

Федеральное агентство по образованию
ГОУ ВПО «Сибирская государственная
автомобильно-дорожная академия
(СибАДИ)»

В.И. Сологаев

ГИДРАВЛИКА
(МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА)

Учебное пособие

Омск
Издательство СибАДИ
2010

УДК 532+533
ББК 24.62
С 60

Рецензенты:

д-р геогр. наук, профессор И.В. Карнацевич
(Омский государственный педагогический университет),
канд. техн. наук, доцент Б.А. Калашников
(Омский государственный технический университет)

Работа одобрена редакционно-издательским советом академии в качестве учебного пособия для студентов строительных специальностей.

Сологаев Валерий Иванович.

Сологаев В.И. Гидравлика (механика жидкости и газа): Учебное пособие. — Омск: Изд-во СибАДИ, 2010. — 64 с.
ISBN 5-230-15352-0

Учебное пособие является вспомогательным материалом при изучении основ гидравлики. Оно может служить первоначальным ориентиром для студента-строителя при знакомстве с этой дисциплиной. В нём отражены главные положения и закономерности механики жидкости и газа, необходимые специалистам по строительству. Материал иллюстрируется примерами, наиболее характерными для строительной практики.

Табл. 3. Ил. 32.

ISBN 5-230-15352-0

© Сологаев В.И., 2010
© ГОУ «СибАДИ», 2010

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Что такое механика жидкости и газа	5
Как пользоваться учебным пособием	5
Что скачать из Интернета	6
ГИДРАВЛИКА (МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ)	8
Физические свойства жидкости	8
Плотность	8
Удельный вес	8
Вязкость	9
Гидростатика	9
Гидростатическое давление	9
Основное уравнение гидростатики	10
Приборы для измерения давления	11
Эпюры давления жидкости	13
Законы Архимеда и Паскаля	14
Гидростатический напор	15
Гидродинамика	16
Словарь гидравлических терминов	16
Уравнение неразрывности потока	18
Гидродинамический напор	19
Уравнение Бернулли для жидкости	20
Разность напоров и потери напора	21
Напорная и пьезометрическая линии	22
Связь давления и скорости в потоке	23
Режимы движения жидкости	25
Расчёт напорных потоков	26
Гидравлический удар	28
Гидравлика отверстий и насадков	29
Расчёт безнапорных потоков	30
Теория фильтрация	32
Определения, термины и закономерности	32
Фильтрационные расчёты	35

АЭРОДИНАМИКА (МЕХАНИКА ГАЗА)	40
Физические свойства газов	40
Плотность	40
Удельный вес	41
Вязкость	41
Статика газа	41
Статическое давление	41
Приборы для измерения давления	42
Эпюры давления	43
Приведённое статическое давление	45
Динамика газа	46
Словарь аэродинамических терминов	46
Уравнение неразрывности потока	47
Приведённое полное давление	47
Уравнение Бернулли для газа	48
Разность давлений и потери давления	49
Режимы движения газа	49
Аэродинамика инженерных сетей	50
Расчёт систем с естественной тягой	51
Расчёт систем с естественной циркуляцией	52
Архитектурно-строительная аэродинамика	54
Фильтрация газа	56
Список контрольных вопросов	57
Буквенные обозначения с указателем	60
Справочные данные	62
Алфавитно-предметный указатель	63

ВВЕДЕНИЕ

Что такое гидравлика

Гидравлика (механика жидкости и газа) — это наука, изучающая закономерности покоя и движения жидкостей и газов. Студенты по направлению строительства изучают те её закономерности, которые имеют практическое значение в области строительства.

Термин «механика жидкости и газа» имеет синонимы «гидравлика и аэродинамика». В этом случае гидравлика обычно понимается как механика жидкости, а аэродинамика — как механика газа.

«Гидро...» подразумевает воду, в общем случае — жидкость. «Аэро...» — воздух, в общем случае — газ. В строительстве чаще всего основные расчёты, касающиеся жидкости и газа, связаны с водой и воздухом.

В учебном процессе курс гидравлики является теоретической основой комплекса дисциплин по инженерным сетям и оборудованию зданий и сооружений (водопровод, канализация, отопление, вентиляция), используется при расчётах строительных конструкций на воздействие воды и ветра, для выбора строительного водоотлива и водопонижения в траншеях, котлованах и подземных проходках при наличии подземных вод.

Как пользоваться учебным пособием

Прежде всего, надо просмотреть его целиком, а затем внимательно прочитать от начала до конца. В конце книги имеются вспомогательные разделы:

- список контрольных вопросов экзамена-зачёта (с. 57).
- буквенные обозначения с указателем (с. 60);
- справочные данные (с. 62).
- алфавитно-предметный указатель (с. 63).

Следует отметить, что учебное пособие является лишь вспомогательным материалом. Оно не может заменить учебник — объём его ограничен. Не вмещает оно и полного текста лекций. Цель данного учебного пособия — кратким телеграфным стилем выделить основные положения механики жидкости и газа, которые в первую очередь необходимо знать для практической деятельности специалистам по строительству.

Что скачать из Интернета

Закон об образовании России дает право преподавателю вуза внедрять личную методику преподавания. Это открывает широкие творческие возможности в развитии отечественного образования. Наибольший простор для творческой свободы предоставляет направление развития образования в виде дистанционного.

В данном учебном пособии представлена оригинальная методика применения современных компьютерных технологий для развития дистанционного образования, применяющая программирование для Интернета, персональных компьютеров и мобильных телефонов.

На рис. 1 показан учебный сайт автора, Интернет-адрес которого

<http://sologaev2010.narod.ru>

Все материалы сайта являются свободно распространяемыми. Они могут быть свободно использованы студентами, аспирантами и преподавателями в учебных целях. Сайт открыт в 2003 году и постоянно работает.

Электронные экзамены и зачёты разработаны с помощью языка программирования Visual Basic. Это позволило получить размер исполняемых файлов всего 30...40 килобайт!

Они запускаются под всеми распространёнными операционными системами Windows 98/Me/NT4/2000/XP/Vista/7, а также свободно распространяемыми Linux и FreeBSD. Для Vista, Linux и FreeBSD на сайте размещена дополнительная библиотека.

Электронные экзамены и зачеты для мобильных телефонов (см. рис. 1) разработаны на языке Java. Поэтому они запускаются на подавляющем большинстве телефонов. Мобильный формат экзаменов и зачетов повышает удобство подготовки.

Деловая игра «Миллионер-гидравлик» размещена на сайте в виде SWF-файлов, имеет базу вопросов экзамена-зачёта. Её можно запускать на персональных компьютерах и мобильных телефонах.

Рекомендуется скачать с сайта (см. рис. 1):

- экзамен-зачёт «Гидравлика» для персонального компьютера;
- экзамен-зачёт «Гидравлика» для мобильного телефона;
- деловую игру «Миллионер-гидравлик»;
- учебное пособие «Гидравлика»;
- учебное пособие «Задачи по гидравлике»;
- контрольные задания по гидравлике (для заочников).
- расписание ближайших консультаций Сологаева В.И.

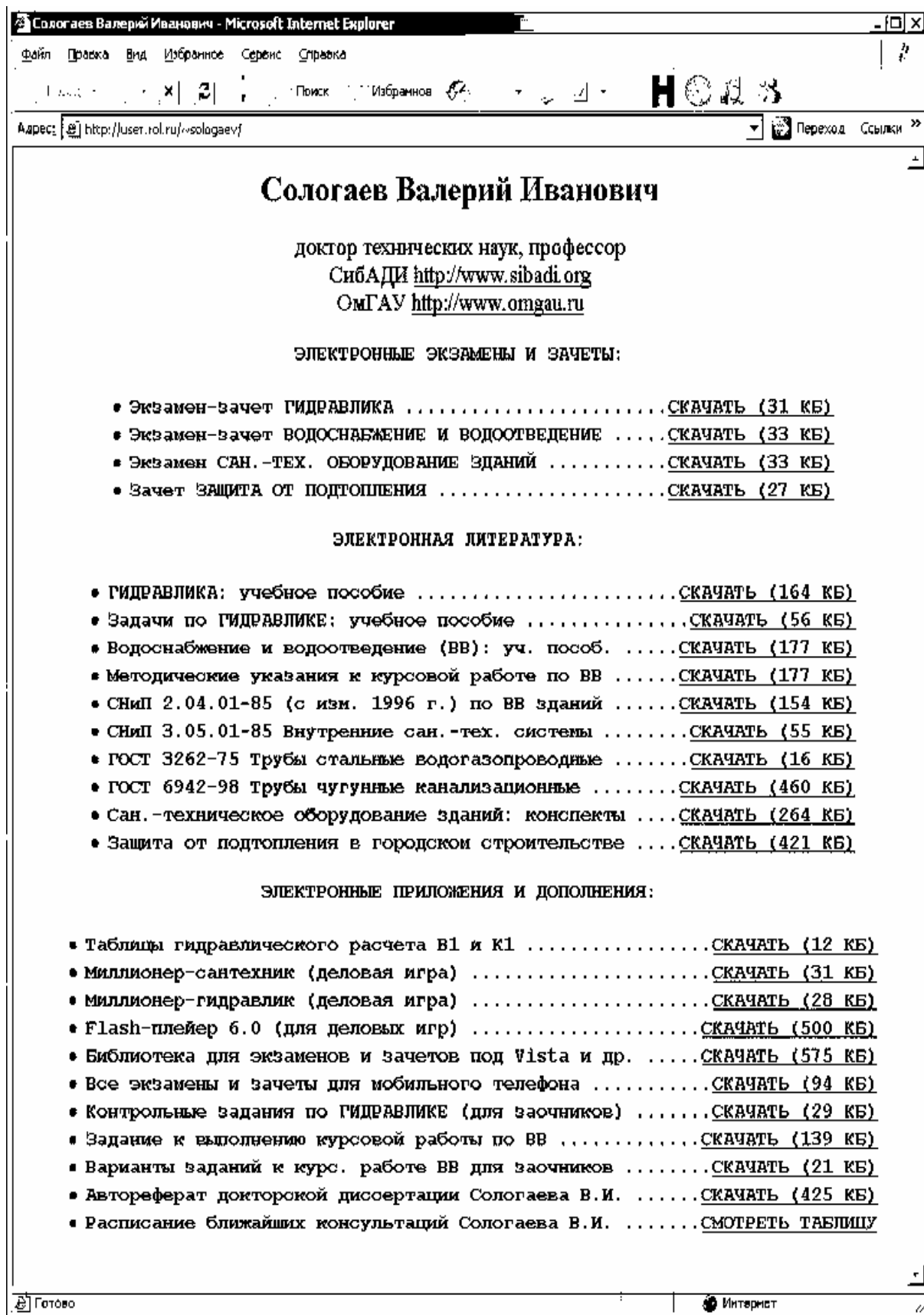


Рис. 1. Учебный сайт <http://sologaev2010.narod.ru>

ГИДРАВЛИКА (МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ)

Гидравликой (в узком смысле) называется раздел механики жидкости и газа, изучающий закономерности покоя и движения только жидкостей. Гидравлика — это наука приближённая, во многом экспериментальная, но точность её формул при расчётах вполне достаточна для инженерной практики.

Физические свойства жидкости

Для практических задач гидравлики в области строительства имеют значение три физических свойства жидкости: плотность, удельный вес, вязкость. Рассмотрим их.

Плотность

Плотность ρ — это масса единицы объёма жидкости ($\text{кг}/\text{м}^3$)

$$\rho = m / V_0, \quad (1)$$

где m — масса жидкости, кг ; V_0 — объём жидкости, м^3 .

Плотность воды при температуре $+4^\circ\text{C}$ минимальная и равна $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$. Другие значения плотности воды в зависимости от температуры можно найти в справочных данных на с. 62. Легко заметить, что плотность воды зависит от температуры незначительно. В большинстве гидравлических расчётов свойствами сжимаемости и температурного расширения жидкостей пренебрегают. Например, для воды считают плотность постоянной и равной $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Удельный вес

Удельный вес γ — это вес единицы объёма жидкости ($\text{Н}/\text{м}^3$)

$$\gamma = G / V_0, \quad (2)$$

где G — вес жидкости (сила тяжести), Н ; V_0 — объём жидкости, м^3 .

Связаны удельный вес и плотность через ускорение свободного падения ($g = 9,81 \approx 10 \text{ м}/\text{с}^2$) так:

$$\gamma = \rho g. \quad (3)$$

Вязкость

Вязкость — это свойство жидкости проявлять внутреннее трение при её движении, обусловленное сопротивлением взаимному сдвигу её частиц. В покоящейся жидкости вязкость не проявляется. Количественно вязкость может быть выражена в виде динамической или кинематической вязкости, которые легко переводятся одна в другую.

Вязкость динамическая μ измеряется в $\text{Па}\cdot\text{с}$.

Вязкость кинематическая ν ($\text{м}^2/\text{с}$) связана с динамической так:

$$\nu = \mu / \rho. \quad (4)$$

Справочные данные по вязкости воды в зависимости от температуры можно найти на с. 62. Зависимость уже более существенная, в отличие от плотности. Для всех жидкостей характерно, что зависимость вязкости от температуры обратная и нелинейная.

Гидростатика

Гидростатика — это раздел гидравлики (механики жидкости), изучающий покоящиеся жидкости. Она изучает законы равновесия жидкости и распределения в ней давления. Основные величины, используемые в гидростатике, — это давление p и напор H . Рассмотрим их.

Гидростатическое давление

Гидростатическое давление p — это скалярная величина, характеризующая напряжённое состояние жидкости. Давление равно модулю нормального напряжения в точке:

$$p = |\sigma|.$$

Давление в системе СИ измеряется в паскалях: $\text{Па} = \text{Н} / \text{м}^2$.

Связь единиц давления в различных системах измерения такая:

$$100000 \text{ Па} = 0,1 \text{ МПа} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 1 \text{ ат} = 10 \text{ м вод. ст.}$$

Два свойства гидростатического давления:

1. Давление в покоящейся жидкости на контакте с твёрдым телом вызывает напряжения, направленные перпендикулярно к поверхности раздела.

2. Давление в любой точке жидкости действует одинаково по всем направлениям. Это свойство отражает скалярность давления.

Основное уравнение гидростатики

Основное уравнение гидростатики гласит, что полное давление в жидкости p равно сумме внешнего давления на жидкость p_0 и давления веса столба жидкости $p_{жс}$, то есть

$$p = p_0 + p_{жс} = p_0 + \gamma h, \quad (5)$$

где h — высота столба жидкости над точкой (глубина её погружения), в которой определяется давление (рис. 2). Из уравнения следует, что давление в жидкости p увеличивается с глубиной h и зависимость является линейной.

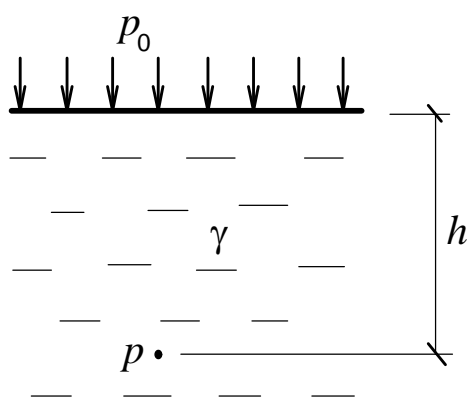


Рис. 2. Схема к основному уравнению гидростатики

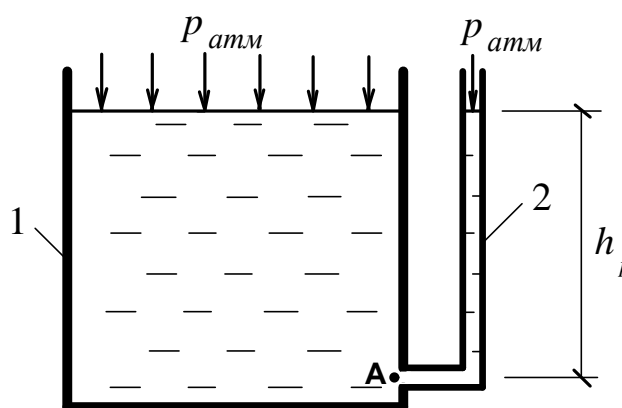


Рис. 3. Измерение давления:
1 - открытый резервуар;
2 - пьезометр

В частном случае для открытых резервуаров и водоёмов, сообщающихся с атмосферой (рис. 3), внешнее давление на жидкость равно атмосферному давлению $p_0 = p_{атм} = 101325 \text{ Па} \approx 1 \text{ ат}$. Тогда основное уравнение гидростатики принимает вид

$$p = p_{атм} + \gamma h_p. \quad (6)$$

где h_p — пьезометрическая высота.

Избыточное давление (манометрическое) $p_{изб}$ есть разность между полным и атмосферным давлением. Из последнего уравнения получаем, что для открытых резервуаров избыточное давление равно давлению столба жидкости

$$p_{изб} = p_{ман} = p - p_{атм} = \gamma h_p. \quad (7)$$

Приборы для измерения давления

Давление в жидкости измеряется приборами:

- пьезометрами,
- манометрами,
- вакуумметрами.

Пьезометры и манометры измеряют избыточное или манометрическое давление, то есть они работают, если полное давление в жидкости превышает величину, равную одной атмосфере $p_{атм} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 0,1 \text{ МПа}$. Эти приборы показывают долю давления сверх атмосферного. Для измерения в жидкости полного давления p необходимо к манометрическому давлению $p_{ман}$ прибавить атмосферное давление $p_{атм}$, снятое с барометра. Часто в гидравлике атмосферное давление считается величиной постоянной $p_{атм} = 101325 \approx 100000 \text{ Па}$.

Пьезометр обычно представляет собой вертикальную стеклянную трубку, нижняя часть которой сообщается с исследуемой точкой в жидкости, где нужно измерить давление (например, точка А на рис. 3), а верхняя её часть открыта в атмосферу. Высота столба жидкости в пьезометре h_p является показанием этого прибора и позволяет измерять избыточное (манометрическое) давление в точке по соотношению

$$p_{изб} = \gamma h_p . \quad (8)$$

где h_p — пьезометрический напор (высота), м.

Упомянутые пьезометры применяются главным образом для лабораторных исследований. Их верхний предел измерения ограничен высотой до 5 м, однако их преимущество перед манометрами состоит в непосредственном измерении давления с помощью пьезометрической высоты столба жидкости без промежуточных передаточных механизмов.

В качестве пьезометра может быть использован любой колодец, котлован, скважина с водой или даже любой замер глубины воды в открытом резервуаре, так как он даёт нам величину h_p .

Манометры (рис. 4) чаще всего применяются механические, реже — жидкостные. Все манометры измеряют не полное давление, а избыточное

$$p_{ман} = p_{изб} = p - p_{атм} . \quad (9)$$

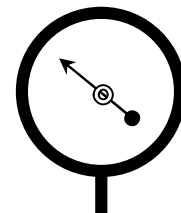


Рис. 4. Манометр

Преимуществами манометров перед пьезометрами являются более широкие пределы измерения, однако есть и недостаток: они требуют контроля их показаний. Манометры, выпускаемые в последнее время, градуируются в единицах СИ: *МПа* или *кПа* (см. с. 56). Однако всё ещё продолжают применяться и старые манометры со шкалой в *кгс/см²*, они удобны тем, что эта единица равна одной атмосфере (см. с. 9). Нулевое показание любого манометра соответствует полному давлению p , равному одной атмосфере.

Вакуумметр по своему внешнему виду напоминает манометр (см. рис. 4). Показывает он ту долю давления, которая дополняет полное давление в жидкости до величины одной атмосферы. Вакуум в жидкости — это не пустота, а такое состояние жидкости, когда полное давление в ней меньше атмосферного на величину p_v , которая измеряется вакуумметром. Вакуумметрическое давление p_v , показываемое прибором, связано с полным и атмосферным так:

$$p_v = p_{атм} - p, \quad (10)$$

то есть, вакуум — это разность между атмосферным и полным давлением.

Величина вакуума p_v не может быть больше одной атмосферы, то есть предельное значение $p_v \approx 100000 \text{ Па}$, так как полное давление не может быть меньше абсолютного нуля.

Для закрепления понятий пьезометрической высоты h_p , манометрического $p_{ман}$ или избыточного $p_{изб}$ давления и вакуума p_v приведём примеры снятия показаний с приборов:

— пьезометр, показывающий $h_p = 160 \text{ см вод. ст.}$, соответствует в единицах СИ избыточному (манометрическому) давлению $p_{изб} = p_{ман} = 16000 \text{ Па}$ и полному давлению $p = 100000 + 16000 = 116000 \text{ Па}$;

— манометр с показаниями $p_{ман} = 2,5 \text{ кгс/см}^2$ соответствует водяному столбу $h_p = 25 \text{ м}$ и полному давлению в СИ $p = 0,35 \text{ МПа}$;

— вакуумметр, показывающий $p_v = 0,04 \text{ МПа}$, соответствует полному давлению $p = 100000 - 40000 = 60000 \text{ Па}$, что составляет 60 % от атмосферного $p_{атм}$.

Эти примеры можно решать «в уме», если для перевода единиц давления и напора использовать соотношение, приведённое на с. 9. Рекомендуется заучить наизусть упомянутое соотношение связи единиц давления в различных системах измерения.

Эюры давления жидкости

Эюра давления жидкости — это графическое изображение распределения давления жидкости по твёрдой поверхности, соприкасающейся с жидкостью. Примеры эюр для плоских и криволинейных поверхностей см. на рис. 5 и 6. Стрелками на эюре показывают направление действия давления (вернее, направление нормальных напряжений, возникающих от действия давления, так как по 2-му свойству давление скалярно). Величина стрелки (ордината) откладывается в масштабе и количественно показывает величину давления.

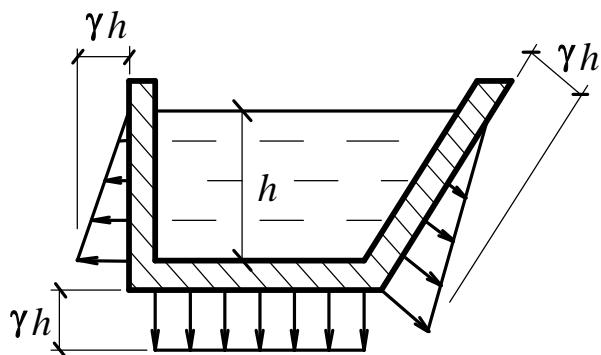


Рис. 5. Эюры давления жидкости на плоские поверхности

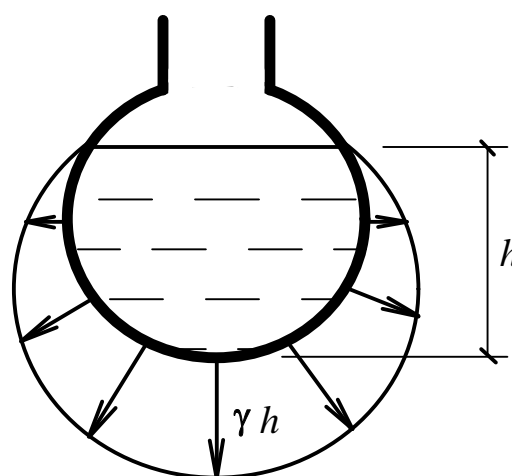


Рис. 6. Эюра давления жидкости на криволинейную поверхность

Эюры давления служат исходными данными для проведения расчётов на прочность и устойчивость конструкций, взаимодействующих с жидкостями: стенок плавательных бассейнов, баков, резервуаров, цистерн. Расчёты ведутся методами сопротивления материалов и строительной механики.

В большинстве расчётных случаев строят эюры избыточного давления $p_{изб}$ вместо полного p , а атмосферное $p_{атм}$ не учитывают из-за его взаимного погашения с той и другой стороны ограждающей конструкции.

При построении таких эюр для плоских и криволинейных поверхностей (см. рис. 5 и 6) используют линейную зависимость давления от глубины $p_{изб} = \gamma h$ и 1-е свойство гидростатического давления (см. с. 9).

Законы Архимеда и Паскаля

Практическое значение в строительстве имеют два закона гидростатики: Архимеда и Паскаля.

Закон Архимеда о подъёмной (архимедовой) силе F_n , действующей на погружённое в жидкость тело, имеет вид

$$F_n = \gamma V_m, \quad (11)$$

где γ — удельный вес жидкости; V_m — объём жидкости, вытесненной телом.

В строительной практике этот закон применяется, например, при расчёте подземных резервуаров на всплытие в обводнённых грунтах. На рис. 5 показан резервуар, часть которого расположена ниже уровня грунтовых вод (УГВ). Таким образом, он вытесняет объём воды, равный объёму его погружённой части ниже УГВ, что вызывает появление архимедовой силы F_n . Если F_n превысит собственный вес резервуара G_p , то конструкция может всплыть — это авария!

Закон Паскаля звучит так: внешнее давление, приложенное к жидкости, находящейся в замкнутом резервуаре, передаётся внутри жидкости во все её точки без изменения. На этом законе основано действие многих гидравлических устройств: гидродомкратов, гидропрессов, гидропривода машин, тормозных систем автомобилей.

Закон Паскаля справедлив для несжимаемых жидкостей, не насыщенных газом. Например, тормозная жидкость в автомобиле передаёт давление от педали тормоза ко всем колёсам. Но, если тормозную жидкость долго не менять, то она насыщается пузырьками воздуха и становится сжимаемой. Закон Паскаля нарушается.

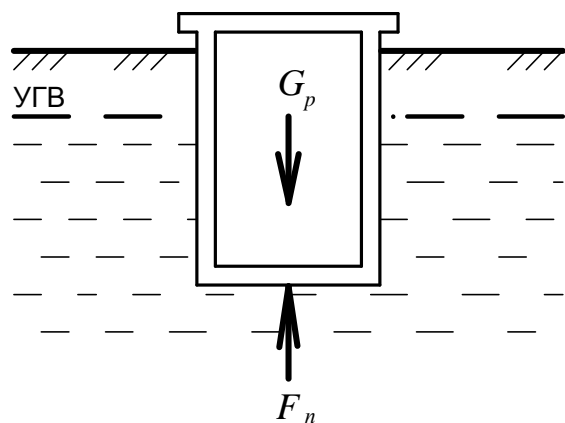


Рис. 7. Схема к закону Архимеда

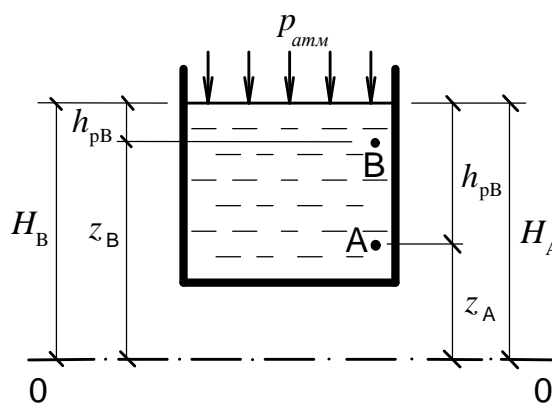


Рис. 8. Схема к понятию гидростатического напора

Гидростатический напор

Гидростатический напор H — это энергетическая характеристика покоящейся жидкости. Напор измеряется в метрах по высоте (вертикали).

Гидростатический напор H складывается из двух величин (рис. 8):

$$H = z + h_p = z + \frac{P_{изб}}{\gamma}, \quad (12)$$

где z — геометрический напор или высота точки над нулевой горизонтальной плоскостью отсчёта напора 0-0; h_p — пьезометрический напор (высота).

Гидростатический напор H характеризует потенциальную энергию жидкости (энергию покоя). Его составляющая z отражает энергию положения. Например, чем выше водонапорная башня, тем больший напор она обеспечивает в системе водопровода. Величина h_p связана с давлением. Например, чем выше избыточное давление в водопроводной трубе, тем больше напор в ней и вода поднимется на большую высоту.

Напоры для различных точек жидкости надо отсчитывать от одной горизонтальной плоскости 0-0 для того, чтобы их можно было сравнивать друг с другом. В качестве горизонтальной плоскости сравнения 0-0 может быть принята любая. Однако, если сама труба горизонтальна, то иногда для упрощения расчётов удобнее 0-0 провести по оси трубы. Тогда геометрическая высота z обратится в ноль. Кроме того, на практике часто высотные отметки z и H отсчёта напоров от 0-0 отождествляют с абсолютными геодезическими отметками, отсчитываемыми от среднего уровня поверхности океана. В России, например, они отсчитываются от уровня Балтийского моря.

Важная особенность гидростатического напора состоит в том, что он одинаков для всех точек покоящейся жидкости, гидравлически взаимосвязанных. Равенство напоров $H_A = H_B$ проиллюстрировано для точек **A** и **B** в резервуаре на рис. 8, невзирая на то, что они находятся на разных глубинах и давления в них неодинаковые.

Следует обратить внимание, что для открытых резервуаров напор в любой точке жидкости находится очень просто: от 0-0 до уровня свободной поверхности воды, на которую действует атмосферное давление $p_{атм}$ (см. рис. 8).

Гидродинамика

Гидродинамика — это раздел гидравлики (механики жидкости), изучающий закономерности движущихся жидкостей (потоков жидкостей).

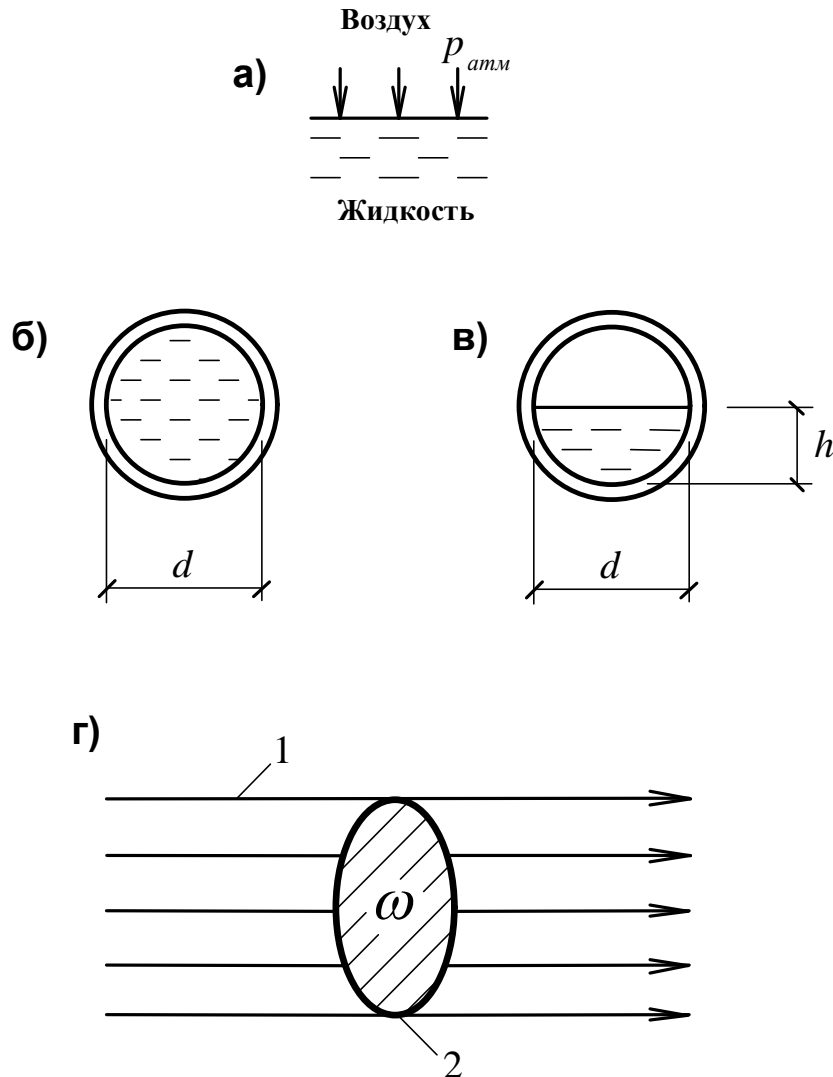


Рис. 9. Гидравлические элементы потока жидкости :
а - свободная поверхность; б - напорный поток;
в - безнапорный поток; г - пучек струек потока;
1 - линия тока; 2 - живое сечение

Словарь гидравлических терминов

Все потоки жидкости подразделяются на два типа (рис. 9):

- 1) напорные — без свободной поверхности;
- 2) безнапорные — со свободной поверхностью.

Все потоки имеют общие гидравлические элементы: линии тока, живое сечение, расход, скорость. Приведём краткий словарь этих гидравлических терминов.

Свободная поверхность — это граница раздела жидкости и газа, давление на которой обычно равно атмосферному (рис. 9,а). Её наличие или отсутствие определяет тип потока: безнапорный или напорный. Напорные потоки, как правило, наблюдаются в водопроводных трубах (рис. 9,б) — они работают полным сечением. Безнапорные — в канализационных (рис. 9,в), в которых труба заполнена не полностью, поток имеет свободную поверхность и движется самотёком, за счёт уклона трубы.

Линия тока — это элементарная струйка потока, площадь поперечного сечения которой бесконечно мала. Поток состоит из пучка струек (рис. 9,г).

Площадь живого сечения потока ω (m^2) — это площадь поперечного сечения потока, перпендикулярная линиям тока (см. рис. 9,г).

Расход потока q (или Q) — это объём жидкости V_0 , проходящий через живое сечение потока в единицу времени t :

$$q = V_0/t. \quad (13)$$

Единицы измерения расхода в СИ m^3/c , а в других системах: $m^3/ч$, $m^3/сут$, $л/с$.

Средняя скорость потока V (m/c) — это частное от деления расхода потока на площадь живого сечения:

$$V = q / \omega. \quad (14)$$

Отсюда расход можно выразить так:

$$q = V \omega. \quad (15)$$

Скорости потоков воды в сетях водопровода и канализации зданий обычно порядка $1 m/c$.

Следующие два термина относятся к безнапорным потокам.

Смоченный периметр χ (m) — это часть периметра живого сечения потока, где жидкость соприкасается с твёрдыми стенками. Например, на рис. 9,в величиной χ является длина дуги окружности, которая образует нижнюю часть живого сечения потока и соприкасается со стенками трубы.

Гидравлический радиус R (m) — это отношение вида

$$R = \omega / \chi. \quad (16)$$

Уравнение неразрывности потока

Уравнение неразрывности потока отражает закон сохранения массы: количество втекающей жидкости равно количеству вытекающей. Например, на рис. 10 расходы во входном и выходном сечениях напорной трубы равны:

$$q_1 = q_2.$$

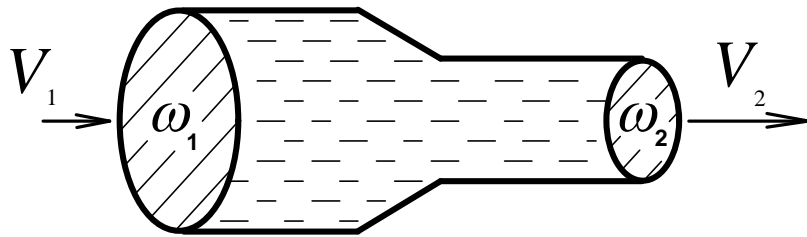


Рис. 10. Схема к уравнению неразрывности потока

С учётом, что $q = V\omega$, получим уравнение неразрывности потока:

$$V_1 \omega_1 = V_2 \omega_2. \quad (17)$$

Если отсюда выразим скорость для выходного сечения

$$V_2 = V_1 \omega_1 / \omega_2, \quad (18)$$

то легко заметить, что она увеличивается обратно пропорционально площади живого сечения потока. Такая обратная зависимость между скоростью и площадью является важным следствием уравнения неразрывности и применяется в технике, например, при тушении пожара для получения сильной и дальнобойной струи воды.

Рассмотрим пример.

Как изменится скорость потока, если диаметр напорной трубы d уменьшится в два раза? Площадь живого сечения такой трубы

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4}. \quad (19)$$

Тогда отношение площадей в формуле (18) будет равно 4.

Таким образом, при уменьшении диаметра трубы в два раза — скорость потока увеличится в четыре раза. Аналогично, если диаметр уменьшится в три раза — скорость возрастёт в девять раз.

Гидродинамический напор

Гидродинамический напор H (м) — это энергетическая характеристика движущейся жидкости. Понятие гидродинамического напора в гидравлике имеет фундаментальное значение.

Гидродинамический напор H (рис. 11) определяется по формуле :

$$H = z + h_p + h_v = z + \frac{p_{изб}}{\gamma} + \frac{V^2}{2g}, \quad (20)$$

где z — геометрический напор (высота), м; h_p — пьезометрический напор (высота), м; $h_v = V^2/(2g)$ — скоростной напор, м; V — скорость потока, м/с; g — ускорение свободного падения, м²/с.

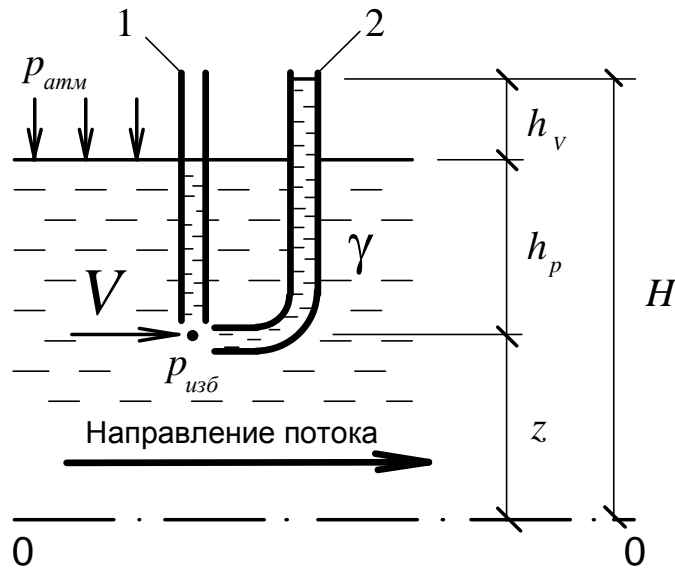


Рис. 11. Схема к понятию гидродинамического напора: 1 - пьезометр; 2 - трубка Пито

Гидродинамический напор, в отличие от гидростатического (см. с. 15), складывается из трёх составляющих. Дополнительная величина h_v отражает кинетическую энергию — движение жидкости. Остальные члены — потенциальную энергию. Отсчитывают напор от нулевой горизонтальной плоскости 0-0 (см. рис. 11) в метрах по высоте.

Величина скоростного напора h_v может быть рассчитана по V , или же измерена с помощью пьезометра и трубки Пито по разности уровней жидкости (см. рис. 11). У трубки Пито, в отличие от пьезометра, нижняя часть, погружённая в жидкость, обращена против движения потока и откликается не только на давление, но и на скорость.

Уравнение Бернулли для жидкости

Рассмотрим поток жидкости, проходящий по напорному трубопроводу переменного сечения (рис. 12). В первом сечении гидродинамический напор равен H_1 . По ходу движения потока часть напора H_1 необратимо потеряется из-за проявления сил внутреннего трения жидкости и во втором сечении напор уменьшится до H_2 на величину потерь напора ΔH .

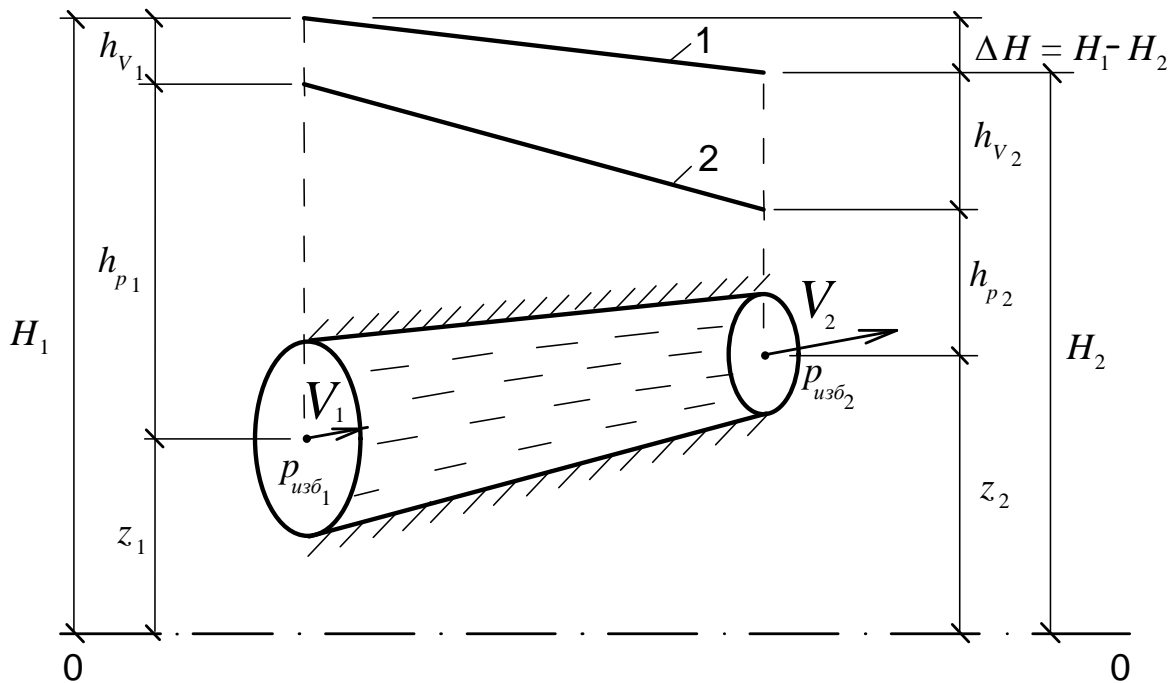


Рис. 12. Схема к уравнению Бернулли: 1 - напорная линия; 2 - пьезометрическая

Уравнение Бернулли для жидкости в самом простейшем виде выглядит так:

$$H_1 = H_2 + \Delta H, \quad (21)$$

то есть это уравнение для двух сечений потока в направлении его течения, выраженное через гидродинамические напоры и отражающее закон сохранения энергии (часть энергии переходит в потери) при движении жидкости.

Уравнение Бернулли в виде (21) обычно не приводят в учебной литературе. Тем не менее, на наш взгляд, его изучение лучше всего начинать именно с такого простейшего представления: при движении жидкости напор в начальном сечении H_1 равен напору в конечном сечении H_2 плюс потери напора ΔH .

Уравнение Бернулли в традиционной записи получим, если в последнем равенстве (21) подставим значения гидродинамических напоров H_1 и H_2 из формулы (20). Тогда получим

$$z_1 + \frac{P_{изб1}}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_{изб2}}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta H . \quad (22)$$

При использовании обозначений пьезометрического h_p и скоростного h_v напоров уравнение Бернулли можно записать и так:

$$z_1 + h_{p1} + h_{v1} = z_2 + h_{p2} + h_{v2} + \Delta H . \quad (23)$$

Энергетический смысл уравнения Бернулли заключается в том, что оно отражает закон сохранения энергии: сумма потенциальной $z+h_p$, кинетической $V^2/(2g)$ энергии и энергии потерь ΔH остаётся неизменной во всех точках потока.

Геометрический смысл уравнения Бернулли показан на рис. 12: сумма четырёх высот z , h_p , h_v , ΔH остаётся неизменной во всех точках потока.

Разность напоров и потери напора

Различие в применении терминов «разность напоров» и «потери напора» с одним и тем же обозначением ΔH поясним на примерах.

Движение жидкости происходит только при наличии разности напоров ($\Delta H = H_1 - H_2$), от точки с большим напором H_1 к точке с меньшим H_2 . Например, если два бака, заполненных водой до разных высотных отметок, соединить трубопроводом, то по нему начнётся перетекание в бак с меньшей отметкой уровня воды под влиянием разности напоров ΔH , равной в этом случае разности отметок уровней воды в баках. При выравнивании уровней напоры в обоих баках становятся одинаковыми $H_1 = H_2$, разность напоров $\Delta H = 0$ и перетекание прекращается.

Потери напора ΔH отражают потерю полной энергии потока при движении жидкости. В предыдущем примере, общие потери напора в трубопроводе при движении из одного бака в другой равны разности напоров в баках $\Delta H = H_1 - H_2$.

Таким образом, «разность напоров» является причиной движения воды, а «потеря напора» — следствием. При установившемся движении жидкости они равны. Измеряются они в одних и тех же единицах СИ: метрах по высоте.

Напорная и пьезометрическая линии

Напорная линия (см. рис. 12) графически изображает напоры вдоль потока. Отметки этой линии могут быть определены с помощью трубок Пито или расчётом. По ходу движения она всегда падает с уклоном, так как потери напора не обратимы.

Пьезометрическая линия (линия давлений) графически отражает напоры вдоль потока без скоростного напора h_v , поэтому она располагается всегда ниже напорной линии. Отметки этой линии могут быть зарегистрированы непосредственно пьезометрами или, с пересчётом, манометрами. В отличие от напорной линии, пьезометрическая — может понижаться или повышаться вдоль потока (рис. 13).

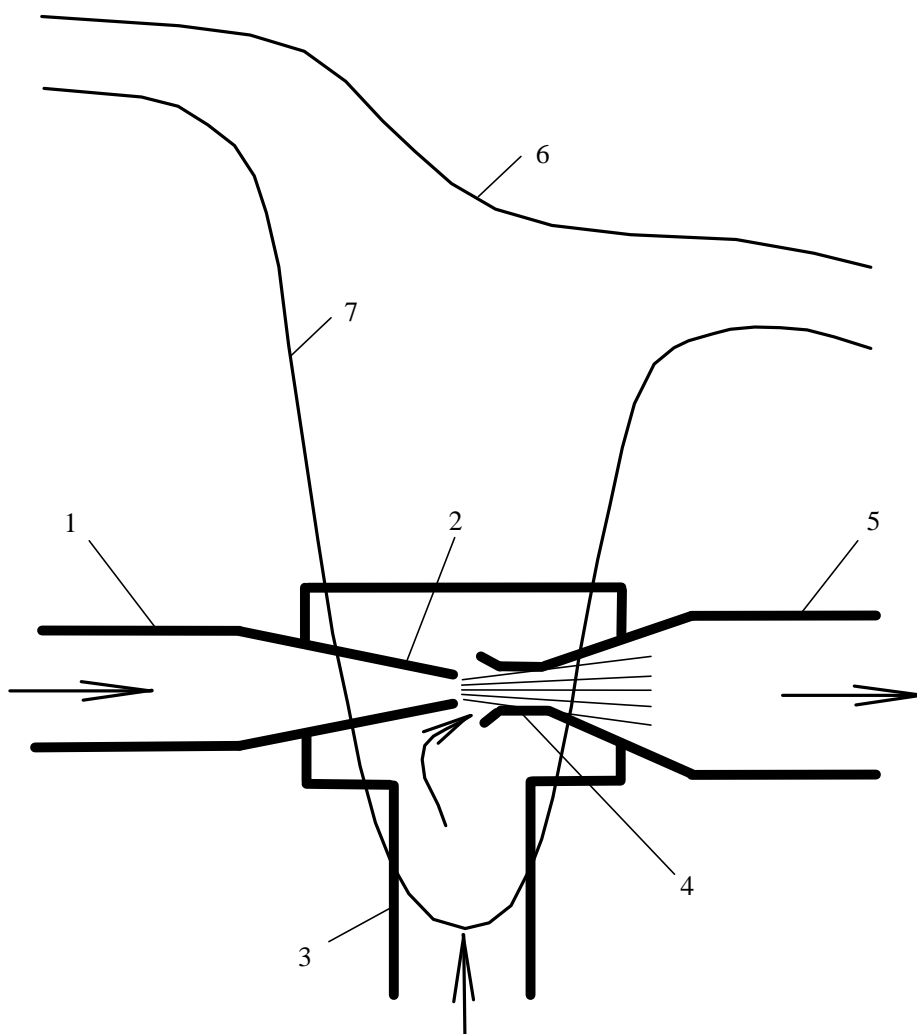


Рис. 13. Водоструйный насос: 1 - нагнетательный трубопровод; 2 - сопло; 3 - всасывающий трубопровод; 4 - горловина; 5 - отводящий трубопровод; 6 - напорная линия; 7 - пьезометрическая линия

Связь давления и скорости в потоке

Связь давления и скорости в потоке жидкости — обратно квадратичная: если в каком-то месте потока скорость увеличивается, то давление здесь мало, и, наоборот, там, где скорости невелики, давление повышенное. Объясним это на основе уравнения Бернулли (22).

Рассмотрим работу водоструйного насоса (см. рис. 13). На подходе по нагнетательному трубопроводу 1 поток рабочей жидкости имеет относительно небольшую скорость V_1 и высокое избыточное давление $p_{изб1}$. Проходя через сопло 2, поток сужается, скорость его резко возрастает до V_2 . Для дальнейших рассуждений запишем уравнение Бернулли (22) так:

$$\frac{p_{изб1}}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{p_{изб2}}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g}. \quad (24)$$

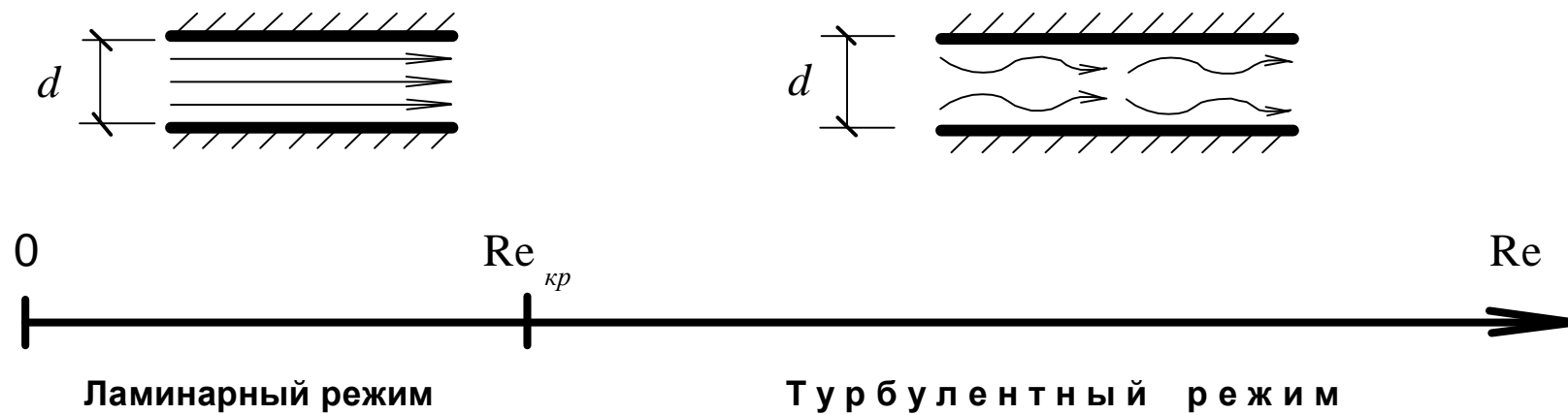
Здесь нет геометрических высот z_1 и z_2 , так как труба горизонтальная и они сокращаются в (22). Величиной потерь напора $\Delta H \approx 0$ на таком коротком расстоянии пренебрегают в 1-м приближении.

Так как в правой части уравнения (24) кинетическая составляющая энергии потока h_V резко возросла из-за увеличения V_2 , то потенциальная составляющая, связанная с избыточным давлением после сопла $p_{изб2}$, наоборот, уменьшится.

Величину давления $p_{изб2}$ можно выразить из этого уравнения и найти численное значение. Если $p_{изб2}$ получится отрицательным, то, значит, возник вакуум (полное давление в струе стало меньше атмосферного). В последнем случае пьезометрическая линия опустится ниже отметки самой струи (см. рис 13).

Таким образом, в струе рабочей жидкости после сопла образуется область пониженного давления или даже вакуум, что вызывает подсос транспортируемой жидкости по всасывающему трубопроводу 3 (см. рис. 13). Далее обе жидкости смешиваются в горловине 4 и транспортируются по отводящему трубопроводу 5.

Водоструйные насосы не имеют трущихся частей, в этом их преимущество перед механическими насосами типа центробежных. По их принципу работают эжекторы, гидроэлеваторы, насосы для создания вакуума. В строительстве для качественной окраски металлических поверхностей применяют краскораспылительные пистолеты, где вместо рабочей жидкости движется сжатый воздух от компрессора. Автомобильный карбюратор тоже работает по принципу водоструйного насоса, дозируя смесь бензина и воздуха.



$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta}{d} \right)^{0,25}$$

Рис. 14. Шкала чисел Рейнольдса для определения режимов движения жидкости и область применения формул для определения коэффициента гидравлического трения λ

Режимы движения жидкости

При проведении гидравлического расчёта в первую очередь нужно выяснить: какой режим движения будет наблюдаться у данного потока?

Режимы движения всех потоков (напорных и безнапорных) делятся на два типа (рис. 14):

1) ламинарный, то есть спокойный, параллельноструйный, при малых скоростях;

2) турбулентный, то есть бурлящий, вихреобразный, с водоворотами, при больших скоростях.

Для выяснения типа режима нужно рассчитать число Рейнольдса Re и сравнить его с критическим числом $Re_{кр}$.

Число Рейнольдса Re — это безразмерный критерий, вычисляемый по формулам:

— для напорных потоков

$$Re = Vd/\nu, \quad (25)$$

где d — внутренний диаметр напорного трубопровода;

— для безнапорных потоков

$$Re = VR/\nu, \quad (26)$$

где R — гидравлический радиус безнапорного потока, m (см. с. 17).

Критическое число Рейнольдса $Re_{кр}$ — это число, при котором наступает смена режима движения.

Для напорных потоков

$$Re_{кр} = 2320.$$

Для безнапорных потоков

$$Re_{кр} \approx 500.$$

Упрощённо режим движения потока можно определить по шкале чисел Рейнольдса (см. рис. 14).

Рассмотрим пример с напорной водопроводной трубой, у которой $d = 20 \text{ мм}$, $V = 1 \text{ м/с}$, $\nu = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Для потока в данной трубе число Рейнольдса составит:

$$Re = 1 \cdot 0,02 / 10^{-6} = 20000.$$

Число 20000 больше, чем $Re_{кр} = 2320$ (для напорных потоков) и на рис.14 оно находится в правой части шкалы, следовательно, режим потока турбулентный. Все дальнейшие гидравлические расчёты должны проводиться по формулам только для этого режима.

Расчёт напорных потоков

Расчёт напорных потоков сводится к нахождению неизвестных расходов q , скоростей V или потерь напора (разности напоров) ΔH . Для трубопроводов определяются их внутренние диаметры d .

Общие потери напора (или разность напоров) определяются по формуле Вейсбаха

$$\Delta H = \zeta \frac{V^2}{2g}, \quad (27)$$

где ζ — коэффициент гидравлического сопротивления.

Скорость потока связана с расходом соотношением (см. с. 17)

$$V = q/\omega,$$

где ω — площадь живого сечения потока. Например, для трубы круглого сечения $\omega = \pi d^2/4$.

Таким образом, приведённые зависимости связывают величины ΔH , V , q , ω , d , что позволяет рассчитать любой напорный поток. Значения коэффициента ζ рассчитывают или принимают в зависимости от вида определяемых потерь напора (линейных или местных).

Общие потери напора ΔH (м) в любом потоке представляют собой сумму линейных h_l и местных h_m потерь:

$$\Delta H = \sum h_l + \sum h_m. \quad (28)$$

Линейные потери напора h_l возникают на прямых участках труб (рис. 15,а). В литературе иногда встречаются другие варианты названий h_l : потери напора по длине; потери напора на трение; путевые потери напора. Величина h_l определяется по формуле Вейсбаха в такой записи:

$$h_l = \zeta_l \frac{V^2}{2g}. \quad (29)$$

Коэффициент линейного гидравлического сопротивления в (29) находится так:

$$\zeta_l = \frac{\lambda l}{d}, \quad (30)$$

где λ — коэффициент гидравлического трения, определяемый по формулам (31) или (32) в зависимости от режима движения потока — ламинарного или турбулентного (см. рис. 14); l — длина прямолинейного участка трубопровода.

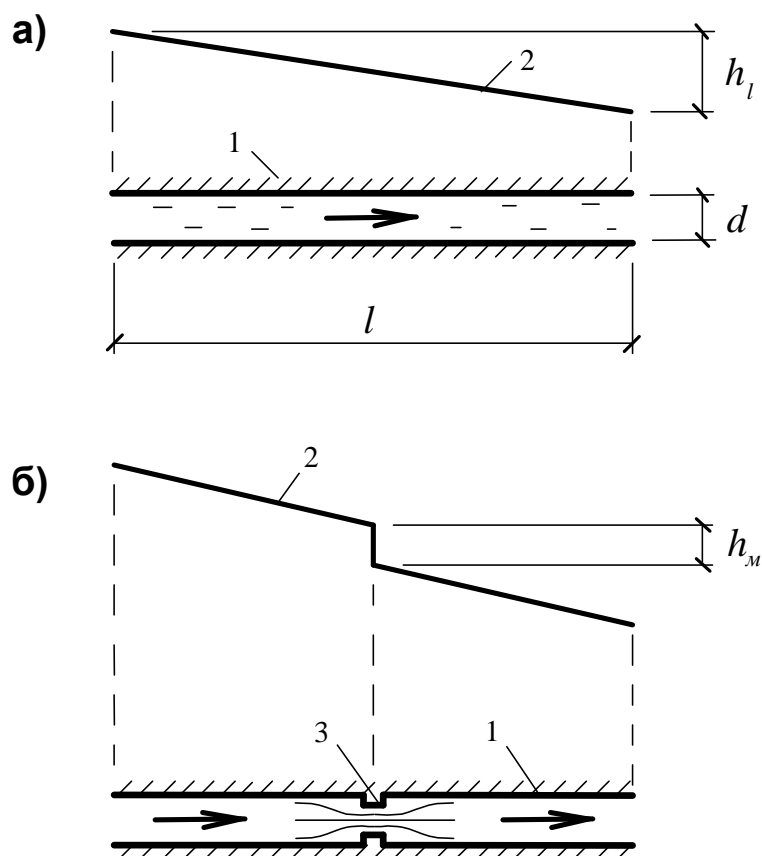


Рис. 15. Потери напора: а - линейные; б - местные; 1 - трубопровод; 2 - напорная линия; 3 - местное сопротивление (диафрагма)

При ламинарном режиме коэффициент гидравлического трения

$$\lambda = 64 / \text{Re}. \quad (31)$$

При турбулентном режиме А.Д. Альтшуль нашёл, что

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{68}{\text{Re}} + \frac{\Delta}{d} \right)^{0,25}, \quad (32)$$

где Δ — абсолютная шероховатость стенок трубопроводов. Например, у старых стальных труб $\Delta \approx 1,5$ мм, у новых $\Delta \approx 0,1$ мм.

Гидравлическим уклоном i называется отношение линейных потерь напора h_l к длине потока l (см. рис. 15, а):

$$i = h_l / l. \quad (33)$$

Местные потери напора h_m возникают в местах резкой деформации потока: на поворотах труб, в местных сужениях или расширениях, тройниках, крестовинах, в кранах, вентилях, задвижках. На напорной линии они изображаются в виде падающего скачкообразного участка h_m (см. рис. 15,б).

Формула Вейсбаха расчёта для местных потерь напора имеет вид

$$h_m = \zeta_m \frac{V^2}{2g}, \quad (34)$$

где ζ_m — коэффициент местного гидравлического сопротивления. Он принимается для конкретного участка деформации потока (поворота, крана и т.д.) по справочным данным.

Гидравлический удар

Гидравлический удар представляет собой явление импульсивного изменения давления, происходящее в напорных трубопроводах.

Например, если резко закрыть водопроводный кран (рис. 16), то вода, движущаяся со скоростью V , вынуждена так же резко остановиться.

Однако из-за наличия инерционных сил движущейся жидкости перед краном возникнет ударное повышение давления величиной Δp , которое начнёт распространяться со скоростью звука $V_{зв}$ в воде в обратную сторону и может привести к авариям на трубопроводах.

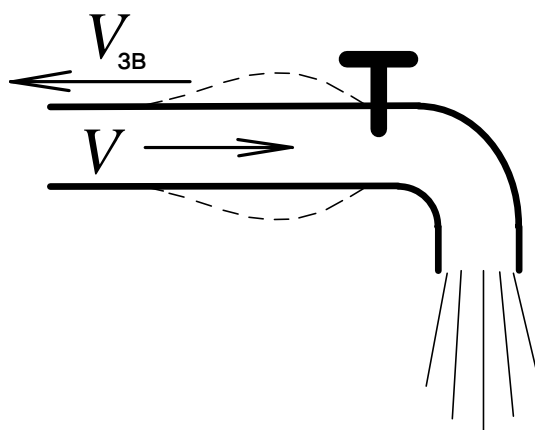


Рис. 16. Иллюстрация гидравлического удара

Величину Δp (Па) при гидравлическом ударе можно рассчитать по формуле Н.Е. Жуковского:

$$\Delta p = \rho V V_{зв}, \quad (35)$$

где ρ — плотность жидкости, $кг/м^3$; $V_{зв} \approx 1000 м/с$.

Покажем на примере, насколько может быть опасен гидравлический удар в водопроводе зданий. При средней скорости движения воды $V = 1 м/с$, если мгновенно закрыть кран (см. рис. 16), давление в трубе может повыситься на опасную величину

$$\Delta p = 1000 \cdot 1 \cdot 1000 = 1\,000\,000 \text{ Па} = 1 \text{ МПа} = 100 \text{ м} = 10 \text{ ат}$$

при максимально допустимом давлении не более 0,45 МПа. Поэтому в конструкции кранов предусматривают медленное закрывание для защиты от гидравлического удара.

Гидравлика отверстий и насадков

Насадком называется короткая труба, длиной обычно от 3 до 4 d , улучшающая условия вытекания жидкости. Например, если вода вытекает из бака через отверстие и насадок (рис. 17), которые расположены на одной и той же глубине ΔH и диаметры которых равны, то в насадке расход воды будет примерно на 30 % больше, чем в отверстии.

Расход воды для отверстия или насадка находят по формуле

$$Q = \mu_0 \omega \sqrt{2g\Delta H}, \quad (36)$$

где μ_0 — коэффициент расхода (для круглого отверстия $\mu_0 = 0,62$; для насадка $\mu_0 = 0,82$); ω — площадь поперечного сечения отверстия или насадка; ΔH — разность напоров (см. рис. 17).

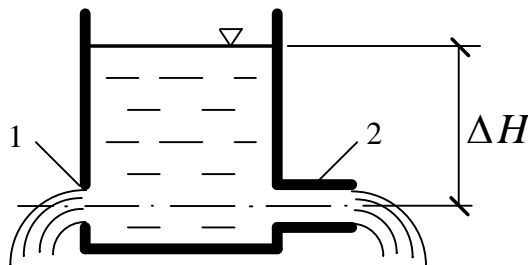


Рис 17. Истечение из отверстий и насадков : 1 - отверстие; 2 - насадок

Расчёт безнапорных потоков

Расчёт безнапорных потоков состоит в решении совместной задачи о пропуске расхода q при допустимых скоростях потока V и геометрических уклонах i_{geom} дна труб, каналов и т.д. Безнапорные (со свободной поверхностью) потоки наблюдаются в канализационных трубах, дорожных лотках, каналах; в природе — в реках, ручьях.

При расчёте безнапорных потоков вводят допущение о равномерном движении потока. При этом геометрический уклон дна i_{geom} принимают равным уклону свободной поверхности (пьезометрическому уклону) и гидравлическому уклону i . Считают, что поверхность дна 1, свободная поверхность потока 2 и напорная линия 3 параллельны друг другу (рис. 18). Это упрощает расчёт, так как, определяя гидравлический уклон i , автоматически находят уклон дна i_{geom} .

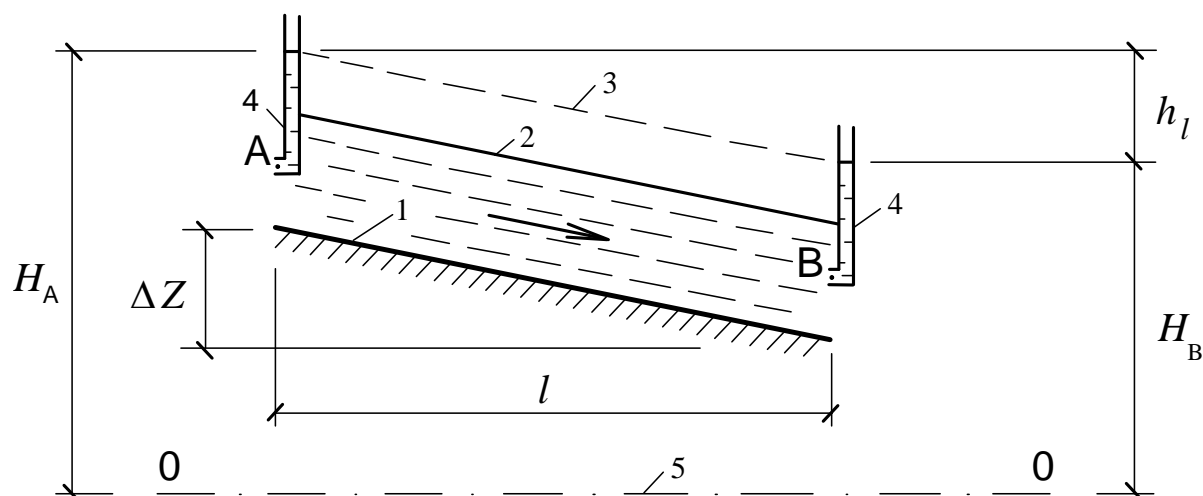


Рис. 18. Безнапорный поток : 1 - дно; 2 - свободная поверхность; 3 - напорная линия; 4 - трубка Пито; 5 - горизонталь

Подчеркнём, что безнапорный поток имеет напоры! Дело в том, что термин «безнапорный» является традиционным, правильнее же его называть «поток со свободной поверхностью». Например, на рис. 18 в точках потока **A** и **B** напоры существуют, и их отметки могут быть зарегистрированы трубками Пито, соответственно H_A и H_B . Разность напоров $H_A - H_B$ равна линейной потере напора h_l на участке потока длиной l . Величина h_l по принятому допущению равна Δz — разности высотных отметок дна в начале и конце участка, так как $i = h_l/l$, $i_{geom} = \Delta z/l$, а $i = i_{geom}$.

Местные потери напора h_m возникают в безнапорных потоках так же, как и в напорных, в местах резкой деформации потока: на поворотах, в тройниках, крестовинах, местных сужениях и т.д. Однако в расчётах безнапорных потоков величины h_m обычно не учитывают.

При проведении гидравлического расчёта безнапорных потоков вводят ограничения по скорости V (м/с), наполнению h/d (см. рис. 9,в) и уклону i_{geom} . Например, при расчёте канализационных труб должны быть выполнены три таких ограничения:

$$\begin{aligned} 0,7 \leq V \leq 4; \\ 0,3 \leq h/d \leq 0,6; \\ 1/d_{mm} \leq i_{geom} \leq 0,15, \end{aligned} \quad (37)$$

где d_{mm} — внутренний диаметр трубы в миллиметрах.

Для расчёта безнапорных потоков широко применяют формулу Шези для определения геометрического уклона дна трубопровода, канала или траншеи

$$i_{geom} = \frac{V^2}{R \cdot C^2}, \quad (38)$$

где R — гидравлический радиус (м); C — коэффициент Шези.

Коэффициент Шези с достаточной для практики точностью можно определить по формуле Маннинга

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6}, \quad (39)$$

где n — коэффициент шероховатости стенок трубы или канала; R — гидравлический радиус, подставляемый в метрах!

Отметим, что формула Шези справедлива для потоков с турбулентным режимом. Но таких потоков на практике подавляющее большинство.

Скорость потока связана с расходом соотношением (см. с. 17)

$$V = q / \omega.$$

Таким образом, приведённые формулы позволяют осуществлять гидравлический расчёт любых безнапорных потоков. Для расчётов используют вспомогательные таблицы или номограммы, составленные на основе формулы Шези. В последнее время широко применяют компьютерные технологии. Например, для гидравлического расчёта сетей дворовой канализации рекомендуются электронные таблицы MS Excel, OpenOffice или Gnumeric (см. рис. 1).

Теория фильтрации

Определения, термины и закономерности

Фильтрацией называется движение жидкости или газа в пористой среде. Под средой подразумевается твёрдая фаза.

Большинство сред являются пористыми: грунты, бетон, кирпич и т.д. Но не в каждой пористой среде происходит фильтрация. Движение жидкости или газа происходит только по сообщающимся между собой порам (не замкнутым). Среды с такими порами называются фильтрующими или проницаемыми. Примерами фильтрующих сред могут служить некоторые грунты (пески, супеси, суглинки), строительные материалы (щебень, пористый бетон, кирпичная кладка). Проницаемость пористой среды определяют опытным путём.

Водоупором называют грунт, практически не пропускающий воду. Глины часто являются водоупорными, так как поры в них замкнутые и малого размера. Непроницаемый же строительный материал принято именовать гидроизоляционным (а не водоупорным). Так, в качестве гидроизоляции используют цементный раствор, различные битумные мастики, толь, рубероид.

Теория фильтрации применительно к строительству, водоснабжению и водоотведению рассматривает закономерности фильтрации воды с целью проведения количественных расчётов:

- притока подземных вод к водозаборным сооружениям (скважинам, колодцам и т.д.);
- работы фильтров на станции водоподготовки при приготовлении питьевой воды;
- при прогнозах подтопления подземными водами территорий застройки;
- при выборе систем строительного водопонижения для котлованов, траншей или подземных проходов в водонасыщенных грунтах;
- при проектировании дренажных систем (дренажей), понижающих уровень грунтовых вод (УГВ) для защиты подземных сооружений и помещений зданий от подтопления.

Термины теории фильтрации во многом совпадают с гидравлическими. Движение жидкости при фильтрации принято рассматривать как сплошной поток, будто бы твёрдых частиц пористой среды нет. Поэтому фильтрационные потоки формально имеют сходство с потоками в трубах и каналах.

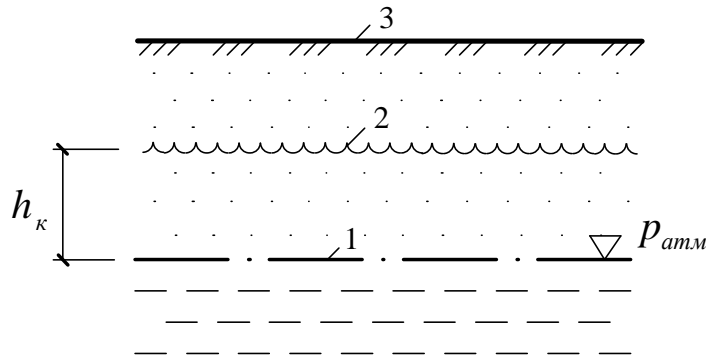


Рис. 19. Пример водонасыщенной пористой среды: 1 - свободная поверхность (УГВ); 2 - верх капиллярной зоны; 3 - поверхность земли

Перечислим элементы фильтрационных потоков (термины).

Свободная поверхность — это граница раздела между полностью водонасыщенной пористой средой и осушенной её частью (рис. 19). На этой границе давление равно атмосферному $p_{атм}$. Особенностью является то, что над свободной поверхностью в пористой среде имеется капиллярная зона высотой h_k , которая не полностью водонасыщена, но где часть влаги удерживается капиллярными силами пор.

Все фильтрационные потоки делятся на:

- напорные (без свободной поверхности);
- безнапорные (со свободной поверхностью).

Примерами напорных фильтрационных потоков могут служить артезианские подземные воды, которые при бурении скважин дают фонтан. Примером безнапорных потоков является грунтовые воды, просачивающиеся в котлованы и траншеи, что рассмотрено ниже.

Определения линии тока, площади живого сечения потока ω (m^2) и фильтрационного расхода Q ($m^3/сут$) можно использовать гидравлические (см. с. 17). Но в отношении ω нужно учитывать, что это площадь вся — и пор, и твёрдой фазы, так как в теории фильтрации принято считать поток сплошным (условие сплошности).

Движение потока при фильтрации всегда происходит под влиянием разности напоров ΔH (m), от большего напора к меньшему. Величину ΔH называют «разностью напоров» или «потерей напора» в зависимости от рассматриваемой задачи (см. с. 21).

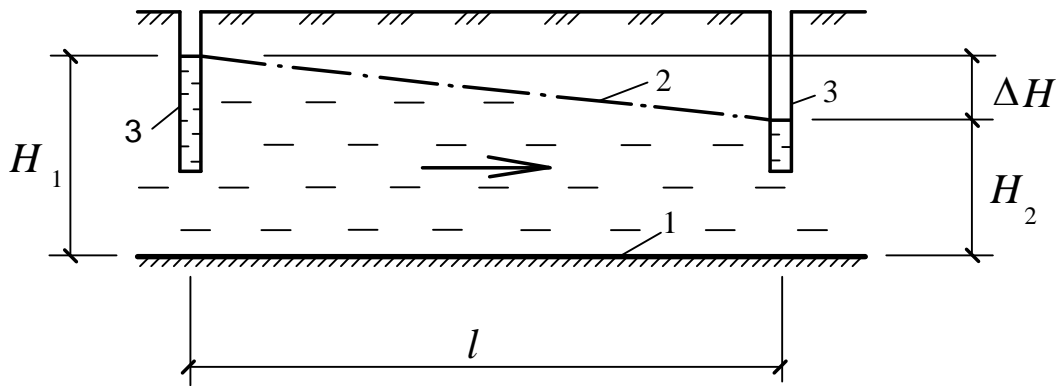


Рис. 20. Поток грунтовых вод: 1 - водоупор; 2 - УГВ; 3 - скважина

Фильтрационный напор H (м) находится формально как гидростатический (см. с. 15):

$$H = z + h_p = z + \frac{P_{изб}}{\gamma}, \quad (40)$$

так как в нём обычно не учитывается скоростная составляющая напора h_v (см. гидродинамический напор, с. 19) из-за малых скоростей движения жидкости по порам. В грунтовых водах напор в метрах по высоте может отсчитываться от водоупора, если поверхность последнего можно принять за горизонтальную плоскость (рис. 20), но может также приниматься как абсолютная геодезическая отметка свободной поверхности потока (см. с. 15).

Фильтрационный поток по ходу движения всегда теряет напор из-за внутреннего трения жидкости. Отношение потерь напора ΔH (м) к длине пути фильтрации l (м) называется пьезометрическим уклоном или градиентом напора (величина безразмерная):

$$I = \Delta H / l. \quad (41)$$

Скоростью фильтрации V_ϕ (м/сут) называется отношение фильтрационного расхода Q (м³/сут) к площади живого сечения потока ω (м²), как в гидродинамике:

$$V_\phi = Q/\omega. \quad (42)$$

Теперь, имея вышеперечисленные термины теории фильтрации, приведём её основной закон.

Фильтрационные характеристики пористых сред

Пористая среда	Коэффициент фильтрации k_f , м/сут	Коэффициент водоотдачи μ_e
Водоупорные глины, плотный бетон	Менее 0,01	Менее 0,05
Суглинки	0,01 — 0,5	0,05 — 0,1
Супеси	0,5 — 2	0,1 — 0,2
Пески	2 — 50	0,2 — 0,25

Закон Дарси (основной закон фильтрации) связывает скорость фильтрации V_f (м/сут) с коэффициентом фильтрации пористой среды k_f (м/сут), разностью напоров (потерями напора) ΔH (м) и длиной пути фильтрации l (м) так:

$$V_f = k_f \frac{\Delta H}{l}. \quad (43)$$

Фильтрационные характеристики пористых сред определяют опытным путём. Некоторые из них приведены в табл. 1.

Коэффициент фильтрации k_f характеризует проницаемость пористой среды.

Коэффициент водоотдачи μ_e (величина безразмерная) показывает, сколько воды может отдать при осушении грунт в долях единицы его объёма.

Фильтрационные расчёты

В строительной практике большинство фильтрационных расчётов связано с определением водопритока грунтовых вод Q (м³/сут) в траншеи и котлованы, с целью заблаговременного подбора насосов для водоотлива так, чтобы их производительность была не менее величины Q .

Грунтовые воды (см. рис. 20) — это подземный водоносный горизонт, имеющий свободную поверхность (т.е. уровень грунтовых вод — УГВ) и залегающий на первом от поверхности земли водоупоре. Таким образом, грунтовые воды являются безнапорными. Они залегают в проницаемых грунтах (песках, супесях, суглинках), имею-

щих некоторый коэффициент фильтрации k_ϕ . Они имеют некоторую естественную мощность H_e , в пределах которой грунт полностью водонасыщен. УГВ регистрируется скважинами, открытыми в атмосферу (скважинами-пьезометрами).

Закон Дарси (43) служит основой для получения расчётных формул при различных случаях фильтрации, которые могут наблюдаться на практике.

В качестве примера покажем, как вывести формулы для определения притока грунтовых вод в строительные траншеи и котлованы с использованием закона Дарси (43). Эти простейшие случаи относятся к одномерной плоскопараллельной и радиальной фильтрации.

На рис. 21 изображена траншея длиной B . Она гидродинамически совершенная — дном доходит до водоупора. Прибывающая в траншею грунтовая вода постоянно откачивается насосом с расходом Q . Этот расход складывается из правого Q_n и левого Q_l притоков грунтовых вод.

Движение грунтовых вод к траншее происходит под влиянием разности напоров в водоносном пласте и траншее $\Delta H = H_e - H_m$. Напоры отсчитываем от поверхности водоупора.

Длину пути фильтрации L_t (см. рис. 21,б) назовём зоной влияния откачки. В пределах этой зоны естественный УГВ постепенно понижается в сторону траншеи и носит название кривой депрессии. Зона влияния откачки L_t с течением времени увеличивается. Это происходит из-за осушения грунта вблизи траншеи, кривая депрессии становится более пологой и длинной. Величину L_t (м) можно определить по формуле К.Э. Лембке:

$$L_t = 1,73 \sqrt{\frac{k_\phi H_e t}{\mu_s}}, \quad (44)$$

где t — время от начала откачки, *сут.*

Двухсторонний приток грунтовых вод в траншею

$$Q = Q_n + Q_l = V_\phi \omega + V_\phi \omega. \quad (45)$$

Скорость фильтрации по закону Дарси (43) выражается так:

$$V_\phi = k_\phi \frac{\Delta H}{l} = k_\phi \frac{H_e - H_m}{L_t}. \quad (46)$$

Средняя величина площади живого сечения фильтрационного потока переменной высоты в пределах кривой депрессии (см. рис. 21,б)

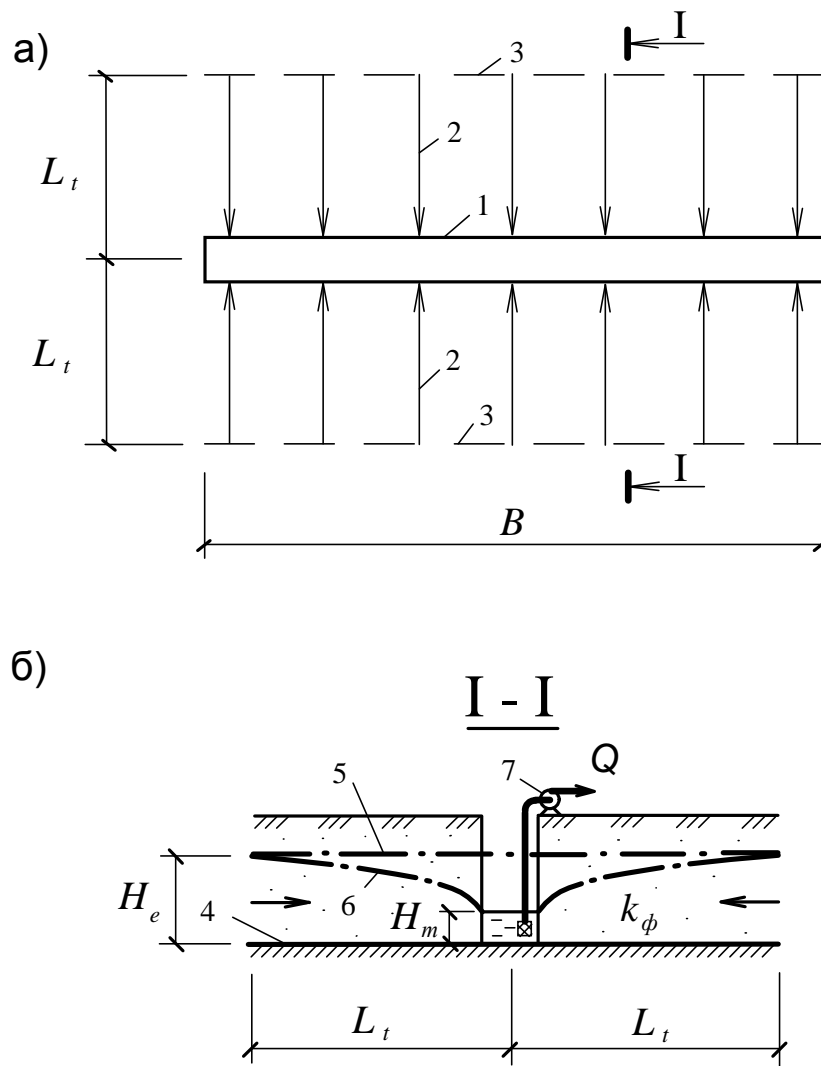


Рис. 21. Фильтрация в траншею: а - план; б - разрез;
 1 - траншея; 2 - направление фильтрации; 3 - граница
 области фильтрации; 4 - водоупор; 5 - естественный УГВ;
 6 - пониженный УГВ (кривая депрессии); 7 - насос

$$\omega = B \frac{H_e + H_m}{2}. \quad (47)$$

Подставляя V_ϕ из (46) и ω из (47) в выражение (45) для Q , после элементарных выкладок получим известную формулу Дюпюи для определения притока грунтовых вод в траншею:

$$Q = k_\phi B \frac{H_e^2 - H_m^2}{L_t}. \quad (48)$$

В случае радиальной фильтрации формулу для притока грунтовых вод, поступающих в котлован (рис. 22), колодец или скважину, также можно получить на основе закона Дарси (43).

Приток грунтовых вод в котлован

$$Q = V_{\phi} \omega. \quad (49)$$

Скорость фильтрации по закону Дарси (43) выражается так:

$$V_{\phi} = k_{\phi} \frac{\Delta H}{l} = k_{\phi} \frac{dH}{dr}, \quad (50)$$

где dH — дифференциал напора; dr — дифференциал радиальной координаты r , лежащей между r_{κ} и R_t (см. рис. 22).

Площадь живого сечения фильтрационного потока переменной высоты H с координатой r в пределах воронки депрессии от r_{κ} до R_t (см. рис. 22,б)

$$\omega = 2\pi r H. \quad (51)$$

Подставим (50) и (51) в (49) и разделим переменные H и r

$$Q \frac{dr}{r} = 2\pi k_{\phi} H dH.$$

Проинтегрируем левую часть уравнения в пределах от r_{κ} до R_t , а правую часть — от H_{κ} до H_e . Тогда, после выкладок, получим окончательно приток грунтовых вод, поступающих в котлован (рис. 22), колодец или скважину, также по формуле Дюпюи

$$Q = \frac{\pi k_{\phi} (H_e^2 - H_{\kappa}^2)}{\ln(R_t/r_{\kappa})}, \quad (52)$$

где H_e — естественный напор в грунтовых водах (их мощность); H_{κ} — напор в котловане (слой воды в котловане); R_t — радиус влияния откачки (воронка депрессии); r_{κ} — радиус котлована.

Величину R_t можно найти так:

$$R_t = r_{\kappa} + 1,5 \sqrt{\frac{k_{\phi} H_e t}{\mu_s}}, \quad (53)$$

где t — время от начала откачки, *сут.*

При этом котлован с реальной плановой конфигурацией площадью F приводят к равновеликому условно круглому котловану радиусом

$$r_{\kappa} = \sqrt{\frac{F}{\pi}}. \quad (54)$$

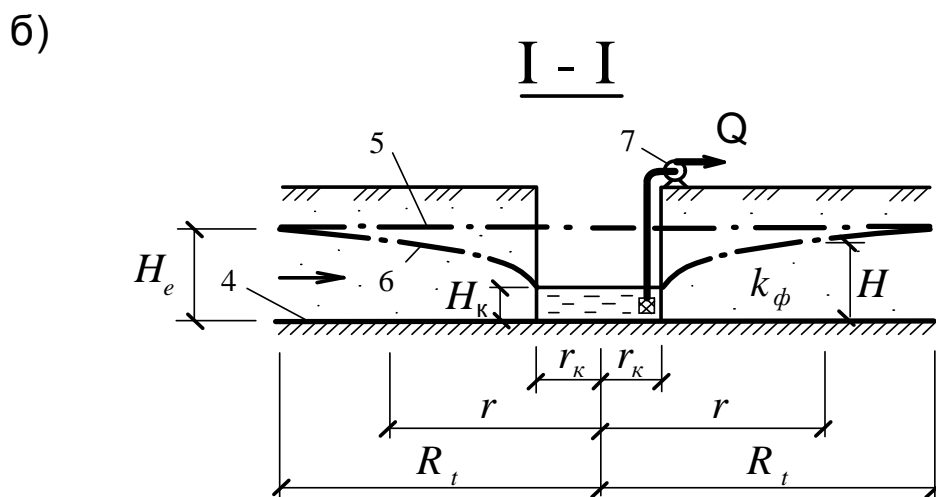
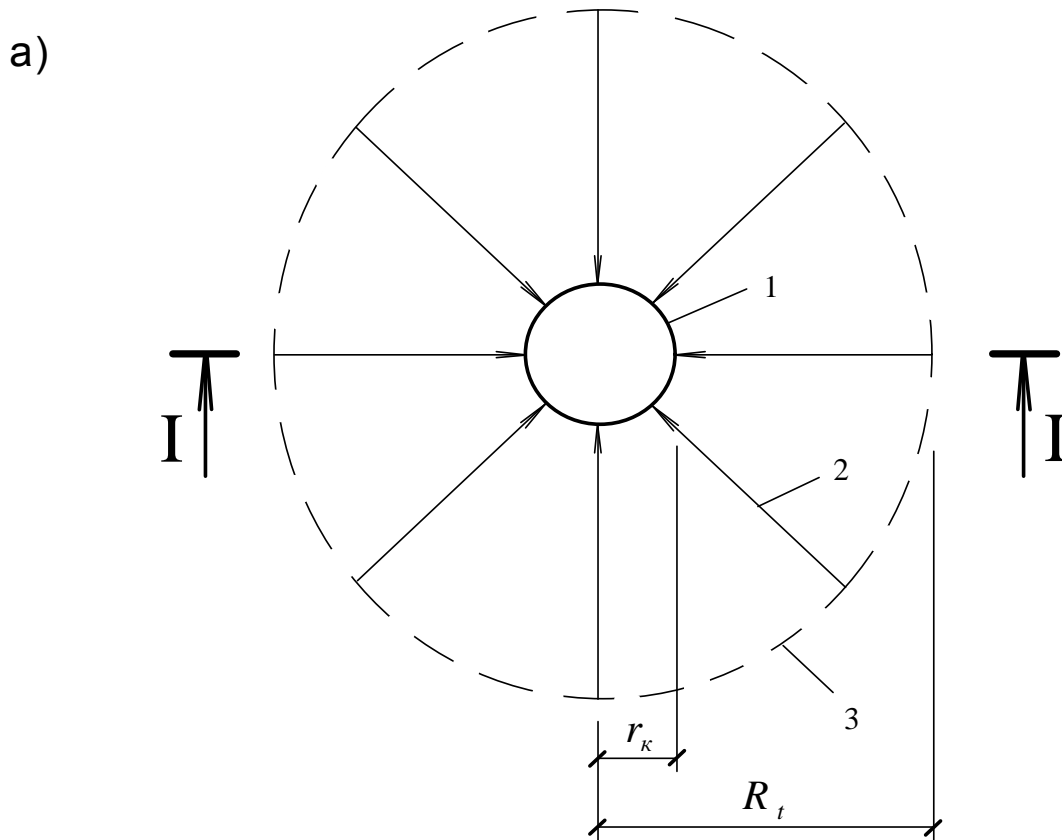


Рис. 22. Фильтрация в котлован: а - план; б - разрез;
 1 - котлован; 2 - направление фильтрации; 3 - граница
 области фильтрации; 4 - водоупор; 5 - естественный УГВ;
 6 - пониженный УГВ (воронка депрессии); 7 - насос

Водоприток Q в траншеи и котлованы максимален в начале откачки и уменьшается с течением времени одновременно с увеличением L_t или R_t .

АЭРОДИНАМИКА (МЕХАНИКА ГАЗА)

Аэродинамикой называется раздел механики жидкости и газа, изучающий закономерности покоя и движения газов.

В области строительства аэродинамические расчёты связаны главным образом с воздухом, на который в основном и будем ориентироваться в данной книге.

Многие гидравлические принципы сохраняются и для газов, так как последние часто считают условно несжимаемыми, как и жидкости. Поэтому в аэродинамике много ссылок на гидравлику.

Положения аэродинамики используются для расчёта систем вентиляции и газоснабжения зданий, при определении ветровых нагрузок на строительные конструкции, в расчётах продуваемости жилых микрорайонов, для оценки воздухопроницаемости стен и оконных проёмов зданий.

Физические свойства газов

Определения плотности ρ , удельного веса γ , вязкости динамической μ и кинематической ν , приведённые для жидкости в гидравлике (см. с. 8-9), остаются в силе и для газа.

Плотность

Плотность газа ρ ($\text{кг}/\text{м}^3$) в зависимости от давления и температуры можно рассчитать по формуле Менделеева и Клапейрона

$$\rho = \frac{p_{ст}}{R_2 T}, \quad (55)$$

где $p_{ст}$ — статическое давление в газе, $Па$ (аналогично гидростатическому — см. с. 10); R_2 — газовая постоянная, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; T — абсолютная температура газа в градусах Кельвина (K), вычисляемая через температуру t° в градусах Цельсия ($^\circ\text{C}$) по формуле

$$T = t^\circ + 273^\circ. \quad (56)$$

Например, плотность воздуха при $t^\circ = +20^\circ\text{C}$, нормальном атмосферном давлении $p_{ст} = p_{атм} = 101325 \text{ Па}$ и соответствующей газовой постоянной $R_2 = 287 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ будет по формуле (55)

$$\rho = 101325 / (287 (20 + 273)) = 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3.$$

В расчётах воздухообмена в зданиях плотность воздуха определяют упрощённо при условии постоянства давления (изобарный процесс): $p_{ст} = p_{атм} = 101325 \text{ Па}$. При этом плотность воздуха ρ считают зависящей только от его температуры T . В дальнейшем, будем иметь в виду только такую простейшую зависимость.

Удельный вес

Удельный вес газа $\gamma \text{ (Н/м}^3\text{)}$ находится по формуле:

$$\gamma = \rho g . \quad (57)$$

Вязкость

Динамическая вязкость воздуха $\mu \text{ (Па}\cdot\text{с)}$ может быть определена по экспериментальной формуле Р.Э. Мулликена

$$\mu = 1,745 \cdot 10^{-5} + 5,03 \cdot 10^{-8} t^\circ . \quad (58)$$

где t° — температура, $^\circ\text{С}$. Например, при $t^\circ = +20 \text{ }^\circ\text{С}$ вычисляем динамическую $\mu = 1,85 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$ и кинематическую вязкость $\nu = \mu / \rho = 1,85 \cdot 10^{-5} / 1,2 = 1,54 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2\text{/с}$.

Обратим внимание, что с увеличением температуры вязкость газа увеличивается (и, наоборот, с уменьшением — уменьшается), в отличие от жидкостей, которые при нагревании становятся менее вязкими (см. с. 9).

Статика газа

Статика газа — это раздел аэродинамики (механики газа), изучающий законы равновесия покоящегося газа и распределения в нём давления.

Статическое давление

Статическое давление $p_{ст} \text{ (Па)}$, действующее в покоящемся газе, складывается из внешнего давления на газ p_0 на некотором горизонтальном уровне (например, замеренное барометром атмосферное давление) и давления собственного веса газа (весового давления) (рис. 23):

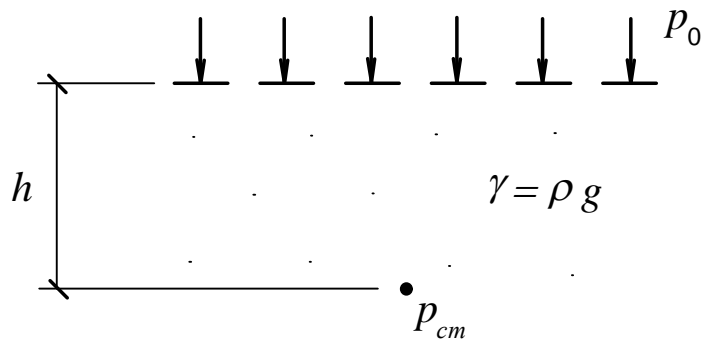


Рис. 23. Схема к определению статического давления p_{cm}

$$p_{cm} = p_0 + \gamma h = p_0 + \rho g h, \quad (59)$$

где h — высота слоя газа над точкой, в которой определяется статическое давление. Приведённое уравнение аналогично основному уравнению гидростатики (см. с. 10). Оно показывает, что давление в газе, как и в жидкости, с изменением высоты меняется по линейной зависимости.

Приборы для измерения давления

Для измерения давления в газе могут применяться следующие приборы:

- барометры (измеряют атмосферное давление);
- манометры (измеряют избыточное давление);
- вакуумметры (измеряют вакуум — см. с. 12).

Давление в газе в системе СИ измеряется в паскалях ($Па = Н/м^2$), которые связаны с миллиметрами водяного столба и $кгс/см^2$ так:

$$1 Па = 0,1 мм вод.ст. = 10^{-5} кгс/см^2 .$$

В атмосферном воздухе статическое давление p_{cm} равно атмосферному $p_{атм}$ на уровне, где оно измеряется барометром. Для других уровней делают поправку $\rho g h$ с плюсом или минусом. Например, в атмосфере при $t^\circ = +20^\circ C$ давление при подъёме на каждые восемь метров уменьшается примерно на $100 Па$ — это можно проверить по формуле (59) для p_{cm} .

При измерении p_{cm} в резервуарах (рис. 24) различают два случая:

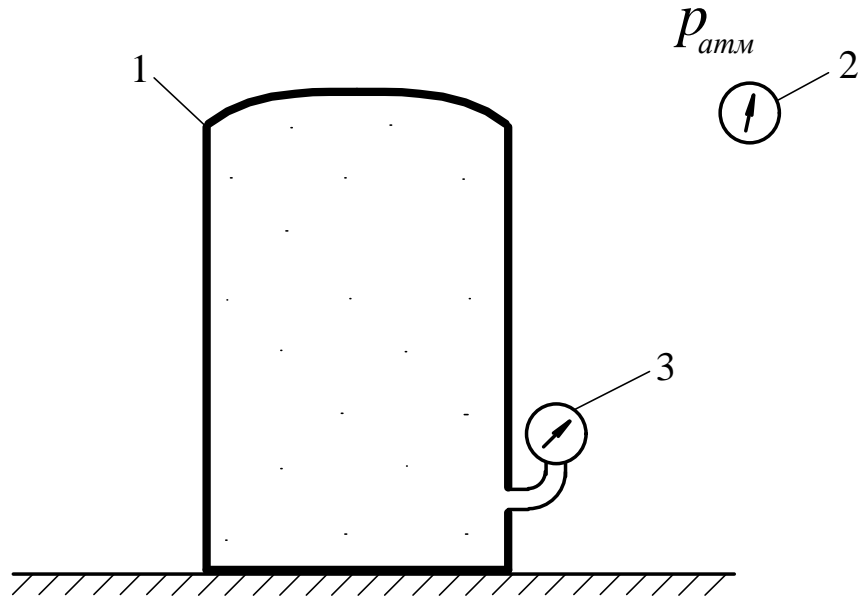


Рис. 24. Схема к измерению $p_{ст}$: 1 - резервуар;
2 - барометр; 3 - манометр (или вакуумметр)

1. Когда внутри давление больше атмосферного ($p_{ст} > p_{ман}$), то используются барометр и манометр и тогда

$$p_{ст} = p_{атм} + p_{ман} ,$$

где $p_{ман}$ — давление манометрическое (избыточное).

2. Когда внутри давление меньше атмосферного ($p_{ст} < p_{атм}$), то используются барометр и вакуумметр и тогда

$$p_{ст} = p_{атм} + p_{в} ,$$

где $p_{в}$ — давление вакуумметрическое (см. с. 12).

Эпюры давления

Для расчёта на прочность замкнутых конструкций, ограждающих газ (трубопроводов, баллонов, резервуаров, газгольдеров и т.д.), на их поверхностях строят эпюры давления:

- избыточного $p_{ман} = p_{ст} - p_{атм}$ (рис. 25,а);
- вакуумметрического $p_{в} = p_{атм} - p_{ст}$ (рис. 25,б).

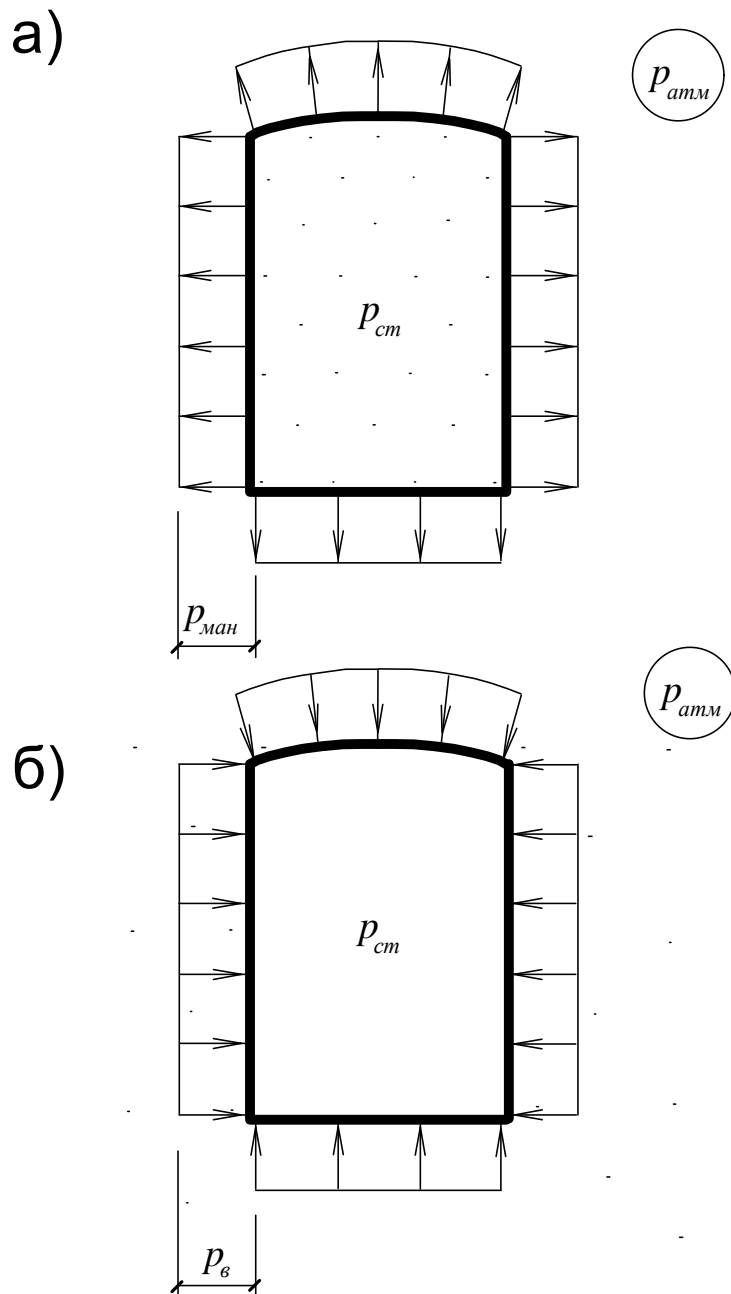


Рис. 25. Эпюры давления на поверхность резервуара: а - $P_{ст} > P_{атм}$; б - $P_{ст} < P_{атм}$

Эпюры давления на рис. 25 построены с пренебрежением изменения давления по высоте резервуара, поэтому на вертикальных стенках они прямоугольные, а не треугольные как для жидкости (см. рис. 5). Такой приём допускается для газа при небольших высотах из-за малости его удельного веса. Эпюры давления служат исходными данными для расчёта конструкций на прочность методами сопромата и строительной механики.

Приведённое статическое давление

Статическое давление $p_{ст}$ не выражает условия равновесия (покоя) газа. Например, газ покоится, но по высоте z в разных его точках величина $p_{ст}$ разная, так как z является переменной. В гидравлике применяют понятие гидростатического напора H (см. с. 15), который для всех точек покоящейся жидкости одинаков. Однако для газа напор не удобно вводить из-за переменной плотности ρ , зависящей от температуры. Поэтому в газе для энергетического сравнения его точек удобно использовать понятие приведённого статического давления (рис. 26):

$$p_{np.cm} = \rho g z + p_{ст}, \quad (60)$$

где $\rho g z$ — давление положения точки газа, отстоящей на высоту z от нулевой горизонтальной плоскости отсчёта 0-0; ρ — плотность газа, соответствующая температуре в рассматриваемой точке. То есть $p_{np.cm}$ приводит давления газа в различных точках к одному уровню 0-0.

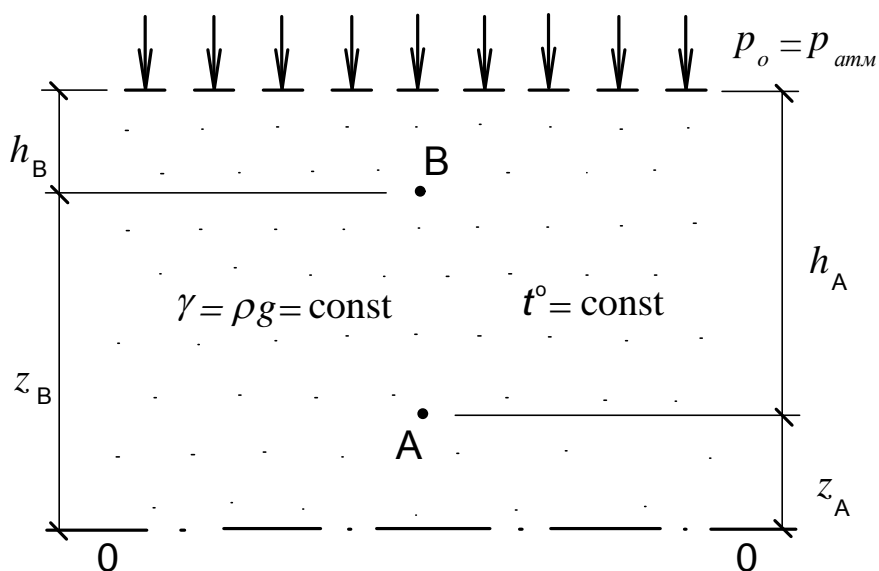


Рис. 26. Сравнение приведённых давлений $p_{np.cm}$

Условие равновесия газа можно сформулировать так: если приведённые статические давления $p_{np.cm}$ в различных его точках одинаковы, то газ покоится.

Это легко доказывается, например, по рис. 26 и формулам (60) и (59) для двух точек газа **A** и **B**. Значения $p_{np.cm}$ для точек **A** и **B** равны, значит газ находится в состоянии покоя, без движения.

Динамика газа

Динамика газа — это раздел аэродинамики (механики газа), изучающий закономерности движущихся газов (потоков газов). Будем рассматривать, главным образом, воздух.

На практике движение воздуха подобно движению несжимаемой жидкости (как в гидравлике). Разница состоит лишь в физических свойствах (плотности ρ , вязкости ν) и в использовании для газа величин давления вместо напора.

Словарь аэродинамических терминов

Аэродинамическую терминологию приведём в сопоставлении с гидравлической.

Аналогия напорным и безнапорным потокам жидкости существует и в газах.

Поток газа в трубопроводе, закрытом канале или воздуховоде заполняет сечение полностью, соприкасаясь со стенками, поэтому он аналогичен напорному. Такие потоки, например, наблюдаются в системах вентиляции, а также в газопроводах.

Аналогию с безнапорными потоками можно проследить в так называемых свободных струях. Например, в струях тёплого воздуха — воздушных завесах, устраиваемых зимой при входе в общественные здания.

В аэродинамике определения площади живого сечения ω , m^2 , расхода потока Q , m^3/c , скорости потока V , m/c , можно использовать гидравлические (см. гидродинамику, с. 16), заменив слово «жидкость» на «газ». Величины скоростей в сетях вентиляции и отопления зданий обычно лежат в пределах 0,5—1,5 м/с.

Для трубопроводов, каналов и воздухопроводов круглого сечения расчётным геометрическим параметром является внутренний диаметр d . Если сечение некруглое, то его приводят к условно круглому с эквивалентным диаметром d_3 по формуле

$$d_3 = 4 \omega / \chi, \quad (61)$$

причём χ — полный периметр сечения (как для напорной трубы).

Например, для воздуховода прямоугольного сечения со сторонами a и b эквивалентный диаметр находится так:

$$d_3 = 4 \omega / \chi = 2 a b / (a + b) .$$

Уравнение неразрывности потока

Уравнение неразрывности потока газа, отражающее физический закон сохранения массы, выглядит так:

$$V_1 \omega_1 = V_2 \omega_2, \quad (62)$$

то есть точно так же, что и для жидкости (см. с. 18), и с тем же следствием: при уменьшении площади живого сечения скорость потока увеличивается, и наоборот.

Приведённое полное давление

В любой точке движущегося газа действует полное давление

$$p_n = p_{ст} + p_d, \quad (63)$$

где $p_{ст}$ — статическое давление (см. с. 42); $p_d = \rho V^2/2$ — динамическое давление, отражающее кинетическую энергию потока газа (аналогично скоростному напору в жидкости $h_V = V^2/(2g)$ — см. с. 19).

Однако величина полного давления p_n не охватывает полную энергию точки движущегося газа, так как в ней не содержится давление положения точки $\rho g z$. Поэтому в качестве энергетической характеристики любой точки потока газа введём понятие приведённого полного давления (рис. 27):

$$p_{пр.н} = \rho g z + p_{ст} + \rho V^2/2, \quad (64)$$

где первые два члена $\rho g z + p_{ст}$ представляют собой потенциальную часть энергии, а последний $\rho V^2/2$ — кинетическую.

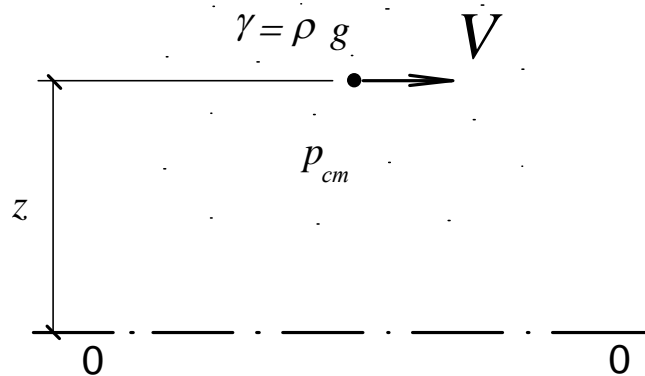


Рис. 27. Схема к понятию приведённого полного давления $p_{пр.н}$

Уравнение Бернулли для газа

Рассмотрим поток газа, проходящий по трубопроводу переменного сечения (рис. 28). В первом сечении приведённое полное давление равно $p_{np.n1}$. При прохождении по трубе часть $p_{np.n1}$ необратимо потеряется из-за проявления сил внутреннего трения газа и во втором сечении энергетическая характеристика уменьшится до $p_{np.n2}$ на величину потерь давления Δp_{nom} .

Уравнение Бернулли для газа в простейшем виде записывается так:

$$p_{np.n1} = p_{np.n2} + \Delta p_{nom}, \quad (65)$$

то есть оно аналогично уравнению Бернулли для жидкости (21) на с. 20, но записано в давлениях, а не напорах.

Уравнение Бернулли в традиционной записи получим, если в последнем равенстве раскроем значения приведённых полных давлений $p_{np.n1}$ и $p_{np.n2}$ по (64):

$$\rho_1 g z_1 + p_{cm1} + \frac{\rho_1 V_1^2}{2} = \rho_2 g z_2 + p_{cm2} + \frac{\rho_2 V_2^2}{2} + \Delta p_{nom}. \quad (66)$$

Энергетический смысл уравнения Бернулли для газа заключается в том, что оно отражает закон сохранения энергии, а геометрический не рассматривается, так как величины в нём выражаются в единицах давления ($Па$), а не напора ($м$).

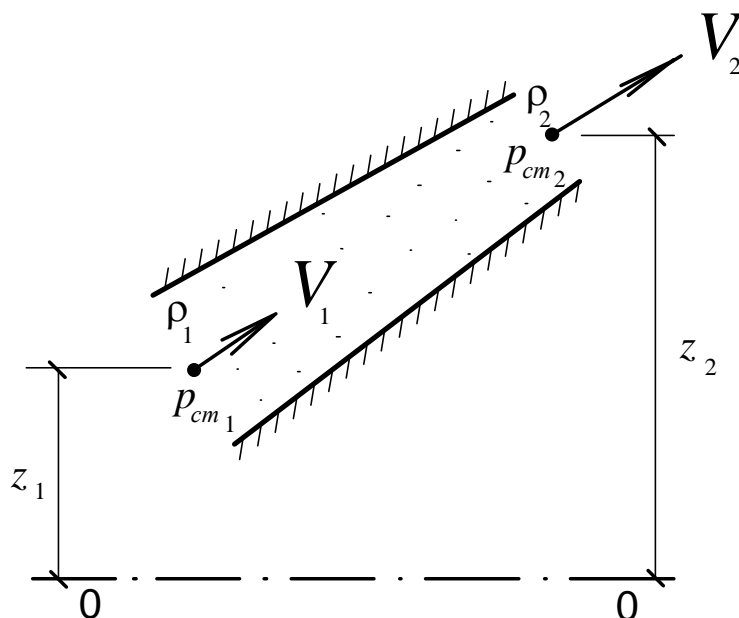


Рис. 28. Схема к уравнению Бернулли для газа

Разность давлений и потери давления

Движение газа происходит только при наличии разности приведённых полных давлений $\Delta p_{np} = p_{np.n1} - p_{np.n2}$ от большего давления $p_{np.n1}$ к меньшему $p_{np.n2}$. Например, так работает естественная вентиляция для удаления воздуха из помещений зданий.

Потери давления Δp_{nom} отражают потерю полной энергии потока при движении газа. Например, чем длиннее воздуховод, меньше его проходное сечение, шероховатее его стенки, тем больше будут потери давления Δp_{nom} в системе вентиляции, что может ухудшить удаление несвежего воздуха из помещений.

При установившемся движении газа разность давлений численно равна потерям давления: $\Delta p_{np} = \Delta p_{nom}$.

Таким образом, «разность давлений» является причиной движения газа, а «потери давления» — следствием. Измеряются они в одних и тех же единицах СИ — паскалях (Па).

Режимы движения газа

При проведении аэродинамического расчёта в первую очередь нужно выяснять, какой режим движения будет наблюдаться у данного потока газа.

Режимы движения газовых потоков делятся на два типа (так же, как в жидкостях):

- 1) ламинарный, спокойный, при малых скоростях;
- 2) турбулентный, вихреобразный, при больших скоростях.

Для выяснения типа режима нужно рассчитать число Рейнольдса Re и сравнить его с критическим числом $Re_{кр}$ для газа.

Число Рейнольдса для газа Re вычисляют по формуле:

$$Re = V d_3 / \nu, \quad (67)$$

где d_3 — эквивалентный диаметр трубопровода, воздуховода или канала (см. с. 46); $d_3 = d$, если трубопровод круглого сечения.

Критическое число Рейнольдса для газа $Re_{кр} \approx 2000$.

Если $Re < Re_{кр}$, то режим ламинарный.

Если $Re > Re_{кр}$, то режим турбулентный.

На практике в подавляющем большинстве случаев наблюдается режим турбулентный: в вентиляционных каналах (воздуховодах), газопроводах, паропроводах, при ветре.

Инженерные сети вентиляции и отопления зданий рассчитывают по законам аэродинамики. При этом используют уравнение Бернулли для газа (см. с. 48), в котором фигурируют давления, а не напоры. Даже водяное отопление рассчитывают именно по давлениям, так как в нём имеет место изменение температуры жидкости и, соответственно, её плотности, поэтому применять величины напоров неудобно. Аэродинамический расчёт этих сетей сводится к определению действующей разности давлений Δp_{np} (вызывающей в них движение), потерь давления в них Δp_{nom} , скоростей, расходов и геометрических размеров проходных сечений.

Расчёт ведётся по уравнению Бернулли так. Надо подобрать такие размеры трубопроводов, каналов и их проходных сечений (которые создают сопротивления потоку), чтобы скорости потоков были допустимыми, расходы удовлетворяли нормам и разность давлений Δp_{np} была равна потерям давления в сети Δp_{nom} , причём для запаса надёжности потери искусственно увеличивают на 10 %. Поэтому для расчёта инженерных сетей уравнение Бернулли применяют в такой записи:

$$\Delta p_{np} = 1,1 \Delta p_{nom}, \quad (68)$$

и сеть окончательно должна удовлетворять этому равенству.

Вычисление разности давлений Δp_{np} будет рассмотрено ниже на примерах расчётов топки с дымовой трубой и водяного отопления с естественной циркуляцией.

Потери давления Δp_{nom} в трубопроводе, воздухопроводе или газопроводе можно найти по формуле Вейсбаха для газа:

$$\Delta p_{nom} = \zeta \frac{\rho V^2}{2}, \quad (69)$$

где ζ — коэффициент гидравлического сопротивления, тот же, что и для жидкости (см. с. 26), только в случае некруглого сечения надо использовать величину эквивалентного диаметра d_3 вместо d .

Общие потери давления Δp_{nom} складываются из суммы линейных Δp_l и местных Δp_m потерь:

$$\Delta p_{nom} = \sum \Delta p_l + \sum \Delta p_m. \quad (70)$$

Для вычисления Δp_l и Δp_m применяется формула Вейсбаха для газа (69), в которой вместо ζ подставляют соответственно ζ_l или ζ_m (см. с. 26-28), а вместо d — d_3 .

Например, при определении Δp_l коэффициент линейного гидравлического сопротивления (величина безразмерная)

$$\zeta_l = \lambda l / d_s, \quad (71)$$

где l — длина прямолинейного участка сети.

Коэффициент гидравлического трения λ при турбулентном режиме (практически всегда в газовых потоках) определяется по формуле (32) с. 27 в виде

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{68}{\text{Re}} + \frac{\Delta}{d_s} \right)^{0,25}, \quad (72)$$

где Δ — шероховатость стенок трубопровода или канала, мм. Например, вентиляционные короба из листовой стали имеют $\Delta = 0,1$ мм, а воздухопроводы в кирпичной стене $\Delta = 4$ мм.

Значения коэффициента местных гидравлических сопротивлений ζ_m принимают по справочным данным для конкретных участков деформации потока (вход и выход из трубы, поворот, тройник и т.д.).

Расчёт систем с естественной тягой

Работа печных труб и вентиляционных систем зданий, удаляющих дым и несвежий воздух из помещений, основана на естественной тяге Δp_e — разности приведённых полных давлений внутри и снаружи, Па.

Естественная тяга Δp_e (Па) находится по формуле

$$\Delta p_e = g h (\rho_n - \rho_s), \quad (73)$$

где h — высота печной (дымовой) трубы или вентиляционной шахты; ρ_n — плотность наружного (холодного) воздуха; ρ_s — плотность внутреннего (тёплого) воздуха по формуле (55).

Рассмотрим пример расчёта топки (рис. 29). При горении топлива в топке тяга дымовой трубы способствует удалению горячих газов. Тяга возникает из-за разности температур: горячего воздуха внутри топки t_s° и холодного — снаружи t_n° . Разные температуры соответствуют разным плотностям воздуха ρ_s и ρ_n . Из-за малых скоростей V в таких системах динамическое давление $p_d = \rho V^2/2$ не учитывается. Тогда, подставляя в уравнение Бернулли для газа (65) приведённые полные давления для точек **A** и **B** (см. рис. 29), придём к формуле естественной тяги (73) и определим Δp_e .

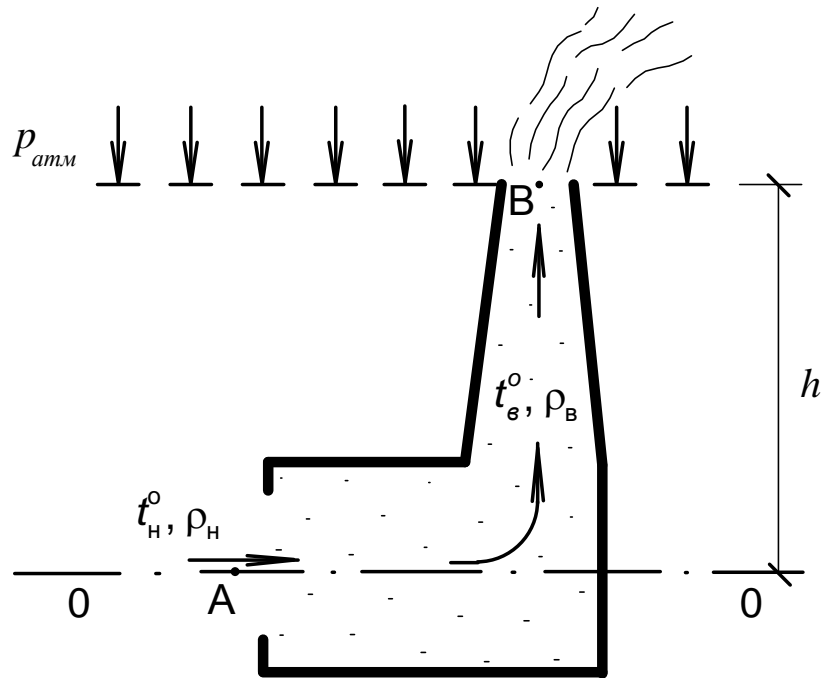


Рис. 29. Схема топки с дымовой трубой

Следующим шагом расчёта является нахождение общих потерь давления $\Delta p_{пот}$ (см. с. 50) и сравнение их с величиной тяги Δp_e . Если достигнуто равенство (68), то расчёт закончен, система будет работать нормально — удалять дым. Если равенство (68) не соблюдается, то нужно конструктивными мероприятиями изменить или тягу, или потери. Например, тягу можно увеличить двумя способами:

- сделать выше трубу;
- увеличить разницу температур (что не всегда возможно).

Потери давления будут меньше, если будет:

- больше проходное сечение трубы;
- короче путь прохождения удаляемых газов;
- меньше поворотов и других местных сопротивлений;
- меньше шероховатость стенок каналов.

Системы естественной вентиляции в зданиях по удалению не-свежего воздуха из помещений работают и рассчитываются точно по таким же принципам.

Расчёт систем с естественной циркуляцией

На рис. 30 схематично изображена система водяного отопления — это типичная система с естественной циркуляцией. Стрелками показан круговорот воды. За счёт чего же она «крутится»?

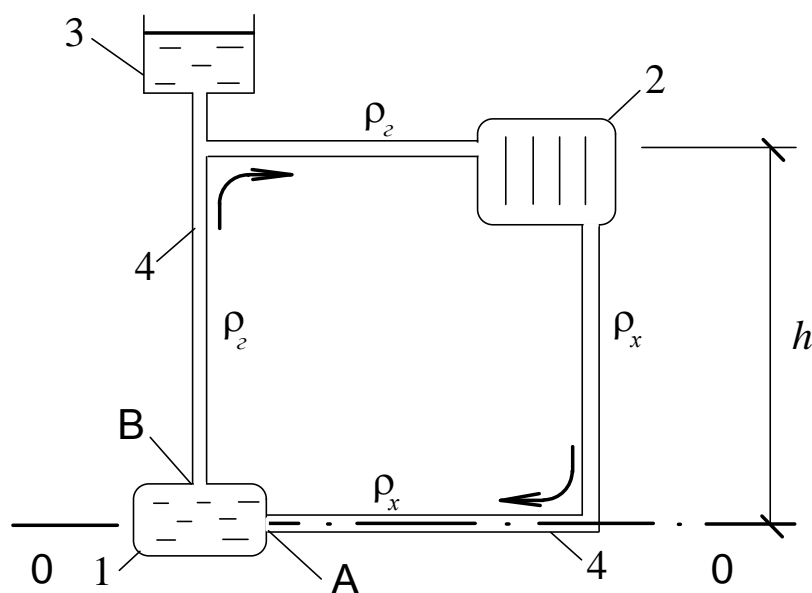


Рис. 30. Схема водяного отопления с естественной циркуляцией: 1 - водогрейный котёл; 2 - радиатор; 3 - расширительный бак; 4 - трубопроводы

При нагревании воды в водогрейном котле она становится горячей и приобретает плотность ρ_2 , отличную от плотности холодной воды ρ_x . Для расчёта таких систем упрощённо принимают, что температура и плотность резко изменяются только в центре нагревания (котле) и центре охлаждения (отопительном приборе — радиаторе). Возникает естественное давление Δp_e — так принято называть разность приведённых полных давлений в котле и радиаторе, P_a . Оно и приводит в движение воду в таких системах, гоня её по замкнутому кругу, — это называется естественной циркуляцией.

Формула для естественного давления Δp_e выводится, как и в предыдущем примере, с помощью уравнения Бернулли для газа:

$$\Delta p_e = \gamma h (\rho_x - \rho_2), \quad (74)$$

где h — расстояние по высоте между центром нагревания и охлаждения (см. рис. 30).

После вычисления Δp_e рассчитывают общие потери давления Δp_{nom} при движении воды по трубопроводам циркуляционного кольца от точки В к А (см. рис. 30) с использованием формулы (69).

Если соблюдается равенство (68) — расчёт закончен, система будет работать нормально — обогревать помещение. Если равенство не соблюдается, то надо корректировать или естественное давление Δp_e , или потери Δp_{nom} . Как этого добиться — подумайте сами (см. с. 52).

При возведении зданий строители сталкиваются с воздействием ветра — с так называемыми ветровыми нагрузками. Поток воздуха обтекает здания, сооружения, строительные механизмы (краны и т.д.) и стремится опрокинуть их. При ветре на поверхности домов возникают зоны повышенного и пониженного давления, что может привести к продавливанию ограждающей конструкции или к её отрыву. При сильных ветрах срывает крышу или её отдельные элементы. Перепад давлений с разных сторон дома приводит к сквознякам в помещениях через окна, балконные двери и даже через стены. Рассмотрим аэродинамическую суть этих явлений.

При обтекании здания воздушным потоком линии тока обтекают его коробку, причём за зданием в подветренной зоне образуется вихрь и область пониженного давления (рис. 31). В передней же наветренной части давление воздуха, наоборот, повышается.

Ветровое давление вычисляется по формуле

$$P_{ветр} = k_г C_{аэр} P_д = k_г C_{аэр} \frac{\rho V^2}{2}, \quad (75)$$

где $k_г$ — коэффициент изменения ветрового давления по высоте; $C_{аэр}$ — аэродинамический коэффициент (безразмерный); $p_д = \rho V^2/2$ — динамическое давление, Па; $\rho \approx 1,22 \text{ кг/м}^3$ — плотность воздуха, обычно принимаемая в строительных расчётах; V — скорость ветра, м/с.

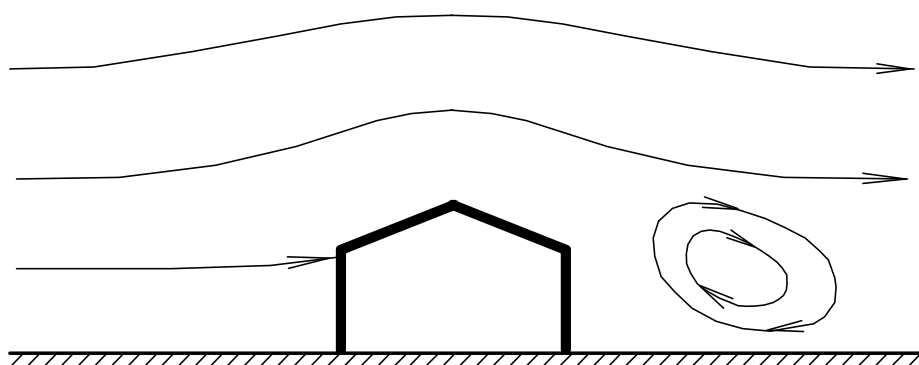


Рис. 31. Обтекание здания воздушным потоком

Коэффициент k_e с увеличением высоты от поверхности земли возрастает обычно с 0,4 до 1,5 (ветер с высотой усиливается). В первом приближении его можно принимать $k_e \approx 1$.

Аэродинамический коэффициент $C_{aэр}$ в общем случае является функцией формы обтекаемого тела и числа Рейнольдса. Он характеризует условия обтекания здания в зависимости от его конфигурации в плане и разрезе и ориентации по отношению к господствующему направлению ветров. В строительных расчётах его принимают в виде констант.

Аэродинамический коэффициент $C_{aэр}$ имеет численные значения между 1 и 0 (по абсолютной величине). Например, для наветренной (фронтальной) стены дома $C_{aэр} = +0,8$, а с противоположной (подветренной) стороны коэффициент $C_{aэр} = -0,6$ (рис. 32). Знак «минус» указывает, что давление ветра направлено от стены, ветер стремится оторвать конструкцию от здания. Знак «плюс» — давление направлено к стене.

Для выяснения картины распределения ветрового давления $p_{ветр}$ по поверхности здания строят эпюры давления (см. рис. 32). Их ординаты вычисляют по формуле ветрового давления (75). Значения динамического давления p_d принимают в готовом виде по нормативной литературе для рассматриваемого географического района строительства или же вычисляют по скорости ветра V из наблюдений метеорологов, если район малоизучен. Реальные эпюры ветрового давления $p_{ветр}$ имеют криволинейное очертание, однако в строительных расчётах применяют упрощённо прямоугольные эпюры (см. рис. 32).

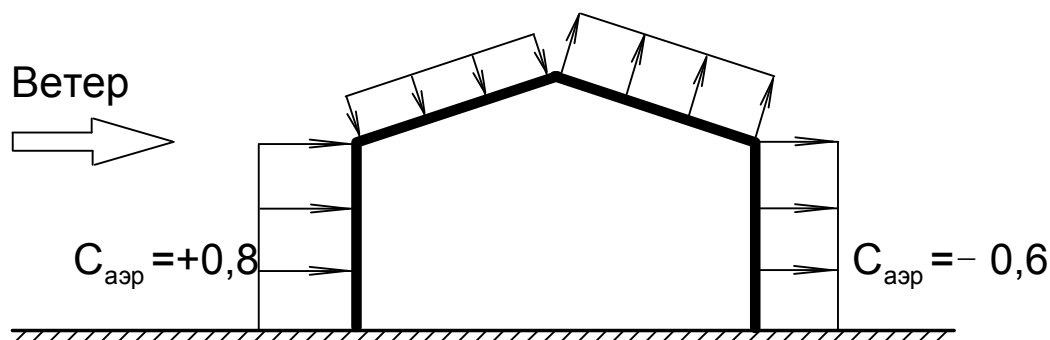


Рис. 32. Эпюры ветрового давления по поверхности здания

Фильтрация газа

Фильтрация газа, то есть его движение через пористые среды, в области строительства имеет особое значение для ограждающих конструкций зданий: стен, покрытий.

Зимой холодный воздух проникает в помещения через поры и микротрещины стен, через щели окон, балконных дверей — происходит так называемая инфильтрация воздуха, порождающая сквозняки и понижение температуры. Поэтому проницаемость ограждающих конструкций зданий ограничивается строительными нормами.

Для расчёта скорости фильтрации газа используется закон Дарси в виде:

$$V_{\phi} = \frac{k_0}{\mu} \cdot \frac{\Delta p_{np}}{l}, \quad (76)$$

где k_0 — проницаемость пористой среды, m^2 ; μ — динамическая вязкость газа, $Pa \cdot c$; Δp_{np} — разность приведённых полных давлений, вызывающая движение газа, Pa ; l — длина пути фильтрации, m .

Закон Дарси в этой записи для газа применяется во всех областях техники, например, при расчёте притока природного газа к буровым скважинам на газовых месторождениях. Он позволяет рассчитывать фильтрацию газа только в ламинарном режиме.

Однако в строительстве для расчётов фильтрации воздуха через ограждающие конструкции зданий этот закон применяют в другом виде (для ламинарного и турбулентного режима движения газа)

$$V_{\phi} = \frac{(\Delta p_{np})^n}{\rho R_u}, \quad (77)$$

где ρ — плотность воздуха, kg/m^3 ; R_u — сопротивление воздухопроницаемости строительного материала, $m^2 \cdot c \cdot Pa/kg$ (принимается по строительным нормам для соответствующей толщины материала δ); $n = 1$ — для стен и покрытий (ламинарный режим фильтрации); $n = 2/3$ — для окон и балконных дверей (турбулентный режим).

Следует помнить, что перед расчётом по формуле (77) все исходные величины надо перевести в единицы СИ!

Таким образом, закон Дарси (76) и (77) позволяет вычислять объёмный расход газа (воздуха) $Q = V_{\phi} \omega$, проходящего через конструкцию толщиной l (или δ) с площадью поперечного сечения ω . Для пересчёта Q в весовой расход его умножают на удельный вес газа γ .

Список контрольных вопросов

1. 1-е свойство гидростатического давления?
2. Безнапорные потоки - что это такое?
3. Вакуум в жидкости. Дайте определение вакуума принятое в гидравлике.
4. Как вязкость воздуха зависит от температуры?
5. Какова размерность динамической вязкости в СИ?
6. Гидравлический радиус - дайте точное определение этого термина.
7. Гидравлический удар - что это такое?
8. В чём измеряется гидродинамический напор в гидравлике (единицы измерения)?
9. Дайте точное гидравлическое определение для гидростатического давления.
10. Дайте формулу динамического давления газа в словесном определении.
11. Дайте точное определение живого сечения потока жидкости или газа.
12. Как зависит вязкость жидкости от температуры?
13. Дайте точно определение закона Архимеда.
14. Дайте точное определение закона Дарси.
15. Дайте определение избыточного давления.
16. Характерная особенность напорной линии потока жидкости?
17. Дайте точное гидравлическое определение - что такое напорные потоки?
18. Объясните точно, что означает знак МИНУС у аэродинамического коэффициента?
19. Что такое плотность жидкости? Дайте чёткое определение.
20. Полное гидростатическое давление в жидкости?
21. Назовите единицу измерения, принятую в гидравлике для потерь напора.
22. Назвать лишь тот набор приборов, которые служат для измерения давления в жидкости.
23. Характерный признак пьезометрической линии?
24. Разновидности потерь давления, рассматриваемые в аэродинамике?
25. Режимы движения при вихреобразном и параллельноструйном течении жидкости?
26. Режимы движения при параллельноструйном и вихреобразном течении газа?
27. Что такое свободная поверхность жидкости? Точное гидравлическое определение.
28. Связь скорости и давления в потоке на основе уравнения Бернулли?
29. Дайте определение скорости фильтрации, принятое в гидравлике.
30. Смоченный периметр. Что это такое?
31. Дайте определение средней скорости потока, принятое в гидравлике.
32. Что такое удельный вес жидкости? Точное определение.
33. Дайте словесное определение уравнения Бернулли для газа в простейшем виде.
34. Дать словесное описание уравнения Бернулли для жидкости в простейшем виде.
35. Изменится ли скорость напорного потока в круглой трубе при переходе на диаметр втрое меньший?
36. Что подразумевается в гидравлике под термином ФИЛЬТРАЦИЯ ЖИДКОСТИ?
37. Формула Шези - где используется в гидравлике?
38. Что характеризует число Рейнольдса для потока жидкости или газа?
39. Дайте точное аэродинамическое определение эквивалентного диаметра потока газа.
40. Наиболее точное определение закона Дарси для газа?

41. Набор приборов, применяемых для измерения давления в газе?
42. Как находят скоростной напор?
43. Что характеризует коэффициент фильтрации пористой среды?
44. Что характеризует коэффициент водоотдачи пористой среды?
45. Что служит основой для фильтрационных расчётов?
46. От чего отсчитывают напоры для различных точек жидкости?
47. Каково предельное значение вакуума?
48. Что такое естественная тяга? Дайте определение, принятое в аэродинамике.
49. Энергетический смысл уравнения Бернулли для жидкости?
50. Что такое гидродинамический напор?
51. Плотность воды при температуре +4 градуса по Цельсию?
52. Удельный вес воды при температуре +4 градуса по Цельсию?
53. Какова размерность кинематической вязкости в СИ?
54. 2-е свойство гидростатического давления?
55. Связь единиц давления в различных системах измерения?
56. Что такое манометрическое давление?
57. Избыточное давление жидкости в открытых резервуарах ...
58. Давление столба жидкости вычисляется как ...
59. Что измеряют манометры?
60. Что измеряют пьезометры?
61. Вакуумметры измеряют вакуум в единицах ...
62. Манометр на водопроводе показывает 0,3 МПа. Это соответствует ...
63. Вакуумметр перед насосом показывает 0,03 МПа, что соответствует полному давлению ...
64. В открытом резервуаре эпюра избыточного давления жидкости на вертикальную стенку ...
65. Объем подземной конструкции под уровнем грунтовых вод 4 кубометра. Поэтому сила Архимеда ...
66. Гидростатический напор состоит из ...
67. Гидростатический напор для всех точек покоящейся жидкости ...
68. Расход потока - это ...
69. Единицы измерения расхода в СИ?
70. Изменится ли скорость напорного потока в круглой трубе при переходе на диаметр вдвое меньший?
71. Площадь живого сечения канала с водой 2 м кв., смоченный периметр 5 м, поэтому гидравлический радиус ...
72. Уравнение неразрывности отражает закон ...
73. Гидродинамический напор состоит из ...
74. Разность показаний пьезометра и трубки Пито позволяет измерить ...
75. Критическое число Рейнольдса для напорных потоков ...
76. Критическое число Рейнольдса для безнапорных потоков ...
77. Коэффициент гидравлического трения при ламинарном режиме равен ...
78. Число Рейнольдса для напорных потоков жидкости в трубопроводах вычисляется как ...
79. Число Рейнольдса для безнапорных потоков жидкости в трубопроводах вычисляется как ...
80. Общие потери напора по формуле Вейсбаха вычисляются как ...
81. Гидравлический уклон - это ...
82. При гидравлическом ударе повышение давления по формуле Н.Е. Жуковского равно ...
83. На сколько % увеличивается расход жидкости с помощью насадка в сравнении с отверстием ...

84. Коэффициент расхода круглого отверстия ...
85. Коэффициент расхода насадка ...
86. При гидравлическом расчете безнапорных труб ограничение по скорости ...
87. При гидравлическом расчете безнапорных труб ограничение по наполнению h/d ...
88. При гидравлическом расчете безнапорных труб ограничение по уклону ...
89. Уклон безнапорного потока по формуле Шези вычисляют так ...
90. Коэффициент Шези при расчете безнапорных потоков вычисляют так ...
91. Скорость фильтрации воды по закону Дарси ...
92. Коэффициент фильтрации песков обычно имеет величину ...
93. Коэффициент водоотдачи песков обычно имеет величину ...
94. Плотность газа по формуле Менделеева и Клапейрона находят так ...
95. Статическое давление в покоящейся газе состоит из ...
96. Для газа строят эпюры давления: ...
97. Для газа приведенное статическое давление ...
98. Для воздуховода квадратного сечения со стороной A эквивалентный диаметр равен ...
99. Полное давление движущегося газа есть ...
100. Приведенное полное давление движущегося газа - это ...
101. Число Рейнольдса для газа вычисляют так ...
102. Критическое число Рейнольдса для газа ...
103. Потери давления для газа по формуле Вейсбаха ...
104. Абсолютная шероховатость стенок старых стальных труб ...
105. Абсолютная шероховатость стенок вентиляционных коробов из листовой стали ...
106. Потери давления в газопроводе будут меньше, если будет: ...
107. Потери напора в водопроводе будут меньше, если будет: ...
108. При действии ветра на здание вихрь ...
109. Аэродинамический коэффициент для наветренной стороны высотного здания:
110. Аэродинамический коэффициент для подветренной стороны высотного здания:
111. Аэродинамический коэффициент в общем случае ...
112. Плотность воздуха, принимаемая в расчетах по архитектурно-строительной аэродинамике ...
113. Коэффициент изменения ветрового давления по высоте меняется ...
114. Объясните точно, что означает знак ПЛЮС у аэродинамического коэффициента?
115. Тормозные системы автомобиля используют ...
116. При работе гидродомкрата используют ...
117. Эжектор - это ...
118. Гидроэлеватор - это ...
119. При длине трубы 10 м и гидравлическом уклоне 0,2 потери напора ...
120. Особенность свободной поверхности при фильтрации ...
121. Водоупор - это ...
122. Гидроизоляция - это ...
123. Скорость фильтрации газа по закону Дарси вычисляют так ...
124. Инфильтрация воздуха - это ...
125. В строительных расчетах эпюры ветрового давления принимают в форме ...

Буквенные обозначения с указателем

- ρ - плотность, $кг/м^3$ (с. 8, 40, 62).
 m - масса, $кг$ (с. 8).
 V_0 - объём, $м^3$ (с. 8, 17).
 γ - удельный вес, $Н/м^3$ (с. 8, 41, 56).
 G - вес (сила тяжести), $Н$ (с. 8, 14).
 g - ускорение свободного падения, $м/с^2$ (с. 8, 62).
 μ - вязкость динамическая, $Па·с$ (с. 9, 41, 56).
 ν - вязкость кинематическая, $м^2/с$ (с. 9, 41, 62).
 F_n - подъёмная (архимедова) сила, $Н$ (с. 14).
 h - глубина (высота), $м$ (с. 10).
 p - давление полное (гидростатическое), $Па$ (с. 10).
 p_0 - давление внешнее, $Па$ (с. 10).
 $p_{ж}$ - давление веса столба жидкости, $Па$ (с. 10).
 $p_{атм}$ - давление атмосферное, $Па$ (с. 10, 62).
 $p_{изб}$ - давление избыточное, $Па$ (с. 10).
 $p_{ман}$ - давление манометрическое, $Па$ (с. 10).
 H - напор гидростатический, $м$ (с. 15).
 H - напор гидродинамический, $м$ (с. 19).
 z - напор (высота) геометрический, $м$ (с. 15, 19).
 h_p - напор (высота) пьезометрический, $м$ (с. 15, 19).
 h_v - напор скоростной, $м$ (с. 19, 21, 22).
 ω - площадь живого сечения, $м^2$ (с. 17).
 q, Q - расход потока, $м^3/с$ (с. 17).
 V - скорость потока средняя, $м/с$ (с. 17).
 χ - смоченный периметр, $м$ (с. 17).
 R - гидравлический радиус, $м$ (с. 17).
 d - диаметр внутренний, $м$ (с. 26, 31).
 Re - число Рейнольдса (безразмерное) (с. 25, 49).
 $Re_{кр}$ - число Рейнольдса критическое (безразмерное) (с. 25, 49).
 ΔH - потери напора (разность напоров), $м$ (с. 21, 26).
 h_l - потери напора линейные, $м$ (с. 26).
 h_m - потери напора местные, $м$ (с. 28).
 ζ - коэффициент гидравлического сопротивления (с. 26).
 λ - коэффициент гидравлического трения (с. 22, 27).
 Δ - абсолютная шероховатость стенок труб, $мм$ (с. 27).
 l - длина потока, $м$ (с. 27).

- i - уклон гидравлический (безразмерный) (с. 27, 30).
- i_{geom} - уклон геометрический (безразмерный) (с. 30, 31).
- V_{zv} - скорость звука, м/с (с. 28).
- μ_0 - коэффициент расхода (безразмерный) (с. 29).
- C - коэффициент Шези (с. 31).
- n - коэффициент шероховатости (безразмерный) (с. 31).
- V_ϕ - скорость фильтрации, м/сут (с. 34, 35, 56).
- k_ϕ - коэффициент фильтрации, м/сут (с. 35).
- H_e - напор (естественная мощность) грунтовых вод, м (с. 36, 38).
- H_m - напор воды в траншее, м (с. 36).
- H_k - напор воды в котловане, м (с. 38).
- L_t - зона влияния откачки, м (с. 36).
- R_t - радиус влияния откачки, м (с. 38).
- r_k - радиус котлована, м (с. 38).
- μ_v - коэффициент водоотдачи грунта (безразмерный) (с. 35).
- T - температура абсолютная по Кельвину, К (с. 40).
- t° - температура по Цельсию, °С (с. 40)
- R_z - газовая постоянная для воздуха, Дж/(кг·К) (с. 40, 62).
- $p_{ст}$ - статическое давление, Па (с. 41, 42).
- $p_{пр.ст}$ - приведённое статическое давление, Па (с. 45).
- p_n - полное давление (движущегося газа), Па (с. 47).
- p_d - динамическое давление, Па (с. 47).
- $p_{пр.n}$ - приведённое полное давление, Па (с. 47).
- $\Delta p_{пр.n}$ - разность приведённых полных давлений, Па (с. 49).
- $\Delta p_{пот}$ - потери давления (общие), Па (с. 50).
- Δp_l - потери давления линейные, Па (с. 50).
- Δp_m - потери давления местные, Па (с. 50).
- d_ε - диаметр эквивалентный, м (с. 46).
- Δp_e - естественная тяга, Па (с. 51)
- Δp_e - естественное давление, Па (с. 53).
- $p_{ветр}$ - давление ветровое, Па (с. 54).
- k_v - коэффициент ветрового давления (безразмерный) (с. 54).
- $C_{aэр}$ - коэффициент аэродинамический (безразмерный) (с. 54, 55).
- k_0 - проницаемость, м² (с. 56).
- R_u - сопротивление воздухопроницаемости, м²·ч·Па/кг (с. 56).

Справочные данные

Таблица 2

Плотность и кинематическая вязкость воды

$t, ^\circ\text{C}$	+10	+20	+30	+40	+50
$\rho, \text{кг/м}^3$	999,73	998,23	995,67	992,24	988,07
$\nu, \text{см}^2/\text{с}$	0,01306	0,01006	0,00805	0,00659	0,00556

Некоторые практические константы

Ускорение свободного падения $g = 9,80665 \approx 10 \text{ м/с}^2$.

Нормальное атмосферное давление $p_{\text{атм}} = 101325 \text{ Па} \approx 100000 \text{ Па}$.

Газовая постоянная для воздуха $R_z = 287 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

Таблица 3

Размерности величин в различных системах измерения

Величина	СИ	Перевод в другие единицы
Длина	м	$1 \text{ м} = 100 \text{ см} = 1000 \text{ мм}$
Площадь	м^2	$1 \text{ м}^2 = 10^4 \text{ см}^2 = 10^6 \text{ мм}^2$
Объём	м^3	$1 \text{ м}^3 = 10^6 \text{ см}^3 = 1000 \text{ л}$
Масса	кг	$1 \text{ кг} = 1000 \text{ г}$
Сила, вес	Н	$10 \text{ Н} \approx 1 \text{ кгс} = 10^{-3} \text{ тс}$
Плотность	кг/м^3	$1000 \text{ кг/м}^3 = 1 \text{ г/см}^3$
Удельный вес	Н/м^3	$10^4 \text{ Н/м}^3 = 1 \text{ тс/м}^3$
Вязкость кинематическая	$\text{м}^2/\text{с}$	$1 \text{ м}^2/\text{с} = 10^4 \text{ см}^2/\text{с}$
Давление	$\text{Па} =$ $=\text{Н/м}^2$	$100000 \text{ Па} \approx 1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс/см}^2 =$ $=10 \text{ м вод.ст.} = 760 \text{ мм рт.ст.}$

Алфавитно-предметный указатель

- Аэродинамика 40
- Вакуум 12
- Вязкость динамическая 9, 41, 56
— кинематическая 9, 41, 62
- Водоупор 32
- Гидравлика 8
- Гидравлический радиус 17
- Гидродинамика 16
- Гидроизоляция 32
- Гидростатика 9
- Давление атмосферное 10, 62
— вакуумметрическое 12
— весовое 41
— ветровое 54
— внешнее 10, 41
— динамическое 47
— избыточное 10
— манометрическое 10
— полное 10, 47
— — приведённое 47
— положения точки 45, 47
— статическое 41, 42
— — приведённое 45
- Диаметр эквивалентный 46, 49, 50
- Естественная тяга 51
- Естественное давление 53
- Закон Архимеда 14
— Дарси 35, 56
- Инфильтрация воздуха 56
- Коэффициент аэродинамический 55
— водоотдачи 35
— гидравлического сопротивления 26, 50
— — трения 22, 27
— изменения ветрового давления по высоте 54, 55
— расхода 29
— фильтрации 35
— шероховатости 31
- Ламинарный режим 25, 49
- Линия напорная 20, 22
— пьезометрическая 20, 22
- Напор гидродинамический 19
— гидростатический 15
— фильтрационный 34
- Плотность 8, 40, 62
- Потери давления общие 50
— — линейные 50
— — местные 50
- Потери напора общие 26,
— — линейные 26
— — местные 28
- Пьезометр 10, 11
- Радиус влияния откачки 38
- Разность давлений 49
— напоров 21
- Режимы движения 25, 49
- Свободная поверхность 16, 17
- Смоченный периметр 17
- Турбулентный режим 25, 49
- Удельный вес 8, 41, 56
- Уклон геометрический 30, 31
— гидравлический 27, 30
— пьезометрический 34
- Уравнение Бернулли 20, 21, 48
— неразрывности 18, 47
- Фильтрация 32, 56
- Формула Вейсбаха 26, 50
— Клапейрона 40
— Шези 31
- Число Рейнольдса 25, 49
— — критическое 25, 49
- Шероховатость абсолютная 27
- Эпюры давления 13, 43, 44

Учебное издание

Сологаев Валерий Иванович

ГИДРАВЛИКА
(МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА)

Учебное пособие

Набор, иллюстрации и макет автора

Зав. редакцией СибАДИ Т.И. Калинина

Подписано к печати 25.01.2010 г.
Формат 60x90 1/16. Бумага писчая.
Оперативный способ печати
Гарнитура Times New Roman
Усл. п. л. 4,4. Уч.-изд. л. 3,8.
Тираж 500 экземпляров. Заказ № 523
Цена договорная

Издательство СибАДИ
644099, г. Омск, ул. Петра Некрасова, 10

Отпечатано в ПЦ издательства СибАДИ
644099, г. Омск, ул. Петра Некрасова, 10