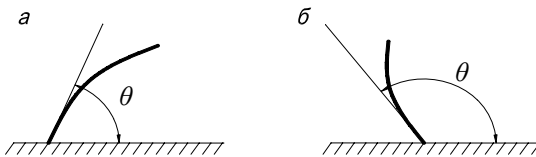


Рис. 1.2. К определению краевого угла:  $a$  – и  $0 \dots 90^\circ$ ;  $b$  – и  $> 90^\circ$

Поверхностное натяжение зависит от химической природы жидкости и температуры, уменьшаясь с увеличением температуры:

$$\gamma_t = \gamma_{t_0} - v(t - t_0) \quad (1.17)$$

при  $t = 0^\circ$ ,  $v$  – коэффициент пропорциональности.



От явления смачивания зависит поведение жидкости в тонких (капиллярных) трубках, погруженных в жидкость. При смачивании жидкость в трубке поднимается над уровнем свободной поверхности, при не смачивании – опускается. Высота капиллярного поднятия (опускания) жидкости  $h_n$  находится по формуле

$$h_n = \frac{2\gamma}{cgr} \cos i = \frac{4\gamma \cos i}{cgd}. \quad (1.18)$$

Влияние сил поверхностного натяжения приходится учитывать при работе с жидкостными приборами для измерения давления, при истечении жидкости из малых отверстий, при фильтрации, образовании капель и в других случаях, когда прочие силы, действующие на жидкость (вес, давление), малы.

## 1.2. Аномальные жидкости

Жидкости, движение которых не подчиняется закону Ньютона, называются *аномальными*, или *неньютоновскими*. К аномальным жидкостям можно отнести, например, строительный и глинистый растворы, нефтепродукты при температуре, близкой к температуре застывания, коллоидные растворы и др.

Чтобы привести такие жидкости в движение, необходимо приложить некоторое усилие. Движение неньютоновских жидкостей начинается только после того, как касательные напряжения в них достигнут некоторого предельного значения: при меньших касательных напряжениях эти жидкости не текут, а испытывают только упругие деформации, как твердые тела. В аномальных жидкостях касательное напряжение определяется по формуле Бингама

$$\phi = \phi_0 + m^* \frac{dU}{dy}, \quad (1.19)$$

где  $\phi_0$  – начальное напряжение сдвига;  $m^*$  – пластическая вязкость.

Таким образом, в аномальных жидкостях сила трения возникает еще в покоящихся, но уже стремящихся прийти в движение жидкостях. Кривые течения различных жидкостей показаны на рис. 1.3.

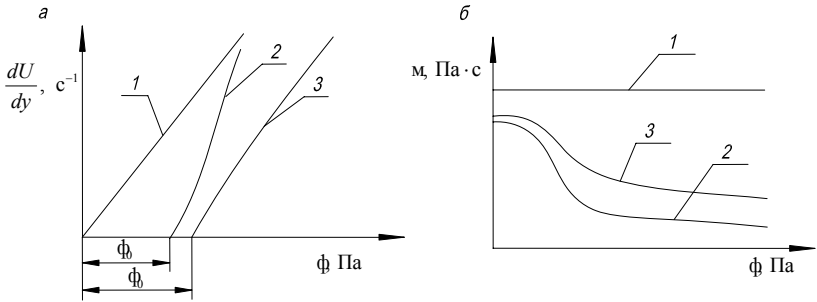


Рис. 1.3. Кривые течения различных жидкостей: *a* – зависимость градиента скорости сдвига от касательного напряжения; *б* – зависимость вязкости от касательного напряжения (1 – ньютоновская жидкость; 2, 3 – аномальные жидкости)

Вязкость аномальных жидкостей (так называемая структурная вязкость), при заданных температуре и давлении, непостоянная и изменяется в зависимости от градиента скорости  $\frac{dU}{dy}$  по мере разрушения структуры жидкости, а следовательно, не является физической константой, как вязкость нормальных жидкостей.

### 1.3. Невязкая (идеальная) жидкость

В механике жидкости для облегчения решения некоторых задач используется понятие о невязкой (совершенной) жидкости.

Под *невязкой жидкостью* понимают воображаемую жидкость, обладающую абсолютной подвижностью, т.е. лишенную вязкости, а также абсолютно несжимаемую, не расширяющуюся с изменением температуры, абсолютно неспособную сопротивляться разрыву. Таким образом, невязкая жидкость представляет собой некоторую модель реальной жидкости. Выводы, полученные исходя из свойств невязкой жидкости, приходится, как правило, корректировать, вводя поправочные коэффициенты.

## 2. ГИДРОСТАТИКА

Гидростатика – это раздел гидравлики, в котором изучают законы равновесия жидкости, находящейся под действием внешних и внутренних сил, и условия равновесия тел, погруженных в жидкость. В гидростатике изучается равновесие жидкостей, находящихся в состоянии относительного покоя, при котором в движущейся жидкости ее частицы не перемещаются относительно друг друга. При этом силы внутреннего трения отсутствуют, что позволяет считать жидкость идеальной.

В состоянии относительного покоя форма объема жидкости не изменяется, и она, подобно твердому телу, перемещается как единое целое. Так, жидкость находится в относительном покое в перемещающемся сосуде (например, в цистерне), внутри вращающегося с постоянной угловой скоростью барабана центрифуги и т.д. В подобных случаях покой рассматривают относительно стенок движущегося сосуда.

Жидкость в неподвижном сосуде находится в абсолютном покое (относительно поверхности земли), который в таком понимании является частным случаем относительного покоя. Независимо от вида покоя на жидкость действуют силы тяжести и давления.

### 2.1. Гидростатическое давление и его свойства

В покоящихся жидкости и газе касательные напряжения в любой произвольной точке равны нулю и напряженное состояние определяется совокупным действием только нормальных напряжений, равных между собой ( $y_x = y_y = y_z = y$ ). Очевидно, что напряжения  $y_x, y_y, y_z$  и  $y$  являются сжимающими, так как жидкости и газы не сопротивляются растягивающим усилиям.

Основным понятием гидростатики является понятие гидростатического давления. Величина, равная модулю напряжения  $y$ , в гидромеханике называется *гидростатическим давлением* в точке и обозначается буквой  $P$  (Па). Размерность давления равна размерности силы, деленной на площадь, и совпадает с размерностью напряжения  $P = [y] = \text{Н/м}^2 = \text{Па}$ .

Гидростатическое давление обладает двумя основными свойствами.

1. *Гидростатическое давление всегда действует нормально к площадке и является сжимающим, т.е. оно направлено по нормали внутрь рассматриваемого объема жидкости.*

Рассечем объем жидкости поверхностью  $AB$  на два отсека I и II (рис. 2.1). Очевидно, что отсек I будет с некоторой силой давить на поверхность  $AB$  отсека II. С силой той же величины, но обратной по на-

правлению, отсек II будет давить на поверхность  $AB$  отсека I. Отбросим отсек I, заменив его действие силой. Наметим на поверхности  $AB$  несколько точек ( $a, b, c$ ) и выделим у этих точек на поверхности  $AB$  площадки  $\delta S$ . Проведем к этим площадкам нормали  $N'-N''$ .

Примем метод доказательства от противного. Предположим, что в точке  $a$  да-

вление  $P$  действует не по нормали  $N'-N''$ . При этом давление  $P$  можно разложить на две составляющие: нормальную к площадке действия  $P_n$  и касательную  $P_\tau$ . Однако в покоящейся жидкости касательных напряжений ( $P_\tau$ ) быть не может. Отсюда заключаем, что предположение о несовпадении  $P$  с нормалью неверно.

Предположим теперь, что в точке  $b$  давление действует по нормали, но направлено наружу рассматриваемого объема. При этом в данной точке получается растягивающее усилие, чего в обычных условиях также не может быть. Таким образом, остается только одна возможность, которая и отмечена выше как первое свойство гидростатического давления.

*2. Гидростатическое давление  $P$  в любой точке внутри жидкости по всем направлениям одинаково, т.е. не зависит от угла наклона площадки, на которую оно действует.*

В объеме покоящейся жидкости около точки  $M$  выделим бесконечно малую призму (рис. 2.2). Боковые грани призмы параллельны свободной поверхности жидкости. Один из торцов призмы перпендикулярен к боковым граням, другой наклонен под углом  $\alpha$ .

Средние гидростатические давления на торцы грани обозначим  $P$  и  $P_1$  соответственно. Сумма проекций всех сил, действующих на призму, вдоль горизонтальной оси из условия равновесия равна нулю, т.е.

$$P \cdot \delta S - P_1 \delta S_1 \cos \alpha. \quad (2.1)$$

Так как  $\delta S_1 \cos \alpha = \delta S$ , то

$$P - P_1 = 0 \text{ или } P = P_1.$$

При уменьшении размеров призмы до нуля ( $\delta F \rightarrow 0$ ) давление  $P = P_1$ , будет ни чем иным, как гидро-

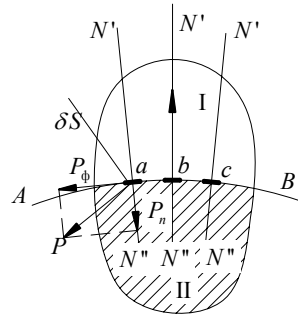


Рис. 2.1. К определению направления действия гидростатического давления

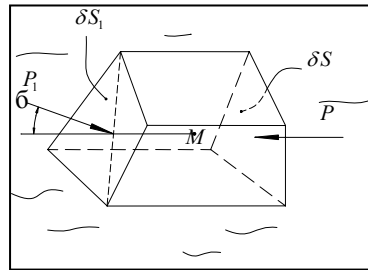


Рис. 2.2. К установлению независимости величины  $P$  от ориентации площадки действия

статическим давлением в точке  $M$ , т.е.  $P_M$ .

Единичное давление в точке по всем направлениям одинаково и не зависит от угла наклона площадки. В проекциях на координатные оси можно записать  $P_x = P_y = P_z = P_n$ .

Так как положение точке  $M$  выбрано произвольно, можно заключить, что гидростатическое давление является непрерывной функцией координат пространства:

$$P = f(x, y, z). \quad (2.2)$$

## 2.2. Дифференциальные уравнения равновесия жидкости (уравнения Эйлера)

На жидкость в состоянии покоя действуют силы, определяемые гидростатическим давлением, а также массовые силы, пропорциональные его массе. Соотношение между этими силами выражается системой дифференциальных уравнений, полученных Эйлером в 1755 г.

$$\left. \begin{aligned} x - \frac{1}{c} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} &= 0, \\ y - \frac{1}{c} \cdot \frac{\partial P}{\partial y} &= 0, \\ z - \frac{1}{c} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

где  $x, y, z$  – проекции ускорения массовых сил на соответствующие оси.

Умножим каждое уравнение (2.3) соответственно на  $dx$ ,  $dy$  и  $dz$  и сложим их:

$$x dx + y dy + z dz - \frac{1}{c} \left( \frac{\partial P}{\partial x} dx + \frac{\partial P}{\partial y} dy + \frac{\partial P}{\partial z} dz \right) = 0$$

или

$$\frac{\partial P}{\partial x} dx + \frac{\partial P}{\partial y} dy + \frac{\partial P}{\partial z} dz = c(x dx + y dy + z dz). \quad (2.4)$$

Давление является функцией только трех независимых переменных координат  $x, y$  и  $z$ , поэтому левая часть уравнения (2.4) представляет собой полный дифференциал функции  $P = f(x, y, z)$ .

Следовательно,

$$dP = c(x dx + y dy + z dz). \quad (2.5)$$

Учебное пособие

Татьяна Николаевна **Ильина**

## **ОСНОВЫ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ИНЖЕНЕРНЫХ СЕТЕЙ**

*Оригинал-макет подготовлен РИО Белгородского государственного  
технологического университета им. В.Г. Шухова*

Редактор: *В.И. Пустовая*

Дизайн обложки: *Н.С. Кузнецова*

Лицензия ЛР № 0716188 от 01.04.98. Сдано в набор 16.09.04.

Подписано к печати 16.02.05. Формат 60x84/16.

Гарнитура Таймс. Печать офсетная. Бумага газетная.

Усл. 12 п. л. Заказ № . Тираж 1000 экз. П завод

Издательство Ассоциации строительных вузов (АСВ)  
129337, Москва, Ярославское шоссе, 26, отдел реализации – оф. 511  
тел., факс: (495)183-56-83, e-mail: [iasv@mgsu.ru](mailto:iasv@mgsu.ru), <http://www.iasv.ru/>