

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

**А. А. Андрижиевский, П. М. Клепацкий,
Е. С. Санкович**

ОСНОВЫ ГИДРОГАЗОДИНАМИКИ ПРАКТИКУМ

*Допущено
Министерством образования Республики Беларусь
в качестве учебного пособия для студентов учреждений,
обеспечивающих получение высшего образования
по технологическим и техническим специальностям*

Минск 2007

УДК 681.3.06(075.8)
ББК 32.973я7
А 65

Под редакцией А. А. Андрижиевского

Рецензенты:

д-р физ.-мат. наук, проф. *В. Г. Баитовой*;
чл.-кор. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф. *В. А. Бородуля*

Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или ее части не может быть осуществлено без разрешения учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».

Андрижиевский, А. А.

А 65 Основы гидрогазодинамики. Практикум : учеб. пособие /
А. А. Андрижиевский, П. М. Клепацкий, Е. С. Санкович; под ред.
А. А. Андрижиевского. — Минск : БГТУ, 2007. — 232 с.

ISBN 978-985-434-734-8

Учебное пособие предназначено для сопровождения практических и лабораторных работ по дисциплине «Основы гидрогазодинамики». Обучение проводится на доступных, адаптированных к учебному процессу в высших учебных заведениях примерах и задачах.

УДК 681.3.06(075.8)
ББК 32.937я7

ISBN 978-985-434-734-8 © УО «Белорусский государственный
технологический университет», 2007
© Андрижиевский А. А.,
Клепацкий П. М., Санкович Е. С., 2007

ПРЕДИСЛОВИЕ

Разработка научно-обоснованных решений по совершенствованию технологических процессов и технических устройств связана, в частности, с моделированием и оптимизацией лежащих в их основе массообменных процессов. Успешное решение подобных задач предполагает знание методов описания гидрогазодинамических процессов в областях и каналах различной конфигурации.

Настоящее учебное пособие предназначено для сопровождения практических и лабораторных работ в рамках лекционного курса «Основы гидрогазодинамики», но может быть использовано также и для самостоятельного изучения.

Основная цель данного пособия — разъяснить базовые понятия статики и кинематики газожидкостных систем.

Представленный в практикуме материал предназначен для развития у студентов навыков разработки и принятия научно-обоснованных решений по совершенствованию и оптимизации технологических процессов и технических устройств, включая массообменные аппараты и химические реакторы.

Каждый из разделов учебного пособия содержит достаточный объем теоретической информации, примеры решения и контрольные задачи, а также контрольные вопросы для самопроверки. В качестве дополнительного раздела выделен «Лабораторный практикум», который сопровождается пояснительным материалом, описанием лабораторных установок и порядком их выполнения.

Основой для освоения предмета являются общенаучные и общепрофессиональные дисциплины — математика, физика, химическая технология и т. д.

Обучение проводится на доступных, адаптированных к учебному процессу в высших учебных заведениях примерах и задачах.

В пособии использованы данные и иллюстративные материалы из цитируемой литературы, список которой приведен в конце пособия.

Данное пособие может служить руководством для студентов технологических и инженерно-технических специальностей высших учебных заведений.

ВВЕДЕНИЕ

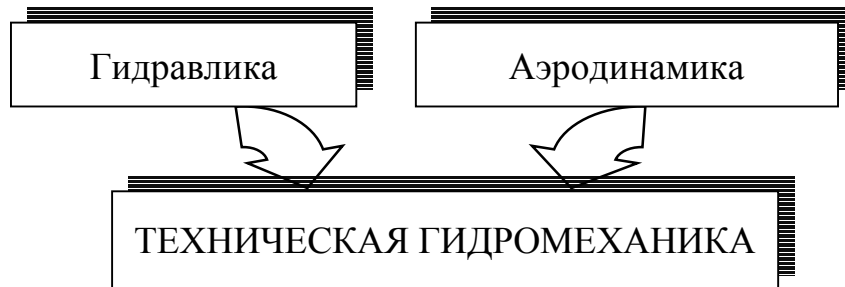
Предмет гидрогазодинамики. Само понятие гидрогазодинамики включает в себя в рамках данного пособия такие разделы механики жидкости и газа, как *техническая гидромеханика* и *газовая динамика*.

Или в графическом виде:



В свою очередь, *техническая гидромеханика* объединяет такие понятия, как *гидравлика* и *аэродинамика*.

Или в графическом виде:



Расшифруем введенные нами понятия.

Гидравлика — наука о законах движения капельных жидкостей (так называемая внутренняя задача — движение жидкостей в ограниченных областях, например в трубах, каналах и т. д.).

Аэродинамика — наука о законах движения газов (так называемая внешняя задача — обтекание газовым потоком твердых тел).

Газовая динамика — наука о законах движения газов с большими скоростями.

Знание гидрогазодинамики и, в частности, технической гидромеханики необходимо для решения многочисленных инженерных задач, например:

- расчета трубопроводов различного назначения (воздухопроводы, водопроводы, газопроводы, паропроводы и др.);
- конструирования гидравлических и воздуходувных машин (насосы, компрессоры, вентиляторы и пр.);
- проектирования котельных агрегатов, печных и сушильных установок, воздухо- и газоочистных аппаратов, теплообменных аппаратов;
- расчет отопительных и вентиляционных устройств и т. д.

Исторические данные. Техническая гидромеханика в своем историческом развитии прошла длинный путь. Некоторые принципы гидростатики (теория равновесия жидкостей) были установлены еще Архимедом в трактате «О плавающих телах» (250 лет до н. э.), а затем возрождены и развиты Галилеем (1564–1642) и Паскалем (1623–1662).

В середине XV в. Леонардо да Винчи (1452–1519) положил начало экспериментальной гидравлике, исследовав в лабораторных условиях некоторые вопросы движения воды в каналах, через отверстия и водосливы. Торичелли (1608–1647 гг.) предложил известную формулу для скорости жидкости, вытекающей из отверстия, а Ньютон (1642–1724) высказал основные положения о внутреннем трении в движущихся жидкостях.

В XVIII в. Даниил Бернулли (1700–1782) и Леонард Эйлер (1707–1783) разработали общие уравнения движения так называемой идеальной жидкости и тем самым положили начало теоретической гидромеханике. Однако применение этих уравнений приводило к удовлетворительным результатам лишь в немногих случаях.

В связи с этим с конца XVIII в. многочисленные ученые и инженеры (Шези, Дарси, Базен, Вейсбах и др.) начали опытным путем изучать движение воды и получили значительное число эмпирических формул. Создававшаяся таким путем чисто практическая гидравлика все более отдалялась от теоретической гидродинамики.

Сближение между ними наметилось лишь к концу XIX в., когда сформировались новые взгляды на движение жидкости, основанные на исследовании структуры потока. Экспериментальные исследования

законов внутреннего трения в жидкостях при ламинарном движении (в работах Н. П. Петрова, 1836–1920) и перехода от ламинарного движения к турбулентному (в работах Рейнольдса, 1848–1912) позволили глубже проникнуть в физическую природу гидравлических сопротивлений.

Несколько позже работы Н. Е. Жуковского (1847–1921) и Прандтля (1875–1953) продвинули вперед изучение важнейших вопросов гидродинамики (и, в частности, турбулентных потоков), которое завершилось созданием так называемых полуэмпирических теорий турбулентности, получивших широкое практическое применение.

XX век был ознаменован стремительным ростом авиационной техники, гидротехники, теплоэнергетики, гидромашиностроения, что привело к бурному развитию технической гидромеханики на базе синтеза теоретических и экспериментальных методов исследования.

Теория напряженного состояния (общие рассуждения). Рассмотрим *напряженное состояние* жидкости, находящейся в равновесии. Прежде чем определить это понятие, заметим, что общие теоремы о равновесии сил применимы также и к жидким телам. Это следует из так называемого *принципа отвердевания*, сущность которого заключается в следующем.

Если в какой-либо подвижной системе, находящейся в равновесии, сделать отдельные ее части неподвижными, то от этого равновесие всей системы не нарушится. Следовательно, в случае жидкости, находящейся в равновесии, можно всегда вообразить, что некоторая ее часть отвердела; от этого равновесие всей жидкости не нарушится, к отвердевшей же части можно применить теоремы о равновесии твердых тел¹. Однако для исследования равновесия жидкости не обязательно прибегать к представлению об отвердевании.

Прежде всего напомним, что любые силы представляют собою взаимодействие между массами. Если, например, масса m_1 притягивает к себе другую массу m_2 с силой P , то с такой же силой масса m_2 притягивает к себе массу m_1 . Следовательно, обе силы

¹ Применяя принцип отвердевания, следует иметь в виду не физическое отвердевание, а воображаемое, идеальное отвердевание без всякого перемещения частиц и изменения объема.

направлены прямо противоположно друг другу (закон Ньютона о равенстве действия и противодействия).

В системе масс, каким-нибудь образом выделенных среди других масс, следует различать два вида сил:

- *внутренние силы*, действующие между массами, принадлежащими к рассматриваемой системе;
- *внешние силы*, действующие между каждой массой рассматриваемой системы и массами, находящимися вне системы.

Теорема № 1. Во всей совокупности сил, действующих в рассматриваемой системе масс, внутренние силы входят всегда *попарно* в виде равных и прямо противоположных сил, а внешние — всегда *в одиночку*. При суммировании (векторном или координатном) всех сил внутренние силы всегда попарно уничтожаются, и остаются только внешние силы.

Следовательно, для равновесия системы необходимо, чтобы сумма сил, приложенных к каждой отдельной массе системы, была *равна нулю*.

При сложении таких сумм для всех масс системы остается, согласно сказанному выше, только сумма всех внешних сил, а так как каждая отдельная из сложенных сумм при равновесии равна нулю, то *равна нулю и сумма всех внешних сил*. Если вычисления ведутся в координатах, то эта теорема записывается в виде трех уравнений:

$$\begin{aligned}\sum X &= 0; \\ \sum Y &= 0; \\ \sum Z &= 0,\end{aligned}$$

где X, Y, Z — проекции внешних сил на оси x, y, z .

Совершенно аналогичная теорема существует и для моментов внешних сил.

Теорема № 2. Сумма всех этих моментов при равновесии *равна нулю*.

Как для упругих твердых, так и для жидких тел важно знать напряженное *состояние внутри тела*, т. е. внутренние силы, действующие между мельчайшими частицами тела во всех направлениях и во всех точках тела. Однако в общем случае приходится ограничиваться указанием только среднего напряженного состояния.

Но как же вообще можно получить представление о внутренних силах, если наши теоремы об условиях равновесия говорят только о внешних силах?

Для этого *необходимо сделать внутренние силы внешними*. Это вполне возможно следующим образом. Вообразим некоторое тело, к которому приложены внешние силы (на рис. В.1 они обозначены стрелками).

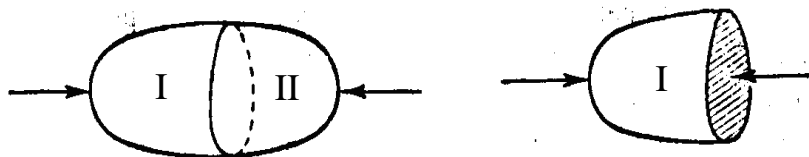
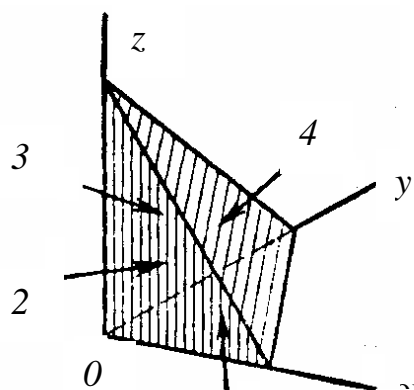


Рис. В.1. Метод сечений

Мысленно разрежем его на две части и одну из частей, например, часть *I*, примем за нашу систему масс. Тогда все силы, с которыми частицы части *II* действовали на частицы части *I* и которые раньше были внутренними, теперь будут внешними. Эти силы распределены по площади сечения, и сумма их должна быть такова, чтобы выделенная часть тела продолжала оставаться в равновесии. Следовательно, результирующая этих сил должна быть равна и прямо противоположна результирующей внешних сил, действующих на выделенную часть тела.

Таким образом, мы получили вполне определенное и однозначное представление о результирующей внутренних сил в проведенном сечении тела². Такая результирующая внутренних сил, отнесенная к единице площади сечения, называется *напряжением*. Более подробно мы познакомимся с этим понятием в следующих главах.



В рассмотренном же выше примере, разделив найденную результирующую внутренних сил на площадь сечения, мы получим,

совершенно такой же результат, если бы вместо части *I* была бы выделена к части *II* и направлена в прямо противоположную

Рис. В.2. Равновесие тетраэдра

очевидно, среднее напряжение в сечении. Вообще же, на различных площадках сечения напряжение может быть разным. Напряжение на площадке, подобно силе, является вектором.

Из многочисленных и важных теорем о напряженном состоянии приведем следующую: *если в трех сечениях, образующих друг с другом трехгранный угол, напряжения известны, то напряжения во всех других сечениях могут быть определены.*

Для доказательства поступим следующим образом. Пересечем трехгранный угол четвертой плоскостью, именно той плоскостью, в которой требуется определить напряжение (рис. В.2).

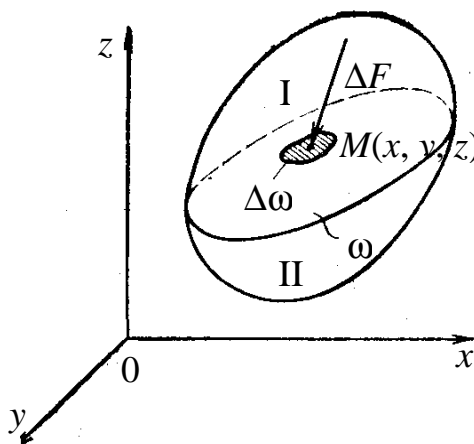
Эта плоскость образует вместе с первыми тремя тетраэдр. Силы 1, 2 и 3, действующие на грани, напряжения на которых известны, мы получим, если умножим заданные напряжения на площади соответствующих граней. Имеется только одна сила 4, которая уравнивает сумму сил $1 + 2 + 3$. Эта сила, разделенная на площадь соответствующей грани, и дает искомое напряжение. Для выполнения вычислений удобнее всего совместить заданные сечения с координатными плоскостями (рис. В.2).

Теперь, после того как мы разъяснили понятие напряжения, мы можем дать более точное определение напряженному состоянию — *напряженным состоянием в какой-либо точке называется совокупность напряжений во всех сечениях, проходящих через заданную точку.*

Как можно выразить напряжение в точке?

Проведем мысленно внутри рассматриваемой массы поверхность, разделяющую объем массы на две части (рис. В.3). На элементарной площади $\Delta\omega$ разделяющей поверхности действует сила ΔF . Площадь $\Delta\omega$ может быть стянута в точку M с координатами x, y, z . В этом случае как площадь поверхности $\Delta\omega$, так и сила ΔF стремятся к нулю. Отношение силы ΔF к площади поверхности $\Delta\omega$ стремится к пределу

$$\lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta F}{\Delta\omega} \right| = \sigma.$$



Значение этого предела называется *напряжением в точке* с координатами x, y, z .

Не вдаваясь в подробности теории напряженного состояния, упомянем только, что напряженное состояние в точке может быть связано с некоторым эллипсоидом, так называемым *эллипсоидом напряжений*. В каждом эллипсоиде имеются три взаимно перпендикулярные оси. Этим осям эллипсоида, называемым *главными осями*, соответствуют в напряженном теле такие три взаимно перпендикулярных сечения, в которых напряжения нормальны к сечениям. Эти напряжения называются *главными напряжениями*, а соответствующие направления — *главными направлениями напряженного состояния*.

Рис. В.3. К определению напряжения в точке

Давление жидкости. Напряженное состояние в жидкости, находящейся в равновесии, особенно простое. Сопротивление жидкости деформации, т. е. перемещению ее частей относительно друг друга, имеет некоторое сходство с трением. Если при соприкосновении двух твердых тел трение отсутствует, то давление одного тела на другое в плоскости их соприкосновения должно быть обязательно перпендикулярно к этой плоскости; следовательно, при скольжении вдоль плоскости соприкосновения не должно совершаться никакой работы. Совершенно аналогично проявляет себя и отсутствие в жидкости сопротивления деформации: *в этом случае напряжение внутри жидкости, или, как принято говорить, давление жидкости, должно быть везде перпендикулярно к поверхности того сечения, на которое оно действует.* Это свойство давления жидкости может рассматриваться как *определение жидкости*, совершенно эквивалентное тому определению, которое было сделано раньше.

При помощи простых соображений из указанного свойства давления можно вывести другое важное свойство — *давление в одной и той же точке жидкости одинаково во всех направлениях* (точнее говоря, одинаково во всех сечениях, проведенных через рассматриваемую точку).

Для определения такого напряженного состояния, которое принято называть *гидростатическим напряженным состоянием*, достаточно указания одного-единственного числа — давления p . Согласно сказанному выше, это число означает силу, действующую на единицу площади сечения.

Способы измерения давления.

Жидкостные манометры.

Если разность давлений воздуха в сосуде и во внешней атмосфере не очень велика, то ее легко измерить при помощи *U*-образной стеклянной трубки, частично наполненной жидкостью (рис. В.4). Пренебрегая собственным весом воздуха, мы получим следующие соотношения. В сечении *A* давление жидкости равно тому давлению p_1 , под которым находится воздух в сосуде. В другом колене *U*-образной трубки на той же высоте, т. е. в сечении *B*, давление также равно p_1 (сообщающиеся сосуды!) На свободной поверхности жидкости, т. е. в сечении *C*, давление жидкости равно атмосферному давлению p_0 . Обозначая превышение уровня жидкости в правом колене над уровнем в левом колене через h , на основании равенства давлений в сечениях *A* и *B* мы получим $p_1 = p_0 + \gamma h$.

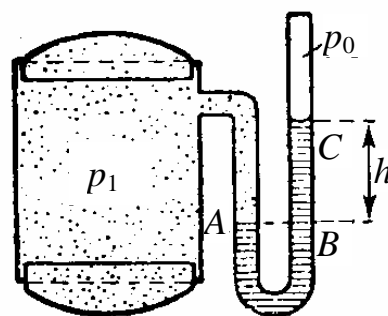


Рис. В.4. Гидростатическое измерение давления (*U*-образная трубка)

Таким образом, *U*-образная трубка, наполненная жидкостью, позволяет весьма просто измерять разности давлений воздуха, пока эти разности не очень велики. В разных видоизменениях она является основной частью многих манометров. Для того чтобы не надо было отсчитывать уровень жидкости в двух сечениях трубки (в сечениях *A* и *C* на рис. В.4), одно из ее колен часто выполняется в виде широкого сосуда (рис. В.5). Тогда колебания уровня в этом сосуде получаются столь малыми, что ими можно пренебречь. Для отметки на трубке нулевой точки необходимо соединить с атмосферой оба отверстия манометра.

Применение жидкостных манометров привело к установлению особого рода единиц для давления, широко распространившихся в практике.

В самом деле, давление жидкости можно условиться измерять непосредственно высотой того столба жидкости, который уравнивается этим давлением. Поскольку жидкостные манометры могут наполняться разными жидкостями с разными удельными весами, то при таком способе измерения давления

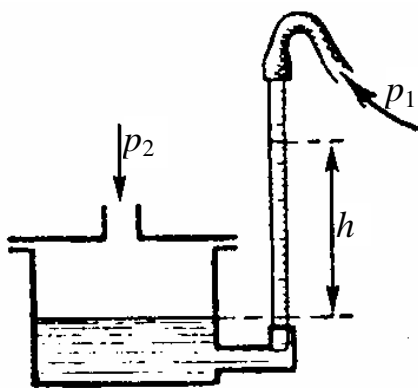


Рис. В.5. Жидкостный манометр

необходимо каждый раз указывать название жидкости.

Так, например, говорят о миллиметрах водяного столба, ртутного столба (сокращенно: вод. ст., рт. ст.). Как легко подсчитать, 1 мм вод. ст. = $1 \text{ кг/м}^2 = 10^4 \text{ кг/см}^2$ (в самом деле, столб воды с площадью основания 1 м^2 и высотой 1 мм имеет объем 1 л и весит 1 кг). Первое соотношение (1 мм вод. ст. = 1 кг/м^2) особенно легко запоминается. Это привело к тому, что единица давления 1 кг/м^2 получила очень широкое распространение в технике. В тех случаях, когда требуется высокая точность отсчета высоты столба жидкости, вода как жидкость для измерения давления мало пригодна, поскольку она легко и неравномерно прилипает к стенкам стеклянной трубки. Значительно удобнее жидкости, растворяющие жир (алкоголь, толуол, ксилол и т. д.). Для измерения значительных разностей давлений удобнее всего применять ртуть, которая в чистом виде даст в не слишком узких трубках очень удобный для отсчета мениск. Удельный вес ртути равен $\sim 13,6 \text{ г/см}^3$, поэтому $1 \text{ мм рт. ст.} = 13,6 \text{ кг/м}^2 = 0,00136 \text{ кг/см}^2$.

Барометр. Если из сосуда, изображенного на рис. В.4, выкачать немного воздуха, то давление в нем станет меньше атмосферного, вследствие чего уровень жидкости в колене А U-образной трубки поднимется выше уровня жидкости в колене В.

По предложению Паскаля подобный прибор был назван *барометром*. Это название (от греч. *barus* — тяжелый) означает, что прибор измеряет вес столба воздуха, расположенного над местом наблюдения.

На применении барометра основана единица давления, называемая *физической атмосферой*. Средняя высота столба ртути в барометре на уровне моря составляет круглым числом 760 мм. Давление воздуха, соответствующее этому показанию барометра при температуре ртути 0°C , условились считать нормальным и дали ему название *физической атмосферы*. Прилагательное «физическая» добавлено для того, чтобы устранить смешивание с технической атмосферой, равной 1 кг/см^2 и обычно применяемой в технике. Удельный вес ртути при 0°C равен $13,595 \text{ г/см}^3$, следовательно, 1 см^3 ртути весит 13,595 г. Поэтому столбу ртути высотой 76 см соответствует давление воздуха, равное $1033,2 \text{ г/см}^2$. Если наполнить барометр вместо ртути водой, то высота столба, уравновешивающего давление, равное $1,0332 \text{ кг/см}^2$, т. е. одной физической атмосфере, будет составлять 10,332 м.

Из определения физической атмосферы следует, что ее величина в известной мере зависит от притяжения Земли. Для того чтобы освободиться от этих несколько произвольных требований введена новая единица давления, связанная с системой единиц CGS и равная 10^6 дин/см². Эта единица давления получила название «бар». Одному бару при нормальной тяжести соответствует ртутный столб высотой 750,06 мм.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Определите предмет и состав гидрогазодинамики.
2. Обозначьте основные этапы развития теоретической и экспериментальной гидромеханики и газодинамики.
3. Какие силы называются внутренними, какие — внешними?
4. Как вы понимаете напряженное состояние выделенного объема капельной жидкости?
5. Назовите содержание основных теорем теории напряженного состояния.
6. Что такое эллипсоид напряжений?
7. Как можно определить понятие давления? Какова его размерность?
8. В чем сходство и различие понятий «напряжение» и «давление»?
9. Как классифицируются приборы для измерения давления по принципу действия?
10. Какие единицы используются для измерения давлений?

1. СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗА

1.1. СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ (ОБЩИЕ)

Жидкость, как и всякое физическое тело, имеет молекулярное строение, т. е. состоит из молекул, расстояние между которыми во много раз превосходит размеры самих молекул, т. е. жидкость, строго говоря, имеет прерывистую структуру.

В технической гидромеханике при решении большинства задач принимают жидкость как сплошную (непрерывную) среду ввиду чрезвычайной малости не только самих молекул, но и расстояний между ними по сравнению с объемами, рассматриваемыми при изучении равновесия и движения жидкости. Тем самым вместо самой жидкости изучается ее модель, обладающая свойством непрерывности (фиктивная сплошная среда — *континуум*).

Гипотеза о непрерывности или сплошности жидкой среды упрощает исследование, поскольку позволяет рассматривать все механические характеристики жидкой среды (скорость, плотность, давление и т. д.) как функции координат точки в пространстве и времени.

Интересуясь, например, вопросом, как велики в данной точке давление внутри жидкости или скорость ее движения, практически важно знать давление и скорость в некотором весьма малом объеме, а не строго именно в данной геометрической точке. Этот объем действительно может быть очень малым. Даже в таком малом объеме, как кубик со стороной 0,001 мм, находится $2,7 \cdot 10^7$ молекул. Этот пример показывает, что замена реальной жидкости ее моделью в виде сплошной жидкой среды не приводит к погрешностям до тех пор, пока не рассматривается движение молекул.

Основные законы, используемые в технической гидромеханике, те же, что и в механике твердых тел. Однако применение этих законов к задачам гидромеханики отличается некоторыми особенностями вследствие различия свойств жидкостей и твердых тел. Поэтому изучение технической гидромеханики целесообразно начать с определения и оценки основных свойств жидкостей.

Жидкость и твердые тела. Жидкости отличаются от твердых тел легкой подвижностью своих частиц. Для изменения формы

твердого тела к нему необходимо приложить силы конечной, иногда весьма значительной величины. Между тем для медленной деформации жидкости достаточно действие самых ничтожных сил, которые в предельном случае бесконечно малой деформации равны нулю.

На основании этого мы можем дать следующее определение жидкости: *жидкостью называется такое тело, в котором в состоянии равновесия всякое сопротивление деформации равно нулю.*

Однако при быстрой деформации жидкость, подобно твердому телу, оказывает сопротивление деформации. Но, как только движение жидкости прекращается, это сопротивление очень быстро исчезает. Свойство жидкостей оказывать сопротивление деформации называется *вязкостью*.

Кроме обычных, легко подвижных жидкостей существуют очень вязкие жидкости, сопротивление которых деформации весьма значительно, но в состоянии покоя по-прежнему равно нулю. По мере увеличения вязкости жидкость становится все более похожей на твердое тело, однако нельзя провести резкой границы между жидкостью с очень большой вязкостью и твердым телом: некоторые вещества при быстрой деформации ведут себя как твердые тела, а при медленной — как жидкости. К таким веществам принадлежит, например, асфальт.

Согласно кинетической теории материи, мельчайшие частицы всех тел (атомы и молекулы) находятся в непрерывном движении; кинетическая энергия этого движения проявляется в теплоте. С точки зрения этой теории, жидкости отличаются от твердых тел тем, что в них отдельные частицы более или менее часто меняются местами с соседними частицами, в то время как в твердых телах каждая частица занимает в пространстве вполне определенное положение, правда, совершая около него небольшие колебания.

Другим свойством жидкостей является их большое сопротивление изменению объема. Никаким способом невозможно сжать один литр воды так, чтобы он поместился в сосуде емкостью в пол-литра. Обратное, если налить литр воды в сосуд емкостью в два литра и выкачать из последнего воздух, то вода по-прежнему будет занимать только половину сосуда. Однако в некоторой мере вода при больших давлениях сжимается; при давлении около 1000 ата это сжатие достигает 5 % первоначального объема. Аналогичным образом ведут себя и другие жидкости.

Жидкость и газ. Жидкости по своим механическим свойствам разделяются на два класса:

- мало сжимаемые (капельные);
- сжимаемые (газообразные).

С позиций физики капельная жидкость значительно отличается от газа, с позиций механики жидкости различие между ними не так велико, и законы, справедливые для капельных жидкостей, могут быть приложены также и к газам, когда сжимаемостью последних можно пренебречь. В связи с отсутствием специального термина, который обозначал бы жидкость в широком смысле слова, в дальнейшем мы будем пользоваться терминами «капельная жидкость» (мало сжимаемая), «сжимаемая жидкость» (газ) и «жидкость», применяя последний термин в широком смысле, охватывающем как капельную жидкость, так и газ. Другими словами, под жидкостью будем понимать всякую среду, обладающую свойством текучести.

Капельные жидкости имеют вполне определенный объем, который практически не изменяется под действием сил.

Газ (сжимаемая жидкость), занимая все предоставленное ему пространство, может значительно изменять объем, сжимаясь и расширяясь под действием сил.

Таким образом, капельные жидкости легко изменяют форму (в отличие от твердых тел), но с трудом изменяют объем, а газы легко изменяют как объем, так и форму.

Основные свойства жидкостей, существенные при рассмотрении задач технической гидромеханики, — *плотность* и *вязкость*. В некоторых случаях (при образовании капель, течении тонких струй, образовании капиллярных волн и др.) имеет значение также *поверхностное натяжение* жидкостей.

Изменение агрегатного состояния (фазовые переходы). В технической гидромеханике, как уже отмечалось, жидкость обычно заменяется моделью в виде непрерывной среды. Однако иногда приходится сталкиваться с нарушением сплошности (непрерывности) жидкости. В таких случаях можно, как правило, выделить границы раздела, отделяющие одну непрерывную среду (фазу) от другой; при переходе через такие границы свойства жидкости меняются скачкообразно.

Системы, состоящие из нескольких фаз, называются многофазными (полифазными). Простейшим случаем многофазной системы являются двухфазные системы.

Например, *газ – твердые частицы* (пневмотранспорт, пылеулавливание); *газ – капли жидкости* (распылители, сушилки, газовое охлаждение, испарение); *жидкость – пузырьки пара* (испарители, эрлифты).

Во всех этих примерах первая из указанных фаз (основная) условно называется *непрерывной*, вторая — *дискретной*.

При некоторых условиях многофазные системы могут переходить в однородные (гомогенные), и наоборот.

Например, в воде при обычных условиях находится растворенный воздух. При снижении давления и повышении температуры воздух начинает выделяться, образуя воздушные пузыри значительных размеров, иными словами, наблюдается переход однофазной системы (вода) к двухфазной (вода + газ).

Количество дискретной фазы в непрерывной определяется объемной концентрацией. Обычно за объемную концентрацию β принимается отношение объема, занятого дискретной фазой (W_1), к общему объему многофазной системы (W_Σ):

$$\beta = W_1 / W_\Sigma.$$

Среднюю плотность ρ многофазной системы можно представить в следующем виде:

$$\rho = \beta \rho_2 + (1 - \beta) \rho_1,$$

где ρ_1 и ρ_2 — плотности соответственно дискретной и непрерывной фаз.

1.2. ПЛОТНОСТЬ И УДЕЛЬНЫЙ ВЕС

Плотностью жидкости ρ называется ее масса m , заключенная в единице объема W :

$$\rho = m / W. \tag{1.1}$$

Плотность пресной воды при температуре 4 °С равна 1000 кг/м³. Если жидкость неоднородна, то формула (1.1) определяет лишь среднюю плотность жидкости. Для определения плотности в данной точке следует пользоваться формулой

$$\rho = \lim_{\Delta W \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta W}. \quad (1.2)$$

Вес жидкости G , приходящийся на единицу объема W , называется удельным весом:

$$\rho = \frac{G}{W}. \quad (1.3)$$

Удельный вес воды при температуре 4 °С равен 9810 Н/м³ (1000 кгс/м³).

Если жидкость неоднородна, формула (1.3) определяет только средний удельный вес жидкости. Для определения удельного веса жидкости в данной точке применяется формула

$$\gamma = \lim_{\Delta W \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta W}.$$

Плотность и удельный вес связаны между собой известным соотношением

$$\lambda = \rho g,$$

где g — ускорение свободного падения.

Относительным удельным весом жидкости (или относительным весом) δ называется отношение удельного веса данной конкретной жидкости к удельному весу воды при температуре 4 °С:

$$\delta = \gamma_{\text{ж}} / \gamma_{\text{в}}.$$

В отличие от удельного веса, относительный удельный вес представляет собой отвлеченную (безразмерную) величину, численное значение которой не зависит от выбранной системы единиц измерения.

Плотность, а следовательно, удельный и относительный удельный вес жидкостей и газов меняются с изменением давления и температуры.

1.3. СЖИМАЕМОСТЬ И ТЕМПЕРАТУРНОЕ РАСШИРЕНИЕ

Сжимаемость и температурное расширение жидкостей. Сжимаемость капельных жидкостей под действием давления характеризуется коэффициентом объемного сжатия рту , который представляет собой относительное изменение объема жидкости на единицу изменения давления:

$$\beta_w = -\frac{1}{W} \frac{\partial W}{\partial p}, \quad (1.4)$$

где W — первоначальный объем жидкости; ∂W — изменение этого объема при увеличении давления на величину ∂p .

Коэффициент объемного сжатия имеет размерность Па^{-1} . Знак «минус» в формуле (1.4) обусловлен тем, что положительному приращению давления p соответствует отрицательное приращение (т. е. уменьшение) объема жидкости W .

Величина, обратная коэффициенту объемного сжатия, называется модулем упругости жидкости (E_0):

$$E_0 = 1/\beta_w,$$

где β_w — коэффициент объемного сжатия.

Коэффициент объемного сжатия капельных жидкостей мало меняется при изменении температуры и давления.

В среднем для воды E_0 равен $2 \cdot 10^9$ Па и, соответственно, $\beta_w = 1 / (2 \cdot 10^9) \text{Па}^{-1}$.

Во многих случаях, встречающихся в практической деятельности, сжимаемостью воды можно пренебрегать, считая ее удельный вес и плотность не зависящими от давления.

Температурное расширение капельных жидкостей характеризуется коэффициентом температурного расширения, выражающим относительное увеличение объема жидкости при увеличении температуры на 1 град:

$$\beta_T = \frac{1}{W} \frac{\partial W}{\partial T}, \quad (1.5)$$

где ∂W — изменение этого объема при повышении температуры на величину ∂T .

При температуре от 10 до 20 °С и давлении 10^5 Па можно приближенно принимать $\beta_T \approx 0,0001$ °С.

Если приближенно считать, что плотность не зависит от давления, а определяется только температурой, то из выражений (1.5) и (1.1) можно найти приближенное соотношение для расчета изменения плотности капельных жидкостей с изменением температуры:

$$\rho_T = \rho_0 \frac{1}{1 + \beta_T (T - T_0)},$$

где T_0 — температура жидкости, к которой относится плотность ρ_0 .

Способность жидкостей менять плотность (и удельный вес) при изменении температуры широко используется для создания естественной циркуляции в котлах, отопительных системах, для удаления продуктов сгорания и т. д.

Сжимаемость и температурное расширение газов. В отличие от капельных жидкостей газы характеризуются значительной сжимаемостью и высокими значениями коэффициента температурного расширения. Зависимость плотности газов от давления и температуры устанавливается уравнением состояния.

Наиболее простыми свойствами обладает газ, разреженный настолько, что взаимодействие между его молекулами может не учитываться, — так называемый совершенный (идеальный) газ. Для совершенных газов справедливо уравнение Клайперона, позволяющее определять плотность газа при известных значениях давления и температуры, т. е.

$$\rho = \frac{p}{RT},$$

где p — абсолютное давление; R — удельная газовая постоянная, различная для разных газов, но не зависящая от температуры и давления (для воздуха $R = 287$ Дж/(кг · К)); T — абсолютная температура.

Поведение реальных газов незначительно отличается от поведения совершенных газов и для них в широких пределах можно пользоваться уравнениями состояния совершенных газов. Отклонения делаются заметными только при сильном сжатии газа и в особенности тогда, когда температура газа настолько понижена, что начинается сжижение. Указанные отклонения подробно изучаются в термодинамике.

В технических расчетах плотность газа обычно приводят к нормальным физическим условиям ($t = 0$ °С, $p = 101\,325$ Па) или к стандартным условиям ($t = 20$ °С, $p = 101\,325$ Па).

При других условиях плотность воздуха определяется по формуле

$$\rho = \rho_0 \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T}.$$

При сжатии газа выделяется теплота. В термодинамике доказывается, что в тех случаях, когда при сжатии или расширении

газа не происходит никакого теплообмена с окружающей средой, что имеет место, очевидно, при очень быстром сжатии или расширении, следует пользоваться уравнением

$$pW^\chi = p_0W_0^\chi,$$

где χ равно отношению удельной теплоемкости c_p при постоянном давлении к удельной теплоемкости c_v при постоянном объеме³, т. е.

$$\chi = c_p / c_v.$$

Сжатие и расширение газа, происходящие согласно приведенному выше уравнению, называются *адиабатическим*.

Таким образом, адиабатическое сжатие связано с нагреванием газа, а адиабатическое расширение — с охлаждением газа.

Изложенные выше свойства газов могут быть очень хорошо объяснены, если предположить, что мельчайшие частицы газа находятся в очень быстром непрерывном движении, причем все время происходят столкновения частиц между собой и со стенкой сосуда, заключающего газ. При таком предположении давление есть не что иное, как суммарное действие ударов частиц, а температура эквивалентна кинетической энергии частиц. В самом деле, температура при сжатии повышается потому, что скорость частиц газа, ударяющихся о двигающуюся им навстречу стенку, после отражения частиц увеличивается.

1.4. ВЯЗКОСТЬ

Все реальные жидкости обладают определенной вязкостью, которая проявляется в виде внутреннего трения при деформации. Некоторые жидкости, например мед, глицерин, тяжелые масла и др., обладают особенно большой вязкостью. Для того чтобы понять, в чем заключается сущность вязкости, рассмотрим следующий простой пример.

Пусть между двумя параллельными пластинками находится жидкость и пусть одна из этих пластинок (верхняя) движется в своей плоскости со скоростью V , а другая (нижняя) — покоится (рис. 1.1).

Тогда под действием вязкости в жидкости устанавливается такое состояние движения, при котором слои, непосредственно прилегающие к

³ Для сухого атмосферного воздуха $\chi = 1,405$

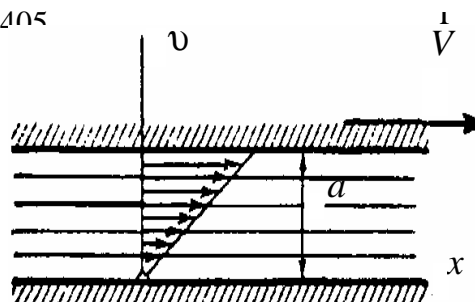


Рис. 1.1. Движение вязкой жидкости между пластинками

пластинкам, имеют одинаковую с ними скорость («прилипают» к пластинкам), а промежуточные слои скользят друг по другу и обладают скоростями, пропорциональными расстоянию от неподвижной пластинки.

Следовательно, скорость слоя, находящегося на расстоянии v от нижней пластинки, равна

$$v = V \frac{y}{a},$$

где a — расстояние между обеими пластинками.

При этом трение жидкости проявляется в виде силы, оказывающей сопротивление движению верхней пластинки. Эта сила пропорциональна градиенту скорости жидкости, т. е. изменению скорости, происходящему на единице длины в направлении, перпендикулярном к плоскости пластинок.

Забегая несколько вперед, скажем, что величина силы сопротивления, приходящаяся на единицу площади пластинки, называется *касательным напряжением*. На основании сказанного касательное напряжение τ равно:

$$\tau = \mu \frac{V}{a},$$

или в более общей формулировке

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}.$$

Величина μ называется *коэффициентом внутреннего трения жидкости*, или *коэффициентом вязкости*, или, наконец, просто *вязкостью*. Первое указание на существование данного соотношения имеется у Ньютона, и поэтому оно часто называется *законом трения Ньютона*.

Динамическая вязкость измеряется в Па · с или в Н · с/м².

В технической системе единиц динамическая вязкость имеет размерность кгс · с/м². В системе CGS за единицу динамической вязкости принимается пуаз (П) (в память французского ученого Пуазейля), равный 1 г · см/с.

Вязкость жидкостей в большой степени зависит от температуры, при этом вязкость капельных жидкостей при увеличении температуры уменьшается, а вязкость газов возрастает. Так, для чистой пресной воды зависимость динамической вязкости (в пуазах) от температуры определяется по формуле Пуазейля:

$$\mu = \frac{0,00179}{1 + 0,0368t + 0,000221t^2},$$

где t — температура, °С.

Вода принадлежит к наименее вязким жидкостям. Лишь немногие из практически используемых жидкостей (например, эфир и спирт) обладают несколько меньшей вязкостью, чем вода. Наименьшую вязкость имеет жидкая углекислота (в 50 раз меньше вязкости воды). Все жидкие масла обладают значительно более высокой вязкостью, чем вода (касторовое масло при температуре 20 °С имеет вязкость, в 1000 раз большую, чем вода при той же температуре).

Для определения динамической вязкости воздуха применяется формула Милликена:

$$\mu = 1,745 \cdot 10^{-6} + 5,03 \cdot 10^{-9}t.$$

Наряду с понятием динамической вязкости в гидрогазодинамике используется и понятие кинематической вязкости, представляющее собой отношение динамической вязкости к плотности:

$$\nu = \mu / \rho.$$

Единицей для измерения кинематической вязкости в системе CGS служит стокс (в честь английского физика Стокса): $1 \text{ Ст} = 1 \text{ см}^2/\text{с}$.

При давлениях, встречающихся в большинстве случаев на практике (до 200 атм), кинематическая вязкость капельных жидкостей весьма мало зависит от давления, и этим изменением в обычных гидравлических расчетах пренебрегают. Кинематическая вязкость газов зависит как от температуры, так и от давления, возрастая с увеличением температуры и уменьшаясь с увеличением давления. Кинематическая вязкость воздуха для нормальных условий (температура 20 °С, давление — $\sim 1 \cdot 10^5 \text{ Па} = 1 \text{ атм}$) примерно в 15 раз больше, чем для воды при той же температуре.

На практике вязкость жидкостей определяют вискозиметрами, наиболее широкое распространение из которых получил вискозиметр Энглера.

1.5. ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ

Молекулы жидкости, расположенные у поверхности контакта с другой жидкостью, газом или твердым телом, находятся в условиях, отличных от условий молекул, находящихся внутри некоторого

объема жидкости. Внутри объема молекулы окружены со всех сторон такими же молекулами, вблизи поверхности — лишь с одной стороны, поэтому энергия поверхностных молекул отличается от энергии молекул, находящихся в объеме жидкости, на некоторую величину, называемую *поверхностной энергией*.

Поверхностная энергия \mathcal{E}_n пропорциональна площади поверхности раздела S :

$$\mathcal{E}_n = \sigma S,$$

где коэффициент пропорциональности σ называется *коэффициентом поверхностного натяжения* и зависит от природы соприкасающихся тел.

Этот коэффициент можно представить в следующем виде:

$$\sigma = -R / l,$$

где R — сила поверхностного натяжения; l — периметр области соприкосновения.

Исходя из определения, σ имеет размерность энергии на единицу площади или силы на единицу длины.

Например, для границы раздела *вода – воздух* при $t = 20^\circ\text{C}$ σ равен 0,073 Н/м, а для границы раздела *ртуть – воздух* — 0,048 Н/м.

Поверхностное натяжение жидкости чувствительно к ее чистоте и температуре. При повышении температуры поверхностное натяжение уменьшается, а в критической точке перехода жидкости в пар обращается в нуль.

На поверхности раздела трех фаз, например твердой стенки 1, жидкости 2 и газа 3, между поверхностью жидкости и твердой стенкой образуется так называемый *краевой угол смачивания* θ (рис. 1.2).

Краевой угол смачивания зависит от природы соприкасающихся сред (от поверхностных натяжений на их границах) и не зависит ни от формы сосуда, ни от действия силы тяжести.

Если край жидкости приподнят, ее поверхность имеет вогнутую форму (см. рис. 1.2, *а*) и краевой угол острый.

В этом случае жидкость смачивает твердую поверхность. Чем хуже смачивающая способность жидкости, тем больше краевой угол (см. рис. 1.2, *б*). При $\theta > 90^\circ$ жидкость считается несмачивающей. При полном несмачивании ($\theta = 180^\circ$) капли жидкости как бы поджимаются, стараясь уменьшить площадь контакта с твердой поверхностью.

Угол θ , например, между водой и стеклом практически равен нулю, если поверхность очень чистая.

От явления смачивания зависит поведение жидкости в тонких (капиллярных) трубках, погруженных в жидкость. При смачивании жидкость в трубке поднимается над уровнем свободной поверхности, при несмачивании — опускается.

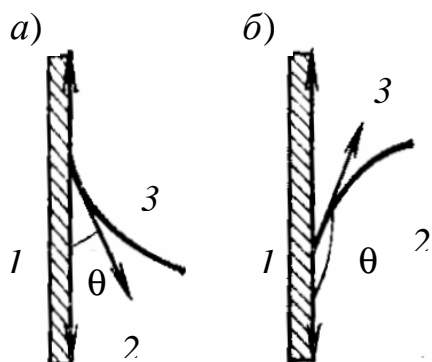


Рис. 1.2. Определение краевого угла: *a* — хорошо смачиваемая поверхность; *б* — плохо смачиваемая

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

Примеры решения задач по темам главы

Пример 1.1. В вертикальном цилиндрическом резервуаре диаметром $d = 4$ м хранится 100 т нефти, плотность которой при 0°C равна 850 кг/м^3 .

Определить изменение уровня в резервуаре при изменении температуры нефти от 0 до 30°C . Расширение резервуара не учитывать. Коэффициент теплового расширения нефти принять равным $\beta_T = 0,00072 \text{ 1/град}$.

Решение. Объем, занимаемый нефтью при температуре 0°C :

$$W = m / \rho = 100 \cdot 10^3 / 850 = 118 \text{ м}^3.$$

В соответствии с формулой (1.5) изменение объема при изменении температуры на 30°C

$$\Delta W = \beta_T W \Delta T = 0,00072 \cdot 118 \cdot 30 = 2,55 \text{ м}^3.$$

Изменение уровня нефти в резервуаре:

$$h = \frac{4\Delta W}{\pi d^2} = 2,554 / (3,1416) = 0,203 \text{ м}.$$

Пример 1.2. Винтовой пресс Рухгольца для тарировки пружинных манометров работает (рис. 1.3) на масле с коэффициентом сжимаемости $\beta_w = 0,638 \cdot 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$. Определить, на сколько оборотов надо повернуть маховик винта, чтобы поднять давление на $9,8 \cdot 10^4 \text{ Па}$, если начальный объем рабочей камеры пресса $W = 0,628 \cdot 10^{-3} \cdot 9,8 \cdot 10^4 \text{ м}^3$, диаметр плунжера 20 мм, шаг винта $h = 2 \text{ мм}$. Стенки рабочей камеры считать недеформируемыми.

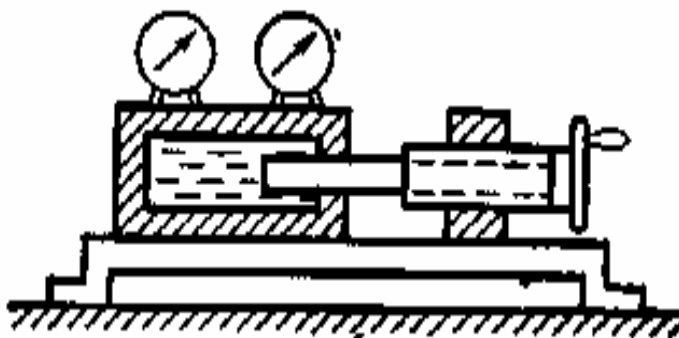


Рис. 1.3. К примеру 1.2

Решение. Для того чтобы давление повысилось на Δp необходимо чтобы объем W жидкости в рабочей камере пресса уменьшился (см. формулу (1.4)) на величину

$$\Delta W = \beta_T W \Delta p = 0,638 \cdot 10^{-9} \cdot 0,628 \cdot 10^{-3} \cdot 9,8 \cdot 10^4 \text{ м}^3.$$

Длина l , на которую должен продвинуться плунжер, равна:

$$l = \frac{4\Delta W}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 3,92 \cdot 10^{-8}}{3,14 \cdot (2 \cdot 10^{-2})^2} = 1625 \cdot 10^{-5} \text{ м}.$$

При этом маховик винта необходимо повернуть на $n = l / h = 0,125 / 2 \approx 1/16$ оборота.

Контрольные задачи по темам главы

Задача 1.1. Определить плотности воды ρ_v и нефти ρ_n при $4 \text{ }^\circ\text{C}$, если известно, что 10 л воды при $4 \text{ }^\circ\text{C}$ имеют массу 10 кг, а масса того же объема нефти равна 8,2 кг. Сравнить плотность нефти с плотностью воды.

Ответ: $\rho_{\text{в}} = 1000 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{\text{н}} = 820 \text{ кг/м}^3$.

Задача 1.2. Цистерна заполнена нефтью плотностью 850 кг/м^3 . Диаметр цистерны $d = 3 \text{ м}$, длина $l = 6 \text{ м}$. Определить массу жидкости в цистерне.

Ответ: $m = 3,60 \cdot 10^4 \text{ кг}$.

Задача 1.3. Найти плотность смеси жидкостей $\rho_{\text{см}}$, имеющей следующий массовый состав: керосина — 30 %, мазута — 70 %, если плотность керосина $\rho_{\text{к}} = 790 \text{ кг/м}^3$, а мазута $\rho_{\text{м}} = 900 \text{ кг/м}^3$.

Ответ: $\rho_{\text{см}} = 864 \text{ кг/м}^3$.

Задача 1.4. Определить, насколько поднимется уровень нефти в цилиндрическом резервуаре при увеличении температуры от 15 до $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Плотность нефти при $15 \text{ }^\circ\text{C} = 900 \text{ кг/м}^3$. Диаметр резервуара $d = 10 \text{ м}$; нефть заполняет резервуар при $15 \text{ }^\circ\text{C}$ до высоты $H = 12 \text{ м}$. Коэффициент теплового объемного расширения нефти $\beta_T = 6,4 \cdot 10^{-4} \text{ 1/град}$. Расширение резервуара не учитывается.

Ответ: $\Delta H = 0,192 \text{ м}$.

Задача 1.5. Трубопровод диаметром $d = 0,3 \text{ м}$, длиной $l = 100 \text{ м}$, подготовленный к гидравлическому испытанию, заполнен водой при атмосферном давлении.

Определить, какое количество воды необходимо дополнительно подать в трубопровод, чтобы давление в нем поднялось до 5 МПа по манометру. Коэффициент сжимаемости воды принять равным $\beta_p = 0,5 \cdot 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$. Деформацией трубопровода пренебречь.

Ответ: $\Delta W = 1,77 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$.

Задача 1.6. Насколько изменится объем воды, находящейся в окружающей нефтяное (или газовое) месторождение пластовой водонапорной системе, за счет упругого расширения при падении пластового давления $\Delta p = 9,8 \text{ МПа}$. Вода занимает площадь

$S \approx 100\,000$ га, средняя толщина пласта $h = 10$ м, пористость* пласта $m = 20\%$, коэффициент сжимаемости воды $\beta_p = 0,5 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$.

Ответ: $\Delta W = 8,4 \cdot 10^6 \text{ м}^3$.

Задача 1.7. Найти кинематический коэффициент вязкости нефти, если известно, что при температуре 40°C ее динамический коэффициент вязкости $\mu = 0,5 \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$. Плотность нефти при той же температуре равна $920 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Ответ: $\nu = 0,543 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$.

Задача 1.8. Для большинства жидкостей зависимость динамического коэффициента вязкости μ от абсолютной температуры T можно представить эмпирической формулой вида

$$\nu = B e^{b/T},$$

где коэффициенты B и b для данной жидкости имеют постоянное значение и определяются экспериментально.

Установлено, что при $t_1 = 15^\circ\text{C}$ динамический коэффициент вязкости нефти $\nu_1 = 0,187 \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$, а при $t_2 = 30^\circ\text{C}$ $\nu_2 = 0,0312 \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$.

Определить постоянные B и b и вычислить значение ν для нефти при $t = 25^\circ\text{C}$.

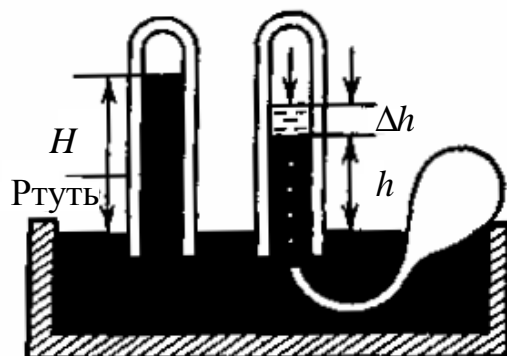
Ответ: $B = 3,65 \cdot 10^{-17} \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с}); b = 1,04 \text{ К}; \nu = 0,05 \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$.

Задача 1.9. Вода поступает в насос по всасывающей трубе, работающей под вакуумом. Минимальное абсолютное давление перед входом в насос $p = 4 \text{ кПа}$. Температура перекачиваемой воды поднялась до 30°C . Будет ли наблюдаться в этом случае явление кипения?

Ответ: вода закипит, так как давление насыщенных паров воды при $t = 30^\circ\text{C}$ равно $p_{\text{н}} = 4,214 \text{ кПа}$, а это больше минимального абсолютного давления.

Задача 1.10. Для определения давления насыщенных паров жидкости используются две предварительно заполненные ртутью барометрические трубки (рис. 1.4).

Одна из них служит барометром, а в другую при помощи пипетки



объема пор, занятых жидкостью, к объему

Рис. 1.4. К задаче 1.10

по капле вводят испытываемую жидкость. Безвоздушное пространство над ртутью вскоре заполняется, наряду с парами ртути, также парами жидкости, а над мениском ртути образуется небольшой слой жидкости высотой Δh . Мениск ртути при этом понизится на величину, соответствующую давлению насыщенных паров жидкости.

Определить давление насыщенных паров воды p_v , если $h = 713$ мм, $\Delta h = 200$ мм, показание барометра $H = 745$ мм рт. ст. При температуре опытов $t = 20$ °С плотность воды $\rho_v = 998,2$ кг/м³, а плотность ртути $\rho_p = 13\,550$ кг/м³.

Ответ: $p_v = 2,3$ кПа.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО ТЕМАМ ГЛАВЫ

1. Какие вы знаете сходства и различия в свойствах жидкости и твердого тела?
2. Какие вы знаете сходства и различия в свойствах жидкости и газа?
3. Как найти объем жидкости, плотность и масса которой известны?
4. В чем различие понятий «плотность» и «удельный вес»?
5. Что такое сжимаемость капельной жидкости или газа?
6. Как определяется коэффициент термического расширения?
7. Если жидкость, полностью заполняющую закрытый недеформируемый сосуд, подогреть, то что произойдет с давлением в ней?
8. Какое из действий (увеличение или снижение давления над поверхностью жидкости) приведет к прекращению начавшегося кипения?
9. Как определяется коэффициент динамической вязкости? Каковую размерность он имеет?
10. Какая связь существует между коэффициентами динамической и кинематической вязкости?
11. Если предположить, что вода и бензин имеют одинаковые значения кинематического коэффициента вязкости, то одинаковы ли при этом значения динамического коэффициента вязкости?
12. Дайте определения понятий «поверхностное натяжение» и «краевой угол смачивания».

2. РАВНОВЕСИЕ ЖИДКОСТИ И ГАЗА

2.1. ДАВЛЕНИЕ В ПОКОЯЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ

Распределение давления в покоящейся жидкости находится из уравнений равновесия Эйлера:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \rho X;$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = \rho Y;$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \rho Z$$

или

$$dp = \rho(Xdx + Ydy + Zdz).$$

Соответственно, дифференциальное уравнение *поверхности равного давления* имеет вид

$$dp = 0,$$

или, учитывая, что плотность отлична от нуля,

$$Xdx + Ydy + Zdz = 0.$$

Поверхность раздела между жидкой и газообразной средой называется *свободной поверхностью*.

В однородной несжимаемой жидкости ($\rho = \text{const}$), находящейся в равновесии под действием силы тяжести ($X = 0$, $Y = 0$, $Z = -g$, ось z направлена вверх), распределение давления определяется из выражения

$$p = p_0 + \rho g(z_0 - z) = p_0 + \rho gh, \quad (2.1)$$

где p_0 — давление в точках горизонтальной плоскости с координатой z_0 (в качестве такой

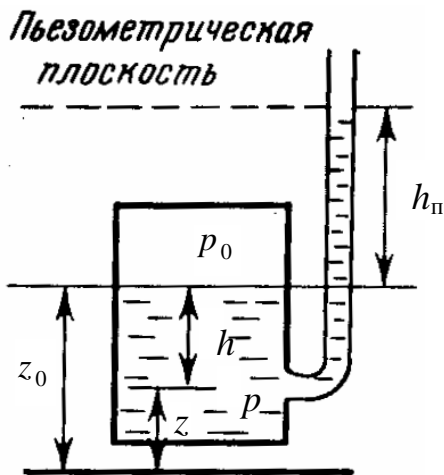


Рис. 2.1. Закрытый сосуд с покоящейся жидкостью (справа показан пьезометр)

плоскости чаще всего выбирается свободная поверхность жидкости); z — координата точки, в которой определяется давление p ; $h = z - z_0$ — глубина погружения рассматриваемой точки; g — ускорение свободного падения (рис. 2.1).

Дополнительно на рис. 2.1 показана высота $h_{\text{п}}$ расположения пьезометрической плоскости по отношению к свободной поверхности жидкости с плотностью ρ .

Формула (2.1) носит название основного уравнения гидростатики. Из нее следует закон Паскаля: *изменение давления в какой-либо покоящейся и продолжающей оставаться в покое точке жидкости передается одинаковым образом всем точкам этой жидкости*. В идеальном газе, т. е. газе, подчиняющемся закону Клапейрона, находящемуся в равновесии под действием силы тяжести, распределение давления при условии постоянства температуры по высоте ($T = \text{const}$) определяется барометрической формулой:

$$p = p_0 e^{-\frac{\rho_0 g (z_0 - z)}{p_0}}, \quad (2.2)$$

где p_0 , ρ_0 — соответственно абсолютное давление и плотность газа в точках горизонтальной плоскости с координатой z_0 .

Из формулы (2.2) можно найти высоту:

$$z_0 - z = \frac{p_0}{\rho_0 g} \ln \frac{p}{p_0}.$$

Эта формула называется формулой барометрического нивелирования, так как позволяет определять разность высот по показаниям двух барометров.

Из формул (2.1) и (2.2) следует, что поверхностями равного давления для жидкости и газа, находящихся в абсолютном покое, являются горизонтальные плоскости:

$$z = \text{const}.$$

Простейшим прибором для измерения давления в сосуде с жидкостью является пьезометр, представляющий собой вертикальную открытую сверху стеклянную трубку, присоединяемую к сосуду (рис. 2.1).

Пьезометр измеряет избыточное давление на поверхности жидкости в сосуде. При этом пьезометрическая высота равна:

$$h_{\text{п}} = \frac{p_0 - p_a}{\rho g} = \frac{\Delta p}{\rho g}, \quad (2.3)$$

где p_a — атмосферное давление.

Назовем пьезометрической поверхностью, проходящую через уровень жидкости в пьезометре, или, что то же самое, поверхность, на которой давление равно атмосферному давлению.

Если $\Delta p > 0$, то пьезометрическая поверхность располагается выше уровня жидкости в сосуде; если $\Delta p < 0$, то она находится ниже уровня жидкости; если $p_0 = p_a$, то пьезометрическая поверхность совпадает с поверхностью жидкости.

Для измерения давления применяются следующие приборы:

- барометры (для измерения атмосферного давления);
- манометры (для измерения избыточного — свыше атмосферного — давления);
- вакуумметры (для измерения вакуума — давления ниже атмосферного);
- дифференциальные манометры (для измерения разности давления в двух точках).

Примеры решения задач

Пример 2.1. В закрытом резервуаре с нефтью плотностью $\rho = 880 \text{ кг/м}^3$ вакуумметр, установленный на его крышке, показывает $p_{\text{в}} = 1,18 \cdot 10^4 \text{ Па}$ (рис. 2.2).

Определить показание манометра $p_{\text{м}}$, присоединенного к резервуару на глубине $h = 6 \text{ м}$ от поверхности жидкости, и положение пьезометрической плоскости.

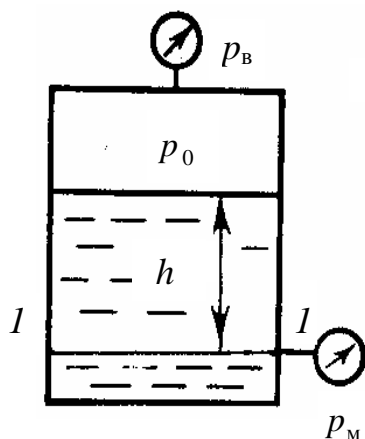


Рис. 2.2. К примеру 2.1

Решение. Проведем плоскость 1-1 на уровне присоединения манометра. В этой плоскости абсолютное давление, в соответствии с основным уравнением гидростатики, равно:

$$p_{1-1} = C + \rho gh,$$

где p_0 — абсолютное давление на поверхности, равное $(p_a - p_{\text{в}})$.

Тогда

$$p_{1-1} = (p_a - p_b) + \rho g h.$$

С другой стороны, так как манометр измеряет избыточное давление, то

$$p_{1-1} = p_a + p_b.$$

Приравняв эти два выражения для p_{1-1} , найдем:

$$p_m = -p_b + \rho g h = -1,18 \cdot 10^4 + 880 \cdot 9,8 \cdot 6 = 3,99 \cdot 10^4 \text{ Па.}$$

Поскольку на поверхности жидкости давление меньше атмосферного, то пьезометрическая высота h_{π} отрицательна:

$$h_{\pi} = \frac{\Delta p}{\rho g} = -\frac{p_b}{\rho g} = -\frac{1,18 \cdot 10^4}{880 \cdot 9,8} = -1,37 \text{ м,}$$

т. е. пьезометрическая плоскость расположена ниже поверхности жидкости.

Пример 2.2. Найти избыточное давление в сосуде A с водой по показаниям многоступенчатого двухжидкостного ртутного манометра (рис. 2.3):

$$h_1 = 82 \text{ см; } h_2 = 39 \text{ см; } h_3 = 54 \text{ см; } h_4 = 41 \text{ см; } h_5 = 100 \text{ см;}$$

$$\rho_b = 10^3 \text{ кг/м}^3; \rho_p = 1,36 \cdot 10^4 \text{ кг/м}^3.$$

где ρ_b, ρ_p — плотности воды и ртути соответственно.

Решение. Поскольку жидкость находится в равновесии, то давления в точках 1 и 2, расположенных на одной горизонтали, равны как давления в точках одного и того же объема однородной покоящейся жидкости, т. е. $p_1 = p_2$. На том же основании $p_3 = p_4$, $p_5 = p_6$.

В то же время избыточное давление:

$$p_1 = \rho_p g (h_1 - h_2);$$

$$p_3 = p_2 - \rho_b g (h_3 - h_2);$$

$$p_5 = p_4 + \rho_p g (h_3 - h_4);$$

$$p_A = p_6 - \rho_b g (h_5 - h_4).$$

Исключив из этих соотношений промежуточные давления p_2 , p_4 , p_6 , получим:

$$p_A = \rho_p g [(h_1 - h_2) + (h_3 - h_4)] - \rho_B g [(h_3 - h_2) + (h_5 - h_4)] =$$

$$= 1,36 \cdot 10^4 \cdot 9,8 \cdot (0,43 + 0,13) - 10^3 \cdot 9,8 \cdot (0,15 + 0,59) = 67,4 \text{ кПа.}$$

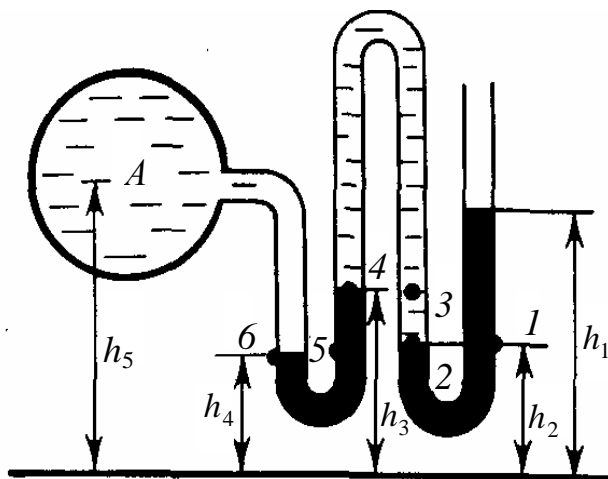


Рис. 2.3. К примеру 2.2

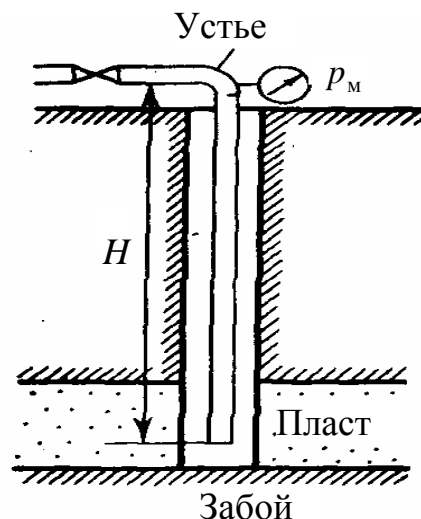


Рис. 2.4. К примеру 2.3

Пример 2.3. Определить давление на забое закрытой газовой скважины (рис. 2.4), если глубина скважины $H = 2200$ м, избыточное давление на устье $p_m = 10,7$ МПа, плотность природного газа при атмосферном давлении и температуре в скважине (считаемой неизменной по высоте) $\rho = 0,76$ кг/м³, атмосферное давление $p_a = 98$ кПа.

Решение. Для определения давления на забое газовой скважины воспользуемся барометрической формулой

$$p = p_0 e^{-\frac{\rho_0 g (z_0 - z)}{p_0}}$$

где p_0 — абсолютное давление на устье скважины:

$$p_0 = p_a + p_m = 98 \cdot 10^3 + 10,7 \cdot 10^6 = 10,8 \cdot 10^6 \text{ Па;}$$

ρ_0 — плотность при давлении p_0 ; $z_0 - z = 2200$ м.

Из уравнения состояния газа следует, что

$$\frac{\rho_0}{\rho_a} = \frac{p_a}{p_0} = \frac{0,76}{98 \cdot 10^3} = 7,76 \cdot 10^{-6} \text{ с}^2/\text{м}^2,$$

а показатель степени

$$\rho_0 g(z_0 - z) = 7,76 \cdot 10^{-6} \cdot 9,8 \cdot 2200 = 0,167.$$

Тогда

$$p = 10,8 \cdot 10^6 \cdot e^{0,167} \cdot 12,8 \text{ МПа}.$$

Контрольные задачи

Задача 2.1. Определить избыточное давление $p_{\text{и}}$ на поверхности жидкости в резервуаре и пьезометрическую высоту $h_{\text{п}}$ (см. рис. 2.5), если высота $H = 0,6$ м, а показания ртутного манометра $h = 80$ мм. Плотность жидкости $\rho = 800 \text{ кг/м}^3$, плотность ртути $\rho_{\text{р}} = 13\,600 \text{ кг/м}^3$.

Ответ: $p_{\text{и}} = 5,96 \text{ кПа}$; $h_{\text{п}} = 0,76 \text{ м}$.

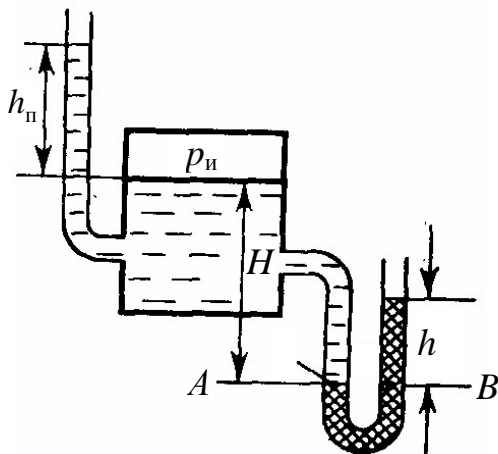


Рис. 2.5. К задаче 2.1

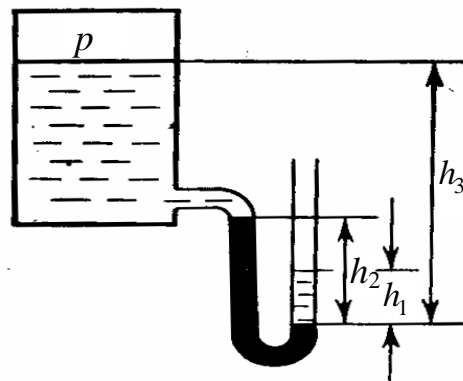


Рис. 2.6. К задаче 2.2

Задача 2.2. В закрытом сосуде хранится жидкость плотностью 850 кг/м^3 . Давление в сосуде измеряется ртутным манометром (рис. 2.6); в открытом конце манометрической трубки над ртутью имеется столб воды высотой $h_1 = 15$ см. Высоты $h_2 = 23$ см, $h_3 = 35$ см.

Найти абсолютное давление p на поверхности жидкости в сосуде, если барометрическое давление соответствует 742 мм рт. ст.

Ответ: $p = 6,85 \cdot 10^4$ Па.

Задача 2.3. Определить разность давления в двух сечениях горизонтального водопровода Δp по разности высот жидкости в трубках ртутного дифференциального манометра $h = 150$ мм (рис. 2.6).

Ответ: $\Delta p = 18,5$ кПа.

Задача 2.4. Сможет ли насос откачивать бензин плотностью $\rho = 750$ кг/м³ из закрытого резервуара, поверхность которого расположена на 8 м ниже оси насоса (рис. 2.7), если на всасывающем патрубке насоса абсолютное давление не может быть меньше чем $5,5 \cdot 10^4$ Па, а избыточное давление на поверхности резервуара $p_{и} = 10^4$ Па. Принять $p_{а} = 10^5$ Па.

Ответ: не сможет.

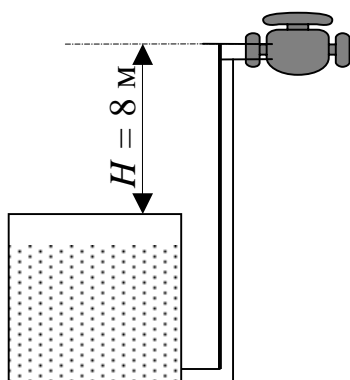


Рис. 2.7. К задаче 2.4

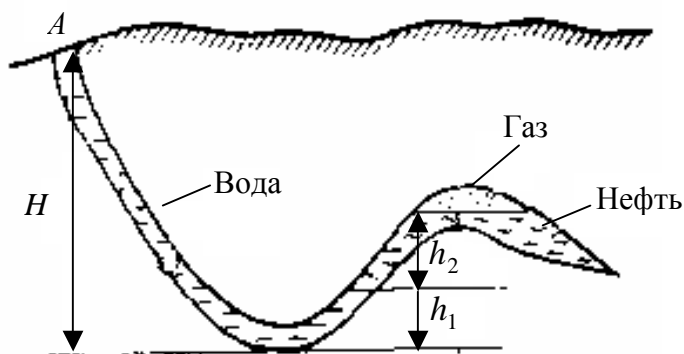


Рис. 2.8. К задаче 2.5

Задача 2.5. На рис. 2.8 приведен вертикальный разрез газонефтеводного пласта, имеющего выход на поверхность в точке A .

Найти абсолютное давление в газовой шапке, если $H = 2500$ м, $h_1 = 800$ м, $h_2 = 300$ м, плотность минерализованной воды $\rho_{в} = 1020$ кг/м³, плотность нефти $\rho_{н} = 850$ кг/м³, атмосферному давлению соответствует 740 мм рт. ст.

Ответ: $p = 14,6$ МПа.

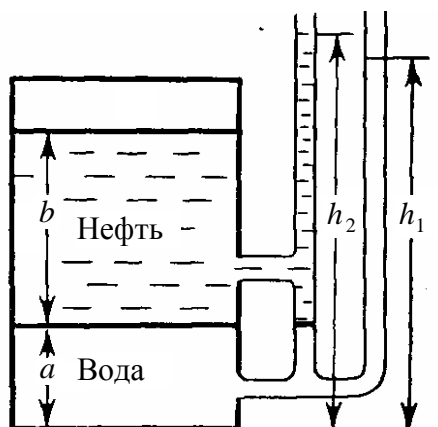


Рис. 2.9. К задаче 2.6

Задача 2.6. В закрытом цилиндрическом отстойнике уровень воды a составляет 0,25 м, уровень нефти b — 0,8 м (рис. 2.9).

Плотность воды $\rho_v = 1000 \text{ кг/м}^3$, плотность нефти $\rho_n = 880 \text{ кг/м}^3$.

Определить уровни h_1 и h_2 , если абсолютное давление на поверхности нефти $p_0 = 1,08 \cdot 10^5 \text{ Па}$, атмосферному давлению соответствует 735 мм рт. ст.

Ответ: $h_1 = 1,96 \text{ м}$; $h_2 = 2,20 \text{ м}$.

Задача 2.7. Барометр,

установленный у подножия холма, показывает давление 760 мм рт. ст., на вершине холма — 720 мм рт. ст.

Определить высоту холма, считая температуру воздуха постоянной и равной 10°C . Газовая постоянная для воздуха $R = 287 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$.

Ответ: $H = 448 \text{ м}$.

Задача 2.8. Определить, на какой высоте H от уровня моря давление воздуха составит 690 мм рт. ст. Температуру воздуха считать постоянной и равной 20°C . Давление воздуха на уровне моря принять равным 760 мм рт. ст.

Ответ: $H = 829 \text{ м}$.

2.2. СИЛА СТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ НА ПЛОСКУЮ СТЕНКУ

Если на плоскую стенку AB (рис. 2.10), наклоненную под углом α к горизонту, с одной стороны действует жидкость, а с другой — атмосферное давление, то скалярная величина равнодействующей сил давления, воспринимаемая стенкой,

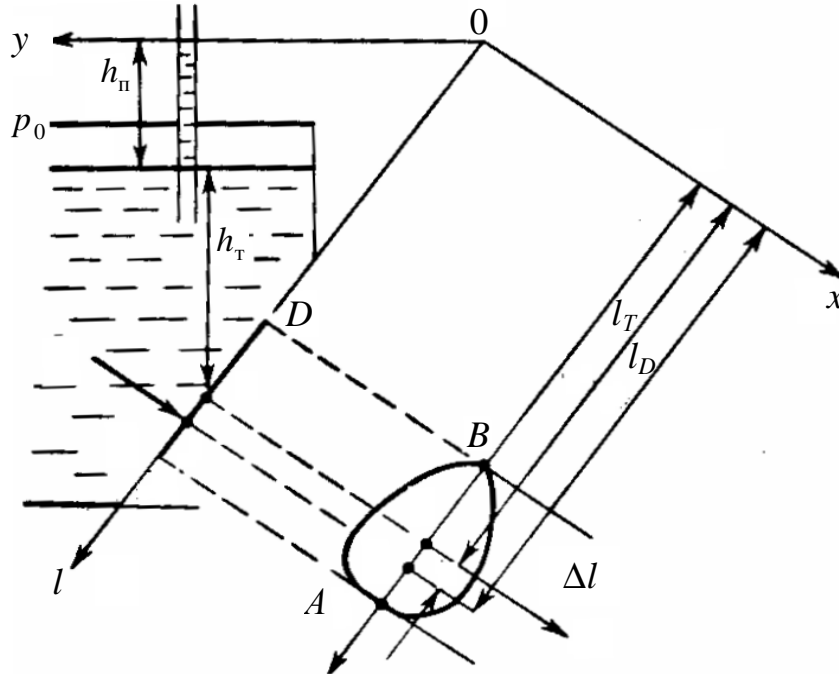


Рис. 2.10. Гидростатическое давление на наклонную плоскую стенку

$$P = (p_T - p_a)S = (\Delta p + \rho g h_T)S = \rho g (h_T + h_{\text{п}})S, \quad (2.4)$$

где p_T — абсолютное давление в центре тяжести смоченной части стенки (точка **T** на рис. 2.10); p_a — атмосферное давление; S — площадь смоченной части стенки; $\Delta p = p_0 - p_a = \rho g h_{\text{п}}$ — разность между абсолютным давлением p_0 на свободной поверхности жидкости и атмосферным давлением; h_T — расстояние по вертикали от центра тяжести смоченной части стенки до свободной поверхности жидкости; $h_{\text{п}}$ — расстояние по вертикали от свободной поверхности до пьезометрической плоскости ($h_T > 0$; $h_{\text{п}} > 0$ или $h_{\text{п}} < 0$).

Точка пересечения линии действия равнодействующей сил давления P с плоскостью стенки называется центром давления (точка D на рис. 2.10).

Положение центра давления относительно пьезометрической плоскости определяется по формуле

$$l_D = l_T + \frac{J}{l_T S}, \quad (2.5)$$

где l_D и l_T — соответственно расстояния до центра давления и центра тяжести, отсчитываемые вдоль плоскости стенки от линии пересечения ее с пьезометрической плоскостью (см. рис 2.10); J — момент инерции площади смоченной части стенки относительно горизонтальной оси, проходящей через ее центр тяжести.

Расстояние между центром давления и центром тяжести равно

$$\Delta l = l_D - l_T = \frac{J}{l_T S} = \frac{\rho g J}{P} \sin \alpha. \quad (2.6)$$

Примеры решения задач

Пример 2.4. Вертикальная стенка (рис. 2.11) длиной $l = 3$ м (в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа), шириной $b = 0,7$ м и высотой $H_0 = 2,5$ м разделяет бассейн с водой на две части. В левой части поддерживается уровень воды $H_1 = 2$ м, в правой — $H_2 = 0,8$ м.

Найти величину опрокидывающего момента, действующего на стенку, а также определить, будет ли стенка устойчива против опрокидывания, если плотность материала стенки $\rho_{ст} = 2500$ кг/м³.

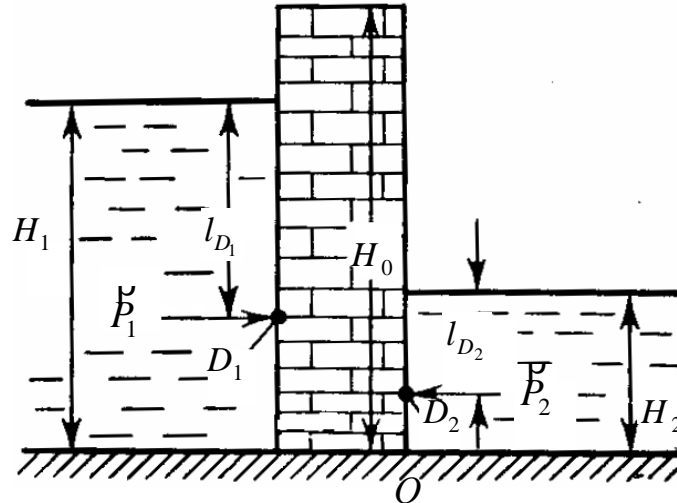


Рис. 2.11. К примеру 2.4

Решение. Найдем силу давления воды на стенку слева.

Поскольку на поверхности атмосферное давление, то пьезометрическая плоскость совпадает с поверхностью жидкости:

$$p_T - p_a = \rho g \frac{H_1}{2};$$

$$P = \rho g \frac{H_1}{2} l H_1 = 10^3 \cdot 9,8 \cdot 2 / (2 \cdot 3 \cdot 2) = 58,8 \cdot 10^3 H_1 = 58,8 \text{ кН.}$$

$$\text{Координата центра давления } l_D = l_T + \frac{J}{l_T S}.$$

Для прямоугольной стенки

$$J = \frac{l H_1^3}{12}.$$

Тогда

$$l_{D_1} = \frac{H_1}{2} + \frac{l H_1^3}{12 \frac{H_1}{2} H_1 l} = \frac{4}{3} \text{ м.}$$

Точно так же справа:

$$P_2 = \rho g \frac{H_2}{2} l H_2 = 9,41 \text{ кН;}$$

$$l_{D_2} = 0,533 \text{ м.}$$

Опрокидывающий момент, т. е. момент сил давления жидкости относительно точки O (см. рис. 2.10)

$$M_{\text{опр}} = P_1 \left(H_1 - \frac{2}{3} H_1 \right) - P_2 \left(H_2 - \frac{2}{3} H_2 \right) =$$

$$= 58,8 \cdot 10^3 \cdot \frac{2}{3} - 9,41 \cdot 10^3 - \frac{0,8}{3} = 3,67 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Устойчивость против опрокидывания сообщает стенке момент силы тяжести относительно нулевой точки:

$$M_{\text{тяж}} = H_0 l b \rho_{\text{ст}} g \frac{b}{2} = 2,5 \cdot 3 \cdot 0,7 \cdot 2500 \cdot 9,8 \cdot 0,35 = 4,5 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Поскольку $M_{\text{тяж}} > M_{\text{опр}}$, то стенка устойчива.

Пример 2.5. Для слива жидкой субстанции из хранилища имеется квадратный патрубок со стороной $h = 0,3 \text{ м}$, закрытый шарнирно закрепленной в точке O крышкой.

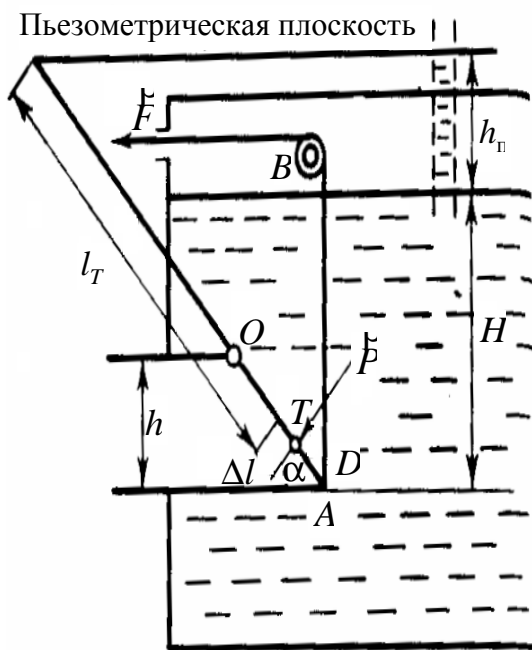


Рис. 2.12. К примеру 2.5

Крышка опирается на торец патрубка и расположена под углом 45° ($\alpha = 45^\circ$) к горизонту (рис. 2.12).

Определить (без учета трения в шарнире O и рамке B) силу F натяжения троса, необходимую для открытия крышки AO , если уровень жидкости $H = 3 \text{ м}$, давление над ней, измеренное манометром, $p_m = 5 \text{ кПа}$, а плотность $\rho = 700 \text{ кг/м}^3$. Вес крышки не учитывать.

Решение. Найдем силу давления на стенку AO .

Рассматриваемой смоченной поверхностью является прямоугольная наклонная стенка высотой $h / \sin \alpha$ и шириной h , т. е. $s = h^2 / \sin \alpha$.

Центр тяжести этой стенки находится на глубине $h_T = H - h / 2$, $\Delta p = p_m$, т. е.

$$P = \left[p_m + \rho g \left(H - \frac{h}{2} \right) \right] s =$$

$$= \left[5 \cdot 10^3 + 700 \cdot 9,8 \cdot \left(3 - \frac{0,3}{2} \right) \right] \frac{0,3^2}{\sin 45^\circ} = 3,13 \text{ кН.}$$

Найдем теперь расстояние между центром давления и центром тяжести крышки:

$$h_n = \frac{\Delta p}{\rho g} = \frac{p_m}{\rho g} = \frac{5 \cdot 10^3}{9,8 \cdot 700} = 0,729 \text{ м.}$$

Тогда

$$l_T = \frac{h_n H - \frac{h}{2}}{\sin \alpha} = \frac{0,729 + 3 - 0,15}{0,707} = 5,06 \text{ м.}$$

Момент инерции прямоугольной стенки относительно горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести стенки,

$$J = \left(\frac{h}{\sin \alpha} \right)^3 \frac{h}{12} = \frac{h^4}{12 \sin^3 \alpha}.$$

Тогда

$$\begin{aligned} \Delta l &= \frac{J}{l_T s} = \frac{h^4 \sin \alpha}{12 l_T \sin^3 \alpha \cdot h^2} = \frac{h^2}{12 l_T \sin^2 \alpha} = \\ &= \frac{0,09}{12 \cdot 5,06 \cdot 0,5} = 0,003 \text{ м.} \end{aligned}$$

Найдем силу натяжения троса из уравнения моментов сил, взятых относительно оси шарнира

$$F \div OA \cos \alpha - P(OT + \Delta l) = 0.$$

Тогда

$$\begin{aligned} F &= \frac{P(OT + \Delta l)}{h} = \frac{P \left(\frac{h}{2 \sin \alpha} + \Delta l \right)}{h} = \\ &= \frac{3,13 \cdot 10^3}{0,3} \left(\frac{0,3}{2 \cdot 0,707} + 0,003 \right) = 2,24 \text{ кН.} \end{aligned}$$

Контрольные задачи

Задача 2.9. Найти силу давления воды на дно сосуда диаметром $D = 1$ м (рис. 2.13), если:

1) глубина $H = 0,7$ м,

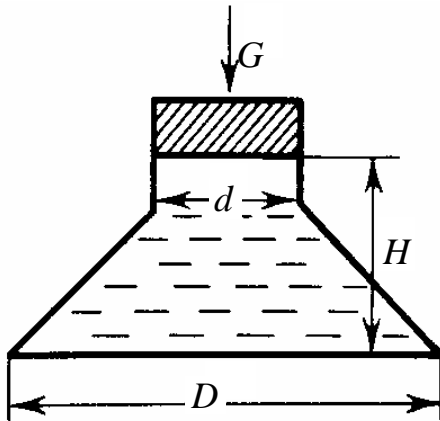


Рис. 2.13. К задаче 2.9

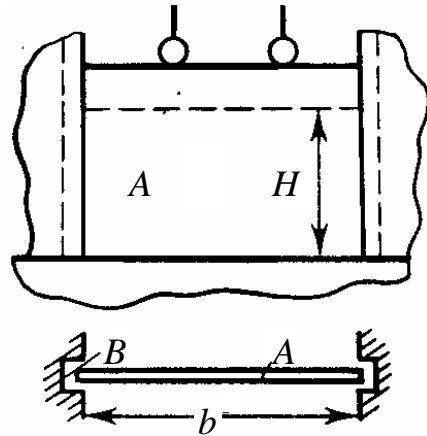


Рис. 2.14. К задаче 2.10

2) вес поршня $G = 300 \text{ Н}$,

3) $d = 0,5 \text{ м}$.

Ответ: $6,59 \text{ кН}$.

Задача 2.10. Вертикальный щит A (рис. 2.14), перекрывающий водослив плотины, может перемещаться в пазах A и B вверх и вниз. Глубина жидкости $H = 1,4 \text{ м}$, ширина щита $b = 2,6 \text{ м}$.

Какую силу нужно приложить, чтобы поднять щит, если вес его $G = 32 \text{ кН}$, а коэффициент трения между щитом и поверхностью пазов $l = 0,3$.

Ответ: $F = 39,5 \text{ кН}$.

Задача 2.11. Наклонный прямоугольный щит плотины шарнирно закреплен на оси O (рис. 2.15).

При каком уровне воды H щит опрокинется, если угол наклона щита $\alpha = 60^\circ$, а расстояние от его нижней кромки до оси шарнира $a = 1,3 \text{ м}$. Вес щита не учитывать.

Ответ: $H = 3,38 \text{ м}$.

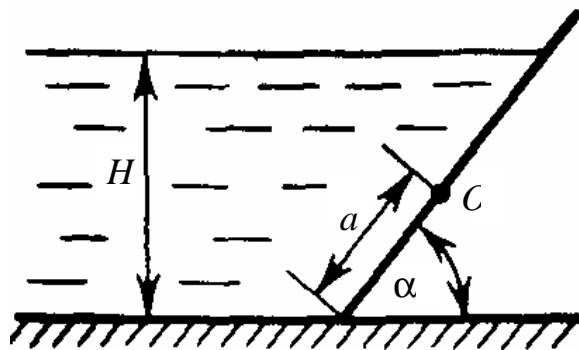


Рис. 2.15. К задаче 2.11

Задача 2.12. Определить силу давления жидкости на плоскую торцевую стенку горизонтальной цилиндрической цистерны (рис. 2.16) диаметром $d = 2,4$ м, заполненной бензином плотностью $\rho = 760$ кг/м³, если уровень бензина в горловине находится на расстоянии $H = 2,7$ м от дна.

Цистерна герметично закрыта и избыточное давление на поверхности жидкости составляет 40 кПа.

Найти также положение центра давления относительно центра тяжести стенки.

Ответ: $P = 231$ кН; $\Delta l = 0,052$ м.

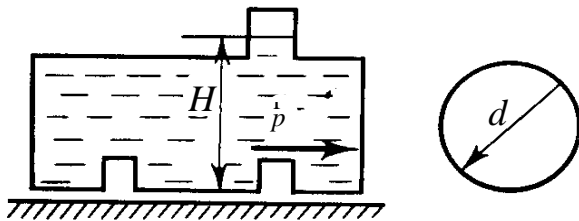


Рис. 2.16. К задаче 2.12

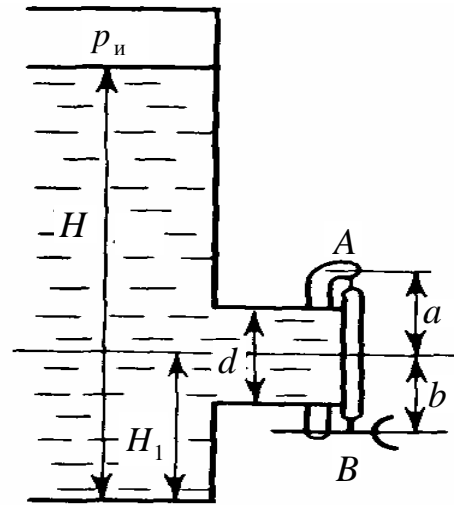


Рис. 2.17. К задаче 2.13

Задача 2.13. Резервуар заполнен нефтью плотностью $\rho = 850$ кг/м³ до высоты $H = 4$ м (рис. 2.17). Избыточное давление на поверхности $p_n = 14,7$ кПа.

Определить реакции шарнира A и стяжного болта B крышки люка, если диаметр патрубка $d = 1$ м, и его центр расположен на расстоянии $H = 1,5$ м от дна резервуара; $a = 0,7$ м и $b = 0,8$ м. Вес крышки не учитывать.

Ответ: $R_A = 14,6$ кН; $R_B = 13,3$ кН.

Задача 2.14. Закрытый резервуар высотой $H = 10$ м (рис. 2.18) разделен на два отсека вертикальной прямоугольной перегородкой шириной $b = 4$ м. В левом отсеке уровень нефти $H_1 = 8$ м

($\rho_n = 850 \text{ кг/м}^3$), в правом уровень воды $H_2 = 5 \text{ м}$ ($\rho_v = 1000 \text{ кг/м}^3$). Избыточное давление паров над нефтью $p_n = 19,6 \text{ кПа}$.

Определить равнодействующую сил давления на перегородку и точку ее приложения⁴.

Ответ: $P = 136 \cdot 10^4 \text{ Н}$; расстояние от точки O до точки приложения равнодействующей P равно $a = 4,46 \text{ м}$. Сила P действует со стороны левого отсека.

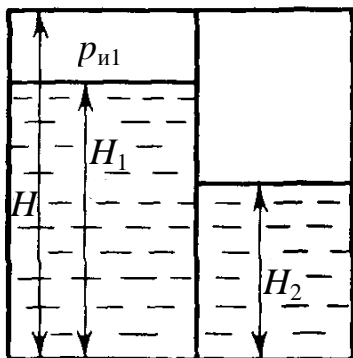


Рис. 2.18. К задаче 2.14

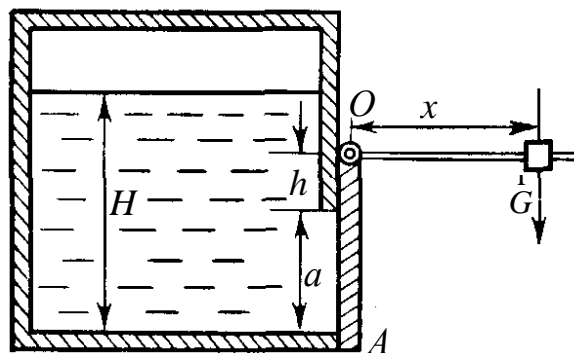


Рис. 2.19. К задаче 2.15

Задача 2.15. Квадратное отверстие со стороной $a = 0,6 \text{ м}$ в стенке резервуара с водой закрыто щитом OA , который прижимается грузом G (рис. 2.19), подвешенным на рычаге длиной $x = 0,5 \text{ м}$. Расстояние от верхней кромки отверстия до оси вращения O $h = 0,3 \text{ м}$.

Задание:

1. Найти минимальный вес груза G , достаточный для удержания воды в резервуаре на уровне $H = 2 \text{ м}$, если избыточное давление на поверхности $p_n = 5 \text{ кПа}$.

2. Определить, будет ли удерживаться щит без груза, если над водой создать вакуум $p_v = 19,6 \text{ кПа}$.

3. Найти в этом случае положение пьезометрической плоскости, силу давления на щит и положение центра давления.

Весом щита, рычага, а также трением в шарнире пренебречь.

⁴ В левом отсеке, кроме силы давления нефти и паров на смоченную часть перегородки, нужно учесть силу давления паров на несмоченную часть стенки.

Ответ:

1. $G = 9,57$ кН.

2. Щит будет удерживаться, так как сила $P = 1,06$ кН направлена внутрь резервуара.

3. Пьезометрическая плоскость проходит по дну резервуара. Центр давления расположен на расстоянии $2a/3 = 0,4$ м от дна резервуара.

2.3. СИЛА СТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ НА КРИВОЛИНЕЙНЫЕ СТЕНКИ. ЗАКОН АРХИМЕДА

Из теоретической механики известно, что в общем случае система сил давления, приложенных к криволинейной поверхности, приводится к главному вектору и главному моменту сил давления.

В частных случаях (сфера, цилиндр с вертикальной или горизонтальной осью) силы давления приводятся только к равнодействующей (главному вектору).

Равнодействующая сил давления \vec{P} определяется из выражения

$$|\vec{P}| = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}. \quad (2.7)$$

Положение в пространстве вектора силы \vec{P} задано направляющими косинусами:

Примем, что ось z направлена вертикально вверх.

Горизонтальная составляющая P_r (P_x или P_y) определяется по формуле

$$P_r = (p_t - p_a)s_b, \quad (2.8)$$

где p_t — абсолютное давление в центре тяжести площади s_b ; p_a — атмосферное давление; s_b — площадь проекции рассматриваемой криволинейной поверхности на вертикальную плоскость, нормальную к соответствующей оси координат (yOz для силы P_x , xOz для силы P_y).

Направление действия силы P_r зависит от знака величины $p_t - p_a$ (при $p_t - p_a > 0$ — наружу, при $p_t - p_a < 0$ — вовнутрь жидкости), причем линия ее действия проходит через центр давления площади s_R .

Вертикальная составляющая силы \dot{P} определяется весом тела давления:

$$P_z = \rho g V_{\text{т.д}}, \quad (2.9)$$

где $V_{\text{т.д}}$ — объем тела давления.

Телом давления называется объем, ограниченный рассматриваемой криволинейной поверхностью, ее проекцией на пьезометрическую поверхность⁵ и боковой цилиндрической поверхностью, образующейся при проектировании (рис. 2.20).

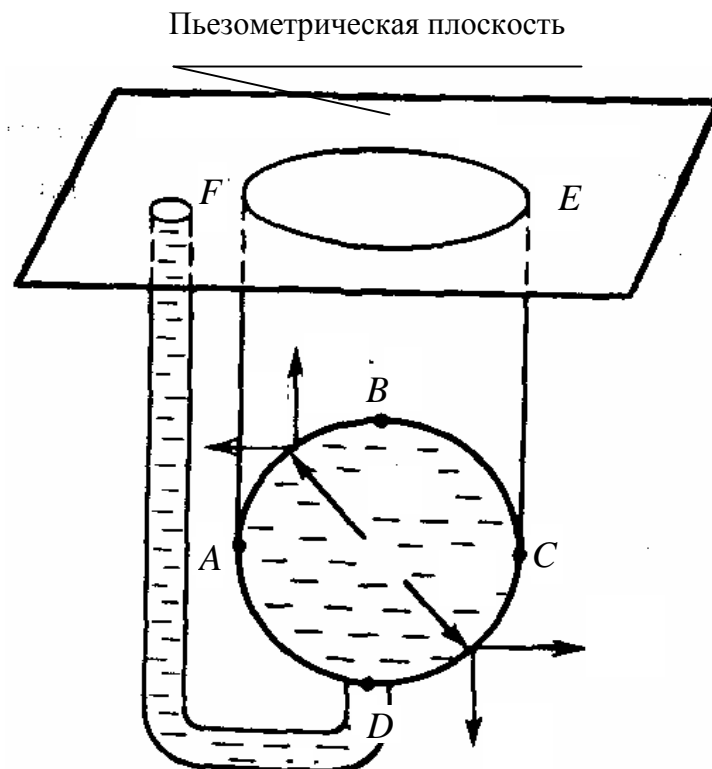


Рис. 2.20. К определению тела давления

Для криволинейной поверхности ABC (см. рис. 2.20) телом давления будет фигура $ABCEFA$, для криволинейной поверхности ADC — $ADCEFA$.

Направление действия вертикальной составляющей \dot{P} зависит от направления элементарных составляющих этой силы.

⁵ Кроме случая относительного покоя жидкости, пьезометрическая поверхность представляет собой горизонтальную плоскость.

На примере рис. 2.20 видно, что давление в любой точке криволинейных поверхностей — как ABC , так и ADC — избыточное (пьезометрическая плоскость лежит выше этих поверхностей). Следовательно, элементарные силы давления $d\vec{P}$, действующие по нормали к касательной в любой точке этих поверхностей, направлены наружу.

Разложение их на составляющие показывает, что вертикальная составляющая силы \vec{P} действует на поверхность ABC вверх, а на поверхность ADC вниз (их результирующая сила направлена вниз и равна весу реальной жидкости в объеме $ABCD$, являющемся результирующим объемом двух тел давления).

Линия действия вертикальной составляющей силы \vec{P} проходит через центр тяжести рассматриваемого тела давления.

Закон Архимеда: на тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила \vec{P} , равная по величине весу жидкости в объеме погруженной части тела V :

$$|\vec{P}| = \rho g V. \quad (2.10)$$

Выталкивающая (Архимедова) сила приложена в центре тяжести объема погруженной части тела, называемом центром водоизмещения.

Плавающее тело обладает устойчивостью (способностью возвращаться в состояние равновесия после получения крена) в случае, если точка пересечения линии действия выталкивающей силы с осью плавания (метацентр) лежит выше центра тяжести тела.

Примеры решения задач

Пример 2.6. Секторный щит радиусом R и шириной B (рис. 2.21) перегородивает канал с жидкостью.

Определить силу давления жидкости и направление ее действия.

Решение:

1. Вертикальная составляющая силы давления

$$P_z = \rho g V_{\text{т.д}},$$

где

$$V_{\text{т.д}} = \pi R^2 B / 4.$$

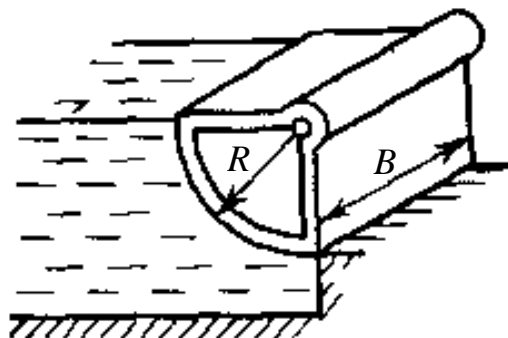


Рис. 2.21. К примеру 2.6

Пьезометрическая поверхность в этой задаче совпадает со свободной поверхностью жидкости в канале, так как на нее действует атмосферное давление.

Сила \vec{P}_z приложена в центре тяжести объема тела давления и направлена вверх, поскольку любая элементарная сила давления жидкости $d\vec{P}$ в любой точке щита дает при разложении вертикальную составляющую, направленную вверх.

2. Горизонтальная составляющая силы давления

$$P_r = (p_T - p_a)S_B = \rho g \frac{R}{2} RB$$

направлена слева направо (все $d\vec{P}$ направлены от жидкости к стенке).

3. Результирующая сила давления жидкости

$$P = \sqrt{P_r^2 + P_z^2} = \rho g BR^2 \sqrt{\frac{\pi^2}{16} + \frac{1}{4}} \approx 0,93 \rho g R^2$$

направлена по радиусу к оси щита; угол ее наклона к горизонту определяется из выражения

$$\cos \alpha = P_r / P = 1 / (2 \cdot 0,93) = 0,538.$$

Следовательно, $\alpha = 57^\circ 27'$.

Пример 2.7. В боковой плоской стенке резервуара с реактивным топливом ($\rho = 800 \text{ кг/м}^3$) имеется круглый люк диаметром $d = 0,5 \text{ м}$, закрытый полусферической крышкой (рис. 2.22). Высота жидкости в резервуаре над осью люка $H = 3 \text{ м}$, вакуум на ее свободной поверхности $p_{\text{вак}} = 4,9 \text{ кПа}$.

Определить горизонтальную и вертикальную составляющие силы давления жидкости на крышку люка, а также величину их равнодействующей и ее направление.

Решение.

1. Найдем положение пьезометрической плоскости, необходимой для определения

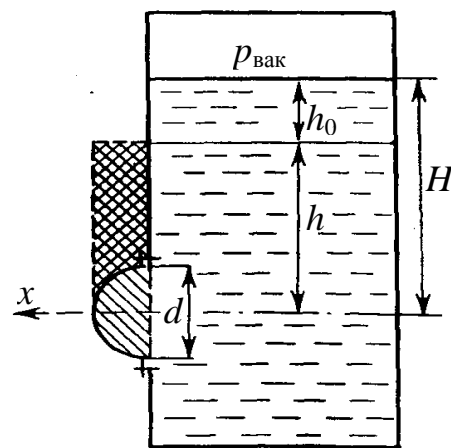


Рис. 2.22. К примеру 2.7

объема тела давления. Поскольку на свободной поверхности жидкости — вакуум, пьезометрическая плоскость будет лежать ниже на расстоянии

$$h_{\text{п}} = \frac{p_{\text{вак}}}{\rho g} = \frac{4,9 \cdot 10^3}{800 \cdot 9,8} = 0,625 \text{ м.}$$

4. Определим вертикальную составляющую силы давления жидкости на крышку.

Пьезометрическая плоскость лежит выше оси крышки на расстоянии

$$h = H - h_{\text{п}} = 3 - 0,625 = 2,375 \text{ м.}$$

Для нижней половины крышки вертикальная составляющая силы давления направлена вниз. Объем тела давления для этого случая равен сумме объемов полуцилиндра и четверти шара (на рис. 2.22 заштриховано «слева вниз»).

Результирующая вертикальная сила равна разности этих двух сил, направлена вниз, и объем ее тела давления равен объему жидкости в крышке люка. Поэтому

$$P_z = \rho g V_{\text{т.д}} = \frac{1}{12} \rho g \pi l^3 = \frac{\pi}{12} \cdot 800 \cdot 9,8 \cdot 0,5^3 = 257 \text{ Н.}$$

Линия действия этой силы проходит через центр объема крышки люка на расстоянии от ее основания, равном

$$x = \frac{3}{16} d = \frac{3 \cdot 0,5}{16} = 0,094 \text{ м.}$$

5. Определим горизонтальную составляющую силы давления жидкости на крышку:

$$\begin{aligned} P_x &= (p_{\text{т}} - p_{\text{а}}) s_{\text{в}} = \rho g h \frac{\pi d^2}{4} = \\ &= 800 \cdot 9,8 \cdot 2,375 \cdot 3,14 \cdot \frac{0,25}{4} = 3,65 \text{ кН.} \end{aligned}$$

Сила направлена параллельно оси x , а линия ее действия лежит ниже этой оси на величину:

$$\frac{J}{l_{\text{т}} s} = \frac{\pi d^4}{64 h \pi d^2} \frac{4}{16 h} = \frac{d^2}{16 h} = \frac{0,5^2}{16 \cdot 2,375} = 6,6 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

6. Определим равнодействующую сил давления:

$$|\vec{P}| = \sqrt{P_x^2 + P_z^2} = \sqrt{(3,65 \cdot 10^3)^2 + (0,257 \cdot 10^3)^2} = 3,66 \text{ кН.}$$

Косинус угла α между осью x и линией действия этой силы

$$\cos \alpha = \frac{P_x}{|\vec{P}|} = \frac{3,65 \cdot 10^3}{3,66 \cdot 10^3} = 0,997.$$

Тогда $-\alpha \approx 4^\circ$.

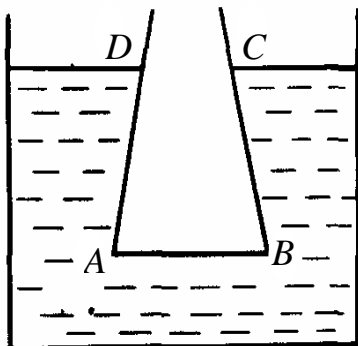


Рис. 2.23. К примеру 2.8

Пример 2.8. Коническая воронка с приставным дном пренебрежимо малого веса погружена в жидкость (рис. 2.23).

Вес жидкости в объеме $ABCD$ равен F .

Объяснить, что произойдет с дном воронки, если:

а) в воронку налить ту же жидкость до уровня CD ;

б) на дно воронки положить груз весом P .

Решение: а) ничего не произойдет;

б) если $P > F$, то дно воронки отойдет вниз и вместе с воронкой опустится на дно резервуара с водой.

Контрольные задачи

Задача 2.16. Вертикальный цилиндрический резервуар ($d = 2$ м) закрыт сверху полусферической крышкой того же диаметра весом $19,6$ кН и целиком заполнен водой. Затем в отверстие в верхней части крышки ввернули вертикальную трубку пренебрежимо малого диаметра и залили в нее воду.

Определить:

1) при какой высоте воды в трубке вертикальная составляющая силы давления жидкости уравновесит вес крышки?

2) как должна измениться эта высота, если в трубке находится не вода, а керосин ($\rho = 810 \text{ кг/м}^3$)?

Ответ: $h = 0,303$ м; $\Delta h = 0,374$ м.

Задача 2.17. Цилиндрический резервуар сварен из двух полуцилиндрических частей и

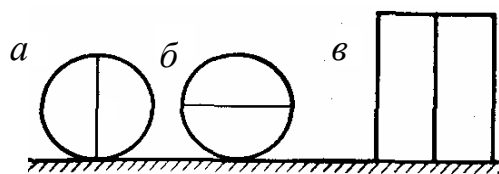


Рис. 2.24. К задаче 2.17

целиком заполнен жидкостью (рис. 2.24). Определить, при каком положении (*а*, *б* или *в*) резервуара действующие на сварной шов растягивающие усилия минимальны. Длина резервуара больше его диаметра, заливочное отверстие всегда находится в верхней его части и открыто.

Ответ: в положении *б*.

Задача 2.18. Полностью погруженный поплавок указателя уровня нефти, имеющий среднюю плотность 900 кг/м^3 , плавает на границе раздела нефти и воды, находящихся в резервуаре-отстойнике.

Плотность нефти — 850 кг/м^3 , воды — 1000 кг/м^3 .

Определить, какая часть объема поплавка находится в воде?

Ответ: $1/3$.

Задача 2.19. Какой объем бензина ($\rho = 740 \text{ кг/м}^3$) можно залить в железнодорожную цистерну внутренним объемом 50 м^3 и массой 23 т , чтобы она еще сохраняла плавучесть в пресной воде?

Будет ли при плавании цистерна устойчива?

Ответ: $V = 40,4 \text{ м}^3$; да.

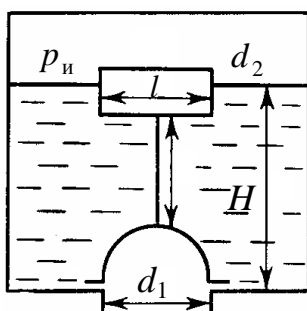


Рис. 2.5. К задаче 2.20

Задача 2.20. В днище резервуара с жидкостью ($\rho = 800 \text{ кг/м}^3$) имеется круглое спускное отверстие ($d = 10 \text{ см}$), закрытое полусферическим клапаном (рис. 25).

Определить при каком диаметре цилиндрического поплавка d_2 клапан автоматически откроется при достижении уровня жидкости в резервуаре $H = 2 \text{ м}$?

Длина цепочки, связывающей поплавок с клапаном, $l = 0,95 \text{ м}$, вес подвижных частей устройства $G = 30 \text{ Н}$, избыточное давление на свободной поверхности жидкости $p_{\text{н}} = 49 \text{ кПа}$.

Ответ: $d_2 = 0,295 \text{ м}$.

2.4. ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ ПОКОЙ ЖИДКОСТИ

Относительным покоем жидкости называется состояние, при котором она неподвижна относительно стенок заключающего ее и

движущегося с постоянным ускорением сосуда. При этом жидкость перемещается с сосудом как единое целое.

В случае относительного покоя на частицы жидкости массой dm действуют две массовые силы:

- сила тяжести $\vec{dG} = gdm$;

- сила инерции $\vec{F} = -a_1 dm$,

где a_1 — ускорение содержащего жидкость сосуда.

При равномерном прямолинейном движении сосуда с жидкостью, силы инерции отсутствуют и условия относительного равновесия совпадают с условиями равновесия в неподвижном сосуде.

Прямолинейное равноускоренное движение сосуда. При движении сосуда с постоянным ускорением a в плоскости xOz под углом α к горизонту (рис. 2.26) вектор напряжения массовых сил одинаков для всех точек жидкости.

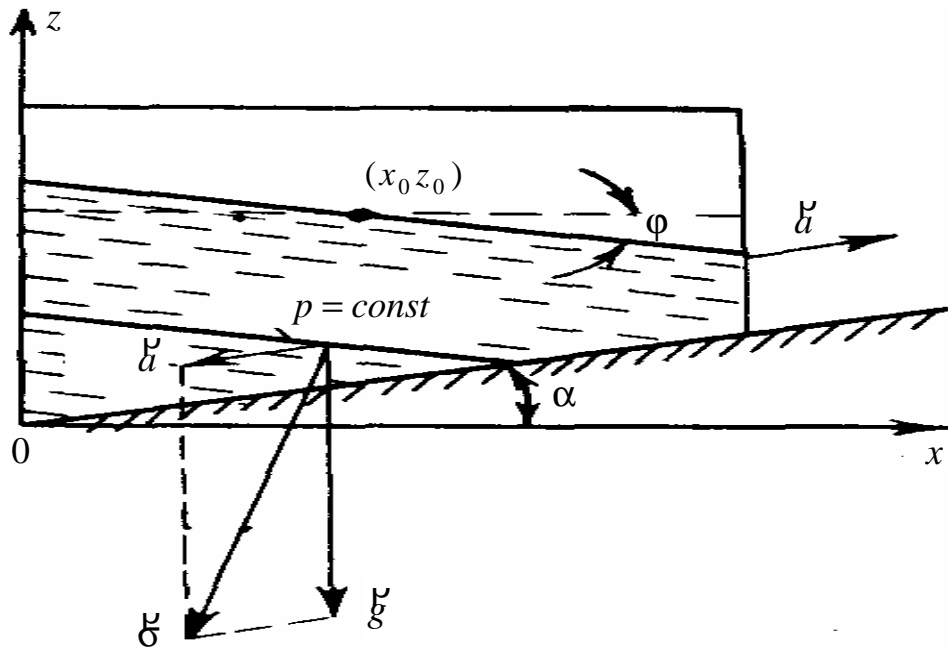


Рис. 2.26. Сосуд с жидкостью, движущийся вдоль наклонной плоскости с постоянным ускорением

В рассматриваемом случае поверхности уровня равного давления — это параллельные плоскости, наклоненные к горизонтали под углом φ , для которого

$$\rho_0$$

$$z = z_0 + \frac{\omega^2 r^2}{2g} - h, \quad (2.14)$$

где z — координата точки пересечения свободной поверхности с осью вращения;

$$h = \frac{p - p_0}{\rho g}. \quad (2.15)$$

Изобарические поверхности — параболоиды вращения, ось которых совпадает с осью Oz , а вершины смещены вдоль этой оси. Форма изобарических поверхностей не зависит от плотности жидкости.

Изменение давления по вертикали (A — глубина точки под свободной поверхностью):

$$p = p_0 + \rho gh,$$

т. е. такое же, как в неподвижном сосуде.

Примеры решения задач

Пример 2.9. Цистерна с нефтью движется по горизонтальному пути со скоростью $v = 60$ км/ч (рис. 2.28). Размеры цистерны, м: $d = 3$, $l = 8$, $h = 0,3$. Плотность нефти $\rho = 850$ кг/м³. В некоторый момент времени поезд начинает тормозить и, пройдя путь длиной $L = 100$ м, останавливается.

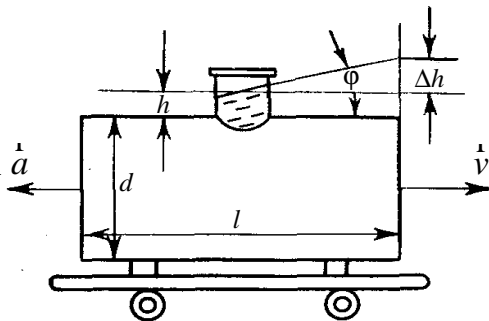


Рис. 2.28. К примеру 2.9

Считая движение прямолинейным равномерно-замедленным, определить силу P давления нефти на переднее днище цистерны при движении и в

состоянии покоя.

Решение. При равномерно-замедленном движении ускорение

$$\Delta h = \frac{l}{2} \operatorname{tg} \varphi = \frac{8}{2} \cdot 0,142 = 0,568 \text{ м.}$$

Вычислим высоту, на которой установится у передней стенки продолжение плоскости свободной поверхности жидкости.

Сила давления жидкости на переднюю стенку цистерны

$$P = \rho g h_T S,$$

где h — глубина погружения центра тяжести стенки под уровень свободной поверхности; S — площадь стенки.

Поскольку

$$h_T = \Delta h + h + d/2,$$

то

$$\begin{aligned} P &= \rho g \left(\Delta h + h + \frac{d}{2} \right) \frac{\pi d^2}{2} = \\ &= 850 \cdot 9,8 \cdot (0,568 + 0,3 + 1,5) \cdot \frac{3,14 \cdot 3^2}{4} = 140 \text{ кН}. \end{aligned}$$

Ускорение цистерны направлено влево, а напряжение силы инерции переносного движения — вправо. Используя формулу (2.13), определим угол φ наклона свободной поверхности жидкости к горизонту. Поскольку цистерна движется горизонтально ($a = 0$), то

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{a}{g} = \frac{1,39}{9,8} = 0,142; \quad \varphi = 8,07^\circ.$$

В состоянии покоя или равномерного прямолинейного движения ($a = 0$) свободная поверхность жидкости горизонтальна, и сила, действующая на торцевую стенку, равна:

$$P = \rho g \left(h + \frac{d}{2} \right) \frac{\pi d^2}{2} = 850 \cdot 9,8 \cdot (0,3 + 1,5) \cdot \frac{3,14 \cdot 3^2}{4} = 106 \text{ кН}.$$

Пример 2.10. Вертикальный цилиндрический сосуд диаметром $D = 40$ см и высотой $H = 100$ см наполнен до половины водой (рис. 2.28).

Определить, с каким предельным числом оборотов можно вращать этот сосуд около его геометрической вертикальной оси, чтобы из него не выливалась вода, а также определить силу давления жидкости на дно сосуда.

Решение: Из рис. 2.29 видно, что

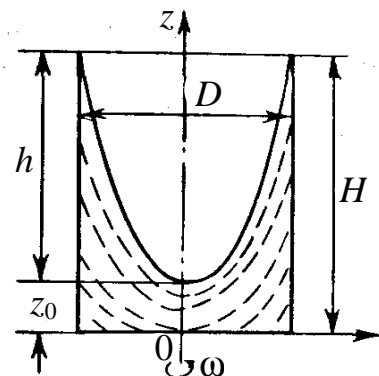


Рис. 2.29. К примеру 2.10

$$H = z_0 + h.$$

В соответствии с формулами (2.14) и (2.15)

$$z_0 = h_0 - \frac{\omega^2 R^2}{4g}; \quad h = \frac{\omega^2 R^2}{2g}.$$

Тогда

$$H = z_0 + h = h_0 + \frac{\omega^2 R^2}{4g}.$$

С другой стороны, начальный уровень в резервуаре h_0 по условию равен $H/2$ и, следовательно,

$$H = \frac{H}{2} + \frac{\omega^2 R^2}{4g}.$$

Соответственно,

$$\omega = \frac{\sqrt{2gh}}{R} = \frac{\sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 1}}{0,2} = 22,1 \text{ с}^{-1}.$$

Предельное число оборотов в минуту: $n = 30\omega / \pi = 211$ об/мин.

Для определения силы давления жидкости на дно сосуда найдем закон распределения избыточного давления, полагая $p_0 = p_a$.

Тогда

$$p_{\text{и}} = p - p_a = \rho \frac{\omega^2 r^2}{2} + \rho g(z_0 - z).$$

Неизвестную величину вершины параболоида z_0 определим по формуле

$$z_0 = h_0 - \frac{\omega^2 r^2}{2g} = \frac{H}{2} - \frac{H}{2} = 0,$$

т. е. параболоид свободной поверхности касается дна сосуда, и закон распределения избыточного давления описывается уравнением

$$p_{\text{и}} = \rho \frac{\omega^2 r^2}{2g} - \rho g z;$$

$$H = z_0 + h = h_0 + \frac{\omega^2 r^2}{4g}.$$

Для точек на дне сосуда ($z = 0$) избыточное давление

$$p_{\text{н}} = \rho \frac{\omega^2 r^2}{2g}.$$

Силу давления на дно сосуда найдем как сумму элементарных сил давления, действующих на элементарные кольцевые площадки, равные $2\pi r dr$:

$$\begin{aligned} P &= \int_0^R p_{\text{н}} 2\pi r dr = \pi \rho \omega^2 \int_0^R r^3 dr = \frac{\pi}{4} \rho \omega^2 R^4 = \\ &= \frac{\pi}{4} 10^3 \cdot 22,1^2 \cdot 0,2^4 = 614 \text{ Н.} \end{aligned}$$

Контрольные задачи

Задача 2.21. Призматический сосуд (рис. 2.30) длиной $l = 3$ м и шириной (нормальной к плоскости рисунка) 1 м, перемещающийся горизонтально с постоянным ускорением $a = 0,4g$, разделен на два отсека, заполненных водой до высоты $h_1 = 1$ м и $h_2 = 1,75$ м.

Определить результирующую силу давления воды на перегородку, разделяющую отсеки.

Ответ: $P = P_2 - P_1 = 2,17$ кН и ее линия действия проходит на расстоянии $CE = 0,738$ м от дна резервуара.

l

l

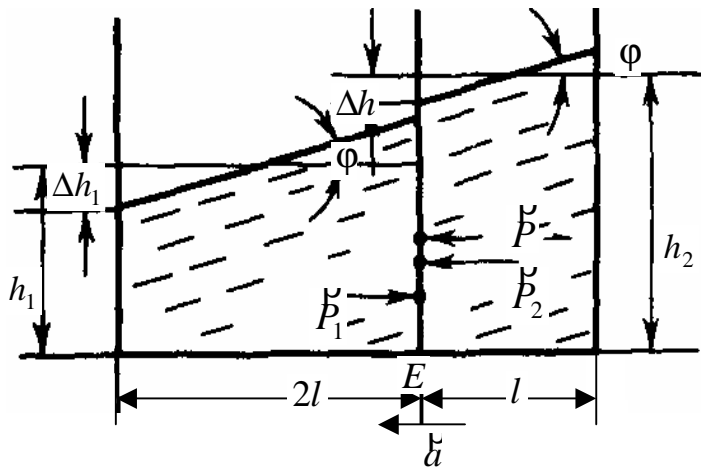


Рис. 2.30. К задаче 2.21

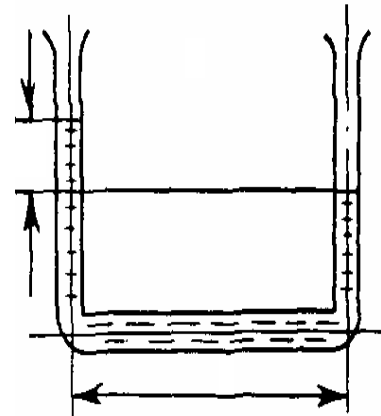


Рис. 2.31. К задаче 2.22

Задача 2.22. Измеритель ускорения тела, движущегося горизонтально, представляет собой закрепленную на нем U -образную трубку малого диаметра, наполненную жидкостью (рис. 2.31).

Определить, с каким ускорением движется тело, если при движении установилась разность уровней жидкости в коленах измерителя $h = 75$ мм, при расстоянии между ними $l = 250$ мм.

Ответ: $a = 2,94$ м/с².

Задача 2.23. Сосуд, имеющий форму усеченного конуса, заполнен водой до половины высоты и приводится во вращение вокруг своей вертикальной оси (рис. 2.32).

Определить наибольшее число оборотов, при котором вода не будет выливаться из сосуда, если $h = a = 0,8$ м и угол $\alpha = 45^\circ$.

Ответ: $n_{\max} = 26,4$ об/мин = 0,44 об/с.

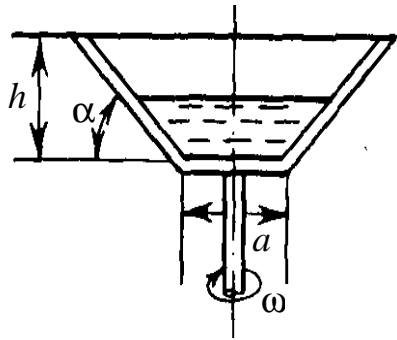


Рис. 2.32. К задаче 2.23

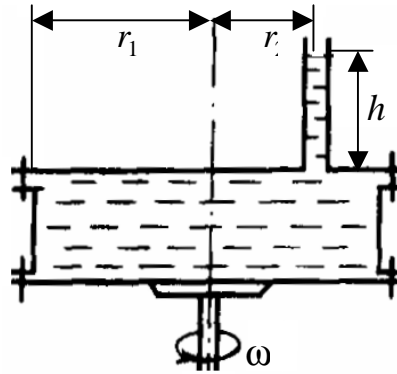


Рис. 2.33. К задаче 2.24

Задача 2.24. Закрытый цилиндрический сосуд радиусом $r_1 = 50$ см равномерно вращается относительно вертикальной оси.

При этом уровень жидкости в открытой трубке малого диаметра, установленной на расстоянии $r_2 = 35$ см от центра, расположен на высоте $h = 40$ см (рис. 2.33).

Плотность жидкости равна 800 кг/м^3 ; атмосферное давление — 760 мм рт. ст.

Определить наибольшую угловую скорость, при которой сохранится относительное равновесие жидкости. Давление насыщенных паров жидкости⁶ равно 49 кПа.

Ответ: $\omega_{\text{max}} = 45,1 \text{ 1/с}$.

Задача 2.25. Закрытый сверху крышкой цилиндр с диаметром $d = 0,9$ м и высотой $h = 0,8$ м содержит воду в количестве $W = 0,35 \text{ м}^3$ и вращается вокруг вертикальной оси с угловой скоростью $\omega = 100 \text{ 1/с}$.

Определить усилия, действующие при этом на крышку цилиндра, если давление на поверхности воды атмосферное.

Ответ: $P = 133 \text{ кН}$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО ТЕМАМ ГЛАВЫ

1. Что такое гидростатическое давление?
2. Назовите свойства гидростатического давления.

⁶ Равновесие жидкости нарушится, когда минимальное абсолютное давление будет равно давлению насыщенного пара жидкости.

3. Запишите дифференциальное уравнение равновесия Эйлера.
4. Какой вид имеет дифференциальное уравнение поверхности уровня?
5. Перечислите и интерпретируйте свойства поверхности уровня равного давления.
6. Назовите условие равновесия невесомой жидкости.
7. Назовите условие равновесия жидкости в поле силы тяжести.
8. Дайте геометрическую и энергетическую интерпретацию основного уравнения гидростатики.
9. Как выглядят условия относительного равновесия жидкости в поле силы тяжести?
10. Какие условия равновесия газа в поле силы тяжести вы знаете?
11. В соответствии с какой формулой можно описать распределение давления воздуха по высоте?
12. Что описывает формула барометрического нивелирования?
13. Что такое равнодействующая сил давления, воспринимаемая стенкой?
14. Что называется центром давления?
15. Как определяется равнодействующая сил давления на плоскую горизонтальную поверхность?
16. Как выглядит поверхность равного давления для случая плоской горизонтальной поверхности?
17. На основании какого баланса определяется равнодействующая сил давления на произвольно ориентированную плоскую поверхность?
18. Каким выражением определяется положение центра давления относительно пьезометрической плоскости?
19. Каким выражением нужно использовать, чтобы определить расстояние между центром давления и центром тяжести смоченной поверхности?
20. Что называется телом давления?
21. Дайте словесное выражение закона Архимеда.
22. Что называется относительным покоем жидкости?
23. Какие массовые силы действуют на частицы жидкости в состоянии относительного покоя?
24. Каким соотношением описывается распределение давления в состоянии относительного покоя при равноускоренном движении сосуда с жидкостью?
25. Что представляют собой поверхности уровня равного давления при равноускоренном движении сосуда с жидкостью?

26. Каким соотношением описывается распределение давления в состоянии относительного покоя при равномерном вращении сосуда с жидкостью?

27. Что представляют собой поверхности уровня равного давления при равномерном вращении сосуда с жидкостью?

3. КИНЕМАТИКА И ДИНАМИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА

3.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ КИНЕМАТИКИ ЖИДКОСТИ И ГАЗА

Методы Лагранжа и Эйлера кинематического исследования течения жидкости. С целью получения исчерпывающей картины течения необходимо для каждой частицы жидкости знать ее положение в пространстве в каждый момент времени. Чтобы составить такую картину, необходимо, прежде всего, как-то обозначить отдельные частицы жидкости, чтобы отличать их друг от друга. Это можно сделать следующим образом.

В произвольный момент времени $t = t_0$ отнесем рассматриваемое течение к произвольной системе координат (например, к прямоугольной). Тогда каждой частице жидкости будет соответствовать определенная тройка чисел a, b, c . Эти начальные пространственные координаты и будут служить обозначением рассматриваемой частицы. Пусть в произвольный момент времени t ее координаты будут x, y, z .

Следовательно, для составления картины течения необходимо знать функции:

$$\begin{aligned}x &= F_1(a, b, c, t); \\y &= F_2(a, b, c, t); \\z &= F_3(a, b, c, t).\end{aligned}\tag{3.1}$$

Систему уравнений (3.1) называют *уравнениями Лагранжа*.

Для полной характеристики состояния движущейся жидкости необходимо знать еще давление p , а для жидкости переменной плотности ρ — также и плотность. Однако доведение такого метода исследования течения жидкости до конечного численного результата удается только в немногих, особенно простых случаях.

Поэтому обычно предпочитают пользоваться другим, более простым методом, позволяющим указать, что происходит в каждой точке пространства в каждый момент времени. Следовательно, при этом методе исследования индивидуальная судьба отдельных частиц оставляется без внимания.

Если рассматриваемое течение — установившееся, т. е. не изменяющееся во времени, то для получения картины движения достаточно указать величину и направление скорости в каждой точке пространства, занятого потоком; кроме того, для полного описания состояния движения необходимо определить также давление, а при переменной плотности — и **последнюю**. Если же течение неустановившееся, т. е. изменяющееся во времени, то скорость и давление (в необходимом случае и плотность) должны быть указаны для каждого момента времени.

Математически эти указания даются обычно в виде зависимостей, связывающих три проекции скорости u , v , w на прямоугольные оси координат (в необходимом случае также давление p и плотность ρ) с пространственными координатами x , y , z и временем t , т. е. в виде уравнений:

$$\begin{aligned} u_x &= f(x, y, z, t); \\ u_y &= f(x, y, z, t); \\ u_z &= f(x, y, z, t). \end{aligned} \tag{3.2}$$

Систему уравнений (3.2) называют *уравнениями Эйлера*, хотя Эйлеру были известны обе системы (3.1) и (3.2).

Кинематика одного и того же потока может изучаться как методом Эйлера, так и методом Лагранжа. Координаты Эйлера и Лагранжа связаны друг с другом. В большинстве случаев используют метод Эйлера.

Установившееся и неустановившееся движение. Все случаи течения жидкости или газа можно разделить на две группы: *установившееся* и *установившееся* движение.

Установившееся течения описываются системой уравнений (3.2), т. е. в любой точке параметры, характеризующие поток, являются функцией не только координат, но и времени.

Движение жидкости или газа будет *установившимся*, если характеризующие его параметры не зависят от времени. В этом случае уравнения, характеризующие распределение скорости течения жидкости, имеют вид:

$$\begin{aligned} u_x &= f(x, y, z); \\ u_y &= f(x, y, z); \\ u_z &= f(x, y, z). \end{aligned} \tag{3.3}$$

Равномерное и неравномерное движение. Установившееся течение может быть равномерным и неравномерным. При равномерном движении жидкости или газа скорости течения в сходственных точках постоянны независимо от координат этих точек. Примером такого движения может служить течение несжимаемой жидкости с постоянным расходом в трубе постоянного сечения.

Линия тока, уравнение линии тока. *Линией тока* называют кривую, проведенную внутри потока во **всех точках касательную** к скорости течения жидкости (рис. 3.1). При установившемся течении в каждой данной точке потока устанавливается скорость, величина и направление которой не зависят от времени, поэтому линия тока и траектория элементарно малой жидкой частицы совпадают.

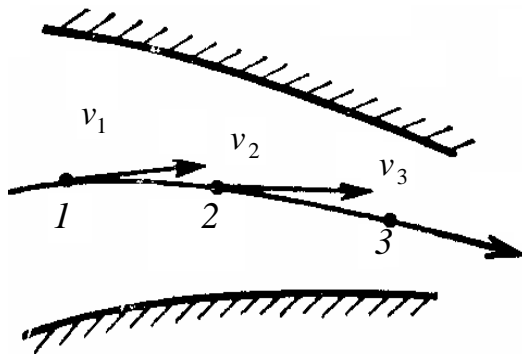


Рис. 3.1. Линия тока

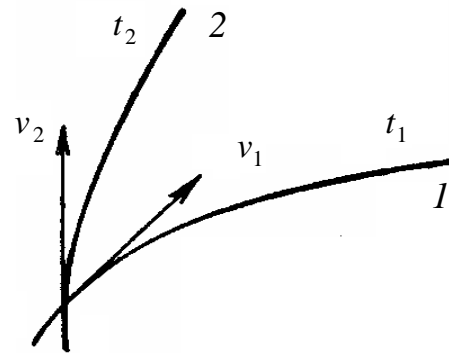


Рис. 3.2. Изменение направления линии тока при неустановившемся движении

Если движение неустановившееся, то в заданной точке в потоке направление скорости изменяется во времени (рис. 3.2). Следовательно, с течением времени изменяются и проходящие через данную точку линии тока.

В точке потока с координатами x, y, z составляющие скорости вдоль осей координат u_x, u_y, u_z .

При перемещении вдоль линии тока на расстояние ds в точку с координатами $x + dx; y + dy; z + dz$, получим

$$u_x / dx = u_y / dy = u_z / dz. \quad (3.4)$$

Равенство (3.4) представляет собой *уравнение линии тока*.

Трубка тока, элементарная струйка, элементарный расход. В потоке жидкости проведем замкнутый контур, ограничивающий

поверхность элементарно малой площади. Через каждую точку контура может быть проведена линия тока (рис. 3.3).

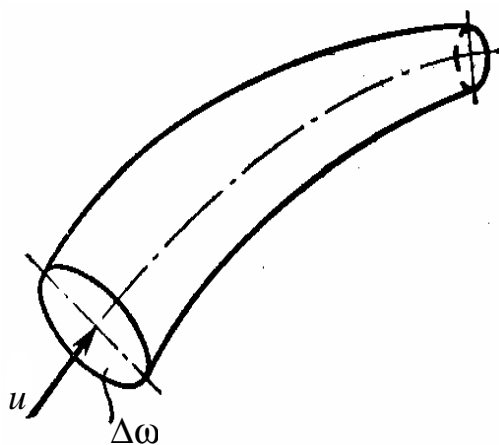


Рис. 3.3. Трубка тока

Поверхность, образованная этими линиями тока, называется *трубкой тока*. Скорости жидкости — касательные к поверхности трубки тока, поэтому между жидкостью, движущейся в трубке тока, и остальным потоком нет обмена массами жидкости. Масса жидкости, текущей внутри трубки тока, называется *элементарной струйкой*.

Совокупность элементарных струек образует поток жидкости или газа.

Проведем в трубке тока сечение, нормальное к направлению скорости. Такая поверхность называется *живым сечением струйки*. Произведение площади живого сечения и скорости называется *элементарным расходом* жидкости или газа.

Если провести сечение в потоке таким образом, чтобы его поверхность в любой точке была нормальна к направлению соответствующего вектора скоростей, то площадь этой поверхности будет равна сумме живых сечений струек. Такая поверхность называется *живым сечением потока*.

Смоченный периметр — это та часть периметра, вдоль которой жидкость соприкасается с твердыми стенками канала (трубы).

Гидравлическим радиусом называют отношение площади живого сечения к смоченному периметру.

Средняя скорость потока жидкости — отношение расхода к площади живого сечения потока.

3.1. УРАВНЕНИЯ СОХРАНЕНИЯ

Уравнение неразрывности. В реальных потоках жидкостей и газов материя нигде не исчезает и нигде вновь не создается. Поэтому мы можем рассматривать только такие скоростные поля, которые удовлетворяют требованию сохранения материи или массы.

При трехмерном рассмотрении течений, математическое выражение условия сохранения массы проще всего получить, если вычислить количество жидкости, втекающей и вытекающей в небольшой параллелепипед со сторонами dx , dy , dz (рис. 3.4), и приравнять эту разность к изменению массы в рассматриваемом объеме:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0. \quad (3.5)$$

Уравнение (3.5) представляет собой обобщенную форму уравнения неразрывности.

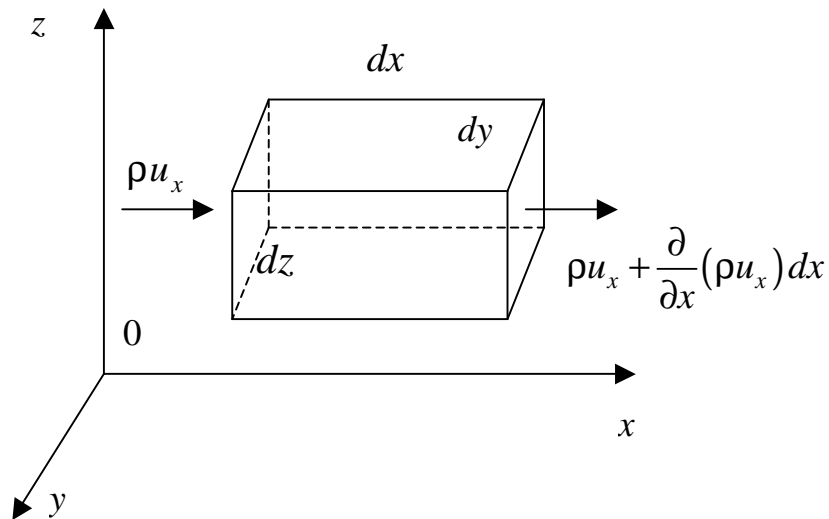


Рис. 3.4. Схема течения потока через стенки элементарного параллелепипеда

Уравнение движения невязкой жидкости. При трехмерном рассмотрении задач о движении жидкостей необходимо использовать три дифференциальных уравнения движения вдоль пространственных координат x , y , z . Выведем эти уравнения, исходя из основного закона динамики: *результатирующая действующих на выделенный объем жидкости сил равна массе, умноженной на ускорение.*

Выделим в движущейся жидкости (в обобщенном понятии) небольшой параллелепипед со сторонами dx , dy , dz , параллельными соответственно осям координат x , y , z . Объем этого параллелепипеда

равен произведению $dx \cdot dy \cdot dz$, а масса равна плотности, умноженной на этот объем.

В направлении оси x результирующая сила давления равна

$$P_x = -\partial p / dx \cdot dy \cdot dz.$$

Аналогичным образом для осей y и z :

$$P_y = -\partial p / dx \cdot dy \cdot dz;$$

$$P_z = -\partial p / dx \cdot dy \cdot dz.$$

Проекции массовой силы на оси координат, отнесенные к единице массы, обозначим X, Y, Z .

На массу параллелепипеда по направлениям осей координат будут действовать силы:

$$X \cdot dx \cdot dy \cdot dz;$$

$$Y \cdot dx \cdot dy \cdot dz;$$

$$Z \cdot dx \cdot dy \cdot dz.$$

где X, Y, Z — отнесенные к единице массы проекции массовой силы на оси координат.

Обозначим проекции скорости на оси координат через u_x, u_y, u_z .

Тогда согласно основному закону динамики:

$$\begin{cases} \frac{du_x}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + X, \\ \frac{du_y}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + Y, \\ \frac{du_z}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + Z, \end{cases} \quad (3.6)$$

где

$$\frac{du}{dt} = \frac{\partial u}{\partial t} + u_x \frac{\partial u}{\partial x} + u_y \frac{\partial u}{\partial y} + u_z \frac{\partial u}{\partial z}.$$

Уравнение движения вязкой жидкости. Применительно к течению реальных жидкостей различают силы, обусловленные взаимодействием жидкости и окружающей среды (сила тяжести, сила механического давления, сила трения на границе жидкости с твердой стенкой), и силы, возникающие в самой жидкости (инерционная сила, вызванная ускорением, и сила вязкого трения, связанная с наличием

градиента скорости в жидкости). Чаще всего рассматривается не сама сила, а напряжение.

Напомним, что:

- результирующая внутренних сил, отнесенная к единице площади сечения, называется *напряжением*.

- *напряженным состоянием* в какой-либо точке называется совокупность напряжений во всех сечениях, проходящих через заданную точку.

В отличие от твердых тел, деформация которых пропорциональна приложенному напряжению (закон Гука), в жидкостях с увеличением напряжения возрастает не только деформация (перемещение частиц), но и ее скорость.

Соответственно, при выводе уравнения движения вязкой жидкости преобразуем представленную выше систему уравнений движения невязкой жидкости (3.6) в систему уравнений движения вязкой жидкости с использованием компонент напряжений (нормальных и касательных) по осям координат:

Если в потоке жидкости выделить элементарный объем $dV = dx \cdot dy \cdot dz$ (рис. 3.5), то действующие на него со стороны окружающей жидкости силы можно представить в виде напряжений на боковых поверхностях.

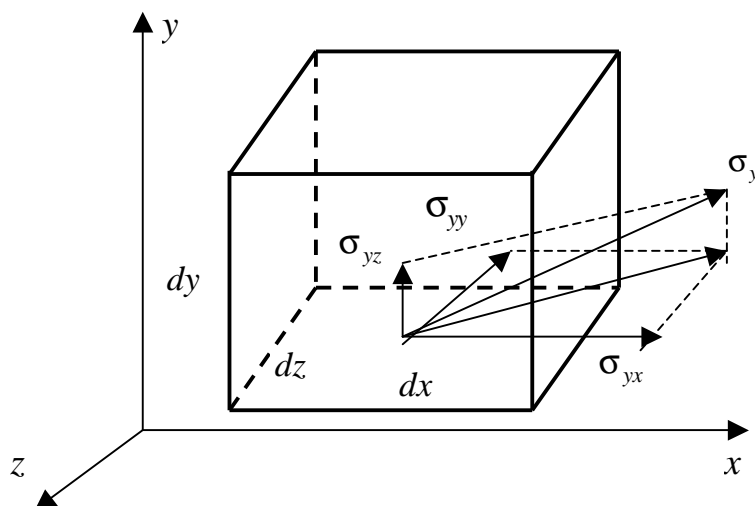


Рис. 3.5. Разложение вектора напряжений

В общем случае напряжение на каждой боковой поверхности направлено к ней под углом и может быть разложено на три составляющие, параллельные осям координат.

Например, напряжение σ_y , действующее на поверхность (dx, dz) перпендикулярную оси y , можно разложить на составляющие σ_{yx} , σ_{yy} , σ_{yz} , параллельные соответственно осям x , y и z . Составляющие σ_{yx} и σ_{yz} , действующие в плоскости (dx, dz) , являются касательными напряжениями (напряжениями сдвига). Составляющая σ_{yy} является нормальным напряжением, вызывающим растяжение или сжатие. При этом часть нормального напряжения расходуется на создание давления, а часть, пропорциональная скорости деформации растяжения или сжатия, — на преодоление сил вязкостного трения:

$$\sigma_{xx} = -p + \bar{\sigma}_x; \quad \sigma_{yy} = -p + \bar{\sigma}_y; \quad \sigma_{zz} = -p + \bar{\sigma}_z,$$

где $\bar{\sigma}_x, \bar{\sigma}_y, \bar{\sigma}_z$ — собственно вязкие нормальные напряжения в направлении осей.

Таким образом, система уравнений движения вязкой жидкости в напряжениях будет иметь вид

$$\begin{cases} \rho \frac{du_x}{dt} = \rho X + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z}, \\ \rho \frac{du_y}{dt} = \rho Y + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z}, \\ \rho \frac{du_z}{dt} = \rho Z + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z}. \end{cases} \quad (3.7)$$

Расшифровывая вязкостные напряжения в (3.7) через соответствующие градиенты компонент скорости и с учетом выражения для нормальных напряжений, получим следующий вид системы уравнений движения вязкой жидкости:

$$\begin{cases} \rho \frac{du_x}{dt} = \rho X - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \Delta u_x, \\ \rho \frac{du_y}{dt} = \rho Y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \Delta u_y, \\ \rho \frac{du_z}{dt} = \rho Z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \Delta u_z, \end{cases} \quad (3.8)$$

где символ Δ введен для сокращенного обозначения операции дифференцирования компонент скорости движения

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

При турбулентном режиме течения система уравнений (3.7) преобразуется посредством замены коэффициента вязкости μ на турбулентный коэффициент вязкости $\mu_{\text{турб}}$. Данная вязкость расшифровывается в рамках соответствующей модели турбулентности. Например, в рамках модели пути смешения Прандтля или $k - \epsilon$ модели турбулентности.

Следует также отметить, что численное значение величины $\mu_{\text{турб}}$ превышает численное значение коэффициента вязкости μ обычно в десятки и даже сотни тысяч раз. Величина $\mu_{\text{турб}}$, кроме численного значения, отличается от обычной вязкости μ еще и тем, что она изменяется при переходе от одной точки потока к другой. В частности, при приближении к стенке она стремится к нулю.

3.2. УРАВНЕНИЕ БЕРНУЛЛИ

Уравнение Бернулли для невязких жидкостей. В случае одномерного течения в произвольном направлении s (например, вдоль линии тока), система уравнений (3.6) может быть преобразована к виду

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} - g \frac{\partial z}{\partial s} = \frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{u_s^2}{2} \right) + \frac{\partial u_s}{\partial t}, \quad (3.9)$$

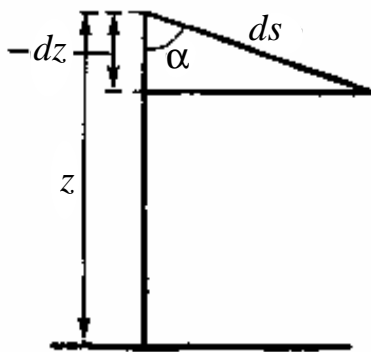


Рис. 3.6. К выводу уравнения Бернулли

где массовая сила определена согласно рис. 3.6.

Массовой силой обычно является только одна сила тяжести. Тогда величину g можно считать постоянной по модулю и направлению.

Если рассматриваемое движение — установившееся, а плотность ρ — постоянная, то все члены уравнения (3.9) представляют собой производные по s , и поэтому его можно интегрировать вдоль

линии движения, что приводит к следующему так называемому уравнению Бернулли:

$$\frac{p}{\rho} + gz + \frac{w^2}{2} = \text{const.} \quad (3.10)$$

Уравнение (3.10) является основным уравнением при одномерном рассмотрении задач о движении жидкостей, но в то же время оно имеет фундаментальное значение для всей гидромеханики. Оно выражает собой закон сохранения содержащейся в единице массы механической энергии движущейся жидкости, а именно: первый член есть ничто иное, как работа сил давления, второй — потенциальная энергия силы тяжести и третий — кинетическая энергия.

Уравнение Бернулли для потока вязкой жидкости. Применение уравнения Бернулли к потоку вязкой жидкости становится возможным при соблюдении следующего условия: течение жидкости в рассматриваемых сечениях должно быть плавно изменяющимся.

При течении реальной жидкости силы, определяемые вязкими напряжениями, производят работу, целиком и необратимо превращающуюся в тепловую энергию.

Рассмотрим баланс энергии массы жидкости в произвольном канале между двумя сечениями. Ограничим характер течения следующими условиями:

- движение жидкости установившееся;
- распределение давления в сечениях 1 и 2 подчиняется гидростатическому закону, скорости в любой точке каждого сечения одинаковы;
- обмен теплом и механической энергией с внешней средой отсутствует.

Энергия единицы массы, веса или объема движущейся жидкости равна сумме механической и внутренней энергии. По закону сохранения энергии, в рассматриваемом случае суммарное количество энергии остается постоянным. При течении жидкости от одного сечения канала к другому происходит процесс необратимого превращения части механической энергии во внутреннюю (тепловую). Следовательно, вдоль потока при отсутствии подвода тепла или механической энергии извне механическая энергия потока снижается и соответственно увеличивается внутренняя энергия.

Работа сил вязкости, произведенная между двумя сечениями потока и отнесенная к единице массы, веса или объема движущейся жидкости, называется потерями механической энергии, или *гидравлическими потерями*. Если эта работа отнесена к единице веса, то гидравлические потери называются *потерями напора*.

Обозначим давление в выбранных сечениях потока p_i и p_2 , расстояние от центров тяжести этих сечений до произвольной плоскости сравнения — z_1 и z_2 , скорости в них — u_1 и u_2 , потери напора — h_w . Тогда уравнение Бернулли можно записать в следующем виде:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{u_2^2}{2g} + h_w. \quad (3.11)$$

Уравнение (3.11) может быть представлено в графическом виде (рис. 3.7).

В этом уравнении h_w (потери напора) — величина линейная. Она представляет собой разность ординат $H = z + p/\gamma + u^2/(2g)$, вычисленных для любых двух выбранных сечений. Линия полного напора не горизонтальна — каждая последующая ее ордината меньше предыдущей на величину h_w .

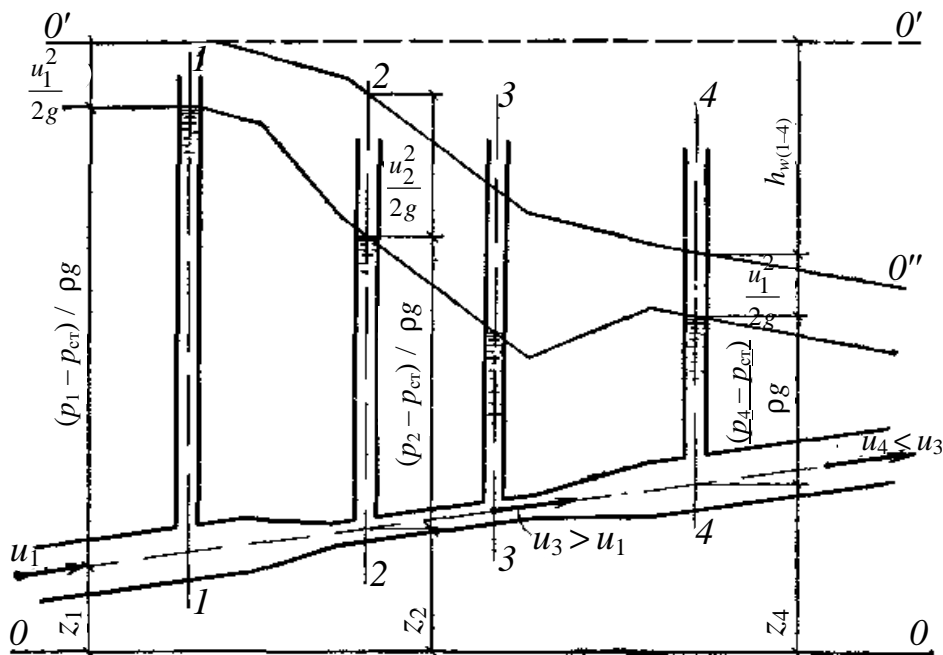


Рис. 3.7. Геометрическая интерпретация уравнения Бернулли для вязкой жидкости

Потери напора, отнесенные к единице длины, называются *гидравлическим уклоном*:

$$i = \Delta \left[z + p/\gamma + u^2 / (2g) \right] / \Delta l,$$

где Δl — расстояние между рассматриваемыми сечениями.

Пьезометрическим уклоном называется отношение

$$i = \Delta (z + p/\gamma) / \Delta l.$$

Гидравлический уклон всегда меньше нуля; пьезометрический уклон может быть как отрицательным, так и положительным.

Уравнение (3.11) записано при условии равенства скоростей по сечению канала, т. е. при условии линейного профиля скоростей. В реальных потоках, вследствие прилипания жидкости к ограничивающей поверхности канала, профиль скоростей отличается от линейного и не может быть охарактеризован одним ее значением. В этом случае значение скорости в уравнении (3.11) следует понимать как

усредненное по реальному профилю значение. Вместе с тем возникает вопрос насколько удельные значения кинетической энергии, рассчитанные по реальному профилю скоростей и по усредненному значению скорости, различаются между собой.

Отношение удельной кинетической энергии потока, рассчитанное по реальному профилю скоростей и по усредненному значению скорости, называется коэффициентом кинетической энергии или коэффициентом Кориолиса:

$$\alpha = \int \rho u^2 ds / \rho \bar{u}^2, \quad (3.12)$$

где интегрирование ведется по сечению канала.

Коэффициент Кориолиса меняется в достаточно широких пределах: при равенстве скоростей во всех точках сечения потока $\alpha = 1$, при параболическом распределении скоростей $\alpha = 2$.

С учетом (3.12) уравнение Бернулли для потока вязкой жидкости с учетом реального профиля скоростей может быть записано в следующем виде:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 u_2^2}{2g} + h_w. \quad (3.13)$$

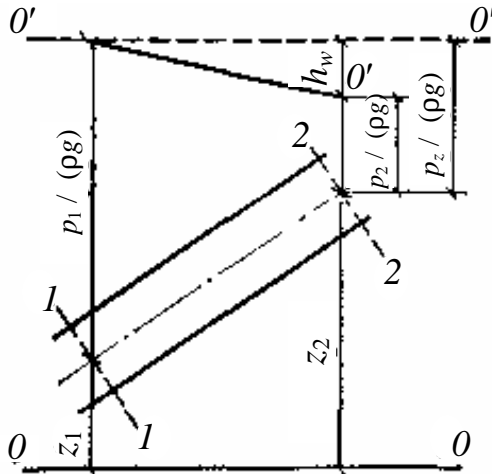
Примеры решения задач

Рассмотрим некоторые частные случаи применения уравнения Бернулли.

Пример 3.1. Определить статический напор при течении несжимаемой жидкости в трубе постоянного сечения (рис. 3.8).

Решение. В сечении 1-1: давление p_1 , расстояние z_1 от центра тяжести сечения до произвольной плоскости сравнения, средняя скорость v_1 течения, в сечении 2-2: давление p_2 , расстояние z_2 от центра тяжести сечения до плоскости сравнения и средняя скорость v_2 течения.

Если бы в трубе текла невязкая жидкость, то в сечениях 1-1 и 2-2 на основании уравнения Бернулли полные напоры были бы одинаковыми, т. е.



$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g}.$$

В рассматриваемом случае сечение трубы постоянно, следовательно, из условия неразрывности — $v_1 = v_2$. Поэтому при течении невязкой жидкости статический напор будет постоянным

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g}.$$

Рис. 3.8. К примеру 3.1

При течении реальной (вязкой) жидкости между сечениями 1-1 и 2-2 произойдут гидравлические потери h_w . Поскольку при течении в трубе постоянного диаметра $v_1 = v_2$ и, соответственно, $\alpha_1 = \alpha_2$, то уравнение (3.13) преобразуется к виду

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + h_w,$$

т. е. статический напор в сечении 2-2 уменьшится по сравнению с сечением 1-1 на величину h_w .

$$z_2 + \frac{p_2}{\rho g} = z_1 + \frac{p_1}{\rho g} - h_w.$$

Пример 3.2. Определить скорость течения жидкости по показанию дифференциального манометра (трубки Пито – Прандтля — рис. 3.9).

Решение. Выберем в потоке линию тока, проходящую через точку a . Примем значения давления и скорости потока на рассматриваемой линии тока на достаточном удалении от точки a в точке c соответственно p_0 и v_0 .

Напишем уравнение Бернулли для линии тока в точках c и a :

$$p_0 + \frac{\rho v_0^2}{2} = p_a + \frac{\rho v_a^2}{2}.$$

Если «затормозить» поток в точке a , т. е. положить $v_a = 0$, то p_a будет соответствовать полному (статическому и динамическому) давлению в потоке

$$p_a = p_0 + \frac{\rho v_0^2}{2}.$$

Полному давлению в потоке будет соответствовать уровень h_1 дифференциального манометра (см. рис. 3.9).

Для линии тока, примыкающей к точкам b (впускные отверстия), уравнение Бернулли будет иметь вид

$$p_0 + \frac{\rho v_0^2}{2} = p_b + \frac{\rho v_b^2}{2}.$$

Поскольку $v_b = v_0$, то $p_b = p_0$. Соответственно в непроточную область дифференциального манометра передается статическое давление p_0 . Этому давлению будет соответствовать уровень h_2 .

Тогда

$$h_1 - h_2 = p_a - p_0 = \frac{\rho v_0^2}{2},$$

т. е. дифференциальный манометр регистрирует динамическую составляющую полного давления в потоке.

Соответственно

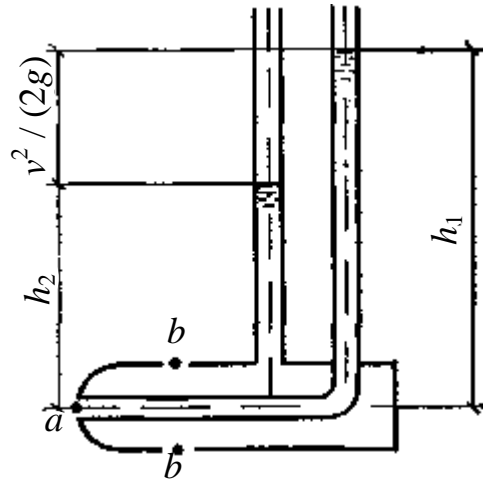


Рис. 3.9. К примеру 3.2

$$v_0 = [2(h - h_2) / \rho]^{0,5}.$$

Контрольные задачи

Задача 3.1. В закрытом сосуде (рис. 3.10) под давлением p_1 находится несжимаемая среда с плотностью $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$. Во внешнем пространстве давление p_0 равно атмосферному давлению.

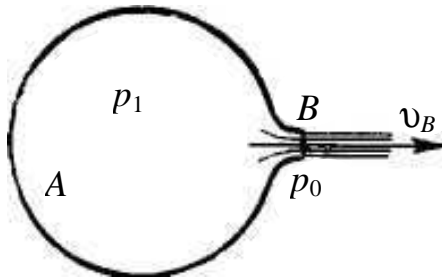


Рис. 3.10. К задаче 3.1

Определить среднюю скорость v_B потока в сечении B , принимая, что избыточное давление в сосуде равно 500 Па.

При решении задачи исходить из условия неподвижности среды внутри сосуда на удалении от выходного отверстия (в точке A). Принять также коэффициент сжимаемости струи в сечении B равным единице.

Ответ: $v_B = \left[\frac{2(p_A - p_0)}{\rho} \right]^{0,5} = 28,9 \text{ м/с}.$

Задача 3.2. В открытом сосуде находится несжимаемая среда с плотностью ρ (рис. 3.11).

Давление во внешнем пространстве p_0 равно атмосферному давлению. Высота столба жидкости h от уровня B (выпускное отверстие) до уровня A равна 2 м.

Определить среднюю скорость v_B потока в сечении B , исходя из условия $d_A \gg d_B$, где d_A и d_B — внутренний диаметр сосуда и выпускного отверстия соответственно.

Принять также коэффициент сжимаемости струи в сечении B равным единице.

Ответ: $v_B = [2gh]^{0,5} = 6,3 \text{ м/с}.$

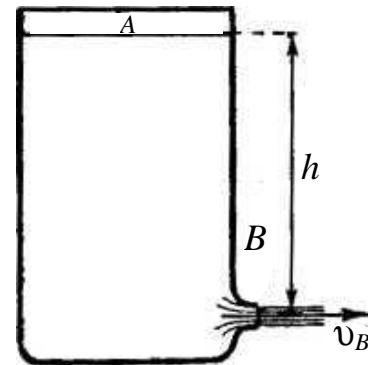


Рис. 3.11. К задаче 3.2

Задача 3.3. Определить суточную потерю воды через трещину трубопровода, площадь которой составляет 4 мм. Манометр, установленный на трубопроводе, показывает давление 0,8 МПа.

Ответ: 6,5 м³.

Задача 3.4. Определить начальные объемные и массовые расходы воды и бензина ($\rho_6 = 750 \text{ кг/м}^3$), если истечение происходит из закрытого сосуда, объем которого $V \rightarrow \infty$, в атмосферу через малое отверстие в тонкой стенке. Глубина погружения центра отверстия $H = 2 \text{ м}$, давление над поверхностью жидкости — 150 кПа, атмосферное давление 0,1 МПа, диаметр отверстия 30 мм, коэффициент расхода $\mu = 0,6$.

Ответ: $Q_B = 5 \cdot 10^{-3}$ и $Q_6 = 5,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; $Q_B = 3,75$ и $Q_6 = 5,57 \text{ кг/с}$.

Задача 3.5. Определить расстояние l , на которое будет падать струя воды при истечении из бака, сообщающегося с атмосферой, через малое отверстие в тонкой стенке. Напор в баке $H = 5 \text{ м}$, $h = 1 \text{ м}$ (рис. 3.12).

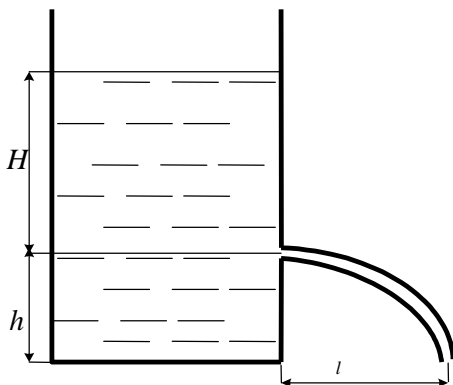


Рис. 3.12. К задаче 3.5

Ответ: 4,5 м.

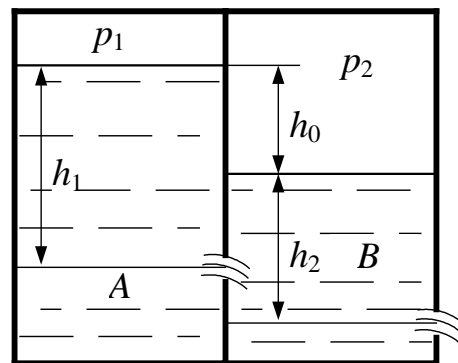


Рис. 3.13. К задаче 3.6

Задача 3.6. Определить постоянный полный напор, влияющий на скорость истечения воды из сосуда A в сосуд B и из сосуда B в атмосферу (рис. 3.13).

Глубины погружения центров малых отверстий — величины постоянные и равные $h_1 = 2 \text{ м}$ и $h_2 = 1,5 \text{ м}$. Давления в сосудах равны $p_1 = 0,3 \text{ МПа}$ и $p_2 = 0,15 \text{ МПа}$.

Ответ: 13,8 и 6,6 м.

Задача 3.7. В открытый бак, имеющий в дне отверстие диаметром $d = 15$ мм, поступает $2 \text{ м}^3/\text{ч}$ воды. Определить на какую высоту поднимется вода в баке при коэффициенте расхода μ , равном 1 и 0,6.

Ответ: 0,5 и 1,4 м.

Задача 3.8. Открытый резервуар делится при помощи вертикальных перегородок на три части, сообщающиеся друг с другом (рис. 3.14).

Определить расход воды через систему и найти распределение напоров H_1 , H_2 и H_3 , если диаметры отверстий равны $d_1 = 90$ мм, $d_2 = 60$ мм и $d_3 = 70$ мм и постоянный напор $H = 2,5$ м, коэффициент расхода $\mu = 0,6$.

Ответ: $Q = 9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; $H_1 = 0,284$; $H_2 = 1,44$ и $H_3 = 0,777$ м.

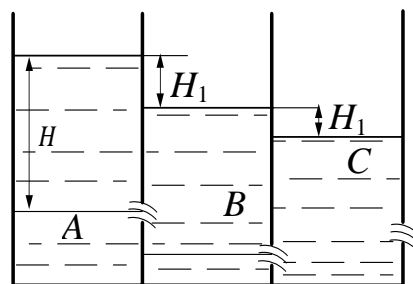


Рис. 3.14. К задаче 3.8

Задача 3.9. Жидкость вытекает из открытого резервуара в атмосферу через трубу, имеющую плавное сужение до диаметра d_1 , а затем постепенное расширение до d_2 (рис. 3.15).

Истечение происходит под действием напора $H = 3$ м.

1. Пренебрегая потерями энергии, определить абсолютное давление p в узком сечении трубы 1-1, если:

– соотношение диаметров $d_2/d_1 = \sqrt{2}$;

– атмосферное давление соответствует $h_3 = 750$ мм рт. ст.; плотность жидкости $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$.

2. Найти напор $H_{кр}$, при котором абсолютное давление в сечении 1-1 будет равно нулю.

Указание. Уравнение Бернулли следует записать два раза, например для сечения 0-0 и 2-2, а затем для сечений 1-1 и 2-2.

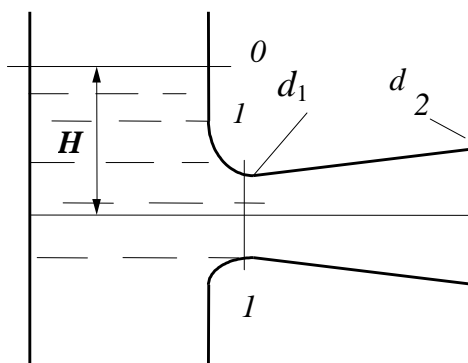


Рис. 3.15. К задаче 3.9

Ответ: $p = 0,012$ МПа; $H_{кр} = 4,3$ м.

3.4. ОТНОСИТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ И ТВЕРДОГО ТЕЛА

Сопротивление жидкостей движущимся в них телам. Сопротивление тела, движущегося в жидкости, всегда можно разложить на две части: на сопротивление, обусловленное разностью давлений, и сопротивление, обусловленное трением. При этом результирующая всех сил давления и будет *сопротивлением давления*, а результирующая всех сил трения — *сопротивлением трения*.

Согласно современным представлениям, сопротивление жидкости движущемуся в ней телу является результатом разностей давлений в его носовой и кормовой частях, а также касательных напряжений, возникающих при обтекании тела. Причем влияние разности давлений в общем случае преобладает. Эта разность может быть принята пропорциональной динамическому давлению (т. е. динамическому напору) и площади, на которую эта разность давлений действует, т. е. сила сопротивления $f_{сопр}$ равна

$$f_{сопр} = cF \frac{\rho u^2}{2}, \quad (3.14)$$

где $c = f(Re)$ — коэффициент пропорциональности (коэффициент сопротивления) есть функция числа Рейнольдса; F — площадь, на которую воздействует результирующее давление.

Весьма важным является вопрос: какая численная связь существует между сопротивлением, которое встречает тело при своем движении в покоящейся жидкости, и силой, с которой движущаяся жидкость действует на покоящееся тело?

Если жидкость движется во всех своих частях равномерно, то между обоими указанными случаями не может быть никакой разницы.

Однако если движение жидкости не является совершенно равномерным во всех ее частях (как это имеет место при турбулентном течении), то разница между обоими указанными случаями все же имеется.

Как правило, во втором случае, т. е. при обтекании неподвижного тела, сопротивление больше, чем при движении тела в покоящейся жидкости.

Пограничный слой. При движении вязкой жидкости вдоль твердой поверхности в непосредственной близости от нее образуется слой, в пределах которого интенсивность действия сил вязкости велика и соизмерима с интенсивностью действия сил инерции и гидродинамического давления. Влияние вязкости приводит к тому, что внутри рассматриваемого слоя скорость резко меняется от нуля (условие «прилипания») до значения скорости набегающего на тело невозмущенного потока. Эта область течения называется *пограничным слоем*.

Введение понятия пограничного слоя позволяет разделить весь поток на две области течения: пограничный слой и внешний поток.

Каждую из областей можно рассчитывать отдельно. Однако деление потока на две области не означает, что они являются изолированными и не связанными друг с другом. Граница между ними может быть проведена лишь условно, при этом в расчетах ее обычно назначают из условия, что скорость на внешней границе пограничного слоя отличается от скорости внешнего невозмущенного потока на заданную малую величину (например, на 1 или 0,5 %).

Следует отметить, что толщина пограничного слоя существенным образом зависит как от характера течения набегающего потока, так и от формы обтекаемого тела.

Для случая обтекания полубесконечной пластины при относительно малых числах Рейнольдса толщина пограничного слоя δ изменяется по длине пластины x в соответствии с соотношением

$$\delta = 5,2 \sqrt{\frac{\nu x}{u_{\infty}}}, \quad (3.15)$$

где ν — коэффициент динамической вязкости; u_{∞} — скорость на внешней границе пограничного слоя.

Пограничный слой может быть как ламинарным, так и турбулентным. Переход от одного режима течения к другому определяется размерами тела, интенсивностью увеличения толщины слоя, степенью турбулентности набегающего потока и т. п.

Как указывалось выше, сопротивления при обтекании твердого тела (кроме пластины, ориентированной вдоль векторов скорости набегающего потока) жидкостью или газом определяются не столько касательными напряжениями, возникающими на твердой границе, сколько влиянием образующейся за телом области вихревого течения. Образование этой области связано с явлением *отрыва пограничного слоя*.

При обтекании тела с резко меняющимся профилем поверхности отрыв пограничного слоя является следствием проявления инерции жидких частиц в пределах пограничного слоя.

При обтекании плавной криволинейной поверхности отрыв пограничного слоя связан с характером изменения давления вблизи твердой поверхности (рис. 3.16).

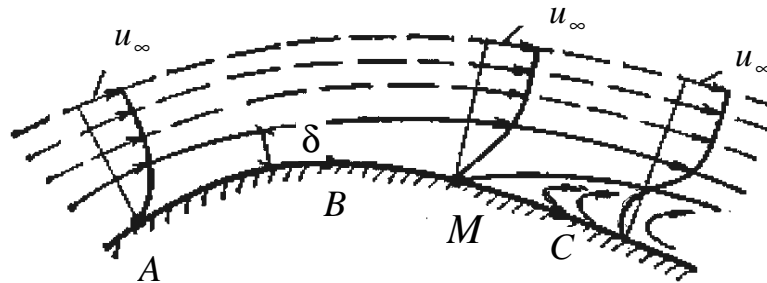


Рис. 3.16. Отрыв пограничного слоя на криволинейной поверхности

На участке *AB* (рис. 3.16) скорость частиц жидкости, находящихся в пограничном слое, увеличивается ($\partial u / \partial x > 0$), а на участке *BC* уменьшается ($\partial u / \partial x < 0$).

Тогда в соответствии с уравнением Бернулли давление на участке *AB* уменьшается ($\partial p / \partial x < 0$), а на участке *BC* увеличивается ($\partial p / \partial x > 0$).

В случае движения вязкой жидкости часть кинетической энергии теряется за счет трения внутри пограничного слоя. Оставшейся части кинетической энергии может не хватить на преодоление действия положительного градиента давления, стремящегося изменить направление движения жидких частиц. В результате частицы жидкости могут начать движение в обратном направлении и привести тем самым к отрыву потока от твердой границы.

За точкой отрыва пограничный слой трансформируется в отрывное течение, характеризующееся сильной неустойчивостью

образующихся крупномасштабных вихрей. Отдельные вихри, отрываясь от твердой поверхности, сносятся потоком, на их месте образуются новые вихри и т. д.

Образование, взаимодействие и перемещение вихрей за обтекаемым телом создают совершенно иную по структуре область течения, которую часто называют *гидродинамическим* (или *аэродинамическим*) *следом*.

Наличие явления отрыва пограничного слоя приводит к перераспределению составляющих полного сопротивления при обтекании криволинейной поверхности от сопротивления трения к сопротивлению давления. Зависимость коэффициента сопротивления в (3.14) от числа Рейнольдса иллюстрирует рисунок 3.17.

При изменении числа Re меняется также и положение точки отрыва пограничного слоя и его структура (рис. 3.18).

До тех пор пока пограничный слой остается ламинарным ($10 < Re < 10^3$), точка находится в лобовой части сферы.

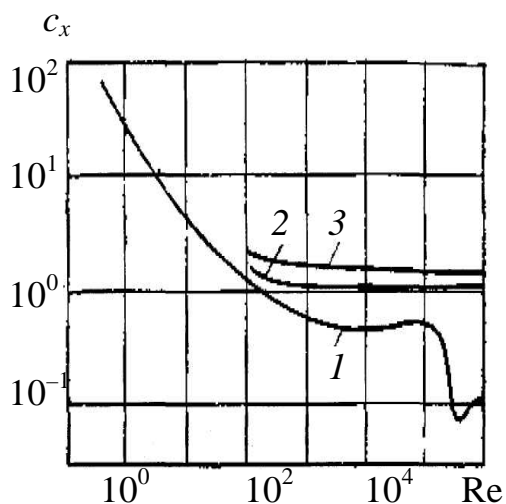


Рис. 3.17. Зависимость коэффициента лобового сопротивления от числа Рейнольдса (1 — шар; 2 —

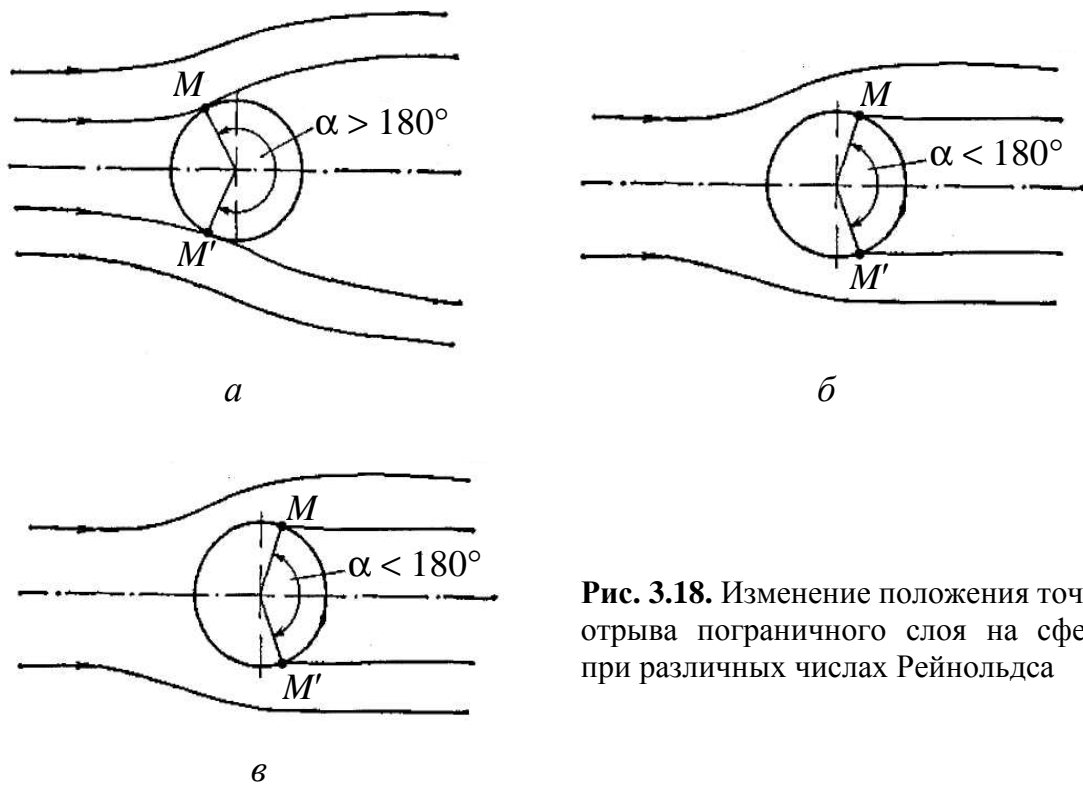


Рис. 3.18. Изменение положения точки отрыва пограничного слоя на сфере при различных числах Рейнольдса

В диапазоне изменения числа Рейнольдса приблизительно $10^3 < Re < 10^5$ ламинарный пограничный слой постепенно переходит в турбулентный слой, и точка отрыва смещается в кормовую область сферы.

Полный переход ламинарного пограничного слоя в турбулентный происходит резко при числах $Re = 10^5$. В этом случае угол между симметричными точками отрыва принимает минимальное значение $110-120^\circ$ и величина области отрывного течения также становится наименьшей. Сопротивление при этом резко уменьшается. Такое явление называют *кризисом сопротивления*.

Примеры решения задач

Пример 3.3. Твердый шар диаметром $d = 0,05$ м и плотностью $\rho_{ш} = 8000$ кг/м³ падает в канале диаметром D , заполненном жидкостью с плотностью $\rho_{ж} = 1000$ кг/м³ (рис. 3.19).

Определить скорость установившегося движения шара v , при условии, что $d/D \ll 1$ (т. е. ограничивающие стенки канала

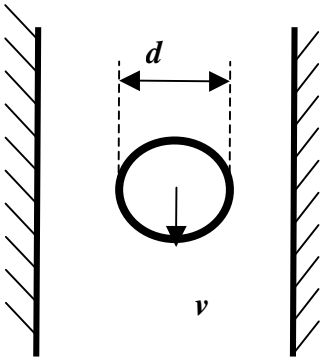


Рис. 3.19. К примеру 3.3

не оказывают заметного влияния на характер взаимодействия жидкости с движущимся в ней твердым телом) и преобладает сопротивление давления по сравнению с сопротивлением трения.

В расчетах принять коэффициент сопротивления $c = 0,6$.

Решение. Скорость установившегося движения шара определяем из баланса силы тяжести f_g и силы сопротивления давления f_c , т. е. $f_g = f_c$.

Согласно соотношению (3.14), сила сопротивления шара f_c в данном случае равна

$$f_c = cF \frac{\rho_{\text{ж}} v^2}{2},$$

где $F = \frac{\pi d^2}{4}$ — максимальное (по отношению к набегающему потоку) сечение шара.

Сила тяжести определяем из соотношения

$$f_g = \rho_{\text{ш}} V_{\text{ш}} g,$$

где

$$V_{\text{ш}} = \frac{\pi d^3}{6} \text{ — объем шара.}$$

Тогда

$$v = \left(\frac{2\rho_{\text{ш}} V_{\text{ш}} g}{cF\rho_{\text{ж}}} \right)^{0,5} = 2,95 \text{ м/с.}$$

Пример 3.4. Определить угол α между симметричными точками отрыва пограничного слоя при обтекании сферы диаметром $d = 0,1$ м потоком жидкости со скоростью $v = 0,5$ м/с при условии линейной зависимости сечения отрыва от числа Рейнольдса.

Данную линейную зависимость строить исходя из допущения, что сечение отрыва равно миделеву сечению (d_m) при $\text{Re} = 10^3$, а при $\text{Re} = 10^5$ $\alpha = 120^\circ$.

Кинематический коэффициент вязкости ν жидкости принять равным 10^{-6} м²/с.

Решение. Угол отрыва (см. рис. 3.18) связан сечением отрыва соотношением

$$\alpha = \arcsin \frac{d_{\text{от}}}{d_{\text{м}}} = \arcsin \sqrt{\frac{S_{\text{от}}}{S_{\text{м}}}},$$

где $d_{\text{от}}$ и $d_{\text{м}}$ — диаметры соответственно отрывного ($S_{\text{от}}$) и миделева ($S_{\text{м}}$) сечений.

Сечение отрыва при $Re = 10^5$ определяется по соотношению

$$\begin{aligned} S_{Re=10^5} &= \frac{\pi [d_{\text{м}} \sin(\alpha/2)]^2}{4} = \frac{\pi [d_{\text{м}} \sin(120^\circ/2)]^2}{4} = \\ &= \frac{3,14 \cdot (0,1 \sin 60^\circ)^2}{4} = 5,59 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2. \end{aligned}$$

Сечение отрыва при $Re = 10^3$, согласно сделанным допущениям, равно $S_{\text{м}}$:

$$S_{Re=10^3} = \frac{\pi d_{\text{м}}^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,1^2}{4} = 7,85 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Тогда указанная зависимость α от Re имеет вид

$$\alpha = \left(\arcsin \sqrt{\frac{S_x}{S_{\text{м}}}} \right),$$

где индекс x относится к искомому сечению;

$$S_x = S_{Re=10^5} - \frac{(S_{Re=10^5} - S_{Re=10^3})}{(10^5 - 10^3)} (10^5 - Re_x).$$

Данная зависимость справедлива при условии, что Re_x находится в диапазоне от 10^3 до 10^5 .

$$Re_x = \frac{d_{\text{м}} v}{\nu} = \frac{0,1 \cdot 0,5}{10^{-6}} = 5 \cdot 10^4.$$

Тогда

$$\begin{aligned} S_x &= 5,59 \cdot 10^{-3} - \frac{(5,59 \cdot 10^{-3} - 7,85 \cdot 10^{-3})}{(10^5 - 10^3)} \cdot (10^5 - 5 \cdot 10^4) = \\ &= 6,72 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2. \end{aligned}$$

Соответственно,

$$\alpha_x = 2 \left[\arcsin \sqrt{\frac{S_x}{(\pi d_{\text{м}}^2 / 4)}} \right] = 135^\circ.$$

Контрольные задачи

Задача 3.10. Твердый шар диаметром $D = 0,05$ м движется в объеме неподвижной жидкости плотностью $\rho = 1000$ кг/м³ с постоянной скоростью $v = 3$ м/с.

Определить силу сопротивления движению шара, при условии, что преобладает сопротивление давления.

В расчетах принять коэффициент сопротивления $c = 0,8$.

Ответ: $f_{\text{ш}} = c \frac{\pi D^2}{4} \frac{\rho v^2}{2} = 7,1$ Н.

Задача 3.11. Твердый шарик диаметром $D = 0,02$ м и плотностью $\rho_{\text{ш}} = 7000$ кг/м³ падает в непроточный колодец, заполненный жидкостью, имеющей плотность $\rho_{\text{ж}} = 900$ кг/м³ (рис. 3.20).

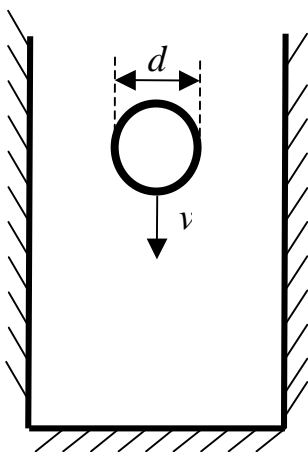


Рис. 3.20. К задаче 3.11

Определить глубину колодца L , если время падения шарика τ от его верхней части до дна составляет 10 с.

В расчетах принять следующие допущения:

- сила сопротивления движению шара определяется сопротивлением давления;
- скорость падения шарика на верхнем срезе колодца имеет установившееся значение.

В расчетах принять также, что коэффициент сопротивления шара (коэффициент формы) $c = 0,9$.

Ответ: $L = \tau \left(\frac{4 \rho_{\text{ш}} g d}{3 c \rho_{\text{ж}}} \right)^{0,5} = 15$ м.

Задача 3.12. Определить на основании значения числа Рейнольдса режим течения и соответствующую толщину пограничного слоя δ на расстоянии 2 м от лобовой части при обтекании со скоростью 1,5 м/с полубесконечной пластины потоком жидкости плотностью $\rho = 1000$ кг/м³.

Кинематический коэффициент вязкости ν принять равным $2 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Ответ: $\delta = 0,009$ м; режим течения — переходный от ламинарного к турбулентному.

Задача 3.13. Определить угол α между симметричными точками отрыва пограничного слоя (рис. 3.18) при обтекании сферы диаметром $d = 0,1$ м потоком жидкости со скоростью $v = 0,5$ м/с.

Кинематический коэффициент вязкости ν принять равным $2 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Указание. Решение принять на основании числа Рейнольдса.

Ответ: $Re = 10^5$, соответственно, $\alpha \approx 120^\circ$.

Задача 3.14. Определить коэффициент лобового сопротивления c при обтекании сферы диаметром 0,25 м газовым потоком плотностью 1 кг/м³, имеющим скорость 10 м/с.

Кинематический коэффициент вязкости ν принять равным $0,15 \cdot 10^{-4}$ м²/с.

Указание. Решение принять на основании числа Рейнольдса, согласно рис. 3.17.

Ответ: $Re = 1,7 \cdot 10^4$, соответственно, $c \approx 0,75$.

3.5. ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

Полный перепад давлений при установившемся движении потока в трубных элементах можно определить по следующему соотношению

$$\Delta p_{\Sigma} = \Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_{\text{м}} + \Delta p_{\text{нив}} + \Delta p_{\text{кол}}, \quad (3.16)$$

где индексы: «тр» — потери напора от трения в прямых трубах; «м» — сумма потерь напора от местных сопротивлений; «нив» — нивелирный перепад давлений; «кол» — суммарное изменение статического давления в коллекторах.

В случае если пароводяная смесь поднимается по трубам на некоторую высоту выше уровня воды в барабане, что часто имеет место в котлах с естественной и многократной принудительной циркуляцией, к полному перепаду давлений добавляются потери напора на подъем среды над уровнем в барабане.

Потери напора от трения и местных сопротивлений. Потери напора от трения при изотермическом движении воды в трубах определяются по уравнению Дарси – Вейсбаха:

$$\Delta p_{\text{тр}} = \lambda \frac{l}{d} \frac{w_m^2}{2\rho} = \lambda_0 l \frac{w_m^2}{2\rho}. \quad (3.17)$$

где λ_0 — приведенный коэффициент трения; l и d — длина и внутренний диаметр трубы соответственно; λ — коэффициент трения; $w_m = \rho v$ — массовая скорость потока; ρ — плотность среды; v — скорость течения.

Потери напора от местных сопротивлений

$$\sum \Delta p_m = \sum \zeta_m \frac{w_m^2}{2\rho}, \quad (3.18)$$

где $\sum \zeta_m$ — сумма коэффициентов местных сопротивлений на пути движения потока.

Суммарные потери от трения и местных сопротивлений

$$\Delta p_{\Sigma} = (\lambda_0 l + \sum \zeta_m) \frac{w_m^2}{2\rho} = z \frac{w_m^2}{2\rho}, \quad (3.19)$$

где $z = \lambda_0 l + \sum \zeta_m$ — полный коэффициент сопротивлений, связанных с потерями напора на трение и на местных сопротивлениях.

Для однофазного потока, с учетом того что поток массы находится в автомодельной области, коэффициент трения определяется по известной формуле Никурадзе:

$$\lambda = \frac{1}{\left(2 \lg \frac{d}{2\kappa} + 1,74\right)^2}, \quad (3.20)$$

где κ — абсолютная или «песочная» по Никурадзе шероховатость труб.

Для стальных труб из углеродистой и низколегированной стали можно принять $\kappa = 0,08$ мм; для труб из аустенитной стали $\kappa = 0,01$ мм.

Для этих случаев приведенный коэффициент трения, подсчитанный по уравнению (3.18) для труб из углеродистой и аустенитной стали, дан на рисунке 3.21.

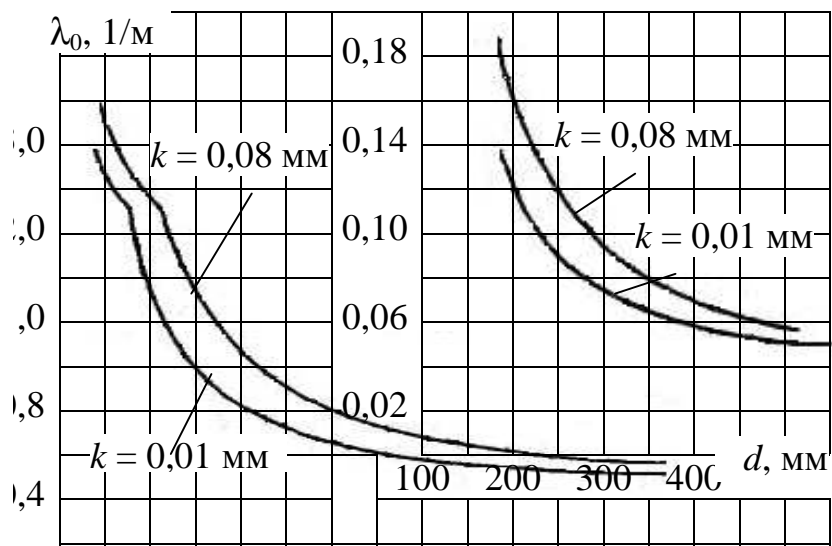


Рис. 3.21. Приведенный коэффициент трения для котельных труб

Наиболее часто встречающимися местными сопротивлениями являются:

- сопротивления на входе в трубу из коллектора;
- сопротивления на выходе из трубы в коллектор;
- сопротивления при поворотах потока в сгибах труб.

Коэффициенты местных сопротивлений в (3.3) в зависимости от вида местного сопротивления могут быть определены по следующим соотношениям:

1) для случая *внезапного расширения потока*

$$(\zeta_M)_{\text{расш}} = \left[\left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 - 1 \right]^2, \quad (3.21)$$

2) для случая *внезапного сужения потока*

$$(\zeta_M)_{\text{суж}} = 0,5 \left[1 - \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2 \right], \quad (3.22)$$

где d_1 , d_2 — внутренний диаметр трубы соответственно до и после местного сопротивления.

Определение нивелирного перепада давлений и изменения статического давления в коллекторах. *Нивелирный напор* для элементов с принудительной циркуляцией определяется как

гидростатическое давление между раздающим и собирающим коллекторами.

В гидравлических расчетах рекомендуется проводить определение нивелирного напора по уравнению

$$\Delta p_{\text{нив}} = \pm g \sum H_{\text{уч}} \bar{\rho}_{\text{уч}}, \quad (3.23)$$

где $\sum H_{\text{уч}}$ — высота всех участков в элементе; $\bar{\rho}_{\text{уч}}$ — средняя плотность среды в элементе.

При этом для докритических параметров средняя плотность среды определяется по средней расходной энтальпии

$$\bar{h} = \frac{h_{\text{вх}} + h_{\text{вых}}}{2},$$

где $h_{\text{вх}}$, $h_{\text{вых}}$ — энтальпии среды на входе в элемент и на выходе из элемента.

При принудительном движении среды можно рассматривать два случая.

1. Входной коллектор находится ниже выходного коллектора, и движение среды осуществляется снизу вверх. Тогда нивелирный напор имеет направление против движения потока. При этом создаваемый насосом напор должен преодолевать сопротивления, возникающие при движении.

2. Среда движется сверху вниз. Тогда нивелирный напор действует в одном направлении с приложенными силами. В этом случае он имеет отрицательное значение.

Потери напора при прохождении рабочей среды через коллекторное устройство могут быть в первом приближении аппроксимированы как потери напора на преодоление местных сопротивлений, т. е. потерями напора при внезапном расширении или сужении потока, а также при плавных изменениях направления движения потока.

Изменение статического давления в коллекторах $\Delta p_{\text{кол}}$, т. е. собственно коллекторный эффект, вызывается изменением скоростей потока и соответственно статических давлений по оси коллектора.

Величину $\Delta p_{\text{кол}}$ можно представить с достаточной для технических расчетов степенью точности через среднее значение, которое в свою очередь составляет 2/3 от максимального значения

$$\Delta p_{\text{кол}} = \frac{2}{3} \frac{A(w_m^{\text{max}})^2}{2\rho}, \quad (3.24)$$

где A — коэффициент, учитывающий потери напора на трение (для большинства практических случаев $A \approx 1$); w_m^{\max} — массовая скорость на входе в активную часть коллектора; ρ — плотность среды.

Определение коэффициентов сопротивлений сложных систем. Если какое-либо звено состоит из n последовательно соединенных участков с различным сечением, то полный перепад давлений и обобщенный коэффициент сопротивлений всего такого звена может быть определен исходя из следующих соотношений:

$$\Delta p_{\Sigma} = z_{\Sigma} \frac{w_{mn}^2}{2\rho}, \quad (3.25)$$

где

$$z_{\Sigma} = z_1 \left(\frac{f_n}{f_1} \right)^2 + z_2 \left(\frac{f_n}{f_2} \right)^2 + K + z_n. \quad (3.26)$$

Если какое-либо звено состоит из n параллельно соединенных участков с различным сечением, то соотношения (3.22) и (3.23) заменяются на

$$\Delta p_{\Sigma} = z_n \frac{w_{mn}^2}{2\rho} = z_{\Sigma} \frac{w_{mf}^2}{2\rho}; \quad (3.27)$$

$$z_{\Sigma} = \frac{\left(\sum_1^n f_n \right)^2}{\left(\frac{f_1}{\sqrt{z_1}} + \frac{f_2}{\sqrt{z_2}} + K + \frac{f_n}{\sqrt{z_n}} \right)^2}, \quad (3.28)$$

где $w_{mf} = G_{\Sigma} / \sum_1^n f_n$ — средняя (по всей системе) массовая скорость потока.

При выводе данных соотношений использованы следующие равенства:

$$G_1 + G_2 + K + G_n = G_{\Sigma},$$

т. е.

$$w_{m1} f_1 + w_{m2} f_2 + K + w_{mn} f_n = w_{mf} \sum_1^n f_n$$

и

$$\Delta p_1 = \Delta p_2 = K = \Delta p_n,$$

т. е.

$$z_1 \frac{w_{m1}^2}{2\rho} = z_2 \frac{w_{m2}^2}{2\rho} = K = z_n \frac{w_{mn}^2}{2\rho}.$$

В том случае если параллельно включенные участки имеют одинаковые сечения и их коэффициенты гидравлических сопротивлений равны, уравнение (3.25) приобретает вид

$$z_{\Sigma} = z_n. \quad (3.29)$$

Таким образом, гидравлические потери всего разветвленного звена можно считать равными гидравлическим потерям в одном участке при значении массовой скорости, определяемой делением всего расхода на сумму сечений всех участков.

Примеры решения задач

Пример 3.5. Через трубопровод переменного сечения прокачивается теплоноситель ($\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$) с расходом $G = 2,5 \text{ кг/с}$.

Характеристики трубопровода (см. рис. 3.22): $D = 80 \text{ мм}$, $d = 40 \text{ мм}$, $L = 5 \text{ м}$, $l = 1 \text{ м}$.

В расчетах коэффициента трения по формуле Никурадзе принять значение абсолютной шероховатости труб $k = 0,05 \text{ мм}$.

Определить полный перепад давлений в трубопроводе ΔP_{Σ} , связанный с преодолением сил трения и местных сопротивлений (эффекты на входе и выходе трубопровода не учитывать).

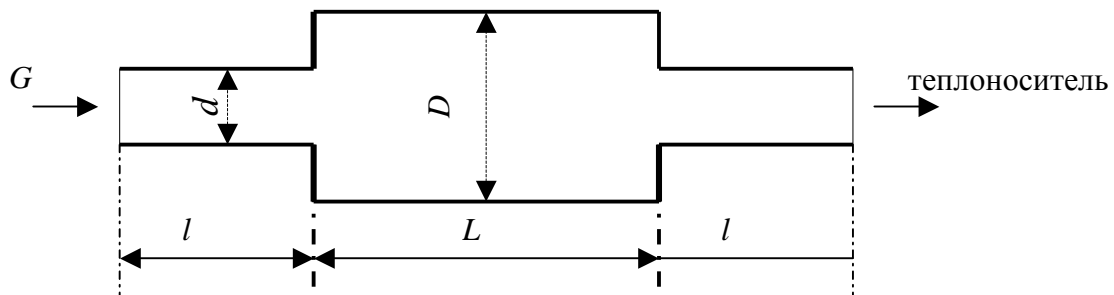


Рис. 3.22. К примеру 3.5

Решение. Суммарные потери напора в рассматриваемом трубопроводе при принятых допущениях включают две составляющие:

- потери напора на трение по всей длине трубопровода $\Delta p_{\text{тр}}$;
- потери напора на местных сопротивлениях $\sum \Delta p_{\text{м}}$ — внезапное расширение и сужение потока.

Согласно (3.17) и (3.20):

$$\Delta p_{\text{тр}} = 2 \left(\lambda_l \frac{l}{d} \frac{w_l^2}{2\rho} \right) + \lambda_L \frac{L}{D} \frac{w_L^2}{2\rho};$$

$$\lambda_l = \frac{1}{\left(2 \lg \frac{d}{2k} + 1,74 \right)^2} = \frac{1}{\left(2 \lg \frac{40}{2 \cdot 0,05} + 1,74 \right)^2} = 0,021;$$

$$\lambda_L = \frac{1}{\left(2 \lg \frac{D}{2k} + 1,74 \right)^2} = \frac{1}{\left(2 \lg \frac{80}{2 \cdot 0,05} + 1,74 \right)^2} = 0,018,$$

где

$$w_l = \frac{G}{\pi d^2 / 4} = \frac{2,5}{3,14 \cdot \frac{0,04^2}{4}} = 1990 \text{ кг/(с} \cdot \text{м}^2);$$

$$w_L = \frac{G}{\pi D^2 / 4} = \frac{2,5}{3,14 \cdot \frac{0,08^2}{4}} = 497 \text{ кг/(с} \cdot \text{м}^2).$$

Тогда

$$\begin{aligned} \Delta p_{\text{тр}} &= 2 \cdot \left(0,021 \cdot \frac{1}{0,04} \cdot \frac{1990^2}{2 \cdot 1000} \right) + 0,018 \cdot \frac{5}{0,08} \cdot \frac{497^2}{2 \cdot 1000} = \\ &= 2079 + 139 = 2218 \text{ Па.} \end{aligned}$$

Согласно (3.18), (3.21) и (3.22):

$$\sum \Delta p_{\text{м}} = \zeta_1 \frac{w_1^2}{2\rho} + \zeta_2 \frac{w_2^2}{2\rho};$$

$$\zeta_1 = \left[\left(\frac{D}{d} \right)^2 - 1 \right]^2 = \left[\left(\frac{0,08}{0,04} \right)^2 - 1 \right]^2 = 3;$$

$$\zeta_2 = 0,5 \cdot \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right] = 0,5 \cdot \left[1 - \left(\frac{0,04}{0,08} \right)^2 \right] = 0,25.$$

Тогда

$$\sum \Delta p_m = 3 \cdot \frac{1990^2}{2 \cdot 1000} + 0,25 \cdot \frac{497^2}{2 \cdot 1000} = 5940 + 31 = 5971 \text{ Па.}$$

Соответственно, суммарные потери напора в рассматриваемом трубопроводе составят:

$$\Delta p_\Sigma = \Delta p_{\text{тр}} + \sum \Delta p_m = 2218 + 5971 = 8189 \text{ Па.}$$

Пример 3.6. Жидкость с заданными свойствами (ρ , μ) должна перетекать из верхнего резервуара в нижний (уровни в которых считаются постоянными) с заданным расходом $Q = 2,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ по трубопроводу с известными параметрами $l = 15 \text{ м}$, $d = 0,04 \text{ м}$, где d , l — внутренний диаметр и длина трубопровода (рис. 3.23).

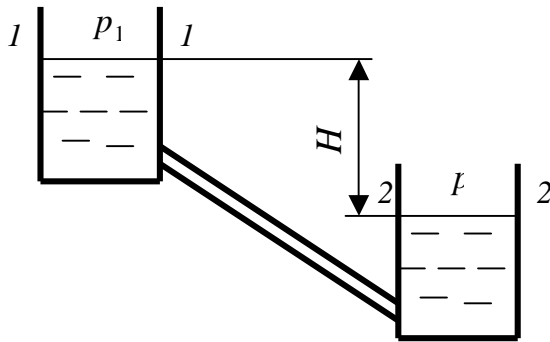


Рис. 3.23. К примеру 3.6

Давления p_1 и p_2 на свободных поверхностях жидкости известны и равны, например, атмосферному давлению: $p_1 = p_2 = p_a$.
Высоты уровней верхнего и нижнего резервуаров поддерживаются постоянными.
Определить требуемый нивелирный напор $\Delta p_{\text{нив}}$ самотечного трубопровода и разность уровней свободных поверхностей жидкости, исходя из условия, что потери напора в местных сопротивлениях малы по сравнению с потерями напора на трение по длине трубопровода.

В расчетах коэффициента трения по формуле Никурадзе принять значение абсолютной шероховатости труб $k = 0,05 \text{ мм}$.

Решение. Требуемый нивелирный напор определяем из равенства нивелирного напора (соотношение (3.21)) потерям напора на трение при заданной скорости потока:

$$\Delta p_{\text{нив}} = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho v_{\text{тр}}^2}{2} = \lambda \frac{l}{d} \rho \frac{(Q/S_{\text{тр}})^2}{2},$$

где $v_{\text{тр}}$ — скорость жидкости в трубопроводе; $S_{\text{тр}}$ — сечение трубопровода;

$$\lambda = \frac{1}{\left(21\text{г} \frac{d}{2k} + 1,74\right)^2} = \frac{1}{\left(21\text{г} \frac{40}{2 \cdot 0,05} + 1,74\right)^2} = 0,018.$$

Тогда

$$\Delta p_{\text{нив}} = 0,018 \cdot \frac{15}{0,04} \cdot 1000 \cdot \left(\frac{4 \cdot \frac{2,5}{3600}}{3,14 \cdot 0,04^2} \right)^2 = 2063 \text{ Па}$$

и

$$H = \frac{\Delta p_{\text{нив}}}{\rho g} = \frac{2063}{1000 \cdot 9,8} = 0,2 \text{ м.}$$

Контрольные задачи

Задача 3.15. Через трубопроводную систему (рис. 3.24), состоящую из труб переменного диаметра прокачивается теплоноситель ($\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$) с суммарным расходом $G = 5,0 \text{ кг/с}$.

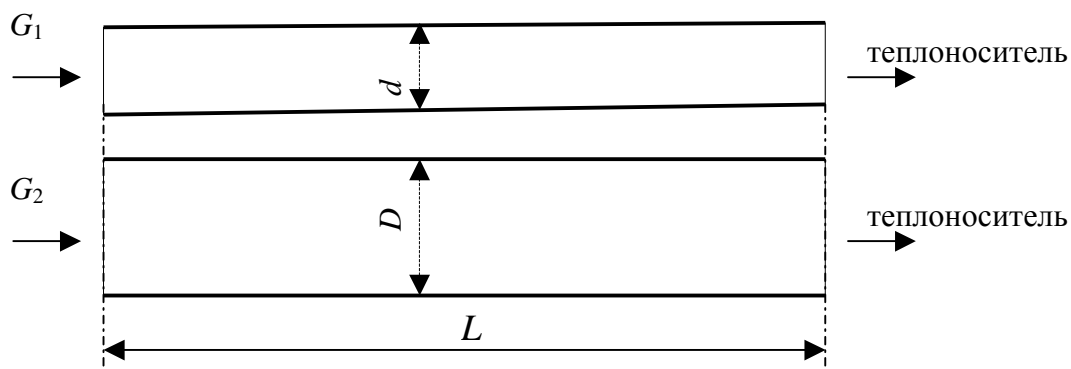


Рис. 3.24. К задаче 3.15

Характеристики трубопровода: $D = 80$ мм, $d = 40$ мм, $L = 10$ м.

Определить обобщенный коэффициент сопротивлений z_{Σ} и связанный с преодолением сил трения полный перепад давлений в трубопроводе Δp_{Σ} .

В расчетах коэффициента трения по формуле Никурадзе принять значение абсолютной шероховатости труб $k = 0,05$ мм.

Указание. При решении задачи воспользоваться соотношениями (3.24) и (3.35).

Ответ: $z_{\Sigma} = 1,98$; $\Delta p_{\Sigma} = 852$ Па.

Задача 3.16. Через трубопроводную систему, состоящую из 10 параллельных труб постоянного диаметра d и одинаковой длины l , прокачивается теплоноситель ($\rho = 1000$ кг/м³) с суммарным расходом $G = 5,0$ кг/с. Характеристики трубопровода: $d = 40$ мм, $l = 10$ м.

Определить связанный с преодолением сил трения полный перепад давлений в трубопроводной системе Δp_{Σ} и обобщенный коэффициент сопротивлений z_{Σ} .

В расчетах коэффициента трения по формуле Никурадзе принять значение абсолютной шероховатости труб $k = 0,1$ мм.

Ответ: $z_{\Sigma} = 6,22$; $\Delta p_{\Sigma} = 4932$ Па.

Задача 3.17. Определить полный перепад давлений Δp_{Σ} в трубопроводной системе, состоящей из $n = 20$ параллельных труб переменного диаметра, конструкция которых представлена на рисунке 3.22.

Суммарный расход рабочей среды $G_{\Sigma} = 50$ кг/с.

В расчетах принять условия и допущения примера 3.5.

Ответ: $\Delta p_{\Sigma} = 8,2$ кПа.

Задача 3.18. Кожухотрубное теплообменное устройство включает в себя раздающие и собирающие коллектора, а также размещенную внутри трубчатого кожуха систему параллельных труб.

Определить изменение гидростатического давления, связанное с изменением скоростей потока и соответственно статических давлений по оси раздающего в трубную систему коллектора.

В расчетах принять:

- максимальная по оси коллектора массовая скорость потока $w_m = 1,5$ м/с;

- плотность рабочей среды $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$.

Коэффициент, учитывающий потери напора на трение в коллекторном устройстве, принять равным единице.

Ответ: $\Delta p_{\text{кол}} = 750 \text{ Па}$.

Задача 3.19. Через звено трубопроводной системы, состоящей из n последовательно соединенных участков с различным сечением и одинаковой длиной $l = 2 \text{ м}$, прокачивается теплоноситель ($\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$) с расходом $G = 1,0 \text{ кг/с}$.

Характеристики трубопровода:

$$n = 5; l = 2 \text{ м}; d_i = \sum_{i=1}^n (25 + 5i) \text{ мм},$$

где i — порядковый номер участка трубопровода.

Определить связанный с преодолением сил трения в рассматриваемом звене трубопроводной системы обобщенный коэффициент сопротивлений z_{Σ} и полный перепад давлений Δp_{Σ} .

В расчетах коэффициента трения по формуле Никурадзе принять значение абсолютной шероховатости труб $k = 0,08 \text{ мм}$.

Ответ: $z_{\Sigma} = 23,63$; $\Delta p_{\Sigma} = 3068 \text{ Па}$.

Задача 3.20. Принимая допущения примера 3.6, определить пропускную способность представленного на рис. 3.23 трубопровода, если заданы его геометрические характеристики ($l = 15 \text{ м}$, $d = 0,04 \text{ м}$) и действующий напор ($H = 5 \text{ м}$).

Ответ: $Q = 86 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Задача 3.21. Кожухотрубное теплообменное устройство включает в себя раздающие и собирающие коллекторы, а также размещенную внутри трубчатого кожуха систему параллельных труб.

Определить полный перепад давлений в раздающем коллекторе Δp_{Σ} , включая:

- изменение гидростатического давления, связанное с изменением скоростей потока и, соответственно, статических давлений по оси раздающего в трубную систему коллектора $\Delta p_{\text{кол}}$;

- потери напора на преодоление местных сопротивлений $\Delta p_{\text{м}}$, т. е. потери напора при внезапном расширении на входе в раздающий

коллектор, и потери напора при внезапном сужении потока на входе в трубопроводную систему.

В расчетах принять:

- максимальная по оси коллектора скорость потока $v_{\max} = 30$ м/с;
- плотность рабочей среды $\rho = 1$ кг/м³;
- диаметр коллектора $D = 1$ м;
- соотношение диаметров подводящего трубопровода и коллектора равно 0,5;
- эквивалентный диаметр живого сечения трубопроводной системы $(d_{\text{э}})_{\text{тр}} = 0,8D$.

Коэффициент, учитывающий потери напора на трение в коллекторе, принять равным единице.

Ответ: $\Delta p_{\Sigma} = 4356$ Па.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО ТЕМАМ ГЛАВЫ

1. Какую систему уравнений называют уравнениями Эйлера?
2. Какую систему уравнений называют уравнениями Лагранжа?
3. Может ли кинематика одного и того же потока изучаться как методом Эйлера, так и методом Лагранжа?
4. Каким образом связаны друг с другом координаты Эйлера и Лагранжа?
5. Какие движения называются установившимися и неустановившимися?
6. Какие движения называются равномерными и неравномерными?
7. Что такое живое сечение, смоченный периметр гидравлический радиус, средняя скорость потока?
8. Дайте определение понятий «линия тока», «трубка тока».
9. Запишите уравнение линии тока.
10. Какой метод кинематического исследования преимущественно используется на практике?
11. Проявлением какого закона сохранения является уравнение неразрывности?
12. Какой вид имеет уравнение неразрывности для неустановившегося и установившегося движения несжимаемой среды?
13. Запишите обобщенную форму уравнения неразрывности.

14. На основании какого закона динамики исследуется кинематика потоков жидкости и газа?
15. Какой баланс сил рассматривается при выводе уравнения движения невязких жидкостей?
16. Как выглядит уравнение движения невязких жидкостей в обобщенной форме?
17. Напишите уравнение движения невязкой жидкости вдоль линии тока (одномерные уравнения Эйлера, Бернулли).
18. Какой баланс сил рассматривается при выводе уравнения движения вязких жидкостей?
19. Как преобразуется уравнение движения невязких жидкостей в уравнение движения вязкой жидкости с использованием компонент напряжений (нормальных и касательных)?
20. Запишите пространственную форму уравнения движения вязких жидкостей.
21. Как выглядит уравнение Бернулли (одномерная форма уравнения Эйлера) для вязкой жидкости при равенстве скоростей в каждой точке проходного сечения?
22. Как выглядит уравнение Бернулли для потока вязкой среды?
23. Что такое коэффициент Кориолиса?
24. На какие составляющие можно разложить сопротивление жидкостей и газов движущимся в них телам?
25. Какое явление называют кризисом сопротивления?
26. Каким образом распределяется давление по поверхности обтекаемого тела?
27. Что называют пограничным слоем?
28. Как определяется толщина пограничного слоя?
29. Каков механизм отрыва пограничного слоя?
30. Что такое гидродинамический (аэродинамический) след?
31. Дайте определение понятия «сопротивление при течении вязких жидкостей в каналах».
32. Как называется и как выглядит уравнение для расчета потерь напора на трение?
33. Для чего используется уравнение Никурадзе?
34. Как выглядит уравнение для расчета местных сопротивлений?
35. Какие местные сопротивления вы знаете?
36. Что понимается под обобщенным коэффициентом сопротивления?

4. ГАЗОВАЯ ДИНАМИКА

Течение газов (сжимаемых жидкостей) рассматривается с учетом ряда допущений. Предполагается, что газ — невязкий. Рассматривается изолированная термодинамическая система, т. е. к массе газа не подводится тепло из окружающей среды и отсутствует обмен механической энергией. Принимается, что распределение давления и скоростей в живых сечениях потока — равномерны. Поэтому процессы, сопутствующие течению газа, являются адиабатическими. Такая постановка задачи о течении газа называется одномерной.

Рассматривая скорость распространения возмущений, возникающих в газовой среде, следует различать два случая.

Первый случай, когда в среде распространяются малые возмущения, т. е. возмущения среды, при которых местные изменения давления среды в точке возмущения (колебания амплитуды давления) пренебрежимо малы по сравнению с общим давлением. Это — *звуковые колебания*.

Второй случай — распространяются возмущения конечной величины, т. е. колебаний давления конечной амплитуды. Это — *ударные волны*.

4.1. ЗВУКОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Скорость звука. *Скоростью звука* называется скорость распространения малых возмущений. Звуковые колебания вызываются колебаниями давления малой амплитуды, поэтому малыми будут и колебания плотности среды.

При оценке скорости распространения звука a используется уравнение сохранения количества движения (импульса) $d(mv) = Fdt$, где m , v , F — масса, скорость течения и результирующая сила соответственно, с учетом того, что $(p_1 - p_0) / (\rho_1 - \rho_0) = dp / d\rho$ и $\rho_1 / \rho_0 \sim 1$.

В итоге при изоэнтропном течении газа, получим

$$a = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s}, \quad (4.1)$$

где a — скорость распространения звука в газовой среде.

Для адиабатического, изоэнтропного течения газа, в соответствии с адиабатой Пуассона,

$$\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s = \frac{k p}{\rho},$$

где $k = c_p / c_v$; c_p , c_v — теплоемкость газовой среды при постоянном давлении и постоянном объеме соответственно.

Тогда уравнение (4.1) приводится к виду

$$a = \sqrt{\frac{k p}{\rho}}. \quad (4.2)$$

Течение газа в сужающемся канале. Газ поступает в сужающийся канал из ресивера, в котором скорость движения газа равна нулю, а температура и давление соответственно T_0 и p_0 (рис. 4.1).

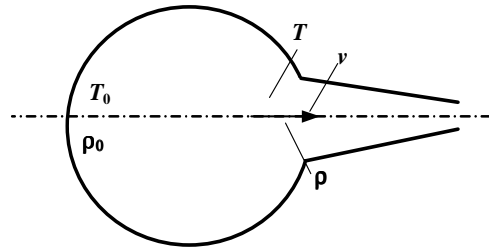


Рис. 4.1. Течение газа в сужающемся канале

Закон сохранения полной (механической и внутренней) энергии газового потока, при условии адиабатичности процесса распространения колебаний в газовой среде, в любом сечении канала будет иметь вид

$$\frac{v_a^2}{2} + c_p T = c_p T_0, \quad (4.3)$$

где v_a — средняя скорость адиабатического течения газа в рассматриваемом сечении сужающегося канала; T — температура газа.

В сечении $0-0$ скорость газа равна нулю, тогда температура T_0 равна температуре адиабатического торможения.

Таким образом, для произвольного сечения сужающегося канала скорость течения газового потока определяется соотношением

$$v_a = \sqrt{2c_p T_0 \left(1 - \frac{T}{T_0}\right)}. \quad (4.4)$$

Температура T_0 рассчитывается по уравнению

$$T_0 = \frac{p_0}{\rho_0 R},$$

где $R = c_p - c_v$ — газовая постоянная.

Тогда

$$c_p T_0 = \frac{k}{k-1} \frac{p_0}{\rho_0}. \quad (4.5)$$

С учетом уравнения состояния газовой среды, отношение температур в рассматриваемом сечении и в ресивере T/T_0 будет равно

$$\frac{T}{T_0} = \frac{p}{p_0} \frac{\rho_0}{\rho}, \quad (4.6)$$

а отношение плотностей ρ_0/ρ в (4.6) можно представить через давления p и p_0 как

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left(\frac{p}{p_0}\right)^{-1/k}. \quad (4.7)$$

Уравнение (4.6) приводится к виду

$$\frac{T}{T_0} = \left(\frac{p}{p_0}\right)^{(k-1)/k}. \quad (4.8)$$

С учетом (4.4), (4.5) и (4.8), скорость v_a (м/с) течения потока газа в сечении, где давление стало равным p , можно определить из соотношения

$$v_a = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \frac{p_0}{\rho_0} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0}\right)^{(k-1)/k}\right]}. \quad (4.9)$$

Вдоль сужающегося канала массовый расход газа постоянен.

Расход газа Q (кг/с), определяют по формуле

$$Q = f \sqrt{2 \frac{k}{k-1} p_0 \rho_0 \left[\left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad (4.10)$$

где f — площадь выходного сечения сопла, м^2 .

Действительная скорость истечения v будет меньше рассчитанной по формуле (4.9) из-за трения струи о стенки сопла, что учитывается коэффициентом скорости. Сечение струи на выходе может быть меньше сечения выходного отверстия, что учитывается коэффициентом сжатия струи.

Поэтому действительный массовый расход газа Q (кг/с) находится по формуле

$$Q = \alpha \varphi v_a f = \mu v_a f \rho, \quad (4.10a)$$

где $\mu = \varphi \alpha$ — коэффициент расхода.

Из уравнения (4.9) следует, что скорость течения потока газа в сужающемся канале имеет предел.

Зависимость плотности газовой среды от давления определяется для адиабатического потока, согласно (4.7), соотношением

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{1/k}.$$

При $p/p_0 < p_{\text{кр}}/p_0$ удельный объем газа, равный $1/\rho$, может достигать очень больших величин. Канал не сможет пропустить удельный расход, больший критического, который является постоянным для данного газа и данного канала.

Поэтому в некотором сечении канала (и, соответственно, на выходе из канала) устанавливается постоянное отношение давлений $p/p_0 = p_{\text{кр}}/p_0$ и постоянное давление, равное $p_{\text{кр}}$.

Данное сечение канала и значение давления в нем называются критическими (рис. 4.2).

Следовательно, скорость течения газа в сечении сужающегося канала,

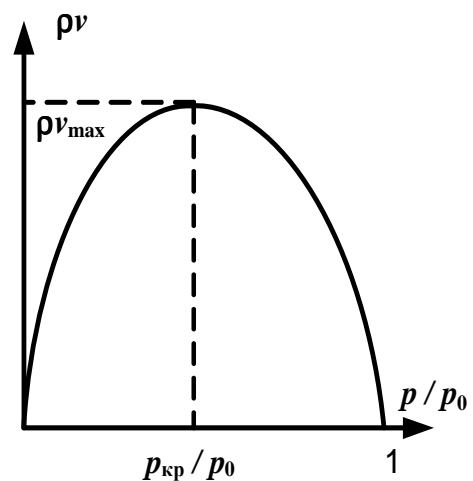


Рис. 4.2. Зависимость массовой скорости от относительного давления при течении газа в сужающемся канале

где устанавливается критическое давление, равна

$$v_{кр} = \sqrt{\frac{kp_{кр}}{\rho_{кр}}} = \sqrt{\left(\frac{2k}{k+1}\right) p_0 v_0}, \quad (4.11)$$

где индекс «кр» относится к критическому сечению.

Из сравнения соотношений (4.11) и (4.2) следует, что $v_{кр}$ имеет смысл скорости звука.

При скорости истечения, равной скорости звука, секундный расход газа получается максимальным

$$Q_{max} = f \sqrt{2 \frac{k}{k+1} \frac{p_0}{v_0} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}}}. \quad (4.12)$$

Таким образом, если истечение газа из сужающегося канала происходит в среду с давлением, меньшим критического, то скорость в выходном сечении канала не будет зависеть от давления окружающей среды и будет равна скорости звука.

Если давление больше критического, то скорость истечения газа будет меньше скорости звука, а ее значение будет зависеть от противодействия.

Получить в сужающемся канале скорость, большую звуковой скорости, невозможно.

Примеры решения задач

Пример 4.1. В резервуаре, заполненном кислородом, поддерживается давление $p_1 = 5$ МПа. Газ вытекает через сужающееся сопло в среду с давлением 4 МПа. Начальная температура кислорода 100 °С.

Определить теоретическую скорость истечения и расход, если площадь выходного сечения сопла $f = 20$ мм².

Найти также теоретическую скорость истечения кислорода и его расход, если течение будет происходить в атмосферу ($p_a = 100$ кПа).

Решение. В соответствии с молекулярно-кинетической теорией для двухатомного кислорода $c_v = 5 / 2R$ и $c_p = 7 / 2R$.

Коэффициент адиабаты $k = 7 / 5 = 1,4$.

Критическое отношение

$$\frac{p}{p_0} = \psi_{кр} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\left(\frac{k}{k-1} \right)} = 0,528 < 4 / 5 = 0,8.$$

Следовательно, скорость истечения газа меньше критической скорости и определяется по формуле (4.9).

Вычислим

$$v_0 = RT / p_0 / \mu = 8,314 \cdot 36 \cdot 10^6 \cdot 373,15 / 5 \cdot 10^6 / 32 = 0,0194 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Далее вычисляем теоретическую скорость истечения.

Критическое отношение равно

$$0,528 < 4 / 5 = 0,8 = \sqrt{2 \cdot \frac{1,4}{0,4} \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 0,0194 \cdot \left[1 - \left(\frac{4}{5} \right)^{0,4/1,4} \right]} = 205 \text{ м/с}.$$

Расход докритического течения определяется по формуле

$$Q = f \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \frac{p_0}{v_0} \left[\left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} =$$

$$= 20 \cdot 10^{-6} \sqrt{2 \cdot \frac{1,4 \cdot 5 \cdot 10^6}{0,4 \cdot 0,0194} \left[\left(\frac{4}{5} \right)^{\frac{2}{1,4}} - \left(\frac{4}{5} \right)^{\frac{2,4}{1,4}} \right]} = 0,180 \text{ кг/с}.$$

Пример 4.2. При условиях предыдущего примера найти теоретическую скорость истечения кислорода и его расход, если его истечение будет происходить в атмосферу ($p_a = 100 \text{ кПа}$).

Решение. Отношение давлений $p_a / p_0 = 0,1 / 5 < \psi_{кр} = 0,528$, следовательно, скорость истечения равна критической и определяется по формуле (4.11).

$$v_{кр} = \sqrt{\frac{k p_{кр}}{\rho_{кр}}} = \sqrt{\left(\frac{2k}{k+1} \right) p_0 v_0} = \sqrt{\frac{2,8}{2,4} \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 0,0194} = 336 \text{ м/с}.$$

Расход определяется по формуле (4.12)

$$Q_{\max} = f \sqrt{2 \frac{k}{k+1} \frac{p_0}{\rho_0} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}}} =$$

$$= 20 \cdot 10^{-6} \sqrt{2 \cdot \frac{1,4}{2,4} \cdot \frac{5 \cdot 10^6}{0,1 \cdot 10^6} \left(\frac{2}{2,4} \right)^{0,4}} = 0,22 \text{ кг/с.}$$

Контрольные задачи

Задача 4.1. Воздух, имеющий температуру 15 °С, по трубке диаметром 8 мм перетекает из резервуара с постоянным давлением 1,2 МПа в другой, расположенный рядом, с постоянным давлением 0,8 МПа. Определить скорость истечения воздуха, температуру при переходе его во второй резервуар и количество воздуха, перетекшее за 1 ч.

Ответ: $v = 251,5 \text{ м/с}$; $t_2 = -16,5 \text{ °С}$; $\Delta m = 495 \text{ кг}$.

Задача 4.2. В пространство, где давление 0,4 МПа из резервуара выпускается газ при давлении 0,6 МПа и температуре 25 °С через суживающееся сопло, у которого площадь сечения 10 мм². Определить количество газа, вытекающее за 1 с, если в резервуаре находится один из следующих газов: азот, кислород или углекислота.

Ответ: $Q = 0,013$; $0,014$; $0,0163 \text{ кг/с}$.

Задача 4.3. Рассчитать сечение f_a суживающегося сопла для выпуска из резервуара в среду с давлением 1,12 бар углекислоты и окиси углерода в количестве 100 кг/ч.

Давление в резервуарах — 1,6 бар, температура обоих газов — 17 °С.

Соппротивлениями пренебречь.

Ответ: $f_a = 65$; 80 мм^2 .

Задача 4.4. В газгольдере постоянного давления (рис. 4.3) содержится азот; атмосферное давление равно 1,1 бар, избыточное давление, создаваемое колоколом, — 250 мбар, температура азота — 20 °С. В колоколе образовалось отверстие, у которого площадь сечения 2 мм².

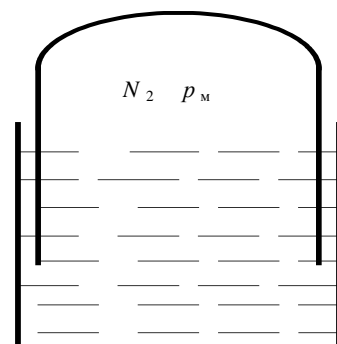


Рис. 4.3. К задаче 4.4

Определить количество азота, теряющееся за 1 ч через это отверстие, и выразить потерю в процентах, если объем газгольдера равен 180 м^3 ; коэффициент расхода ($\mu = 0,65$).

Ответ: 0,91 кг/ч; 0,35 %.

Задача 4.5. Рассчитать количество азота, вытекающее за 1 ч из суживающегося сопла в пространство, где давление 0,1 МПа, если постоянное давление в резервуаре составляет: 0,15; 0,2; 0,4; 0,8 МПа.

Температура газа — $27 \text{ }^\circ\text{C}$, диаметр сопла — 8 мм.

Соппротивлениями пренебречь.

Ответ: 59,5; 81,2; 164,0; 325,0 кг/ч.

Задача 4.6. В резервуаре под вакуумом 0,4 бар содержится воздух. Через неплотность в шве, у которого площадь сечения 2 мм^2 , в резервуар снаружи проникает воздух при давлении 1,1 бар и температуре $17 \text{ }^\circ\text{C}$.

Определить количество воздуха, которое необходимо удалять из резервуара вакуум-насосом за 1 ч. Принять $\varphi = 0,75$; $\alpha = 0,7$.

Ответ: 3,5 кг/ч.

4.2. ОТНОСИТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ ГАЗА И ТВЕРДЫХ ТЕЛ СО СВЕРХЗВУКОВЫМИ СКОРОСТЯМИ

Течение газа в расширяющемся канале. Вдоль канала, стенки которого ограничивают поток газа, должно удовлетворяться условие сплошности.

Для того чтобы в выходном сечении канала устанавливалось давление окружающей среды, меньшее критического, канал должен постепенно расширяться. В этом случае скорость истечения газа в окружающую среду будет больше звуковой, так как давление, устанавливающееся в выходном сечении канала, меньше критического.

Для получения скорости истечения газа, большей скорости звука, необходимо сначала в сужающемся канале снизить давление до критического, а затем в расширяющемся канале дополнительно снизить давление от критического значения до давления окружающей среды.

Подобный канал, называющийся соплом Лавалья, показан на рис. 4.4.

Расширение газа сначала в сужающемся, а затем в расширяющемся канале для увеличения скорости потока от меньшей скорости звука до сверхзвуковой осуществляется со сравнительно малыми гидравлическими потерями.

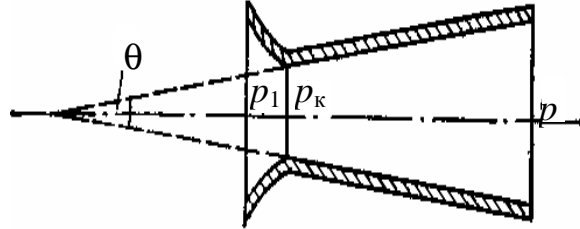


Рис. 4.4. Сопло Лавалья

Уравнения сохранения энергии изоэнтропного, горизонтального потока идеального газа, записанное через параметры торможения, связывает их с текущими параметрами состояния T, p, ρ в любом сечении потока:

$$c_p T + \frac{v^2}{2} = c_p T_0 = i_0 = \frac{k}{k-1} RT_0, \quad (4.13)$$

или

$$\frac{k}{k-1} \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} = \frac{k}{k-1} \frac{p_0}{\rho_0}, \quad (4.13')$$

где T_0, p_0, ρ_0 и i_0 — параметры потока в заторможенном состоянии, т. е. при его скорости $v = 0$.

Для адиабатического изоэнтропного потока газа все параметры торможения остаются постоянными по длине потока. Для адиабатического потока с трением, для которого энтропия вдоль потока меняется, параметры торможения p_0, ρ_0 будут различными в разных сечениях, а температура торможения T_0 , энтальпия торможения i_0 и отношение p_0 / ρ_0 остаются вдоль потока постоянными.

Связь между скоростью газа и скоростью звука при изоэнтропном течении. Отношение скорости v течения газа в данной точке потока к скорости звука a в этой же точке называется числом Маха

$$M = \frac{v}{a}. \quad (4.14)$$

Для изотропного процесса распространения звука в идеальном газе

$$a = \sqrt{kRT} = \sqrt{kp/\rho}.$$

Если $v < a$, то $M < 1$ и режим является дозвуковым; если $v > a$, то $M > 1$ и режим сверхзвуковой; если $v = a$, то $M = 1$ и режим называется критическим. При этом режиме параметры течения газа называются критическими ($p_{кр}$, $\rho_{кр}$, $T_{кр}$, $v_{кр} = a_{кр}$).

Если площадь поперечного сечения струйки газа изменяется по длине $f = f(x)$, то критическое состояние ($M = 1$) может установиться только в самом узком сечении струйки. Это сечение называется критическим $f_{кр}$.

Отношение скорости течения газа v в данной точке потока к критической скорости $a_{кр}$ называется коэффициентом скорости:

$$\lambda = \frac{v}{a_{кр}}. \quad (4.15)$$

Коэффициент скорости (λ) и число Маха (M) в данной точке связаны соотношением

$$\lambda^2 = (k+1) \cdot M^2 / [2 + (k-1) \cdot M^2]. \quad (4.16)$$

Зависимости параметров потока газа (p , ρ , T) от числа Маха (или от коэффициента скорости) и от параметров торможения (p_0 , ρ_0 , T_0) называются газодинамическими функциями:

$$\tau = \frac{T}{T_0} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)^{-1} = 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2; \quad (4.17)$$

$$\pi = \frac{p}{p_0} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)^{\frac{-k}{k-1}} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{k}{k-1}}; \quad (4.18)$$

$$\varepsilon = \frac{\rho}{\rho_0} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)^{\frac{-1}{k-1}} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}}. \quad (4.19)$$

К газодинамическим функциям относится также функция приведенного расхода:

$$q = \frac{\rho v}{\rho_{\text{кр}} v_{\text{кр}}} = M \left[\frac{k+1}{2+(k-1)M^2} \right]^{\frac{(k+1)}{2(k-1)}} =$$

$$= \lambda \left[\frac{k+1}{2} \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \right) \lambda^2 \right]^{\frac{1}{(k-1)}}.$$

(4.20)

Если в самом узком (критическом) сечении струйки достигается критическое состояние, то

$$q = \frac{f_{\text{кр}}}{f}. \quad (4.21)$$

Если величины p , T , ρ и T_0 , p_0 , ρ_0 берутся в одном и том же сечении, то формулы (4.17)–(4.20) справедливы при любых термодинамических процессах. Если же параметры торможения берутся в одном сечении потока, а величины p , T , ρ , v — в другом, то формула (4.17) справедлива для адиабатического процесса, а формулы (4.18)–(4.20) — только для изоэнтропного процесса.

Таблицы значения газодинамических функций τ , π , ϵ , q от M и λ для разных k (в зависимости от вида газа) приведены в соответствующих справочниках.

Зависимости между критическими параметрами и параметрами торможения следующие:

$$T_{\text{кр}} = 2T_0/(k+1); \quad p_{\text{кр}} = [2/(k+1)]^{k/(k-1)} p_0; \quad (4.22)$$

$$\rho_{\text{кр}} = [2/(k+1)]^{1/(k-1)} \rho_0; \quad (4.23)$$

$$a_{\text{кр}} = \sqrt{2/(k+1)} a_0. \quad (4.24)$$

Примеры решения задач

Пример 4.3. Воздух с температурой $t_0 = 15^\circ\text{C}$ вытекает из котла. Определить температуру его в тех сечениях, где скорость составляет $v_1 = 200$ м/с, $v_2 = 400$ м/с, а также скорости звука a_1 , a_2 , числа Маха M_1 , M_2 и коэффициенты скорости λ_1 и λ_2 в этих сечениях. Движение считать изоэнтропным.

Решение. Используя уравнение сохранения энергии (4.13), найдем

$$T_1 = T_0 - \frac{v_1^2}{2c_p} = 288,15 - 4 \cdot 10^4 / (2 \cdot 1003,5) = 268,2 \text{ К};$$

$$T_2 = T_0 - \frac{v_2^2}{2c_p} = 288,15 - 16 \cdot 10^4 / (2 \cdot 1003,5) = 208 \text{ К}.$$

Скорости звука найдем по формуле (4.2):

$$a_1 = \sqrt{kRT_1} = \sqrt{1,4 \cdot 287,15 \cdot 268} = 328 \text{ м/с};$$

$$a_2 = \sqrt{kRT_2} = \sqrt{1,4 \cdot 287,15 \cdot 208} = 289 \text{ м/с}.$$

Тогда $M_1 = v_1 / a_1 = 200 / 328 = 0,610$;

$M_2 = v_2 / a_2 = 400 / 289 = 1,38$.

По формуле (4.16) найдем коэффициенты скорости:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \sqrt{(k+1)M_1^2 / [2 + (k-1)M_1^2]} = \\ &= \sqrt{(1,4+1) \cdot 0,610^2 / [2 + (1,4-1) \cdot 0,610^2]} = 0,645; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \lambda_2 &= \sqrt{(k+1)M_2^2 / [2 + (k-1)M_2^2]} = \\ &= \sqrt{(1,4+1) \cdot 1,38^2 / [2 + (1,4-1) \cdot 1,38^2]} = 1,29. \end{aligned}$$

Пример 4.4. Как изменится кинетическая энергия единицы объема и единицы массы воздуха при изоэнтропном движении по расширяющейся трубе с увеличением числа Маха от $M_1 = 1$ до $M_2 = 2$?

Решение. Кинетическая энергия единицы объема

$$\mathcal{E}_{\text{кин}} = mv^2 / (2V) = \rho V v^2 / (2V) = \rho v^2 / 2,$$

где V — объем газа, поэтому

$$\begin{aligned} \frac{\mathcal{E}_{\text{кин}_2}}{\mathcal{E}_{\text{кин}_1}} &= \frac{\rho v_2^2}{\rho v_1^2} = \frac{\rho M_2^2 v_2^2}{\rho M_1^2 v_1^2} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^2 \frac{T_2}{T_1} = \frac{\rho_2 / \rho_0}{\rho_1 / \rho_0} \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^2 \frac{T_2 / T_0}{T_1 / T_0} = \\ &= \frac{\varepsilon(M_2)}{\varepsilon(M_1)} \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^2 \frac{\tau(M_2)}{\tau(M_1)} = \frac{0,230}{0,634} \cdot (2)^2 \cdot \frac{0,556}{0,833} = 0,969, \end{aligned}$$

где $\varepsilon(M)$ и $\tau(M)$ определяются по таблицам газодинамических функций.

Кинетическая энергия единицы объема в сечении 2 уменьшилась, несмотря на увеличение скорости, за счет очень резкого падения плотности. При этом кинетическая энергия единицы массы, равная $v^2/2$, возрастает в отношении

$$\begin{aligned} \frac{v_2^2}{v_1^2} &= \frac{M_2^2 a_2^2}{M_1^2 a_1^2} = \left(\frac{M_2}{M_1}\right)^2 \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{M_2}{M_1}\right)^2 \frac{T_2/T_0}{T_1/T_0} = \left(\frac{M_2}{M_1}\right)^2 \frac{\tau_2(M_2)}{\tau_1(M_1)} = \\ &= 2^2 \cdot \frac{0,556}{0,833} = 2,67. \end{aligned}$$

Пример 4.5. Воздух при нормальных условиях ($h_6 = 760$ мм рт. ст., $t = 15$ °С), имеющий скорость $v_1 = 136$ м/с, ускоряется в сопле до $v_2 = 280$ м/с. Найти температуру, давление и плотность в конце сопла, а также температуру и давление торможения, считая движения изоэнтропным.

Решение. Определяем число Маха в сечении 1:

$$M_1 = \frac{v_1}{a_1} = \frac{v_1}{\sqrt{kRT_1}} = \frac{136}{\sqrt{1,4 \cdot 287,15 \cdot 288}} = 0,4.$$

По таблицам газодинамических функций, зная $p_1 = 760$ мм рт. ст., или $1,013 \cdot 10^5$ Па, и $T_1 = 288$ К, находим параметры торможения:

$$p_0 = \frac{p_1}{\pi(M_1)} = \frac{1,013 \cdot 10^5}{0,895} = 1,13 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$T_0 = \frac{T_1}{\tau(M_1)} = \frac{288}{0,969} = 297 \text{ К}.$$

Из уравнения закона сохранения энергии определяем температуру в сечении 2:

$$T_2 = T_0 \frac{v_2^2}{2c_p} = 297 \cdot \frac{280^2}{2000} = 258$$

и число Маха

$$M_2 = \frac{v_2}{a_2} = \frac{v_2}{\sqrt{kRT_2}} = \frac{280}{\sqrt{1,4 \cdot 287 \cdot 258}} = \frac{280}{322} = 0,87.$$

По таблицам газодинамических функций находим давление в конце сопла

$$p_2 = \pi(M_2) p_0 = \pi(0,870) \cdot 1,13 \cdot 10^5 = 0,611 \cdot 1,13 \cdot 10^5 = 6,9 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

И из уравнения Клапейрона – Менделеева определяем плотность:

$$\rho_2 = p_2 / (RT_2) = 0,932 \text{ кг/м}^3.$$

Контрольные задачи

Задача 4.7. В камере жидкостного реактивного двигателя газ с молекулярной массой 24,2 кг/моль имеет температуру $T_0 = 2800 \text{ К}$.

Определить скорость звука в заторможенном газе в камере двигателя и критическую скорость звука ($k = 1,3$).

Ответ: $a_0 = 1,12 \cdot 10^3 \text{ м/с}$; $a_{кр} = 1,04 \cdot 10^3 \text{ м/с}$.

Задача 4.8. Дана температура торможения $T_0 = 357 \text{ К}$ и температура $T = 250 \text{ К}$ в некотором сечении изоэнтропного потока воздуха.

Найти скорость звука в заторможенном газе a_0 , скорость звука a , коэффициент скорости λ , число Маха M и скорость v в этом сечении.

Ответ: $a_0 = 378 \text{ м/с}$; $a = 317 \text{ м/с}$; $\lambda = 34$; $M = 1,46$; $v = 463 \text{ м/с}$.

Задача 4.9. Воздух течет изоэнтропно по трубе переменного сечения. В сечении 1 трубы число Маха $M_1 = 1$, а во втором $M_2 = 2$.

Каково соотношение между скоростями воздуха в первом и втором сечениях?

Ответ: $v_2 / v_1 = 1,63$.

Задача 4.10. Отношение чисел Маха в сечениях 1 и 2 потока воздуха $M_2 / M_1 = 2$.

Найти отношение скоростей в этих сечениях. Процесс изоэнтропный ($M_1 = 1,5$).

Ответ: $v_2 / v_1 = 1,44$.

Задача 4.11. Отношение чисел Маха в сечениях 1 и 2 потока воздуха $M_2 / M_1 = 3$. Процесс изоэнтропный.

Найти отношение температур и давлений $T_2 / T_1, p_2 / p_1$.

Ответ: $T_2 / T_1 = 0,429$; $p_2 / p_1 = 5,17 \cdot 10^2$.

Задача 4.12. Покоящийся воздух, находящийся в нормальных условиях ($p_0 = 0,1013 \cdot 10^6$ Па, $t_0 = 15$ °С), расширяясь изоэнтропно, приобретает скорость, соответствующую числу Маха $M = 0,9$.

Найти конечную плотность ρ и изменение плотности $\Delta\rho$.

Ответ: $\rho = 0,84$ кг/м³; $\Delta\rho = 0,38$ кг/м³.

Задача 4.13. Поток воздуха при давлении $p = 1$ МПа и температуре $t = -8$ °С имеет скорость $v = 100$ м/с.

Определить температуру, давление и плотность этого потока при изоэнтропном торможении до состояния покоя и скорость звука в этом потоке.

Ответ: $T_0 = 270$ К; $p_0 = 1,07$ МПа; $\rho_0 = 13,8$ кг/м³; $a = 326$ м/с.

4.3. УДАРНАЯ ВОЛНА

При обтекании тела потоком жидкости или газа перед ним образуется зона торможения. В этой области происходит снижение скорости потока и повышение давления.

При обтекании тела потоком газа местное повышение давления, связанное с торможением, имеет конечное значение, существенно превышающее звуковое давление.

Возмущения, вызванные в газовой среде повышением давления в любой части обтекаемого тела, распространяются со скоростью, большей скорости звука. Если тело движется со скоростью, большей скорости звука, то перед ним возникает устойчивая ударная волна (рис. 4.5).

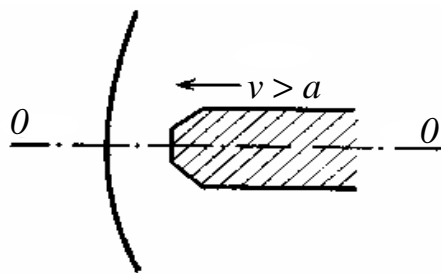


Рис. 4.5. Фронт ударной волны перед телом, движущимся со сверхзвуковой скоростью — прямой скачок уплотнения

Ударной волной называется поверхность, при прохождении через которую давление, плотность, скорость и температура газа **изменяются скачком** (рис. 4.5).

Фронт распространения ударной волны движется с той же скоростью, что и тело. В то же время ударная волна может возникнуть только при сверхзвуковых относительных скоростях движения газа.

Образующиеся в потоке ударные волны в различных случаях могут быть подвижными и неподвижными. Неподвижная ударная волна называется *скачком уплотнения*.

Наличие *скачка уплотнения* связано с гидравлическими потерями, происходящими в очень узкой области ширины фронта ударной волны.

Вдоль плоскости фронта волны допускается равномерное распределение скорости потока, поэтому частные производные скорости потока вдоль фронта равны нулю. Это приводит к выводу о том, что касательные составляющие вязкого напряжения также равны нулю. Частная производная скорости в направлении, нормальном к фронту волны (по направлению движения), велика, так как на узком участке ширины фронта происходит резкое снижение скорости. Это указывает на появление существенных нормальных напряжений, которые и являются в данном случае причиной появления гидравлических потерь.

Запас удельной механической энергии потока перед скачком уплотнения равен $p_1/(\rho_1 g) + v_1^2/(2g)$, а после него — $p_2/(\rho_2 g) + v_2^2/(2g)$. Разность механической энергии до и после скачка уплотнения

$$\Delta h = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} \frac{1}{k}$$

в виде тепла подводится к массе газа.

Таким образом, хотя и нет подвода тепла к потоку газа из внешней среды (условие адиабатичности), происходит перераспределение запаса удельной энергии, и после скачка уплотнения запас механической энергии необратимо снижается. Зависимость между плотностью и давлением газа до и после скачка уплотнения уже не адиабатическая.

Если фронт скачка уплотнения перпендикулярен скорости набегающего потока, то скачок называется прямым. При переходе через прямой скачок направление скорости не меняется. Связь между параметрами газа до скачка p_1, ρ_1 и за ним p_2, ρ_2 имеет вид

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{k+1}{k-1} \frac{\rho_2}{\rho_1} - 1 \left/ \left(\frac{k+1}{k-1} - \frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \right. \quad (4.25)$$

Это соотношение называется ударной адиабатой Гюгонио (рис. 4.6, кривая 1).

На этом же рисунке для сравнения показана адиабата Пуассона $p_2/p_1 = (\rho_2/\rho_1)^k$ (кривая 2), соответствующая изоэнтропному сжатию совершенного газа.

Адиабата Гюгонио характеризует адиабатическое неизоэнтропное сжатие газа в ударной волне. При прохождении газом скачка уплотнения происходит необратимый частичный переход механической энергии в тепловую энергию, что приводит к увеличению энтропии.

Особенность ударной адиабаты состоит в том, что при неограниченном возрастании давления в скачке ($p_2/p_1 \rightarrow \infty$) плотность не может возрасти более, чем в $(k+1)/(k-1)$ раз (для воздуха не больше, чем в 6 раз).

Скорости течения газа до (v_1) и после скачка (v_2) связаны соотношением Прандтля

$$v_1 v_2 = a_{кр}^2 \quad (4.26)$$

или

$$\lambda_1 \lambda_2 = 1. \quad (4.27)$$

Из формулы (4.27) видно, что, каков бы ни был начальный сверхзвуковой поток ($\lambda_1 > 1$), за прямым скачком движение становится дозвуковым ($\lambda_2 < 1$).

Отношения давлений, плотностей и температур за прямым скачком (p_2, ρ_2, T_2) к соответствующим значениям до скачка (p_1, ρ_1, T_1) определяются в зависимости от числа Маха перед скачком $M_1 = a_1$ (или от коэффициента скорости λ_1) по формулам:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{2k}{k+1} M_1^2 - \frac{k-1}{k+1} = \lambda_1^2 - \frac{k-1}{k+1} \left/ \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_1^2 \right) \right.; \quad (4.28)$$

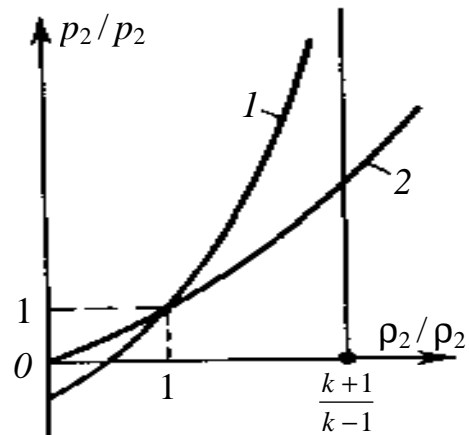


Рис. 4.6. Сравнение ударной адиабаты Гюгонио (кривая 1) и адиабаты Пуассона (кривая 2)

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{k+1}{2} M_1^2 \left/ \left(1 + \frac{k+1}{2} M_1^2 \right) \right. = \lambda_1^2; \quad (4.29)$$

$$\begin{aligned} \frac{T_2}{T_1} &= \frac{4k - (k-1)^2}{(k+1)^2} - \frac{2(k-1)}{(k+1)^2 M_1^2} + \frac{2k(k-1)}{(k+1)^2} M_1^2 = \\ &= 1 - \frac{k-1}{k+1} \frac{1}{\lambda_1^2} \left/ \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_1^2 \right) \right. . \end{aligned} \quad (4.30)$$

Число Маха за прямым скачком M_2 связано с числом Маха перед скачком M_1 соотношением

$$M_2^2 = 1 + \frac{k-1}{2} M_1^2 \left/ \left(k M_1^2 - \frac{k-1}{2} \right) \right. . \quad (4.31)$$

Изменение энтропии при прохождении совершенным газом прямого скачка уплотнения определяется по формуле

$$S_1 - S_2 = c_V \ln \frac{p_{02} \rho_{01}^k}{p_{01} \rho_{02}^k} = R \ln \frac{p_{02}}{p_{01}}, \quad (4.32)$$

где $(\rho_{01}, p_{01}), (\rho_{02}, p_{02})$ — плотность и давление торможения до и после скачка соответственно.

Отношение $\sigma = p_{02} / p_{01} < 1$ называется коэффициентом давления и характеризует потери механической энергии в прямом скачке. Ниже приведена зависимость коэффициента давления от числа Маха M_1 перед скачком (или от коэффициента скорости λ_1):

$$\begin{aligned} \sigma &= \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \frac{M_1^{\frac{2k}{k-1}}}{\left(1 + \frac{k-1}{2} M_1^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} \left(k M_1^2 - \frac{k-1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}}} = \\ &= \lambda_1^{\frac{2k}{k-1}} \left(\frac{1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_1^2}{\lambda_1^2 - \frac{k-1}{k+1}} \right)^{\frac{1}{k-1}} . \end{aligned} \quad (4.33)$$

Температура торможения до и после скачка одна и та же:

$$T_{01} = T_{02} = T_0.$$

Если ударная волна подвижна и распространяется по неподвижному газу, имеющему параметры p_1, ρ_1, T_1 , то скорость ее распространения w определяется по формуле

$$w = \sqrt{k \frac{p_1}{\rho_1}} \sqrt{\frac{k-1}{2} + \frac{k+1}{2k} \frac{p_2}{p_1}}. \quad (4.34)$$

где p_2 — давление за ударной волной.

Скорость распространения ударной волны w всегда больше, чем скорость звука перед ударной волной: $w > a_1$, где $a = \sqrt{kp_1/\rho_1}$.

Примеры решения задач

Пример 4.6. Воздушно-реактивный двигатель обтекается сверхзвуковым потоком с давлением $p_1 = 0,255 \cdot 10^5$ Па, температурой $T_1 = 220$ К и скоростью $v_1 = 575$ м/с (рис. 12.4).

Задание.

1. Рассчитать прямой скачок уплотнения, т. е. найти p_2, T_2, ρ_2, v_2 .
2. Найти давление в камере горения, считая, что оно совпадает с p_{02} .
3. Найти давление, которое имело бы место в камере горения в предположении изоэнтропности всего течения.
4. Найти коэффициент давления $\sigma = p_{02}/p_{01}$, $k = 1,4$; $R = 287$ Дж/(кг·К).

Решение 1. Найдем скорость звука и число Маха перед скачком:

$$a_1 = C_{\text{возд}} \sqrt{T_1} = 20 \cdot \sqrt{220} = 297 \text{ м/с};$$

$$M_1 = v_1 / a_1 = 575 / 297 = 1,94.$$

Зная M_1, p_1 и T_1 , определим давление p_2 и температуру T_2 за скачком по формулам (4.28) и (4.30):

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{2k}{k+1} M_1^2 - \frac{k-1}{k+1} = 1,167 \cdot 1,94^2 - 0,167 = 4,22;$$

$$p_2 = 4,22 p_1 = 4,22 \cdot 0,255 \cdot 10^5 = 1,08 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{4k - (k-1)^2}{(k+1)^2} - \frac{2k - (k-1)}{(k+1)^2} M_1^2 + \frac{2k(k-1)M_1^2}{(k+1)^2} =$$

$$= 0,944 - \frac{0,139}{1,94^2} + 0,194 \cdot 0,194^2 = 1,64; \quad T_2 = 1,64T_1 = 361 \text{ К.}$$

По формуле (4.31) найдем значение M_2 за скачком:

$$M_2 = \sqrt{\frac{1 + \frac{k-1}{2} M_1^2}{kM_1^2 - \frac{k-1}{2}}} = \sqrt{\frac{1,75}{5,27 - 0,20}} = 0,588.$$

Рассчитаем скорость звука за скачком:

$$a_2 = 20 \cdot \sqrt{361} = 380 \text{ м/с};$$

скорость течения газа

$$v_2 = M_2 a_2 = 0,588 \cdot 380 = 223 \text{ м/с};$$

плотность

$$\rho_2 = p_2 / (RT_2) = 1,08 \cdot 10^5 / (287 \cdot 361) = 1,04 \text{ кг/м}^3.$$

Считая движение газа за скачком изоэнтропическим, по таблицам газодинамических функций найдем:

$$p_2 / p_{02} = \pi(M_2) = 0,791; \quad p_{02} = p_2 / 0,791 =$$

$$= 1,08 \cdot 10^5 / 0,791 = 1,36 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

При изоэнтропном движении давление в камере равнялось бы p_{01} :

$$p_1 / p_{01} = \pi(M_1) = \pi(1,94) = 0,140;$$

$$p_{01} = p_1 / 0,140 = 0,255 \cdot 10^5 / 0,140 = 1,82 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$\sigma = p_{02} / p_{01} = 1,36 / 1,82 = 0,75 = 75 \text{ \%}.$$

Пример 4.7. Определить число Маха и коэффициент скорости в потоке воздуха в трубе по известным показаниям манометра $H = 1722$ мм рт. ст. и $h = 320$ мм рт. ст. (рис. 4.7).

Показание барометра $h_6 = 760$ мм рт. ст.

Определить также давление торможения в набегающем потоке p_{01} .

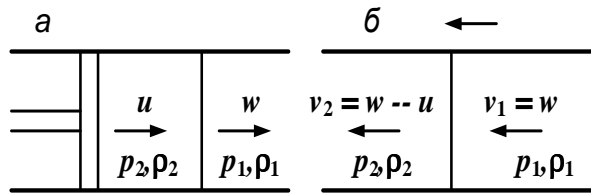


Рис. 4.7. К примеру 4.7

Решение. Давление в набегающем потоке:

$$p_1 = p_a + \rho g H = (0,760 - 0,320) \cdot 1,36 \cdot 10^4 \cdot 9,81 = 5,87 \cdot 10^4 \text{ Па.}$$

Перед трубкой Пито образуется прямой скачок уплотнения, поэтому ее показание H соответствует избыточному давлению торможения в потоке за скачком:

$$\begin{aligned} p_{02} &= p_a + \rho_p g H = (0,760 + 1,722) \cdot 1,36 \cdot 10^4 \cdot 9,81 = \\ &= 3,317 \cdot 10^5 \text{ Па.} \end{aligned}$$

Отношение плотностей определится как

$$\begin{aligned} p_{02} / p_1 &= (p_{02} / p_{01})(p_{01} / p_1) = \\ &= \sigma(M_1) / \pi(M_1) = 33,1 / 5,87 = 5,64. \end{aligned}$$

Задаваясь разными значениями $M_1 > 1$, можно построить график зависимости функции p_{02} / p_1 от M_1 , используя формулу (4.33) и таблицы газодинамических функций, из которых следует, что $M_1 = 2$.

Найдем коэффициент скорости

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{(k+1)M_1^2}{2+(k-1)M_1^2}} = \sqrt{\frac{1,2 \cdot 4}{1+0,2 \cdot 4}} = 1,63.$$

Давление торможения в набегающем потоке p_{01} определяется по таблицам газодинамических функций:

$$p_{01} = p_1 / \pi(M_1) = 5,87 \cdot 10^4 / 0,129 = 0,456 \text{ МПа.}$$

Пример 4.8. С какой скоростью w распространяется по трубе ударная волна, образующаяся при движении поршня со скоростью $u = 250$ м/с в совершенном газе с температурой $T_1 = 300$ К (рис. 4.7, а)? Известно, что $k = 1,3$; $R = 290$ Дж/(кг · К).

Решение. Выведем формулу для скорости распространения ударной волны.

Чтобы применить соотношения, полученные для неподвижной ударной волны (скачка уплотнения), мысленно сообщают газу поступательное движение со скоростью w в направлении, противоположном скорости движения ударной волны (рис. 4.7, б).

Тогда ударная волна оказывается остановленной, а поток перед ней — движущимся со скоростью $v_1 = w$ влево. За скачком газ будет иметь скорость $v_2 = w - u$.

Для нахождения скорости w используем формулу Прандтля (4.26):

$$v_1 v_2 = w(w - u) = a_{\text{кп}}^2$$

и уравнение энергии

$$c_p T_1 + \frac{w^2}{2} = c_p T_0 = \frac{k+1}{2(k-1)} a_{\text{кп}}^2.$$

Исключив из этих соотношений $a_{\text{кп}}^2$, получим уравнение для определения скорости w :

$$w^2 - \frac{k+1}{2} u w - (k-1) c_p T_1 = 0.$$

Используя формулу Майера $R = c_p - c_v$ и соотношение $k = c_p / c_v$ преобразуем последний член к виду $(k-1)c_p = kRT_1$.

Тогда решением уравнения будет

$$w = \frac{k+1}{4} u + \sqrt{\frac{(k+1)^2 u^2}{16} + kRT_1}$$

(второй корень не годится; так как дает $w < 0$).

Подставив численные данные, получим

$$w = \frac{1,3+1}{4} \cdot 250 + \sqrt{\frac{(1,3+1)^2 \cdot 250^2}{16} + 1,3 \cdot 290 \cdot 300} = 510 \text{ м/с.}$$

Контрольные задачи

Задача 4.14. Сравнить увеличение плотности и температуры при ударном и при изэнтропном сжатии воздуха, если в том и другом случае давление возрастает в 10 раз. Объясните разницу.

Пояснение. Повышению плотности при ударном сжатии препятствует разогрев газа на ударной волне.

Ответ:

$$(\rho_2 / \rho_1)_{\text{уд}} = 3,81; \quad (\rho_2 / \rho_1)_{\text{изоэнтр}} = 5,18;$$

$$(T_2 / T_1)_{\text{уд}} = 2,62; \quad (T_2 / T_1)_{\text{изоэнтр}} = 1,93.$$

Задача 4.15. Давление при сжатии воздуха возрастает в 7 раз.

Найти изменение температуры T_2 / T_1 при изоэнтропном течении и при наличии скачка уплотнения.

Ответ: $(T_2 / T_1)_{\text{изоэнтр}} = 1,74; (T_2 / T_1)_{\text{уд}} = 2,12.$

Задача 4.16. При сжатии воздуха плотность возрастает в 4 раза.

Найти изменение температуры T_2 / T_1 при изоэнтропном течении и при наличии скачка уплотнения.

Ответ: $(T_2 / T_1)_{\text{изоэнтр}} = 1,74; (T_2 / T_1)_{\text{уд}} = 2,88.$

Задача 4.17. На прямом скачке уплотнения $p_2 / p_1 = 3; k = 1,4.$

Найти $\lambda_1, \lambda_2, \rho_1 / \rho_2, v_2 / v_1.$

Ответ: $\lambda_1 = 1,45; \quad \lambda_2 = 0,688; \quad \rho_1 / \rho_2 = 2,11; \quad T_2 / T_1 = 1,42;$
 $v_2 / v_1 = 0,475.$

Задача 4.18. На прямом скачке уплотнения плотность возрастает в 2 раза.

При каком значении коэффициента скорости возник скачок уплотнения? Как изменится кинетическая энергия единицы объема газа на скачке?

Ответ: $\lambda_1 = 1,41; \quad \mathcal{E}_{\text{кин}2} / \mathcal{E}_{\text{кин}1} = 0,5.$

Задача 4.19. На прямом скачке уплотнения $\lambda_1 = 2, k = 1,4.$

Найти $\lambda_2, \rho_2 / \rho_1, p_2 / p_1, T_2 / T_1.$

Ответ: $\lambda_2 = 0,5; \quad \rho_1 / \rho_2 = 4; \quad p_2 / p_1 = 11,5; \quad T_2 / T_1 = 2,88.$

Задача 4.20. На прямом скачке уплотнения $T_2 / T_1 = 2.$ Найти $\lambda_1, \lambda_2, \rho_2 / \rho_1, p_2 / p_1.$ Принять $k = 1,4.$

Ответ: $\lambda_1 = 1,78; \quad \lambda_2 = 0,563; \quad \rho_2 / \rho_1 = 3,16; \quad p_2 / p_1 = 6,32.$

Задача 4.21. Скорость газа за прямым скачком уплотнения $v_2 = 221$ м/с. Температура торможения после скачка $t_{02} = 100$ °С.

Определить температуру газа в потоке до скачка. Принять параметры воздуха.

Ответ: $T_1 = 214$ К.

Задача 4.22. Скорость течения воздуха перед скачком $v_1 = 400$ м/с. Температура торможения $T_{01} = 330$ К.

Найти коэффициенты скорости перед и за скачком, температуру T_2 и скорость v_2 .

Ответ: $\lambda_1 = 1,20$; $\lambda_2 = 0,831$; $T_2 = 292$ К; $v_2 = 276$ м/с.

Задача 4.23. Воздух поступает в сопло Лавала под давлением $p_{01} = 2$ МПа. В расширяющейся части сопла имеет место прямой скачок уплотнения. Перед скачком давление $p_1 = 0,4$ МПа.

Найти давление за скачком, считая, что до скачка внутри сопла движение газа изоэнтропное.

Ответ: $p_2 = 1,30$ МПа.

Задача 4.24. Воздух вытекает из котла, в котором он имеет температуру 16 °С, через сопло Лавала с отношением площадей выходного и критического сечений $s_B/s_{кр} = 4$. В выходном сечении сопла имеет место прямой скачок.

Найти скорость газа за скачком, считая течение газа перед скачком изоэнтропным.

Ответ: $v_2 = 159$ м/с.

Задача 4.25. В сопло Лавала подается воздух из резервуара, в котором он имеет давление 4 МПа. Отношение площадей выходного и критического сечений $s_B/s_{кр} = 3,33$.

Определить: 1) давление за прямым скачком, если он имеет место в выходном сечении; 2) давление за прямым скачком, если он имеет место в сечении площадью $s' = 2s_{кр}$.

Ответ: $p_{2в} = 1,38$ МПа; $p_{2'} = 2,03$ МПа.

Задача 4.26. Давление перед прямым скачком уплотнения $p_1 = 0,255$ МПа, давление торможения $p_{02} = 0,6$ МПа.

Найти давление за скачком p_2 , давление торможения p_{02} и коэффициент давления $\sigma = p_{02}/p_{01}$. Принять $k = 1,4$.

Ответ: $p_2 = 0,369$ МПа; $p_{02} = 0,596$ МПа; $\sigma = 0,994$.

Задача 4.27. Определить коэффициент давления σ для прямого скачка уплотнения, если $M_1 = 2$.

Найти также давление торможения за прямым скачком, если давление в потоке воздуха до скачка $p_1 = 10^5$ Па.

Ответ: $\sigma = 0,72$; $p_{02} = 5,65 \cdot 10^5$ Па.

Задача 4.28. Воздух вытекает из сопла Лавала при числе Маха $M_1 = 2,5$ под действием давления $p_{01} = 1,57$ МПа; $T_0 = 288$ К.

Определить:

1) параметры газа в выходном сечении сопла, т. е. p_1 , T_1 , ρ_1 , считая, что расширение воздуха расчетное;

2) параметры газа за скачком p_2 , ρ_2 , T_2 , M_2 , считая, что в выходном сечении сопла имеет место прямой скачок уплотнения;

3) коэффициент давления σ .

Ответ:

1) $p_1 = 9,19 \cdot 10^4$ Па; $T_1 = 128$ К; $\rho_1 = 2,50$ кг/м³;

2) $p_2 = 6,55 \cdot 10^5$ Па; $T_2 = 274$ К; $\rho_2 = 8,33$ кг/м³; $M_2 = 0,513$;

3) $\sigma = 0,5$.

Задача 4.29. Определить давление торможения воздуха за прямым скачком уплотнения, если параметры газа до скачка: $p_1 = 10^5$ Па, $\lambda_1 = 2$.

Ответ: $p_{02} = 1,34$ МПа.

Задача 4.30. Перед поршнем, движущимся с постоянной скоростью $u = 400$ м/с, в трубе, заполненной воздухом, возникла ударная волна. Правый конец трубы открыт в атмосферу ($p_a = 1,013 \cdot 10^5$ Па, $\rho_a = 1,293$ кг/м³) (рис. 4.7).

Найти скорость волны (w) относительно стенок трубы и скорость волны относительно поршня.

Указание. См. пример 12.3.

Ответ: $w = 649$ м/с; $w - u = 249$ м/с.

Задача 4.31. Найти скорость распространения ударной волны по неподвижному газу с давлением $p_1 = 9,8 \cdot 10^4$ Па и плотностью $\rho_1 = 1,29$ кг/м³, предполагая, что движение одномерное, без трения и без притока теплоты. Известно, что после прохождения ударной волны давление возросло в 25 раз.

Сопоставить скорость распространения ударной волны со скоростью звука в неподвижном газе. Принять $k = 1,4$.

Ответ: $w_1 = 1,51 \cdot 10^3$ м/с; $a_1 = 326$ м/с; $w_1 / a_1 = 4,64$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ПО ТЕМАМ ГЛАВЫ

1. Какие два случая необходимо различать при рассмотрении скорости распространения возмущений в газовой среде?

2. Какие колебания называются звуковыми?

3. Какое уравнение сохранения используется при рассмотрении скорости звука?

4. Как можно определить скорость звука при адиабатическом, изоэнтропном течении газа?

5. Какой вид будет иметь закон сохранения полной (механической и внутренней) энергии газового потока, при условии адиабатичности процесса распространения колебаний в газовой среде, в любом сечении сужающегося канала?

6. Что такое кризис течения в сужающемся канале? Какими параметрами он характеризуется?

7. Чему будет равняться скорость течения в выходном сечении сужающегося канала при значении давления окружающей среды, меньшем критического давления?

8. Чему будет равняться скорость течения в выходном сечении сужающегося канала при значении давления окружающей среды, большем критического давления?

9. Можно ли получить в сужающемся канале скорость больше критической?

10. Что нужно для того, чтобы в выходном канале устанавливалось давление окружающей среды меньше критического давления?

11. Какой канал называют соплом Лавалья?

12. Что означает понятие «скачок уплотнения» и при каких режимах течения газа он возникает?

13. Что означает понятие «торможение потока»?
14. Какое значение для различных сечений имеют параметры торможения адиабатического изоэнтропного потока газа?
15. Какое значение для различных сечений имеют параметры торможения адиабатического изоэнтропного потока газа с трением, для которого энтропия вдоль потока меняется?
16. Какая связь между критическими параметрами и параметрами торможения?
17. Что называется газодинамической функцией?
18. Что описывает число Маха?
19. Что называется коэффициентом скорости?
20. Как определить режим течения с использованием числа Маха?

5. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

5.1. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ В КРУГЛОЙ ТРУБЕ

Цели работы:

- визуальное наблюдение за характером движения жидкости при ламинарном и турбулентном режимах;
- установление зависимости между потерями напора и расходом при ламинарном и турбулентном режимах;
- определение критического значения числа Рейнольдса, соответствующего переходу от ламинарного режима к турбулентному.

Введение в тему

Движение жидкости в трубах и каналах характеризуется двумя режимами: ламинарным и турбулентным.

При ламинарном режиме жидкость движется параллельными слоями или струйками.

При турбулентном режиме движение частиц жидкости происходит по сложным траекториям и является хаотическим, в потоке наблюдается интенсивное перемешивание частиц жидкости, сопровождающееся пульсациями скоростей и давлений.

Визуально ламинарный режим и его переход в турбулентный можно наблюдать с помощью опыта, впервые поставленного О. Рейнольдсом. Для этого в стеклянную трубу с движущейся жидкостью вводится тонкая струйка окрашенной жидкости (рис. 5.1).

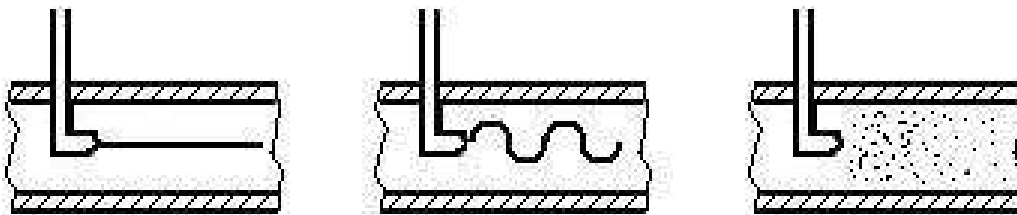


Рис. 5.1. Индикация режима течения потока

При небольшом расходе окрашенная жидкость движется в виде тонкой струйки параллельно стенкам трубки не смешиваясь с основным потоком жидкости.

Если расход увеличивать, то окрашенная струйка начинает колебаться и принимает волнообразный характер. Затем на отдельных ее участках начинают появляться разрывы. Струйка теряет отчетливую форму и при определенном расходе полностью размывается жидкостью, равномерно ее окрашивая. Это свидетельствует о переходе от ламинарного режима к турбулентному.

На основе опытов Рейнольдс предложил безразмерное соотношение, названное числом Рейнольдса, которое позволяет установить режим движения жидкости. Для цилиндрической трубы

$$Re = vd/\nu, \quad (5.1)$$

где v — средняя скорость движения жидкости; d — внутренний диаметр трубопровода; ν — кинематическая вязкость жидкости.

С физической точки зрения, число Re представляет собой отношение сил инерции к силам вязкостного трения.

В потоке, вследствие прилипания частиц жидкости к поверхности трубопровода, скорость на стенках равна нулю, а на оси потока имеет максимальное значение. Поэтому движущаяся жидкость находится в напряженном состоянии и в ней происходит взаимодействие двух сил: инерции и вязкостного трения. Силы инерции стремятся вызвать возмущение в потоке, а силы вязкостного трения препятствуют этому. Поэтому при числах $Re < 2320$ имеет место ламинарный режим, а при $Re > 2320$ — турбулентный.

Развитое турбулентное движение в трубах устанавливается лишь при $Re = 2800$, а при $Re = 2320-2800$ имеет место переходная область (область перемежаемости), в которой, в зависимости от условий, возможно наличие или ламинарного, или турбулентного режимов. Однако для практических расчетов принято считать, что при $Re > 2320$ имеет место турбулентный режим.

Режим движения жидкости определяют путем сравнения полученного по формуле (5.1) числа Re с его критическим значением. Если $Re < Re_{кр} = 2320$, то режим движения называется ламинарным, если $Re > Re_{кр}$ — турбулентным.

Различный характер движения жидкости при ламинарном и турбулентном режимах приводит к различным законам сопротивления, а значит, и к различным потерям напора.

Зависимость между потерями напора и расходом имеет вид

$$h_{\text{дл}} = B\nu^m l Q^{2-m} / d^{5-m}, \quad (5.2)$$

где $h_{\text{дл}}$ — потери напора по длине; ν — кинематическая вязкость жидкости; l — расстояние между пьезометрами; d — внутренний диаметр трубопровода; m — показатель степени.

Для ламинарного режима $B = 128 / \pi g$ и $m = 1$, тогда $h_{\text{дл}} = kQ$, где k — сопротивление трубопровода, т. е. потери напора по длине в этом случае пропорциональны расходу в степени 1. Для турбулентного режима $B = 0,241 / g$ и m изменяются от 0,25 до 0.

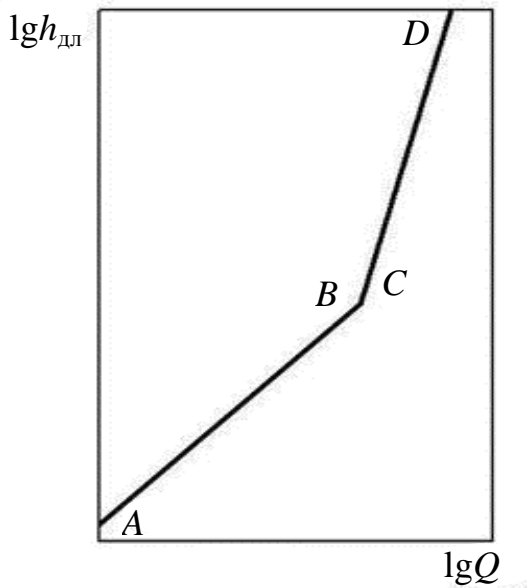


Рис. 5.2. Зависимость между потерями напора по длине и расходом при ламинарном и турбулентном режимах

в зоне гидравлически гладких стенок $m = 0,25$ и $h_{\text{дл}} = kQ^{1,75}$. В зоне квадратичной $m = 0$ и $h_{\text{дл}} = kQ^2$, т. е. при турбулентном режиме потери напора по длине пропорциональны скорости в степени, изменяющейся от 1,75 до 2.

Потери напора, приходящиеся на единицу длины, называют гидравлическим уклоном ($i = h_{\text{дл}} / l$). Зависимость между потерями напора по длине и расходом при ламинарном и турбулентном режимах представлена в виде графика (рис. 5.2).

Прямая AB соответствует ламинарному режиму, а CD — турбулентному. По тангенсу угла наклона этих прямых к оси абсцисс можно определить показатель степени ($n = 2 - m$) для ламинарного и турбулентного режимов.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис. 5.3) состоит из напорного бака 1 с успокоительной решеткой 2 и стеклянного трубопровода 3. Постоянный напор в баке 1 обеспечивается за счет перелива жидкости через сливную трубу 4.

На трубопроводе 3 установлены два пьезометра 5, по которым определяют потери напора по длине $h_{дл}$, и регулировочный кран 6, с помощью которого можно изменять скорость движения жидкости. Для измерения расхода жидкости имеется мерный сосуд и секундомер.

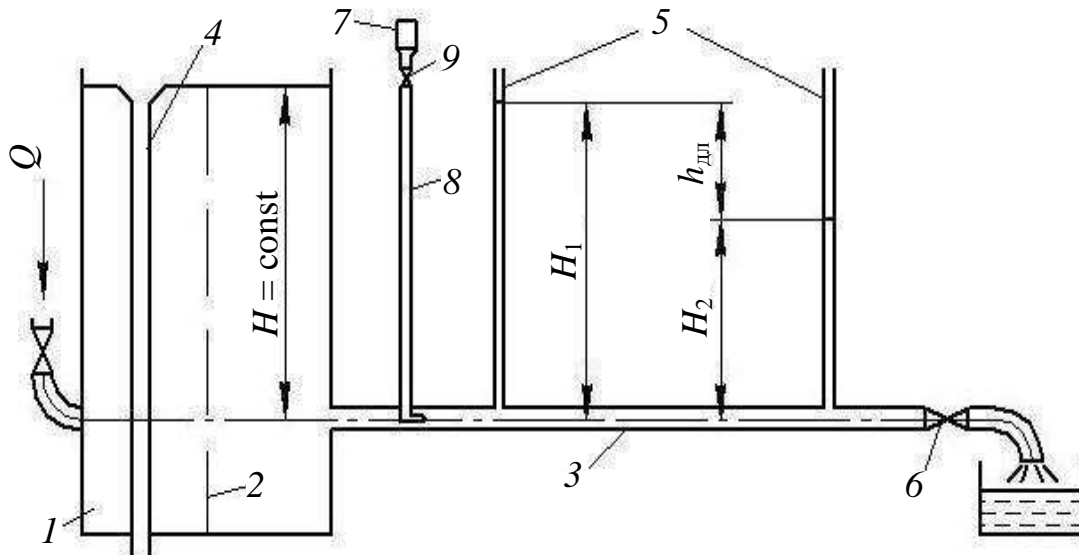


Рис. 5.3. Лабораторная установка

Температура жидкости измеряется термометром. На кронштейне установлен сосуд 7 с окрашенной жидкостью, которая по трубке 8 подается в основной трубопровод 3 при открытии зажима 9.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой.
2. Записать исходные данные: род жидкости; внутренний диаметр трубопровода, d ; температуру жидкости, t ; расстояние между пьезометрами, l .
3. Убедиться в том, что в пьезометрах отсутствует воздух (при $Q = 0$ показания всех пьезометров должны быть одинаковыми).
4. Кран 6 частично приоткрыть и установить небольшой расход.
5. Открыть зажим 9 для подачи окрашенной жидкости в трубопровод 3 и вести наблюдения за характером движения окрашенной струйки во всех опытах.
6. Снять показания пьезометров.
7. Замерить объем жидкости и время истечения.

8. Увеличить расход с помощью крана б и повторить все измерения.

9. Провести 5–6 опытов при ламинарном режиме и 5–6 опытов при турбулентном. Данные измерений и наблюдений занести в соответствующие графы таблицы 5.1.

Таблица 5.1

Результаты измерений и наблюдений

№ п/п	Отсчеты по пьезометрам, мм		Объем вытекшей жидкости $V, м^3$	Время наполнения мерного сосуда $t, с$	Расход жидкости $Q, м^3/с$	Средняя скорость $v, м/с$	Потери напора по длине $h_{дл}, мм$	Гидравлический уклон i	Число Re	Характер поведения окрашенной струйки	Режим движения
	H_1	H_2									

Обработка экспериментальных данных

1. Определить расход жидкости для каждого опыта по формуле $Q = V/t$.

2. Определить среднюю скорость по формуле $v = Q/S$, где S — площадь поперечного сечения трубопровода.

3. Определить потери напора по длине по разности показаний пьезометров: $h_{дл} = H_1 - H_2$.

4. Определить гидравлический уклон: $i = h_{дл}/l$.

5. Рассчитать кинематическую вязкость воды по формуле

$$\nu = \left[0,0178 / \left(1 + 0,0337t + 0,000221t^2 \right) \cdot 10^{-4} \right], м^2/с.$$

6. Определить число Re по формуле (5.1).

7. Построить график $\lg(h_{дл}) = f[\lg(Q)]$ и по тангенсам углов наклона линий к оси абсцисс определить показатели степени для ламинарного и турбулентного режимов.

Проверочный тест 5.1

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
1	Какое движение называется установившимся?	
	Движение, при котором скорость и давление являются функциями только координат	1.1

	Движение в закрытых руслах без свободной поверхности	1.2
	Движение, при котором скорость и давление являются функциями координат и времени	1.3
	Движение в руслах при наличии свободной поверхности	1.4

Продолжение теста 5.1

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
2	Какое движение жидкости соответствует ламинарному режиму?	
	Движение, при котором скорость по длине потока остается постоянной	2.1
	Движение, которое сопровождается интенсивным перемешиванием жидкости и пульсацией скоростей	2.2
	Слоистое движение без перемешивания жидкости и без пульсации скоростей и давлений	2.3
	Движение, при котором скорость и давление являются функциями координат	2.4
3	Зависит ли число Рейнольдса от температуры жидкости при постоянной скорости и диаметре трубопровода?	
	Число Рейнольдса не зависит от температуры	3.1
	Зависимость существует только при турбулентном режиме	3.2
	С увеличением температуры число Рейнольдса уменьшается	3.3
	С увеличением температуры число Рейнольдса увеличивается	3.4
4	Какое движение называется неустановившимся?	
	Движение в закрытых руслах без свободной поверхности	4.1

	Движение, при котором скорость и давление являются функциями координат и времени	4.2
	Движение, при котором скорость по длине потока одинаково	4.3
	Движение, при котором скорость и давление являются функциями только координат	4.4

Продолжение теста 5.1

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
5	Что такое гидравлический уклон?	
	Падение пьезометрической линии на единицу длины потока	5.1
	Потери напора на единицу длины	5.2
	Затраты удельной энергии потока жидкости на преодоление сил трения	5.3
	Потери напора на каком-то определенном участке трубы	5.4
6	Какова зависимость между потерями напора и средней скоростью при ламинарном режиме?	
	Потери пропорциональны скорости в первой степени	6.1
	Зависимость между ними отсутствует	6.2
	Потери пропорциональны скорости во второй степени	6.3
	Зависимость между ними отсутствует	6.4
7	Что является критерием для определения режима при напорном движении?	
	Критическое число Рейнольдса, равное 800	7.1
	Критическое число Рейнольдса, равное 1500	7.2
	Критическое число Рейнольдса, равное 1000	7.3
	Критическое число Рейнольдса, равное 2320	7.4
8	Зависит ли число Рейнольдса от скорости при постоянных диаметре и вязкости?	
	Зависит только при турбулентном режиме движения	8.1

	С увеличением скорости число Рейнольдса уменьшается	8.2
	С увеличением скорости число Рейнольдса увеличивается	8.3
	Скорость не оказывает никакого влияния на число Рейнольдса	8.4

Продолжение теста 5.1

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
9	Какова зависимость между потерями напора и средней скоростью при турбулентном режиме движения?	
	Зависимость между ними отсутствует	9.1
	Потери пропорциональны скорости в первой степени	9.2
	Потери пропорциональны скорости в степени 1,75–2,0	9.3
	Зависимость такая же, как и при ламинарном режиме	9.4
10	Зависит ли число Рейнольдса от диаметра трубы при постоянном расходе и вязкости?	
	Зависимость имеет место только при турбулентном режиме	10.1
	С увеличением диаметра число Рейнольдса уменьшается	10.2
	От диаметра трубы число Рейнольдса не зависит	10.3
	С увеличением диаметра число Рейнольдса увеличивается	10.4
11.	Какова размерность числа Рейнольдса?	
	Число Рейнольдса имеет размерность длины	11.1
	Число Рейнольдса величина безразмерная	11.2
	Число Рейнольдса имеет размерность скорости	11.3
	Число Рейнольдса имеет размерность кинематической вязкости	11.4
12	Какое движение называется неравномерным?	

	Движение, при котором поток ограничен со всех сторон твердыми стенками	12.1
	Движение, при котором скорость постоянна вдоль потока	12.2
	Движение, при котором имеет место пульсация скоростей	12.3
	Движение, при котором скорость изменяется по длине потока и (или) по направлению	12.4

Продолжение теста 5.1

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
13	Постоянно ли критическое число Рейнольдса для различных жидкостей?	
	Постоянно только для газов	13.1
	Постоянно для всех жидкостей	13.2
	Постоянно только для спиртов	13.3
	Постоянно только для воды	13.4
14	Каким образом можно определить среднюю скорость по расходу жидкости?	
	Она равна расходу, деленному на площадь сечения трубопровода	14.1
	По расходу жидкости средняя скорость не определяется	14.2
	Она равна расходу, деленному на гидравлический радиус сечения	14.3
	Она равна расходу, деленному на периметр сечения трубопровода	14.4
15	Как на лабораторной установке определить потери напора на горизонтальном участке трубы постоянного диаметра?	
	Потери равны разности показаний пьезометров, установленных в начале и в конце участка	15.1
	Потери можно рассчитать по формуле А. Дарси	15.2
	Потери на горизонтальном участке трубы постоянного диаметра отсутствуют	15.3
	Потери равны сумме показаний пьезометров, установленных в начале и в конце участка	15.4

16	Каким образом можно определить расход жидкости объемным способом?	
	Необходимо объем вытекшей жидкости разделить на время его истечения	16.1
	Нужно объем вытекшей жидкости разделить на диаметр трубы	16.2
	Следует объем вытекшей жидкости разделить на площадь поперечного (живого) сечения	16.3
	Он равен произведению объема вытекшей жидкости на время его вытекания	16.4

Продолжение теста 5.1

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
17	Как практически получить ламинарный и турбулентный режимы на опытном трубопроводе?	
	Нужно накладывать внешние возмущения на трубопровод	17.1
	Необходимо иметь трубопровод сложной конфигурации	17.2
	Следует постепенно увеличивать скорость движения жидкости	17.3
	Необходимо изменять наклон трубопровода	17.4
18	Как по графику, построенному в логарифмических координатах определить степень зависимости потерь напора от расхода (скорости)?	
	Показатель степени можно установить только для ламинарного режима движения	18.1
	Показатель степени равен тангенсу угла наклона прямой к оси абсцисс	18.2
	Показатель степени равен тангенсу угла наклона прямой к оси ординат	18.3
	Показатель степени по графику установить невозможно	18.4

19	Зависит ли число Рейнольдса от вязкости жидкости?	
	Зависимость имеет место только при турбулентном режиме	19.1
	Вязкость не оказывает никакого влияния на это число	19.2
	С увеличением вязкости число Рейнольдса уменьшается	19.3
	С увеличением вязкости число Рейнольдса увеличивается	19.4

Окончание теста 5.1

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
20	Какое движение принято считать равномерным?	
	Движение с постоянной скоростью вдоль потока	20.1
	Движение в руслах при наличии свободной поверхности	20.2
	Движение в закрытых руслах без свободной поверхности	20.3
	Движение, при котором скорость является функцией координат и времени	20.4

Примечание. Коды правильных ответов: 1.1, 2.3, 3.4, 4.2, 5.2, 6.1, 7.4, 8.3, 9.3, 10.2, 11.2, 12.4, 13.2, 14.1, 15.1, 16.1, 17.3, 18.2, 19.3, 20.1.

5.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ В ТРУБОПРОВОДАХ

Цели работы:

- определение экспериментальным путем коэффициента гидравлического трения трубопровода $\lambda_{оп}$ (коэффициента Дарси) при различных расходах жидкости;
- определение значения коэффициента λ_T по соответствующим эмпирическим формулам;

- сравнение опытного значения коэффициента гидравлического трения трубопровода со значением, вычисленным по формулам, и определение относительной погрешности.

Введение в тему

При движении потока реальной жидкости возникают силы гидравлического сопротивления (трения), тормозящие движение. Различают вязкостные и инерционные сопротивления. Вязкостные сопротивления возникают вследствие наличия у жидкости свойства сопротивляться при движении касательным усилиям. Силы вязкостного трения проявляют свое действие главным образом при ламинарном режиме движения.

При турбулентном режиме движения, кроме вязкостных, возникают также и инерционные сопротивления, вызываемые образованием вихрей и перемешиванием масс жидкости. С увеличением числа Рейнольдса влияние инерционных сопротивлений возрастает, и при развитом турбулентном режиме они становятся преобладающими.

На преодоление сил сопротивления затрачивается часть удельной энергии потока жидкости, которая называется потерей напора.

Потери напора на участке равномерного потока ($d = \text{const}$) называются потерями напора по длине $h_{\text{дл}}$. Количественное определение потерь напора $h_{\text{дл}}$ является одной из важнейших задач гидродинамики, без решения которой невозможно практическое использование уравнения Д. Бернулли.

При движении жидкости в напорном цилиндрическом трубопроводе потери по длине можно определить опытным и расчетным путем.

Если воспользоваться уравнением Бернулли, записав его для сечений 1-1 и 2-2 (рис. 5.4) относительно плоскости отсчета, совпадающей с осью трубопровода, то получим, что $h_{\text{дл}} = H_1 - H_2$, т. е. потери напора по длине можно определить по разности показаний пьезометров (манометров), установленных на границах опытного участка.

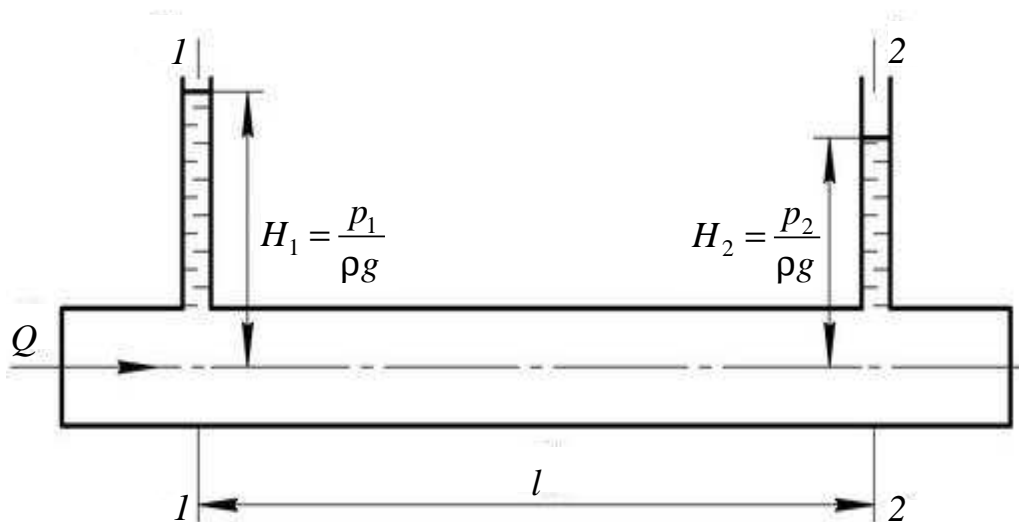


Рис. 5.4. Схема участка трубопровода

При теоретических расчетах величину потерь напора по длине определяют по формуле Дарси – Вейсбаха:

$$h_{\text{дл}} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}, \quad (5.3)$$

где λ — коэффициент гидравлического трения (коэффициент Дарси); l — длина трубопровода; d — внутренний диаметр; v — средняя скорость потока; g — ускорение силы тяжести.

Коэффициент λ зависит от режима движения жидкости (числа Re), относительной шероховатости ($\epsilon = \Delta_s / d$, где Δ_s — эквивалентная абсолютная шероховатость стенок трубы, которая по гидравлическому сопротивлению равноценна абсолютной шероховатости; ее численные значения для труб, изготовленных из различных материалов, приводятся в справочной литературе). Влияние указанных факторов на величину коэффициента λ при различных режимах проявляется по-разному.

При ламинарном режиме ($Re < 2320$) шероховатость стенок не оказывает влияния на сопротивление движению и $\lambda = f(Re)$. В этом случае λ определяется по формуле $\lambda = 64 / Re$.

При турбулентном режиме в связи с наличием у стенок ламинарного (или вязкостного) подслоя толщиной $\delta = 30d / Re\lambda^{0,5}$ в

зависимости от соотношения между δ и высотой среднего выступа шероховатой поверхности Δ_3 , различают трубы гидравлически гладкие и гидравлически шероховатые.

Если $\delta > \Delta_3$, то ламинарный подслой как бы сглаживает шероховатость стенки, поток не испытывает дополнительных завихрений от шероховатости. Такая труба называется гидравлически гладкой.

Если $\delta < \Delta_3$, выступы шероховатости выходят за пределы ламинарного подслоя и при их обтекании возникают вихри, увеличивающие потери напора. В этом случае труба называется гидравлически шероховатой.

В зоне гидравлически гладких труб ($\delta > \Delta_3$) при значениях $2320 < Re < 20 / \epsilon$, коэффициент λ зависит от числа Рейнольдса ($\lambda = f(Re)$) и определяется по формуле Блазиуса $\lambda = 0,3164 / Re^{0,25}$.

В зоне смешанного сопротивления, границы которой находятся в пределах $20 / \epsilon < Re < 500 / \epsilon$, на величину λ оказывают влияние два фактора: число Re и относительная шероховатость ϵ . Для определения λ можно пользоваться формулой Альтшуля $\lambda = 0,11(\epsilon + 68 / Re)^{0,25}$.

В зоне квадратичного сопротивления, когда практически отсутствует ламинарный подслой ($\delta \ll \Delta_3$), коэффициент λ уже не зависит от Re , а определяется лишь относительной шероховатостью. Наличие этой зоны обусловлено соотношением $Re > 500 / \epsilon$ и коэффициент λ можно определять по формуле Шифринсона $\lambda = 0,11\epsilon^{0,25}$.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис. 5.5) состоит из напорного бака 1 с успокоительной решеткой 2, в котором поддерживается постоянный напор $H = \text{const}$ за счет перелива жидкости через сливную трубу 3. К напорному баку присоединена труба 4 определенного диаметра, на конце которой установлен регулировочный кран 5.

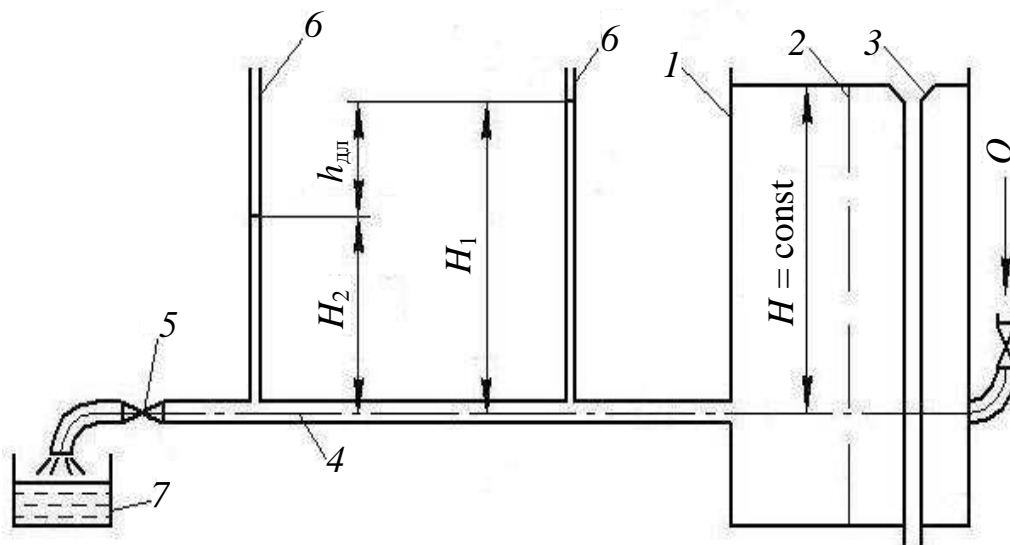


Рис. 5.5. Схема лабораторной установки

Для измерения напора в расчетных сечениях установлены пьезометры 6. Измерение объема вытекающей жидкости проводится мерным баком 7, а времени истечения — секундомером.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой.
2. Записать исходные данные: род жидкости и ее температуру; внутренний диаметр трубопровода d ; длину опытного участка (расстояние между пьезометрами) l ; эквивалентную шероховатость стенок трубы Δ_3 ; площадь мерного бака S_6 .
3. Убедиться в отсутствии в пьезометрах 6 воздуха (при $Q = 0$ их показания должны быть одинаковыми).
4. Установить необходимый уровень жидкости в напорном баке 1 (имеет место постоянный перелив через сливную трубу 3).
5. Открыть полностью кран 5 и провести замеры объема вытекшей жидкости и времени ее истечения, а также снять показания пьезометров.
6. Прикрывая кран 5, установить последовательно указанное преподавателем число различных расходов и провести те же измерения. Результаты измерений и расчетов занести в таблицу 5.2.

Таблица 5.2

№ п/ п	Отсчеты по пьезометра м, мм		Глубина воды, h , м	Объем вытекшей жидкости, V , м ³	Время наполнения, t , с	Расход жидкости, Q , м ³ /с	Средняя скорость, v , м/с	Число Re	Потери напора по длине, $h_{дл}$, мм	Коэф. гидр. сопротив., λ		Отклонение, %
	H_1	H_2								опыт. ($\lambda_{оп}$)	теор. ($\lambda_{т}$)	

7. Закрывать полностью регулировочный кран и выключить насосную установку.

Обработка экспериментальных данных

1. Определить объем вытекшей жидкости $V = S_6 h$.
2. Определить расход жидкости по трубопроводу $Q = V / t$.
3. Определить среднюю скорость движения жидкости $v = Q / S$, где S — площадь поперечного сечения трубопровода.
4. Определить число Рейнольдса $Re = vd / \nu$, где ν — кинематическая вязкость жидкости, определяемая по эмпирическим формулам, таблицам или графикам в зависимости от температуры.
5. Определить потери напора по длине трубопровода $h_{дл} = H_1 - H_2$.
6. Из формулы Дарси – Вейсбаха определить опытное значение коэффициента гидравлического трения $\lambda_{оп}$.
7. Установить, в какой зоне сопротивления происходит движение жидкости в опытах (путем сравнения опытного числа Re с граничными). В соответствии с установленной зоной сопротивления принять формулу для вычисления $\lambda_{т}$ и определить его значение.
8. Определить относительную погрешность $[(\lambda_{оп} - \lambda_{т}) / \lambda_{т}] 100 \%$.

Проверочный тест 5.2

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
1	Что является причиной возникновения потерь по длине?	

	Гидродинамическое давление в движущейся жидкости	1.1
	Наличие сил трения в движущейся жидкости	1.2
	Наличие различных препятствий на пути движущейся жидкости	1.3
	Перепад давлений между расчетными сечениями	1.4
2	Что является критерием для определения режима движения в напорных трубопроводах?	
	Критическое число Рейнольдса, величина которого равна 1500	2.1
	Критическое число Рейнольдса, величина которого равна 580	2.2
	Критическое число Рейнольдса, величина которого равна 2320	2.3
	Критическое число Рейнольдса, величина которого равна 800	2.4
3	Как определить среднюю скорость по расходу жидкости?	
	По расходу жидкости среднюю скорость определить невозможно	3.1
	Необходимо расход жидкости разделить на площадь поперечного (живого) сечения	3.2
	Нужно расход жидкости разделить на диаметр трубопровода	3.3
	Следует расход жидкости разделить на гидравлический радиус	3.4

Продолжение теста 5.2

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
4	Функцией каких величин является коэффициент потерь по длине при ламинарном режиме?	
	Функцией геометрических размеров трубопровода	4.1
	Функцией абсолютной шероховатости стенок трубопровода	4.2

	Функцией скорости движения жидкости в трубопроводе	4.3
	Функцией только числа Рейнольдса	4.4
5	По какой зависимости определяют потери по длине?	
	$h_{\text{дл}} = av^n$	5.1
	$h_{\text{дл}} = \lambda_{\text{экв}} v^2 / d 2g$	5.2
	$h_{\text{дл}} = \zeta v^2 / 2g$	5.3
	$h_{\text{дл}} = \lambda l v^2 / d 2g$	5.4
6	Каким параметром характеризуют абсолютную шероховатость стенок трубопроводов?	
	Величиной отношения диаметра трубы к высоте среднего выступа шероховатой поверхности $\Delta_{\text{экв}}$	6.1
	Величиной среднего выступа шероховатой поверхности $\Delta_{\text{экв}}$	6.2
	Величиной отношения среднего выступа шероховатой поверхности $\Delta_{\text{экв}}$ к диаметру трубы d , т. е. $\Delta_{\text{экв}} / d$	6.3
	Величиной отношения среднего выступа шероховатой поверхности $\Delta_{\text{экв}}$ к радиусу трубы r , т. е. $\Delta_{\text{экв}} / r$	6.4

Продолжение теста 5.2

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
7	В каком случае при турбулентном режиме будет иметь место зона гидравлически гладких труб?	
	Если толщина ламинарной пленки будет меньше высоты среднего выступа шероховатой поверхности	7.1

	Если толщина ламинарной пленки будет равна высоте среднего выступа шероховатой поверхности	7.2
	В случае движения жидкости с постоянной скоростью	7.3
	Если толщина ламинарной пленки будет больше высоты среднего выступа шероховатой поверхности	7.4
8	Функцией каких величин является коэффициент потерь по длине в шероховатой (квадратичной) области сопротивления?	
	Функцией только числа Re	8.1
	Функцией только относительной шероховатости	8.2
	Функцией абсолютной шероховатости	8.3
	Функцией числа Re и относительной шероховатости	8.4
9	Что такое относительная шероховатость труб?	
	Это отношение абсолютной шероховатости к радиусу или диаметру трубы	9.1
	Это отношение радиуса трубы к абсолютной шероховатости	9.2
	Это величина, которая характеризует толщину ламинарного слоя	9.3
	Это высота среднего выступа шероховатой поверхности	9.4

Продолжение теста 5.2

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
10	В каком случае при турбулентном режиме имеет место зона смешанного сопротивления (переходная зона)?	
	В случае движения жидкости по горизонтальному участку трубы постоянного диаметра	10.1

	Если толщина ламинарной пленки меньше высоты среднего выступа шероховатой поверхности	10.2
	Если толщина ламинарной пленки равна высоте среднего выступа шероховатой поверхности	10.3
	Если толщина ламинарной пленки больше высоты среднего выступа шероховатой поверхности	10.4
11	Функцией каких величин является коэффициент потерь по длине в гидравлически гладкой области (зоне) сопротивления?	
	Функцией только относительной шероховатости	11.1
	Функцией только числа Re	11.2
	Функцией числа Re и относительной шероховатости	11.3
	Функцией абсолютной шероховатости	11.4
12	Оказывает ли влияние длина трубопровода на величину потерь по длине?	
	Длина трубопровода не оказывает никакого влияния	12.1
	С увеличением длины потери по длине возрастают	12.2
	С увеличением длины потери по длине снижаются	12.3
	Влияние длины сказывается только при турбулентном режиме	12.4
13	По какой формуле определяют коэффициент потерь по длине в области гидравлически гладких труб?	
	$\lambda = 0,3164 / Re^{0,25}$	13.1
	$\lambda = 0,11(\Delta_{эКВ} / d)^{0,25}$	13.2
	$\lambda = 64 / Re$	13.3
	$\lambda = 0,11(\Delta_{эКВ} / d + 68 / Re)^{0,25}$	13.4

Продолжение теста 5.2

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	

14	В каком случае при турбулентном режиме будет иметь место шероховатая (квадратичная) зона сопротивления?	
	Если толщина ламинарной пленки больше высоты среднего выступа шероховатой поверхности	14.1
	Если толщина ламинарной пленки равна высоте среднего выступа шероховатой поверхности	14.2
	Если толщина ламинарной пленки меньше высоты среднего выступа шероховатой поверхности	14.3
	В случае движения жидкости по горизонтальному участку трубы постоянного диаметра	14.4
15	По какой формуле определяют коэффициент потерь по длине в области смешанного сопротивления (переходной зоне)?	
	$\lambda = 0,11(\Delta_{\text{эКВ}} / d + 68 / \text{Re})^{0,25}$	15.1
	$\lambda = 0,11(\Delta_{\text{эКВ}} / d)^{0,25}$	15.2
	$\lambda = 0,3164 / \text{Re}^{0,25}$	15.3
	$\lambda = 64 / \text{Re}$	15.4
16	Какова зависимость потерь напора от расхода (средней скорости) при турбулентном режиме?	
	Расход (средняя скорость) не оказывает никакого влияния на величину потерь	16.1
	Потери напора пропорциональны расходу (средней скорости) в первой степени	16.2
	Потери напора пропорциональны расходу (средней скорости) в степени 1,75–2,0	16.3
	Зависимость имеет место только при ламинарном режиме	16.4

Продолжение теста 5.2

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
17	Функцией каких величин является коэффициент потерь по длине в области смешанного сопротивления (переходной зоне)?	
	Функцией только абсолютной шероховатости	17.1
	Функцией числа Re и относительной шероховатости	17.2
	Функцией числа Re	17.3
	Функцией относительной шероховатости	17.4
18	Как можно установить наличие той или иной области сопротивления при турбулентном режиме?	
	По значению абсолютной шероховатости	18.1
	По значению относительной шероховатости	18.2
	По значению средней скорости движения жидкости	18.3
	По значению числа Re , сравнивая его с граничными числами Re	18.4
19	Как на лабораторной установке определяют потери по длине на горизонтальном участке трубы постоянного диаметра?	
	Они равны разности показаний пьезометров, установленных в начале и в конце опытного участка	19.1
	Они равны сумме показаний пьезометров, установленных в начале и в конце опытного участка	19.2
	Они равны величине скоростного напора на участке трубы	19.3
	Они равны произведению гидравлического уклона на длину участка	19.4

Окончание теста 5.2

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
20	Как определить расход жидкости объемным способом?	
	Необходимо объем вытекшей жидкости умножить на время ее вытекания	20.1
	Нужно объем вытекшей жидкости разделить на время ее вытекания	20.2
	Следует объем вытекшей жидкости разделить на периметр поперечного сечения	20.3
	Необходимо объем вытекшей жидкости разделить на площадь поперечного (живого) сечения	20.4

Примечание. Коды правильных ответов: 1.2, 2.3, 3.2, 4.4, 5.4, 6.2, 7.4, 8.2, 9.1, 10.3, 11.2, 12.2, 13.1, 14.3, 15.1, 16.3, 17.2, 18.4, 19.1, 20.2.

5.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Цели работы:

- определение опытным путем коэффициентов местного сопротивления $\zeta_{оп}$;
- сопоставление экспериментальных значений коэффициентов $\zeta_{оп}$ со справочными значениями $\zeta_{ф}$.

Введение в тему

При движении реальной жидкости, кроме потерь на трение по длине, могут быть местные потери напора, которые возникают вследствие изменения размеров или конфигурации трубопровода (местные сопротивления). К местным сопротивлениям относятся расширение и сужение трубопровода, колена, тройники, повороты, краны, вентили и др. Проходя через местное сопротивление, поток деформируется, в результате чего происходит отрыв потока от стенки с образованием вихревых зон, которые и являются причиной возникновения местных потерь напора.

Местные потери напора (h_m) определяют по формуле Вейсбаха

$$h_m = \zeta \frac{v^2}{2g}, \quad (5.4)$$

где ζ — коэффициент местного сопротивления; v — средняя скорости движения жидкости в трубопроводе за местным сопротивлением.

Коэффициент местного сопротивления ζ зависит не только от вида местного сопротивления, но и от режима движения жидкости, т. е. от числа Re . При практических расчетах считают, что в турбулентном режиме этот коэффициент зависит только от вида местного сопротивления.

Коэффициент ζ для скоростного напора за местным сопротивлением можно определить по эмпирическим формулам и по справочным данным:

а) внезапное расширение потока: коэффициент $\zeta_{вн.р}$ зависит от размеров трубопровода и определяется по формуле

$$\zeta_{вн.р} = \left[\left(d_2/d_1 \right)^2 - 1 \right]^2, \quad (5.5)$$

где d_1 и d_2 — внутренний диаметр трубопровода до и после расширения;

б) внезапное сужение потока: коэффициент $\zeta_{вн.с}$ зависит от размеров трубопровода и рассчитывается по формуле

$$\zeta_{вн.с} = 0,5 \left[1 - \left(d_2/d_1 \right)^2 \right]; \quad (5.6)$$

в) резкий поворот без закругления (колени): коэффициент зависит от угла поворота и вычисляется по формуле

$$\zeta_k = 0,946 \sin^2 \frac{\alpha}{2} + 2,047 \sin^4 \frac{\alpha}{2}; \quad (5.7)$$

г) диафрагма в трубе постоянного сечения: коэффициент зависит от степени сужения трубы $S_d / S_{тр}$:

$S_d / S_{тр}$	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
ζ_d	1050	245	51,5	18,20	8,25	4,00	2,00	0,97	0,42	0,13	0

д) вентиль: коэффициент ζ_v зависит от степени открытия его a / d , где d — диаметр трубопровода; a — величина перекрытия трубопровода:

a / d	Полное	1/3	1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8
---------	--------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

	открытие											
$\zeta_{\text{в}}$	0	0,07	0,26	0,81	2,06	5,52	17,0	97,8				

е) пробковый кран: коэффициент крана ($\zeta_{\text{кр}}$) зависит от угла поворота (α), град:

α	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	65
$\zeta_{\text{кр}}$	0,05	0,29	0,75	1,56	3,10	5,47	9,68	17,3	31,2	52,6	106	486

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис. 5.6) состоит из напорного бака 1 с успокоительной решеткой 2 и трубопровода 3 с местным сопротивлением 4.

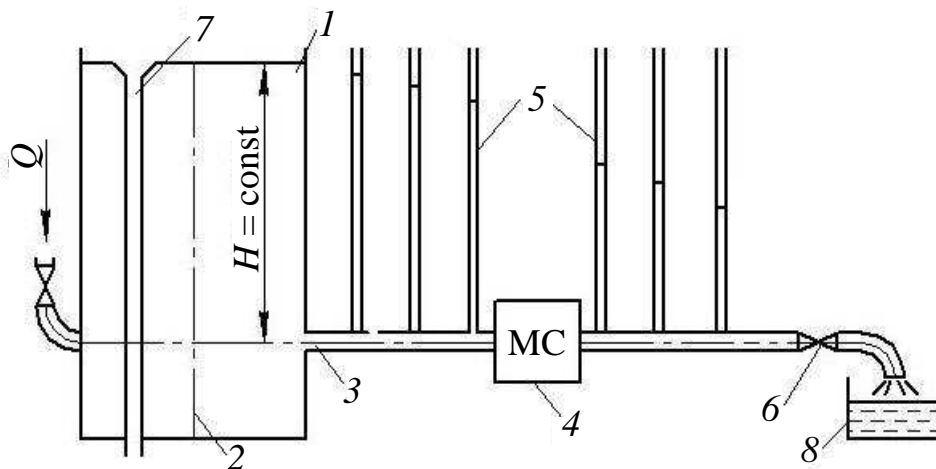


Рис. 5.6. Лабораторная установка

На трубопроводе до местного сопротивления и после него установлены пьезометры 5 для измерения пьезометрического напора в заданных сечениях. На конце трубопровода имеется регулировочный кран б. Постоянный напор в баке 1 обеспечивается за счет перелива жидкости через сливную трубу 7. Для измерения расхода имеется мерный бак 8 и секундомер.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой.
2. Записать исходные данные: род жидкости; внутренний диаметр трубопровода до местного сопротивления d_1 ; внутренний диаметр трубопровода после местного сопротивления d_2 ; площадь мерного бака S_6 ; расстояние между пьезометрами.

3. Установить необходимый уровень жидкости в напорном баке.
4. Убедиться в том, что в пьезометрах отсутствует воздух (при $Q = 0$ показания всех пьезометров должны быть одинаковыми).
5. Открыть кран b и произвольно установить расход жидкости.
6. Снять показания пьезометров и занести их в таблицу 5.3.

Таблица 5.3

Вид сопротивления	Показания пьезометров					
	до сопротивления			после сопротивления		

6. Определить объем вытекшей воды и время истечения. Данные измерения занести в таблицу 5.4.

Обработка экспериментальных данных

1. Определить объем жидкости в мерном баке $V = S_6 h$.
2. Определить расход жидкости по формуле $Q = V/t$, где t — время заполнения мерного бака.
3. Определить среднюю скорость движения жидкости в заданных сечениях по формуле $v = Q/S$.

Таблица 5.4

№ п/п	Отсчеты по пьезометрам, мм		Глубина воды, h , м	Объем жидкости, V , м ³	Время наполнения, t , с	Расход Q , м ³ /с	Средняя скорость, м/с		Скоростной напор, м		Коэф. местн. сопротив.		Отклонение, %
	H_1	H_2					v_1	v_2	$v_1^2/2g$	$v_2^2/2g$	опыт. $\zeta_{оп}$	теор. $\zeta_{т}$	

4. Определить величину скоростного напора $v^2/2g$.
5. Вычертить на миллиметровой бумаге в масштабе участок трубопровода с местным сопротивлением и показать на ней места установки пьезометров. От оси трубопровода отложить показания

пъезометров и построить пъезометрическую линию ($P-P$). От линии $P-P$ отложить величину $\alpha v^2 / 2g$ и построить линию полного напора ($E-E$). Линия, соответствующая полному напору в начальном сечении, будет линией начального напора. Величина падения линии полного напора на местном сопротивлении и будет h_m .

6. Определить опытный коэффициент местного сопротивления из формулы (5.4).

7. Вычислить теоретический коэффициент местного сопротивления $\zeta_{\text{ф}}$.

8. Вычислить процент отклонения $\zeta_{\text{оп}}$ от $\zeta_{\text{ф}}$.

Проверочный тест 5.3

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
1	Какие сопротивления называются местными?	
	Сопротивления, возникающие вследствие изменения размеров или конфигурации трубопровода	1.1
	Сопротивления, которые возникают при движении жидкости по горизонтальным трубопроводам постоянного диаметра	1.2
	Сопротивления, которые возникают при движении жидкости по вертикальным трубопроводам постоянного диаметра	1.3
	Сопротивления, которые возникают при движении жидкости с постоянной скоростью	1.4
2	Как опытным путем определить потери напора в местных сопротивлениях?	
	Необходимо построить диаграмму Бернулли и определить их графическим способом	2.1
	По формуле Дарси – Вейсбаха: $h_m = \lambda v^2 / d 2g$	2.2
	По формуле Вейсбаха: $h_m = \zeta v^2 / 2g$	2.3

	Их всегда определяют по разности показаний пьезометров, которые установлены до и после местного сопротивления	2.4
--	---	-----

Продолжение теста 5.3

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
3	От чего зависит коэффициент местного сопротивления резкого поворота трубы?	
	От средней скорости движения жидкости в трубе	3.1
	От расхода жидкости в трубе	3.2
	От угла поворота трубы	3.3
	От геометрических размеров трубы	3.4
4	Как графически определить местные потери напора?	
	Необходимо построить только линию пьезометрического напора. Показание пьезометра в любом сечении будет соответствовать местным потерям	4.1
	Нужно построить только линию полного напора. Расстояние от оси трубопровода до линии полного напора будет соответствовать местным потерям	4.2
	Величина падения линии полного напора в местном сопротивлении с учетом масштаба построения и будет соответствовать местным потерям	4.3
	Разность между линиями полного и пьезометрического напоров в месте установки местного сопротивления будет равна местным потерям	4.4
5	Какие бывают виды местных сопротивлений?	
	Любая горизонтальная труба постоянного диаметра представляет собой местное сопротивление	5.1

	Вертикальные трубопроводы постоянных диаметров представляют собой местные сопротивления	5.2
	К местным сопротивлениям относят расширения и сужения труб, колена, тройники, повороты, краны, вентили и другую арматуру трубопроводов	5.3
	Классификация местных сопротивлений вообще отсутствует	5.4

Продолжение теста 5.3

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
6	По какой формуле определяют потери напора в местных сопротивлениях?	
	По формуле Дарси – Вейсбаха: $h_m = \lambda l v^2 / d 2g$	6.1
	По формуле Вейсбаха: $h_m = \zeta v^2 / 2g$, где v — скорость за местным сопротивлением	6.2
	По зависимости $h_m = (Q^2 / K^2) L$	6.3
	По формуле $h_m = (\lambda l / d + \zeta) \cdot (v^2 / 2g)$	6.4
7	От чего зависит коэффициент местного сопротивления диафрагмы?	
	От степени сужения трубы, которая определяется соотношением $S_{\text{диаф}} / S_{\text{труб}}$	7.1
	От средней скорости движения жидкости	7.2
	От расхода жидкости по трубе	7.3
	От рода жидкости, перемещаемой по трубе	7.4
8	Как изменится показание пьезометра после внезапного расширения потока?	
	Показания пьезометра не изменятся	8.1
	Показание пьезометра увеличится по сравнению с показанием пьезометра до расширения	8.2
	Показание пьезометра уменьшится по сравнению с показанием пьезометра до расширения	8.3
	Изменение геометрических размеров трубопровода не оказывает никакого влияния на показания пьезометров	8.4

9	Как можно уменьшить потери напора при расширении трубопровода?	
	Необходимо увеличить расход жидкости по трубопроводу	9.1
	Следует увеличить температуру перекачиваемой жидкости	9.2
	Нужно уменьшить скорость движения жидкости через местное сопротивление	9.3
	Необходимо увеличить скорость движения жидкости через местное сопротивление	9.4

Продолжение теста 5.3

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
10	От каких факторов зависит коэффициент местных сопротивлений?	
	От вида местного сопротивления и числа Re	10.1
	От средней скорости движения жидкости через него	10.2
	Только от вида сопротивления	10.3
	Только от режима движения жидкости	10.4
11	От каких параметров зависит коэффициент местного сопротивления для внезапного расширения и сужения потока?	
	От расхода жидкости через местное сопротивление	11.1
	От материала труб, из которого оно изготовлено	11.2
	От рода жидкости, протекающей через местное сопротивление	11.3
	От соотношения внутренних диаметров трубопроводов в узком и широком сечениях	11.4
12	Как построить линию пьезометрического напора?	
	Необходимо знать только величину скоростного напора	12.1
	Нужно показания пьезометров отложить в масштабе от оси трубопровода в местах их установки и соединить все точки линией	12.2
	Следует показания пьезометров в сечениях отложить от линии начального напора	12.3

	Необходимо показания пьезометров в сечениях отложить от линии полного напора	12.4
13	В чем состоит физический смысл коэффициента ζ?	
	Он характеризует местные потери на единицу скоростного напора	13.1
	Он характеризует местные потери по всей длине трубопровода	13.2
	Он характеризует местные потери на определенном участке	13.3
	Он характеризует потери по длине для данного местного сопротивления	13.4

Продолжение теста 5.3

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
14	Какую размерность имеет величина скоростного напора?	
	Скоростной напор — величина безразмерная	14.1
	Величина скоростного напора имеет размерность ускорения (м/с^2)	14.2
	Скоростной напор имеет размерность скорости (м/с)	14.3
	Скоростной напор имеет линейную размерность (м, см, мм)	14.4
15	Как построить линию полного напора?	
	Необходимо в местах установки пьезометров отложить в масштабе от оси трубопровода их показания и величину скоростных напоров $\alpha v^2 / 2g$, полученные точки соединить линией	15.1
	Нужно в местах установки пьезометров отложить в масштабе от оси трубопровода их показания и соединить точки линией	15.2
	Следует в местах установки пьезометров отложить в масштабе от оси трубопровода величину скоростных напоров в сечениях и соединить точки линией	15.3
	Линия полного напора соответствует показаниям пьезометров, установленных в различных сечениях трубопровода	15.4

16	Как изменится показание пьезометра после внезапного сужения потока?	
	Показания пьезометра не изменятся	16.1
	Показание пьезометра уменьшится по сравнению с показанием пьезометра до расширения	16.2
	Показание пьезометра увеличится по сравнению с показанием пьезометра до расширения	16.3
	Изменение геометрических размеров трубопровода не оказывает никакого влияния на показания пьезометров	16.4

Продолжение теста 5.3

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
17	От чего зависит коэффициент местного сопротивления колена?	
	Его величина зависит от скорости движения жидкости через него	17.1
	Значение коэффициента зависит от расхода жидкости через него	17.2
	Его величина зависит от геометрических размеров трубопровода	17.3
	Его величина зависит от угла его поворота	17.4
18	Как определяют расход жидкости в трубопроводе при проведении опытов?	
	Он равен произведению объема вытекшей жидкости на время его истечения	18.1
	Он равен произведению средней скорости на периметр трубопровода	18.2
	Он равен объему вытекшей жидкости, деленному на время истечения этого объема	18.3
	Он равен объему вытекшей жидкости, деленному на площадь поперечного сечения трубопровода	18.4

19	Как определить среднюю скорость движения жидкости в трубопроводе?	
	Средняя скорость равна расходу жидкости в трубопроводе, деленному на площадь его поперечного сечения	19.1
	Ее определяют как частное от деления расхода жидкости на периметр трубопровода	19.2
	Средняя скорость равна расходу жидкости в трубопроводе, умноженному на площадь его поперечного сечения	19.3
	Она равна объему вытекшей жидкости, деленному на время его истечения	19.4

Окончание теста 5.3

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
20	Изменится ли расход, если увеличить диаметр трубопровода?	
	Расход жидкости по трубопроводу в этом случае увеличится	20.1
	Расход жидкости по трубопроводу в этом случае не изменится	20.2
	Расход жидкости по трубопроводу в этом случае уменьшится	20.3
	Расход жидкости по трубопроводу в этом случае резко возрастет, а затем установится его первоначальное значение	20.4

Примечание. Коды правильных ответов: 1.1, 2.1, 3.3, 4.3, 5.3, 6.2, 7.1, 8.2, 9.4, 10.1, 11.4, 12.2, 13.1, 14.4, 15.1, 16.2, 17.4, 18.3, 19.1, 20.2.

5.4. ПОСТРОЕНИЕ ЭЩЮРЫ СКОРОСТЕЙ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА В КРУГЛОЙ ТРУБЕ

Цели работы:

- определение значения усредненных местных продольных скоростей в точках, расположенных на различном расстоянии от стенки трубы;
- построение эпюры скоростей и определение средней скорости;
- установление режима движения, для которого построена эпюра скоростей;
- нахождение отношения средней скорости к максимальной;
- определение расхода воздуха по трубопроводу;
- нахождение ординаты усредненной местной скорости, в которой ее значение численно равно средней скорости в данном живом сечении, и определение ее величины;
- определение значения коэффициента Кориолиса α .

Введение в тему

Скорость движения жидкости (газа) в трубопроводе неодинакова в различных точках сечения потока, и ее распределение зависит от режима движения.

При турбулентном режиме отдельные частицы жидкости совершают беспорядочные движения по сложным траекториям, что приводит к интенсивному продольному перемешиванию частиц жидкости. Мгновенная скорость движения частиц здесь беспорядочно изменяется во времени, как по величине, так и по направлению, т. е. пульсирует. В этом случае вместо переменных по времени мгновенных значений скоростей принято рассматривать их усредненное значение за достаточно длительный промежуток времени. При турбулентном режиме движения форма эпюры скоростей, а также коэффициент k поля скоростей, представляющий собой отношение средней скорости v к максимальной u_{\max} зависят от числа Re . С увеличением числа Re в потоке происходят интенсивные поперечные перемещения частиц, что приводит к выравниванию скорости по сечению и увеличению коэффициента k , значение которого равно $k = 0,8-0,87$.

Характеристикой степени неравномерности распределения местных скоростей в живом сечении потока является коэффициент Кориолиса α — безразмерная величина, равная отношению кинетической энергии массы жидкости, протекающей за некоторый промежуток времени через данное живое сечение потока, к условной кинетической энергии, подсчитанной в предположении, что во всех

точках живого сечения площадью S величины местной скорости u одинаковы и равны средней скорости v .

Коэффициент Кориолиса определяется выражением

$$\alpha = \int_S u^3 dS / v^3 S$$

или приближенно

$$\alpha = \sum_i u_i^3 \Delta S_i / v^3 S.$$

При проведении гидравлических расчетов используют значение средней скорости потока (v). Средняя скорость — это фиктивная величина, принятая одинаковой для всего сечения потока, произведение которой на площадь сечения дает действительный расход. Ее значение можно определить двумя способами: по расходу жидкости $v = Q / S$ или по эпюре скоростей. Для определения средней скорости по эпюре скоростей производят измерение скоростей в различных точках поперечного сечения трубопровода, для чего чаще всего используют скоростную (напорную) трубку Пито – Прандтля (рис. 5.7). Она состоит из двух трубок — внутренней 1 и наружной 2.

Внутренняя, открытая с торца и установленная навстречу потоку, воспринимает полный напор, равный сумме статического и скоростного (динамического) напоров.

Наружная трубка, имеющая отверстия на боковой поверхности, воспринимает только статический напор. По разности $H_{\text{общ}}$ и $H_{\text{ст}}$ определяют скоростной (динамический) напор H , для чего концы трубок (плюс и минус) присоединяют к дифференциальному микроманометру. Из формулы $u \approx \sqrt{2gH}$ определяют значение местной усредненной скорости для точки замера.

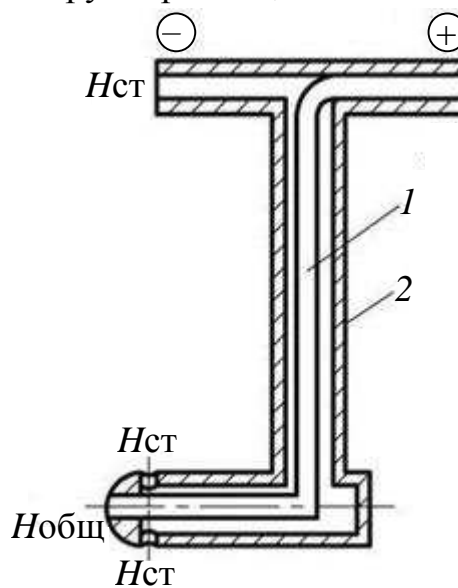


Рис. 5.7. Трубка Пито – Прандтля

Для определения средней скорости v необходимо провести ряд замеров в разных точках поперечного сечения трубопровода. Если полученные в результате измерений значения скоростей отложить в масштабе на эскизе продольного разреза трубопровода в точках, соответствующих точкам замера, и соединить концы векторов скоростей плавной кривой, то получим так называемую эпюру (профиль, поле) скоростей (рис. 5.8).

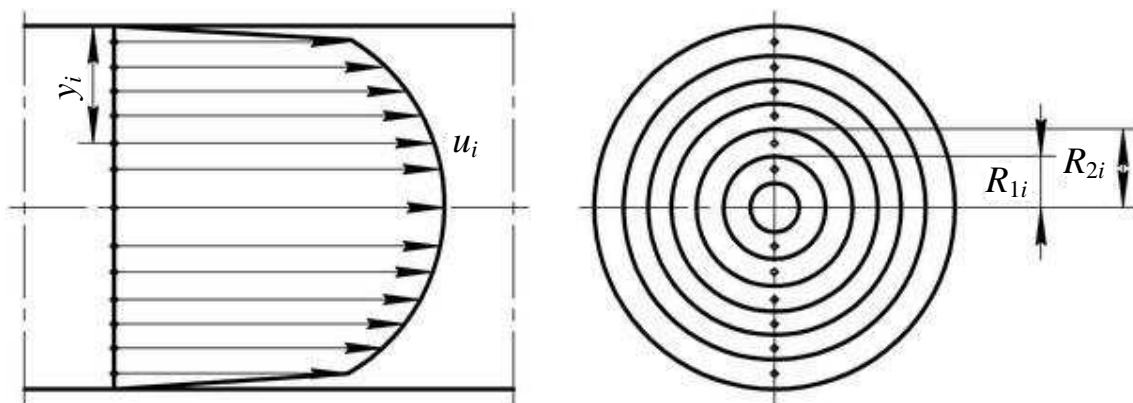


Рис. 5.8. Эпюра скоростей в круглой трубе

Среднюю скорость по эпюре скоростей находят из соотношения

$$v = \frac{\sum_i \Delta Q_i}{\sum_i \Delta S_i},$$

где $\sum_i \Delta Q_i$ — расход, равный сумме расходов через кольцевые струи;

$\sum_i \Delta S_i$ — площадь поперечного сечения.

Расход через каждую кольцевую струю определяют по зависимости $\Delta Q_i = u_i \pi (R_{i1}^2 - R_{i2}^2)$, где u_i — усредненная местная скорость в центре тяжести струи; R_{i1} и R_{i2} — соответственно больший и меньший радиусы струи.

В точках живого сечения потока, отстоящих от стенок трубопровода на расстоянии y_0 , усредненная местная скорость u численно равна средней скорости v в данном живом сечении. В цилиндрических трубах, независимо от диаметра и шероховатости внутренней поверхности, при турбулентном режиме по ГОСТ 8.631-79 $y_0 = (0,242 \pm 0,013)R$. Поместив трубку в эту точку, можно измерить величину скоростного напора и определить значение, соответствующее средней скорости.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис. 5.9) состоит из вентилятора 1, имеющего привод от регулируемого электродвигателя, прозрачного трубопровода 2 диаметром 140 мм, скоростной трубки Пито – Прандтля 3, приспособления 4 для перемещения ее в различные точки поперечного сечения трубы, микроманометра 5, предназначенного для измерения величины скоростного напора.

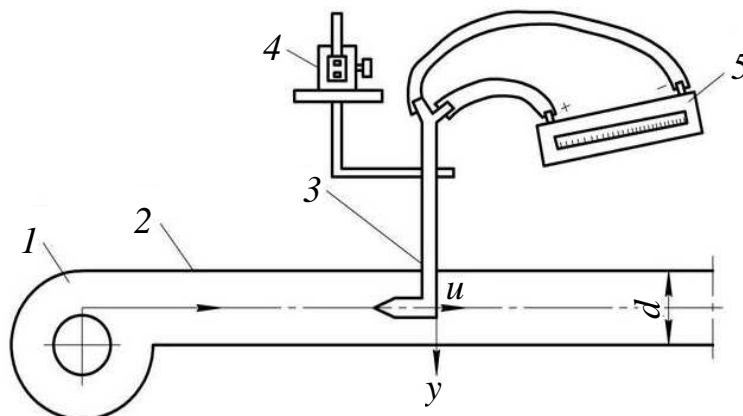


Рис. 5.9. Схема лабораторной установки

Порядок выполнения работы

1. Включить привод вентилятора и установить указанную преподавателем частоту вращения.
2. Измерить температуру воздуха и барометрическое давление.
3. Установить скоростную трубку Пито – Прандтля последовательно в точки поперечного сечения, расположенные на расстоянии 5, 15, 25, 35, 45, 55 и 70 мм от стенки трубы и снять по микроманометру значения скоростного напора в каждой из них. Результаты измерений занести в таблицу 5.5.

Таблица 5.5

№ п/п	Ординаты точек, у, мм	Скоростной напор	Скорость в точке, u_i , м/с	Площадь кольцевой струи, ΔS_i , м ²	Расход кольцевой струи, ΔQ_i , м ³ /с	$u_i^3 \cdot \Delta S_i$
-------	-----------------------	------------------	-------------------------------	--	--	--------------------------

		$H_{\text{вод}}, \text{ мм. вод. ст.}$	$H_{\text{возд}}, \text{ м. возд. ст.}$				

4. Опустить скоростную трубку в точку, ордината которой y_0 соответствует ординате средней скорости и снять отсчет по микроманометру.

5. Выключить лабораторную установку.

Обработка экспериментальных данных

1. Величину скоростного напора, измеренную в миллиметрах водного столба перевести в метры воздушного столба, используя $H_{\text{возд}} = \rho_{\text{воды}} H_{\text{воды}} / \rho_{\text{возд}}$, где $\rho_{\text{воды}}$ и $\rho_{\text{возд}}$ — плотность воды и воздуха при температуре и давлении окружающей среды. Для расчетов принять $\rho_{\text{воды}} = 1000 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{\text{возд}} = 1,205 \text{ кг/м}^3$.

2. Определить значения осредненной местной скорости $u \approx \sqrt{2gH}$.

3. По имеющимся значениям ординат y и скоростей u построить эпюру скоростей (рис. 5.8).

4. Зная значения большего R_{i1} и меньшего R_{i2} радиусов каждой кольцевой струи, определить их площади $S_i = \pi(R_{i1}^2 - R_{i2}^2)$.

5. По вычисленному значению площадей кольцевых струй и усредненной местной продольной скорости в центре тяжести каждой определить расход $\Delta Q_i = u_i \Delta S_i$.

6. Рассчитать среднюю скорость

$$v = \frac{\sum_i \Delta Q_i}{\sum_i \Delta S_i} = Q / S.$$

7. Найти отношение средней скорости к максимальной (u_{max} соответствует скорости по оси трубопровода).

8. По формуле $Re = vd/\nu$ определить число Рейнольдса и установить режим движения, для которого построена эпюра

скоростей. Кинематическую вязкость воздуха (ν) вычислить по формуле

$$\nu = (0,132 + 0,000\ 918\ t + 0,000\ 000\ 66t^2) \cdot 10^{-4}, \text{ м}^2/\text{с},$$

где t — температура, °С.

9. Определить значение средней скорости по величине скоростного напора, измеренного в точке, где местная скорость численно равна средней, и сравнить ее с величиной, установленной по эпюре скоростей.

10. Рассчитать значение коэффициента Кориолиса

$$\alpha = \sum_i u_i^3 \Delta S_i / \nu^3 S.$$

Проверочный тест 5.4

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
1	Какое движение жидкости называют напорным?	
	Движение, параметры которого постоянны во времени	1.1
	Движение в руслах при наличии свободной поверхности	1.2
	Движение в закрытых руслах без свободной поверхности	1.3
	Движение, параметры которого изменяются во времени	1.4

Продолжение теста 5.4

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
2	Изменяется ли скорость в точке во времени при турбулентном движении жидкости?	
	Скорость в точке остается постоянной для всего периода времени	2.1
	Скорость в точке все время будет увеличиваться	2.2
	Скорость в точке будет все время уменьшаться	2.3
	Скорость в точке беспорядочно колеблется около некоторого усредненного во времени значения	2.4

3	Что выражает уравнение неразрывности для элементарной струйки?	
	Закон постоянства расхода вдоль струйки	3.1
	Постоянство живых сечений вдоль струйки	3.2
	Постоянство скорости вдоль струйки	3.2
	Закон изменения расхода вдоль струйки	3.4
4	Как можно определить среднюю скорость по расходу жидкости?	
	Необходимо расход жидкости разделить на диаметр трубопровода	4.1
	Нужно расход жидкости разделить на площадь трубопровода	4.2
	Следует расход жидкости разделить на периметр трубопровода	4.3
	По расходу жидкости среднюю скорость ее движения определить невозможно	4.4
5	Изменяется ли скорость по вертикальному сечению трубы?	
	Скорость увеличивается от нуля на стенке до максимума по оси трубопровода	5.1
	Скорость уменьшается от максимума на стенке до нуля по оси трубопровода	5.2
	Скорость по вертикальному сечению трубы не изменяется	5.3
	Скорость увеличивается от нуля на верхней стенке до максимума на нижней стенке	5.4

Продолжение теста 5.4

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
6	Для чего предназначена трубка Пито – Прандтля?	
	Для определения расхода жидкости	6.1
	Для определения средней скорости	6.2
	Для определения скорости в любой точке движущейся жидкости	6.3
	Для определения статического напора в любой точке движущейся жидкости	6.4
7	Можно ли определить расход жидкости по	

	средней скорости ее движения?	
	По средней скорости расход жидкости определить невозможно	7.1
	Расход равен произведению средней скорости на периметр трубы	7.2
	Расход равен произведению средней скорости на диаметр трубы	7.3
	Расход равен произведению средней скорости на площадь поперечного (живого) сечения трубы	7.4
8	Какое движение жидкости считается равномерным?	
	Движение, при котором расход жидкости вдоль потока постоянен	8.1
	Движение, при котором давление вдоль потока постоянно	8.2
	Движение, при котором скорость вдоль потока постоянно	8.3
	Движение, при котором поперечное сечение трубы вдоль потока изменяется	8.4
9	Какая из этих величин характеризует скоростной напор?	
	$H_{ск} = z + p / \rho g$	9.1
	$H_{ск} = u^2 / 2g$ или $H_{ск} = \alpha v^2 / 2g$	9.2
	$H_{ск} = Q / S$	9.3
	$H_{ск} = p / \rho g$	9.4

Продолжение теста 5.4

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
10	Как определить среднюю скорость по эпюре скоростей?	
	Необходимо площадь эпюры умножить на диаметр трубы	10.1
	Нужно площадь эпюры умножить на радиус трубы	10.2

	Следует площадь эпюры разделить на диаметр трубы	10.3
	Наибольшая абсцисса эпюры скоростей и есть средняя скорость	10.4
11	Как изменяется средняя скорость вдоль трубы конического сечения при постоянном расходе?	
	Скорость вдоль такой трубы не изменяется	11.1
	С увеличением диаметра трубы скорость уменьшается	11.2
	С увеличением диаметра трубы скорость увеличивается	11.3
	При постоянном расходе скорость одинакова во всех сечениях	11.4
12	Какое движение жидкости называется безнапорным?	
	Движение жидкости в руслах при наличии свободной поверхности	12.1
	Движение, при котором параметры неизменны во времени	12.2
	Движение жидкости в руслах без свободной поверхности	12.3
	Движение, при котором параметры изменяются во времени	12.4

Продолжение теста 5.4

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
13	Какое определение соответствует расходу жидкости?	
	Объем жидкости, который заполняет трубопровод определенной длины	13.1
	Количество жидкости, протекающее через поперечное (живое) сечение трубопровода в единицу времени	13.2

	Количество жидкости, протекающее через поперечное (живое) сечение трубопровода за какой-то промежуток времени	13.3
	Количество жидкости, протекающее по трубопроводу на рассматриваемом участке	13.4
14	Как установить режим жидкости в трубопроводе?	
	По величине средней скорости	14.1
	Только для прозрачной трубы	14.2
	По числу Re , сравнивая его с критическим числом Re	14.3
	По расходу жидкости	14.4
15	По какой формуле можно определить скорость в любой точке жидкости?	
	$v = L/t$	15.1
	$v = dQ/dS$	15.2
	$v = k\sqrt{2gH}$	15.3
	$v = Q/S$	15.4
16	Какое движение принято называть неравномерным?	
	Движение, при котором средняя скорость вдоль потока постоянна	16.1
	Движение, при котором имеется свободная поверхность	16.2
	Движение, при котором жидкость движется в трубе постоянного диаметра	16.3
	Движение, при котором средняя скорость изменяется вдоль потока	16.4

Продолжение теста 5.4

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
17	Изменяется ли средняя скорость вдоль трубопровода постоянного сечения при постоянном расходе?	
	Средняя скорость в этом случае непрерывно уменьшается	17.1

	Средняя скорость в этом случае вдоль трубы не изменяется	17.2
	Средняя скорость в этом случае непрерывно увеличивается	17.3
	Изменение средней скорости вдоль трубы незначительно	17.4
18	Что выражает уравнение неразрывности для потока жидкости?	
	Равенство поперечных (живых) сечений вдоль потока жидкости	18.1
	Равенство расхода жидкости вдоль потока жидкости	18.2
	Равенство средней скорости вдоль потока жидкости	18.3
	Оно характеризует режим жидкости вдоль трубопровода	18.4
19	В чем отличие скоростной трубки для безнапорного движения от трубки для напорного движения?	
	Скоростная трубка для безнапорного движения имеет только одну отогнутую под углом 90° трубку	19.1
	Скоростная трубка для безнапорного движения имеет одну отогнутую под углом 90° трубку и пьезометр	19.2
	Между ними нет никакого различия	19.3
	Скоростная трубка для безнапорного движения состоит из пьезометра и дифференциального манометра	19.4

Окончание теста 5.4

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
20	Какое определение соответствует понятию средняя скорость?	
	Скорость, значение которой одинаково для всех поперечных (живых) сечений потока	20.1

Среднее значение скорости за какой-то промежуток времени	20.2
Усредненная средняя скорость за какой-то определенный промежуток времени	20.3
Фиктивная скорость, одинаковая для всех струек поперечного сечения, но принятая так, что ее произведение на площадь поперечного (живого) сечения дает истинный расход жидкости	20.4

Примечание. Коды правильных ответов: 1.3, 2.4, 3.1, 4.2, 5.1, 6.3, 7.4, 8.3, 9.2, 10.3, 11.2, 12.1, 13.2, 14.3, 15.3, 16.4, 17.2, 18.2, 19.1, 20.4.

5.5. ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ УРАВНЕНИЯ БЕРНУЛЛИ ДЛЯ ТРУБОПРОВОДА ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Цели работы:

- определение значений геометрического, пьезометрического и скоростного напоров в различных сечениях опытного трубопровода;
- построение в масштабе линий геометрического, пьезометрического и полного напоров;
- определение графическим способом суммарных потерь напора;
- расчет величины гидравлического уклона для опытного участка трубопровода.

Введение в тему

Уравнение Бернулли для установившегося движения напорного потока реальной жидкости представляет собой аналитическое выражение баланса удельной энергии движущейся жидкости. Оно устанавливает связь между скоростью движения, высотой положения центра тяжести и давлением в различных сечениях одного потока. Для двух сечений потока реальной жидкости при установившемся движении уравнение Бернулли имеет вид

$$\begin{aligned}
 z_1 + p_1 / \rho g + \alpha v_1^2 / 2g = \\
 = z_2 + p_2 / \rho g + \alpha v_2^2 / 2g + \Sigma h_{1-2}.
 \end{aligned}
 \tag{5.8}$$

Каждое из слагаемых уравнения Бернулли имеет линейную размерность и выражает собой часть полного (гидродинамического) напора жидкости H .

Всем слагаемым уравнения Бернулли можно дать объяснение с геометрической, гидравлической и энергетической точек зрения. Более наглядно изобразим уравнение графически (рис. 5.10).

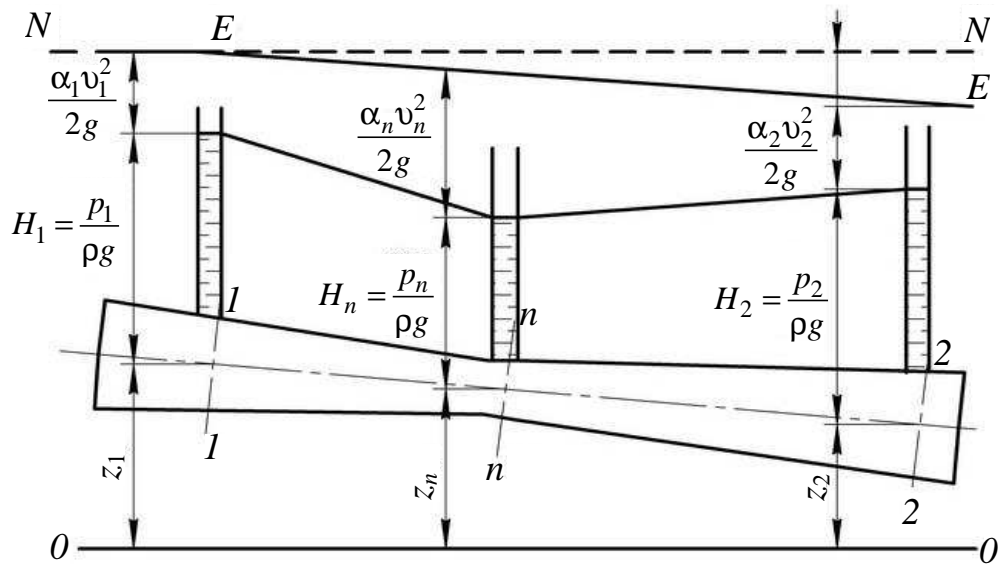


Рис. 5.10. Схема лабораторной установки

Первое слагаемое z уравнения Бернулли определяет высоту положения центра тяжести живого сечения потока над горизонтальной, произвольно выбранной плоскостью сравнения.

Оно характеризует удельную (отнесенную к единице веса жидкости) потенциальную энергию положения в рассматриваемом сечении и называется соответственно геометрической высотой, геометрическим напором, удельной потенциальной энергией положения.

Второе слагаемое $p/\rho g$ уравнения представляет собой пьезометрическую высоту, т. е. ту часть полного напора H , которая использована на сообщение частицам жидкости гидростатического давления. Оно характеризует удельную потенциальную энергию давления в рассматриваемом сечении и называется соответственно

пьезометрической высотой, пьезометрическим напором, удельной потенциальной энергией давления.

Третье слагаемое $\alpha v^2/2g$ уравнения представляет собой скоростную высоту, т. е. ту часть полного напора H , которая использована на сообщение частицам жидкости скорости v . Оно характеризует запас удельной кинетической энергии потока в рассматриваемом сечении и называется соответственно скоростной высотой, скоростным напором, удельной кинетической энергией. Здесь v — средняя скорость в живом сечении потока; α — коэффициент Кориолиса, или корректив кинетической энергии, равный отношению кинетической энергии в сечении потока, вычисленной по действительным скоростям u , к кинетической энергии в том же сечении, вычисленной по средней скорости v . Его величина всегда больше единицы, однако во многих случаях при турбулентном движении для упрощения расчетов принимают $\alpha = 1$.

Сумма геометрической и пьезометрической высот $(z + p/\rho g)$ определяет потенциальный напор и является удельной потенциальной энергией в рассматриваемом сечении. Сумма трех слагаемых уравнения Д. Бернулли $(z + p/\rho g + \alpha v^2/2g)$ определяет полный (гидродинамический) напор и характеризует полную удельную энергию в сечении потока. Слагаемое h_{1-2} выражает потери напора при движении жидкости на всем участке между рассматриваемыми сечениями потока, т. е. это та часть полного напора H , которая расходуется на преодоление гидравлических сопротивлений. Другими словами, h_{1-2} это часть полной удельной энергии жидкости, которая в результате работы сил трения переходит в тепловую энергию и рассеивается в окружающую среду.

Геометрический смысл уравнения Бернулли можно уяснить при рассмотрении движения жидкости в трубе, схема которой приведена на рис. 10. Здесь выделен участок потока между двумя сечениями 1-1, 2-2 и взято промежуточное сечение $n-n$. Если для каждого сечения отложить вверх от плоскости сравнения 0-0 все значения z , $p/\rho g$, $\alpha v^2/2g$, то линия $E-E$, соединяющая верхние концы сумм трех указанных вертикальных отрезков, образует линию полного напора. При движении реальной жидкости полный напор вдоль потока уменьшается, так как часть его затрачивается на преодоление

гидравлических сопротивлений, поэтому линия $E-E$ понижается. Линия $N-N$ представляет линию начального напора.

Падение полного напора, приходящееся на единицу длины, отмеренную вдоль потока, называют гидравлическим уклоном $i = h_{1-2}/l_{1-2}$. Поскольку при установившемся движении линия полного напора $E-E$ всегда понижается, величина i всегда положительна.

Линия $P-P$, характеризующая величину потенциального напора в сечениях, называется пьезометрической линией. Изменение ее на единицу длины называют пьезометрическим уклоном $i_{\text{п}} = [(z_1 + p_1/\rho g) - (z_2 + p_2/\rho g)]/l_{1-2}$. Если пьезометрическая линия $P-P$ понижается по течению, величина $i_{\text{п}}$ положительна, в противном случае — отрицательна. Пьезометрическая линия всегда расположена ниже линии полного напора на величину скоростного напора в соответствующем сечении. При равномерном движении ($d = \text{const}$) средняя скорость на рассматриваемом участке одинакова. Поэтому напорная и пьезометрическая линии представляют собой параллельные прямые и $i_{\text{п}} = i = h_{1-2}/l_{1-2}$.

С энергетической точки зрения, линию $E-E$ следует считать линией полной удельной энергии, а линию $P-P$ — линией удельной потенциальной энергии. Тогда $h_{1-2} = E_1 - E_2$, т. е. уменьшение полной удельной энергии потока жидкости на участке между сечениями 1-1, 2-2 обусловлено потерей энергии за счет работы внутренних сил трения единицы веса жидкости на пути между сечениями.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис. 5.11) состоит из напорного бака 1 с успокоительной перегородкой 2, в котором поддерживается постоянный напор $H = \text{const}$ за счет перелива жидкости через сливную трубу 3.

К напорному баку присоединен трубопровод переменного сечения 4, на конце которого установлен регулировочный кран 5. С его помощью можно регулировать расход жидкости по трубопроводу, а следовательно, сообщать жидкости различную скорость движения.

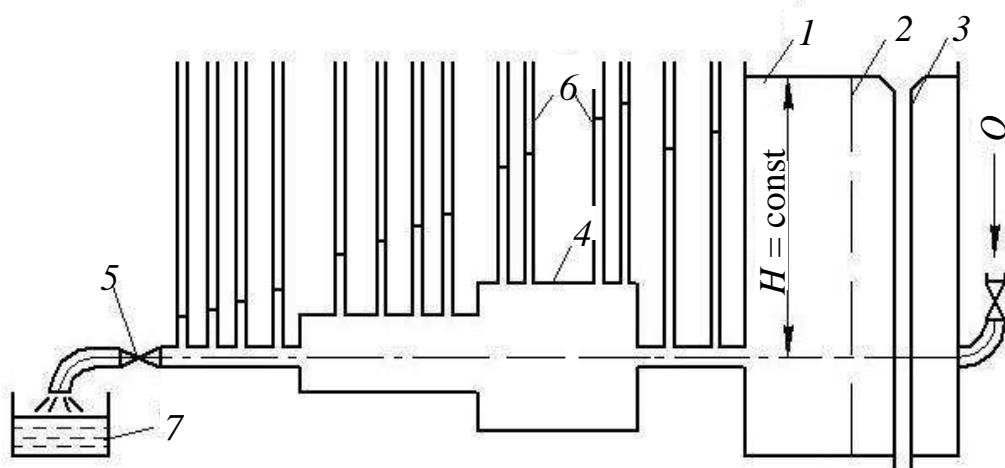


Рис. 5.11. Схема лабораторной установки

Для измерения напора в различных сечениях трубопровода имеются пьезометры 6. Измерение объема вытекающей жидкости проводится мерным баком 7, а времени истечения — секундомером.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой.
2. Записать исходные данные: род жидкости и ее температуру; внутренние диаметры трубопроводов; площадь мерного бака (S_6).
3. Убедиться в отсутствии в пьезометрах воздуха (при $Q = 0$ их показания должны быть одинаковыми).
4. Установить необходимый уровень жидкости в напорной баке (имеет место постоянный перелив через сливную трубу).
5. Открыть кран и установить постоянный на протяжении всего опыта расход Q жидкости.
6. Снять показания всех пьезометров. При этом следует иметь в виду, что уровни в них колеблются и иногда довольно значительно. Это свидетельствует о наличии в трубопроводе турбулентного режима движения, при котором имеет место пульсация скоростей, а значит и давлений. Поэтому во избежание грубых ошибок при снятии показаний пьезометров, необходимо фиксировать средние положения уровня жидкости в них.
7. Измерить объем вытекшей жидкости V и время его истечения t .
8. Закрыть полностью кран и выключить насосную установку. Измеренные и рассчитанные данные занести в таблицу 5.6.

Таблица 5.6

Номера сечений	Расстояние между сечениями l , м	Внутренний диаметр трубопровода в сечениях d , м	Площадь живого сечения трубопровода в сечениях S , м ²	Пьезометрический напор в сечениях $p / \rho g$, м	Средняя скорость движения жидкости в сечениях v , м/с	Скоростной напор в сечениях $\alpha v^2 / 2g$, м	Полный напор в сечениях H , м

Для проведения расчетов измерить объем вытекшей жидкости V (м³), время истечения t и рассчитать расход жидкости по трубопроводу, пьезометрический уклон i_p и гидравлический уклон i .

Обработка экспериментальных данных

1. Определить расход жидкости по трубопроводу $Q = V/t$.
2. Вычислить среднюю скорость движения жидкости в сечениях: $v = Q/S$, где S — площадь живого сечения трубопровода.
3. Определить скоростной напор $\alpha v^2/2g$ в сечениях, приняв $\alpha = 1$.
4. Вычертить на миллиметровой бумаге схему опытного трубопровода в масштабе и показать на ней места установки пьезометров.
5. Принять плоскость сравнения, совпадающую с осью трубопровода и построить линии пьезометрического $P-P$ и полного напора $E-E$: линию $P-P$ получим отложив в масштабе от плоскости сравнения показания пьезометров в соответствующих сечениях и соединив их; линию $E-E$ получим отложив от линии $P-P$ значения скоростного напора $\alpha v^2/2g$ в соответствующих сечениях и соединив их. Линия $N-N$, соответствующая полному напору в начальном сечении, будет линией начального напора.
6. Определить суммарные потери напора в заданных сечениях как разность ординат линий начального и полного напоров в этих сечениях с учетом вертикального масштаба.

7. Рассчитать значение гидравлического уклона для всего опытного участка трубопровода: $i = h/l$, где h — потери напора на участке, определяемые по диаграмме для конечного сечения; l — длина участка.

8. Провести исследования линий $P-P$ и $E-E$ и сделать соответствующие выводы о характере изменения потенциальной и кинетической энергий (пьезометрического и скоростного напором) по длине потоков.

Проверочный тест 5.5

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
1	Какое из этих уравнений является уравнением Бернулли для потока реальной жидкости?	
	$z + p/\rho g = \text{const}$	1.1
	$z_1 + p_1/\rho g + \alpha_1 v_1^2/2g = z_2 + p_2/\rho g + \alpha_2 v_2^2/2g + \sum h_{1-2}$	1.2
	$z_1 + p_1/\rho g + u_1^2/2g = z_2 + p_2/\rho g + u_2^2/2g$	1.2
	$z + p/\rho g + \alpha v^2/2g = H = \text{const}$	1.4
2	Охарактеризуйте слагаемые уравнения Бернулли (z, $p/\rho g$, $\alpha v^2/2g$) с энергетической точки зрения	
	Они характеризуют соответственно удельную (отнесенную к единице объема) потенциальную энергию положения, потенциальную энергию давления и кинетическую энергию жидкости в рассматриваемом сечении	2.1
	Они характеризуют соответственно удельную (отнесенную к единице массы) потенциальную энергию положения, потенциальную энергию давления и кинетическую энергию жидкости в рассматриваемом сечении	2.2
	Они характеризуют соответственно удельную (отнесенную к единице веса) потенциальную энергию положения, потенциальную энергию давления и кинетическую энергию жидкости в рассматриваемом сечении	2.3

	Они характеризуют полный запас удельной механической энергии жидкости в данном сечении потока	2.4
--	---	-----

Продолжение теста 5.5

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
3	Как изменяется пьезометрический напор с увеличением диаметра трубопровода?	
	При увеличении диаметра трубопровода наблюдается снижение пьезометрического напора	3.1
	При увеличении диаметра трубопровода изменения пьезометрического напора не происходит	3.2
	При увеличении диаметра трубопровода наблюдается изменение пьезометрического напора только в случае движения по трубопроводу довольно вязкой жидкости	3.2
	При увеличении диаметра трубопровода наблюдается рост пьезометрического напора	3.4
4	Какое выражение используется для нахождения скоростного напора в любом сечении трубопровода?	
	$\alpha v / 2g$	4.1
	$(z + p / \rho g)$	4.2
	$u^2 / 2g$	4.3
	$\alpha v / 2g$	4.4
5	Объясните причину колебания уровней жидкости в пьезометрах при проведении опытов?	
	Неустановившееся движение жидкости в трубопроводе	5.1
	Пульсация скоростей и давлений при турбулентном режиме движения жидкости в трубопроводе	5.2

	Неравномерное движение жидкости в трубопроводе	5.3
	Наличие местных сопротивлений в виде внезапного расширения и внезапного сужения трубопровода	5.4

Продолжение теста 5.5

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
6	Какой закон выражает уравнение Бернулли?	
	Закон сохранения количества движения в идеальной и реальной жидкости	6.1
	Закон постоянства расхода и отсутствия притока и оттока жидкости между рассматриваемыми сечениями	6.2
	Закон сохранения массы перемещаемой жидкости	6.3
	Закон сохранения энергии в идеальной жидкости, а для реальной жидкости является уравнением баланса энергии	6.4
7	Что такое удельная энергия жидкости?	
	Это энергия, отнесенная к единице площади поперечного (живого) сечения трубопровода	7.1
	Это энергия, отнесенная к единице длины трубопровода	7.2
	Это энергия, отнесенная к единице расхода жидкости по трубопроводу	7.3
	Это энергия, отнесенная к единице веса жидкости	7.4
8	Каким образом можно построить линию пьезометрического напора?	
	Необходимо от линии начального напора отложить в масштабе в соответствующих сечениях величину потерь напора и соединить точки	8.1
	Нужно от плоскости сравнения отложить вверх в масштабе в соответствующих сечениях показания пьезометров и соединить точки	8.2

	Следует от линии полного напора отложить вверх в масштабе в соответствующих сечениях величину потерь напора и соединить точки	8.3
	Необходимо от плоскости сравнения отложить вверх в масштабе в соответствующих сечениях величину скоростного напора $\alpha v^2/2g$ и соединить точки	8.4

Продолжение теста 5.5

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
9	Что называют пьезометрическим уклоном i_{π}?	
	Изменение пьезометрической линии, приходящееся на единицу длины трубопровода: $[i_{\pi} = (z_1 + p_1/\rho g) - (z_2 + p_2/\rho g)]/L_{1-2}$	9.1
	Изменение пьезометрической линии, приходящееся на единицу расхода жидкости через трубопровод: $[i_{\pi} = (z_1 + p_1/\rho g) - (z_2 + p_2/\rho g)]/Q$	9.2
	Потери напора, приходящиеся на единицу длины трубопровода: $i_{\pi} = \sum h_{1-2}/L_{1-2}$	9.3
	Снижение полной удельной энергии потока жидкости на участке между сечениями: $i_{\pi} = E_1 - E_2$	9.4
10	Как определяют расход жидкости по трубопроводу при проведении опытов?	
	Он равен частному от деления объема вытекшей жидкости на время его истечения: $Q = V/t$	10.1
	Он равен произведению средней скорости движения жидкости на площадь поперечного (живого) сечения трубопровода: $Q = vS$	10.2
	Он равен произведению объема вытекшей воды на время его истечения: $Q = Vt$	10.3
	Он равен частному от деления объема мерного бака на его площадь: $Q = V_6/S_6$	10.4

11	Какую размерность имеют составляющие уравнения Бернулли?	
	Размерность ускорения силы тяжести (m/c^2)	11.1
	Размерность скорости (m/c)	11.2
	Линейную размерность ($m, cm, mm, \text{жидк. ст.}$)	11.3
	Расхода жидкости ($m^3/c, cm^3/c, dm^3/c$)	11.4

Продолжение теста 5.5

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
12	Дайте характеристику составляющим уравнения Бернулли ($z, p/\rho g, \alpha v^2/2g$) с геометрической точки зрения	
	Их соответственно называют геометрическим, пьезометрическим и скоростным напором	12.1
	Их соответственно называют удельной потенциальной энергией положения, давления и удельной кинетической энергией	12.2
	Они представляют собой полный запас удельной механической энергии в данном сечении	12.3
	Их соответственно называют геометрической, пьезометрической и скоростной высотой	12.4
13	В чем состоит физический смысл коэффициента Кориолиса α?	
	Он учитывает неравномерность распределения скоростей в поперечном (живом) сечении потока при подсчете кинетической энергии по средней скорости	13.1
	Он представляет собой отношение кинетической энергии в сечении, вычисленной по действительным скоростям, к кинетической энергии того же потока и в том же сечении, вычисленной по средней скорости	13.2
	Он представляет собой запас удельной потенциальной энергии в рассматриваемом сечении	13.3
	Он учитывает ту часть полной энергии жидкости, которая в результате работы сил трения переходит в тепловую	13.4
14	Что такое гидравлический уклон i_r?	

	Изменение пьезометрической линии, приходящееся на единицу длины трубопровода: $[i_r = (z_1 + p_1/\rho g) - (z_2 + p_2/\rho g)]/L_{1-2}$	14.1
	Потери напора, приходящиеся на единицу длины трубопровода: $i_r = \sum h_{1-2}/L_{1-2}$	14.2
	Изменение пьезометрической линии, приходящееся на единицу расхода жидкости через трубопровод: $[i_r = (z_1 + p_1/\rho g) - (z_2 + p_2/\rho g)]/Q$	14.3
	Снижение полной удельной энергии потока жидкости на участке между сечениями: $i_r = E_1 - E_2$	14.4

Продолжение теста 5.5

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
15	Охарактеризуйте составляющие уравнения Бернулли (z, $p/\rho g$, $\alpha v^2/2g$) с гидравлической точки зрения	
	Их соответственно называют удельной потенциальной энергией положения, давления и удельной кинетической энергией	15.1
	Они представляют собой полный запас удельной механической энергии в данном сечении	15.2
	Их соответственно называют геометрической, пьезометрической и скоростной высотой	15.3
	Их соответственно называют геометрическим, пьезометрическим и скоростным напором	15.4
16	Что характеризует слагаемое $\sum h_{1-2}$ в уравнении Бернулли?	
	Потери напора (энергии) на преодоление гидравлических сопротивлений при движении жидкости между рассматриваемыми сечениями	16.1
	Запас удельной потенциальной энергии жидкости в рассматриваемом сечении	16.2
	Снижение запаса удельной кинетической энергии жидкости вдоль трубопровода	16.3
	Неравномерность распределения скоростей в живых сечениях потока жидкости	16.4
17	Какая линия на диаграмме Бернулли	

	соответствует линии начального напора?	
	Линия, соответствующая полному напору ($z + p/\rho g + \alpha v^2/2g$) в начальном сечении трубопровода	17.1
	Линия, построенная по показаниям пьезометров ($p/\rho g$) в различных сечениях трубопровода	17.2
	Линия, построенная по значениям скоростного напора ($\alpha v^2/2g$) в различных сечениях трубопровода	17.3
	Линия, соответствующая пьезометрическому напору в начальном сечении трубопровода	17.4

Окончание теста 5.5

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
18	Какое выражение соответствует потенциальному напору H_{Π} (удельной потенциальной энергии) в сечении?	
	$z + p/\rho g + \alpha v^2/2g = H_{\Pi}$	18.1
	$z + p/\rho g + u^2/2g = H_{\Pi}$	18.2
	$\rho g z + p + \rho g \alpha v^2/2g = H_{\Pi}$	18.3
	$z + p/\rho g = H_{\Pi}$	18.4
19	Какое из этих выражений соответствует полному гидродинамическому напору в сечении для реальной жидкости?	
	$z + p/\rho g + \alpha v^2/2g = H$	19.1
	$z + p/\rho g = H$	19.2
	$\gamma z + p + \gamma \alpha v^2/2g = H$	19.3
	$z + p/\rho g + u^2/2g = H$	19.4
20	Можно ли применять уравнение Бернулли для описания пространственных потоков	
	Да, только если поток установившийся	20.1
	Да, только если поток равномерный	20.2
	Да, если для его описания достаточно одной пространственной координаты	20.3
	Да, если поток установившийся и для его описания достаточно одной пространственной координаты	20.4

Примечание. Коды правильных ответов: 1.2, 2.3, 3.4, 4.4, 5.2, 6.4, 7.4, 8.2, 9.1, 10.1, 11.3, 12.4, 13.2, 14.2, 15.4, 16.1, 17.1, 18.4, 19.1, 20.4.

5.6. ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ МАЛЫЕ ОТВЕРСТИЯ

Цели работы:

- определение опытным путем коэффициентов сжатия (ϵ), скорости (φ) и расхода (μ) при истечении жидкости через малые отверстия в тонкой стенке;
- построение поперечных сечений струй, вытекающих из отверстий различной формы;
- сравнение полученных опытных значений коэффициентов ϵ , φ и μ со справочными данными;
- определение времени опорожнения бака при переменном напоре (от H_1 до H_2);
- сравнение полученного времени с вычисленным по формуле.

Введение в тему

На практике истечение жидкости через малые отверстия наблюдается при опорожнении (наполнении) различных емкостей, а также в гидротехнических сооружениях. Например, сброс воды из верхнего бьефа через донные отверстия и через отверстия для наполнения шлюзовых камер в различных установках гидравлических систем.

Малые отверстия могут использоваться как расходомеры. Малым называют отверстие, диаметр которого меньше 0,1 напора H ($d \leq 0,1H$). Это позволяет считать давление во всех точках этого отверстия практически одинаковым.

Под отверстием в тонкой стенке надо понимать отверстие, имеющее острые кромки. При истечении через такое отверстие возникают только местные потери напора, а толщина стенки не оказывает влияния на характер истечения. Толщина такой стенки для цилиндрического отверстия $\delta < 0,2d$, где d — диаметр отверстия.

При подходе жидкости к отверстию происходит искривление линий тока. Вследствие движения частиц по криволинейным траекториям происходит сжатие струи. Как показывает опыт, максимальное сжатие струи наблюдается на расстоянии $(0,5-1)d$ от выхода. Движение жидкости в сжатом сечении близко к параллельно-струйному. Степень сжатия струи влияет на расход: чем больше сжатие, тем меньше расход.

$$v = \sqrt{2gH}; \quad (5.9)$$

$$Q = \varepsilon \varphi S_{\text{отв}} \sqrt{2gH}. \quad (5.10)$$

В формуле (5.10) произведение $\varepsilon \varphi$ называется коэффициентом расхода μ . Тогда

$$Q = \mu S_{\text{отв}} \sqrt{2gH}, \quad (5.11)$$

где φ — коэффициент скорости; $S_{\text{отв}}$ — площадь сечения отверстия; H — напор над центром тяжести отверстия; ε — коэффициент сжатия.

Коэффициент скорости, входящий в формулу (5.9), представляет собой отношение действительной скорости к теоретической:

$$\varphi = v / \sqrt{2gH}. \quad (5.12)$$

Опытным путем коэффициент скорости φ можно получить измеряя координаты траектории струи, как показано рис. 5.12.

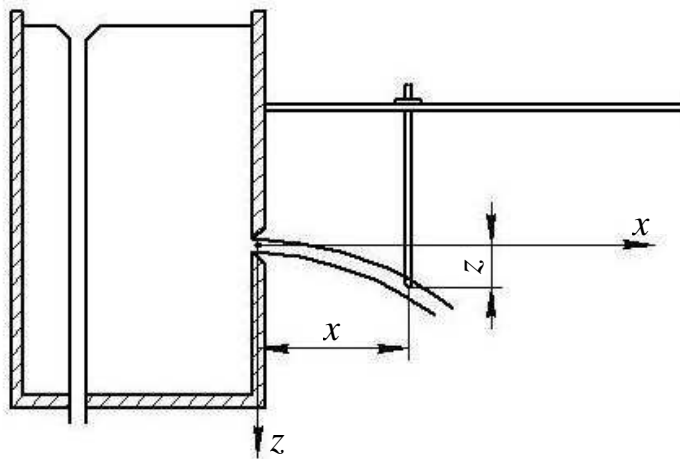


Рис. 5.12. Схема лабораторной установки

Если известны координаты какой-либо точки струи, то коэффициент скорости определяется по формуле

$$\varphi = x / 2\sqrt{zH}, \quad (5.13)$$

где x и z — координаты центра тяжести некоторой точки струи относительно начала, помещенного в центре тяжести сжатого сечения струи.

Численные значения коэффициента расхода μ , можно получить из формулы (5.11):

$$\mu = Q / S_{\text{отв}} \sqrt{2gH}.$$

По известным коэффициентам φ и μ можно определить коэффициент сжатия струи (ε).

Коэффициент сжатия представляет собой отношение площади сжатого сечения к площади отверстия:

$$\varepsilon = S_{\text{сж}} / S_{\text{отв}}. \quad (5.14)$$

Рассмотренные коэффициенты φ , μ и ε зависят от формы отверстия и числа Рейнольдса. Для круглого отверстия при $Re > 10^5$ они имеют следующие значения: $\varphi = 0,97$; $\varepsilon = 0,64$; $\mu = 0,62$.

Истечение жидкости через отверстия некруглой формы сопровождается инверсией струи, т. е. изменением формы поперечного сечения по длине струи. Поперечное сечение струи, вытекающей из квадратного отверстия, принимает крестообразную форму, а из треугольного — форму треугольной звезды. Происходит это потому, что скорости подхода к отверстию оказываются неодинаковыми для различных участков периметра отверстия.

Истечение жидкости через отверстия при переменном напоре относится к неустановившемуся движению и находит применение при определении времени частичного или полного опорожнения различных емкостей. Теоретическая формула для определения времени частичного опорожнения прямоугольного бака имеет вид

$$t = \left[2S_6 \left(\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2} \right) \right] / \mu S_{\text{отв}} \sqrt{2g}, \quad (5.15)$$

где S_6 — площадь поперечного сечения бака; H_1 и H_2 — начальный и конечный напоры; $S_{\text{отв}}$ — площадь поперечного сечения отверстия.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис. 5.13) состоит из водооборотного бака 1, напорного бака 2 и центробежного насоса 3.

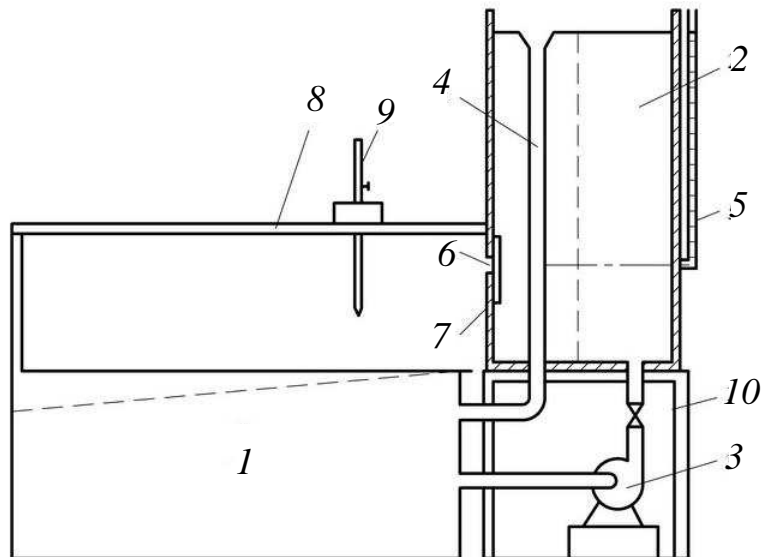


Рис. 5.13. Схема лабораторной установки

Постоянный уровень жидкости в баке поддерживается сливной трубой 4. Напор над центром тяжести отверстия измеряется водомерным стеклом 5. В стенке напорного бака имеется цилиндрическое отверстие с резьбой 6 для крепления съемных устройств с отверстиями различной формы. Цилиндрическое отверстие перекрывается резиновым клапаном 7. Для измерения координат струи на горизонтальной рейке 8 установлена мерная игла 9. Объем жидкости измеряется с помощью мерного бака, а время — секундомером.

Порядок выполнения работы

1. Установить съемное устройство с круглым отверстием в цилиндрическое отверстие напорного бака.
2. Включить центробежный насос и открыть кран 10 для наполнения бака.
3. При постоянном уровне жидкости в баке открыть резиновый клапан.
4. Измерить объем воды и время истечения.
5. Измерить координаты струи x и z с помощью мерной иглы; данные занести в таблицу 5.7.

Таблица 5.7

x_i , см	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
------------	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----

z_i , см													
z , см													
φ													

Все остальные измерения заносятся в таблицу 5.8.

Таблица 5.8.

Объем вытекшей жидкости, V , м ³	Время наполнения мерного сосуда, t , с	Коэффициент						Время опорожнения бака от H_1 до H_2	
		скорости, φ		расхода, μ		сжатия, ε		опытное	теоретическое
		опытный	справочный	опытный	справочный	опытный	справочный		

6. Закрыть резиновый клапан и кран 10. Выключить насос.

7. Зафиксировать начальный напор H_1 , открыть резиновый клапан и включить секундомер. После падения напора до отметки H_2 выключить секундомер.

8. Для наблюдения явления инверсии поменять съемное приспособление с отверстием.

9. Записать исходные данные: внутренний диаметр отверстия d ; напор над центром тяжести отверстия H ; площадь напорного бака S_n ; площадь мерного бака S_6 .

Обработка экспериментальных данных

1. Найти расход Q по формуле $Q = V/t$.

2. Рассчитать коэффициент расхода μ из формулы (5.11).

3. Вычислить коэффициент скорости φ по формуле (5.13) для каждого измерения и найти его среднее значение.

4. Определить теоретическое время опорожнения бака при переменном напоре и сравнить его с опытным.

5. Опытные значения коэффициентов φ , μ и ε сравнить со справочными данными.

6. Зарисовать инверсию струи для заданного отверстия.

Проверочный тест 5.6

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
1	Какие отверстия называют малыми?	
	Отверстия, диаметр которых значительно меньше напора H , при котором происходит истечение	1.1
	Отверстия, диаметр которых меньше 0,2 напора H ($d < 0,2H$), при котором происходит истечение	1.2
	Отверстия, диаметр которых больше 0,1 напора H ($d > 0,1H$), при котором происходит истечение	1.2
	Отверстия, диаметр которых меньше 0,1 напора H ($d < 0,1H$), при котором происходит истечение	1.4

Продолжение теста 5.6

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
2	В чем заключается физический смысл коэффициента расхода μ?	
	μ представляет собой произведение коэффициентов сжатия и скорости: $\mu = \epsilon\varphi$	2.1
	μ представляет собой отношение действительного расхода к теоретическому	2.2
	μ характеризует степень неравномерности струи	2.2
	μ характеризует изменение расхода вдоль струи	2.4
3	От каких параметров зависит величина коэффициента скорости?	
	От формы отверстия и режима движения жидкости (числа Рейнольдса)	3.1
	От напора, при котором происходит истечение жидкости через отверстие	3.2
	Только от формы отверстия, из которого происходит истечение жидкости	3.2

	Только от режима движения (числа Рейнольдса), при котором происходит истечение жидкости	3.4
4	Как определяется расход жидкости через отверстие при проведении опытов?	
	Расход жидкости равен частному от деления объема вытекшей жидкости на время его вытекания: $Q = V / t$	4.1
	Расход жидкости равен произведению средней скорости на площадь поперечного сечения струи: $Q = vS_{стр}$	4.2
	Расход жидкости равен частному от деления объема вытекшей жидкости на площадь мерного бака: $Q = V / S_б$	4.3
	Расход жидкости равен произведению средней скорости на периметр вытекающей струи: $Q = v\chi$	4.4

Продолжение теста 5.6

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
5	Что является причиной инверсии струи?	
	Действие сил тяжести в вытекающей жидкости	5.1
	Действие сил инерции переносного движения в жидкости	5.2
	Различие скоростей подхода жидкости к отверстию на различных участках его периметра	5.3
	Наличие перепада давлений в сечениях до и после отверстия	5.4
6	Что понимают под термином тонкая стенка?	
	Это стенка, толщина которой ($\delta < 0,2d$) не влияет на характер истечения через отверстие	6.1
	Это стенка, толщина которой гораздо меньше диаметра отверстия, из которого происходит истечение	6.2

	Это стенка, толщина которой ($\delta > 0,2d$) не влияет на характер истечения через отверстие	6.3
	Это стенка, толщина которой гораздо меньше напора H , при котором происходит истечение через отверстие	6.4
7	Существует ли связь между коэффициентами расхода, сжатия и скорости?	
	Коэффициент расхода μ равен произведению коэффициентов сжатия ϵ и скорости ϕ ($\mu = \epsilon\phi$)	7.1
	Коэффициент расхода μ равен частному от деления коэффициента сжатия ϵ на коэффициент скорости ϕ ($\mu = \epsilon / \phi$)	7.2
	Коэффициент расхода μ равен частному от деления коэффициента скорости ϕ на коэффициент сжатия ϵ ($\mu = \phi / \epsilon$)	7.3
	Связь между этими коэффициентами отсутствует	7.4

Продолжение теста 5.6

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
8	По какой формуле определяют время истечения жидкости при переменном напоре?	
	$t = 2S_6\sqrt{H} / \mu S_0\sqrt{2g}$	8.1
	$t = V / Q$	8.2
	$t = Q / V$	8.3
	$t = [2S_6(\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2})] / \mu S_{отв}\sqrt{2g}$	8.4
9	Как рассчитывают действительную скорость истечения жидкости через отверстие?	
	Она равна частному от деления расхода жидкости на площадь поперечного (живого) сечения: $v = Q / S_{стр}$	9.1

	По расчетной формуле $v = \sqrt{2gH}$	9.2
	По формуле $v = \varphi \sqrt{2gH}$	9.3
	Она равна частному от деления расхода жидкости на периметр вытекающей струи: $v = Q / \chi_{стр}$	9.4
10	Какова зависимость расхода через отверстие от напора в баке, из которого происходит вытекание жидкости?	
	Изменение напора не оказывает никакого влияния на расход жидкости через отверстие	10.1
	С увеличением напора расход жидкости через отверстие увеличивается	10.2
	Напор влияет только при истечении жидкости через круглые отверстия	10.3
	С увеличением напора расход жидкости через отверстия уменьшается	10.4

Продолжение теста 5.6

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
11	Какое определение соответствует коэффициенту сжатия струи?	
	Коэффициент сжатия (ϵ) есть величина, определяемая из соотношения $\epsilon = \mu / \varphi$	11.1
	Коэффициент сжатия (ϵ) есть отношение площади отверстия к площади сжатого сечения струи: $\epsilon = S_{отв} / S_{стр}$	11.2
	Коэффициент сжатия есть величина, определяемая из соотношения $\epsilon = Q / \varphi S_{отв} \sqrt{2gH}$	11.3
	Коэффициент сжатия струи ϵ есть отношение площади струи в сжатом сечении к площади отверстия: $\epsilon = S_{сж} / S_{отв}$	11.4
12	В чем заключается физический смысл коэффициента скорости φ?	

	Он характеризует степень неравномерности распределения скорости по поперечному сечению струи	12.1
	Он представляет собой отношение коэффициента расхода к коэффициенту сжатия струи: $\phi = \mu / \epsilon$	12.2
	Он представляет собой отношение действительной скорости вытекания струи к теоретической: $\phi = v / \sqrt{2gH}$	12.3
	Он характеризует изменение скорости вдоль струи при истечении жидкости через отверстие	12.4
13	Как рассчитать расход жидкости через отверстие?	
	Он равен произведению средней скорости на площадь поперечного сечения струи: $Q = vS_{стр}$	13.1
	Его рассчитывают по формуле $Q = S_{отв} \sqrt{2gH}$	13.2
	Он равен произведению средней скорости на периметр поперечного сечения вытекающей струи: $Q = v\chi_{стр}$	13.3
	Его рассчитывают по формуле $Q = \mu S_{отв} \sqrt{2gH}$	13.4

Продолжение теста 5.6

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
14	Назовите причину различия (уменьшения) между действительной и теоретической скоростью	
	Наличие сил сопротивления (местные потери напора) в движущейся через отверстие жидкости	14.1
	Действие сил тяжести в движущейся через отверстие жидкости	14.2
	Наличие перепада давлений в сечениях до и после отверстия	14.3
	Действие сил инерции переносного движения при истечении жидкости через отверстие	14.4
15	Каково влияние сжатия струи на расход жидкости через отверстие?	
	Сжатие струи не оказывает никакого влияния на расход жидкости через отверстие	15.1

	Чем больше сжатие струи, тем меньше расход жидкости через отверстие	15.2
	Сжатие струи оказывает влияние на расход только при вытекании жидкости через квадратное отверстие	15.3
	Чем больше сжатие струи, тем больше расход	15.4
16	Назовите причину сжатия струи	
	Действие сил поверхностного натяжения при истечении струи через отверстие	16.1
	Движение жидкости по криволинейным траекториям вследствие искривления линий тока при подходе жидкости к отверстию	16.2
	Наличие перепада давлений в сечениях до и после отверстия	16.3
	Наличие сил сопротивления в движущейся жидкости	16.4
17	Каковы численные значения коэффициентов сжатия (ϵ), скорости (ϕ), расхода (μ) для круглого отверстия в квадратичной (шероховатой) области сопротивления?	
	Соответственно 0,64; 0,97; 0,62	17.1
	Соответственно 1,00; 0,82; 0,82	17.2
	Соответственно 0,98; 0,96; 0,94	17.3
	Соответственно 1,00; 0,45; 0,45	17.4

Окончание теста 5.6

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
18	Возможно ли по координатам струи определить коэффициент скорости ϕ?	
	По координатам струи определить коэффициент скорости невозможно	18.1
	По координатам струи можно определить коэффициент скорости только для круглого отверстия	18.2
	При известных координатах струи коэффициент скорости определяется по формуле $\phi = x / \sqrt{2zH}$	18.3
	По координатам струи можно определить коэффициент скорости только для квадратного отверстия	18.4
19	Что называется инверсией струи?	

	Равенство давлений во всех точках струи, вытекающей из отверстия	19.1
	Искривление линий тока при подходе жидкости к отверстию	19.2
	Параллельно струйное движение жидкости в сжатом сечении струи	19.3
	Изменение формы поперечного сечения по длине струи при истечении через отверстие	19.4
20	По какой зависимости определяется опытное значение коэффициента расхода μ?	
	$\mu = \epsilon\varphi$	20.1
	$\mu = \varphi / \epsilon$	20.2
	$\mu = QS_{\text{отв}}\sqrt{2gH}$	20.3
	$\mu = Q / S_{\text{отв}}\sqrt{2gH}$	20.4

Примечание. Коды правильных ответов: 1.4, 2.2, 3.1, 4.1, 5.3, 6.1, 7.1, 8.4, 9.3, 10.2, 11.4, 12.3, 14.1, 15.2, 16.2, 17.1, 18.3, 19.4, 20.4.

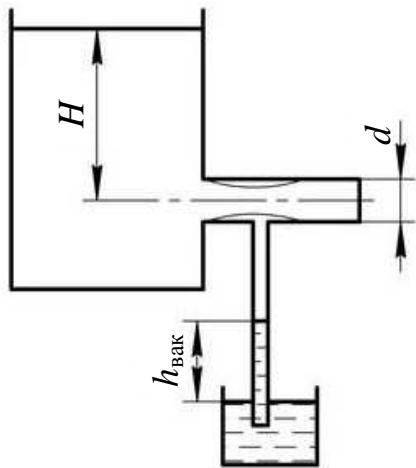
5.7. ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ НАСАДКИ

Цели работы:

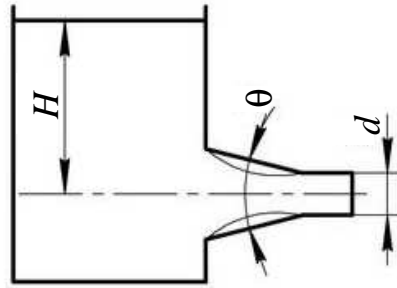
- определение коэффициентов скорости ($\varphi_{\text{оп}}$) и расхода ($\mu_{\text{оп}}$);
- сравнение опытных значений $\varphi_{\text{оп}}$ и $\mu_{\text{оп}}$ со справочными данными;
- наблюдение явления срыва вакуума;
- построение траектории полета струи;
- определение времени истечения при переменном напоре.

Введение в тему

Насадками называются короткие трубки длиной $l = (3-4)d$, присоединенные к отверстию в стенке с целью увеличения расхода жидкости или создания струи, обладающей определенными энергетическими характеристиками. В практике применяются насадки различной формы: цилиндрические, конические сходящиеся (рис. 5.14) и конические расходящиеся, коноидальные (рис. 5.15).



Цилиндрический насадок



Конический сходящийся насадок

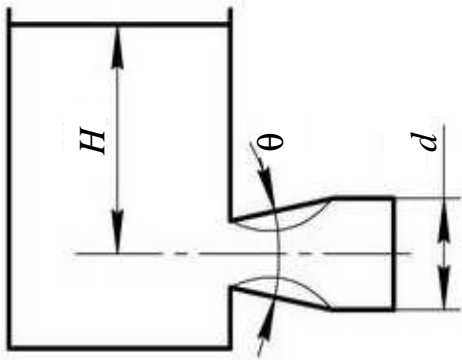
Рис. 5.14. Схемы цилиндрических и конических сходящихся насадок

Используя уравнение Бернулли, получены расчетные формулы для определения средней скорости истечения v и расхода Q при истечении жидкости через насадки:

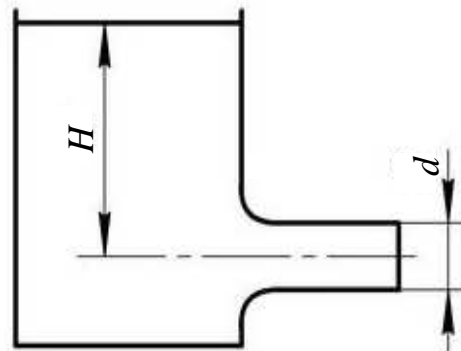
$$v = \varphi \sqrt{2gH}; \quad (5.16)$$

$$Q = \mu S_{\text{отв}} \sqrt{2gH}, \quad (5.17)$$

где φ — коэффициент скорости насадка; μ — коэффициент расхода насадка; H — напор над центром тяжести насадка.



Конический расходящийся насадок



Коноидальный насадок

Рис. 5.15. Схемы конических расходящихся и коноидальных насадков

Величины μ и φ в этих формулах зависят от конструктивных особенностей различных насадков.

1. Внешний цилиндрический насадок. При входе жидкости в насадок струя вначале несколько сжимается, как и при истечении через отверстия, а затем постепенно расширяется до полного сечения. Вокруг сжатого сечения образуются зоны с пониженным давлением (вакуумом). Образование вакуума объясняется тем, что в сжатом сечении скорость струи больше, чем на выходе из насадка. Согласно уравнению Д. Бернулли, давление в сечении с большой скоростью должно быть меньше, чем давление в сечении с меньшей скоростью. Поскольку на выходе из насадка давление атмосферное, то в сжатом сечении оно меньше атмосферного — вакуум.

Величину вакуума при истечении воды при $20\text{ }^\circ\text{C}$ можно определить из выражения $h_{\text{вак}} \approx 0,74H$.

Образование вакуума внутри насадка приводит к увеличению расхода по сравнению с истечением через отверстие. Поэтому при одинаковом напоре H и входном диаметре d коэффициент расхода при истечении жидкости через насадок будет больше, чем при истечении через отверстия. Коэффициент расхода внешнего цилиндрического насадка $\mu = 0,82$.

Наличие вакуума наглядно демонстрируется, если в месте наибольшего сжатия струи присоединить вакуумметр. Жидкость в нем поднимается на высоту $h_{\text{вак}}$.

Предельная величина вакуума в сжатом сечении ограничена давлением насыщенных паров. При значениях H , близких к предельному, происходит интенсивное парообразование; образовавшиеся пары оттесняют жидкость от стенок, что приводит к срыву вакуума, и увеличения расхода не наблюдается.

2. Конический сходящийся насадок. Основное назначение таких насадков — увеличение скорости выхода жидкости, т. е. создание струи, обладающей большой удельной кинетической энергией. Струя, вытекающая из такого насадка, обладает компактностью и на длительном расстоянии сохраняет свою форму. Коэффициент расхода и скорости такого насадка зависит от угла конусности. Наиболее высокими гидравлическими

показателями конические сходящиеся насадки обладают при угле конусности $\theta = 13^\circ 24'$, при этом $\mu = 0,94$.

3. Конический расходящийся насадок. В сжатом сечении этого насадка образуется вакуум, величина которого возрастает с увеличением угла конусности. Это обуславливает большой расход таких насадков по сравнению с рассмотренными выше. Оптимальный угол конусности $\theta = 7^\circ$. При этом коэффициент расхода, рассчитанный по выходному отверстию, равен 0,45. При большем угле конусности происходит отрыв струи от стенок насадка и вакуум срывается.

4. Коноидальный насадок имеет форму, близкую к форме струи, вытекающей из отверстия. Поэтому сопротивление движению минимальное, это обеспечивает наиболее высокие значения коэффициентов скорости и расхода: $\mu = \varphi = 0,97-0,99$.

Истечение жидкости через насадки при переменном напоре относится к неустановившемуся движению.

Теоретически время истечения жидкости из бака при переменном напоре можно рассчитать по формуле (5.15). Время полного опорожнения бака определяется по формуле

$$t = 2S_6 \sqrt{H_1} / \mu S_{\text{отв}} \sqrt{2g} = 2S_6 H_1 / \mu S_{\text{отв}} \sqrt{2gH_1}. \quad (5.18)$$

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис. 5.16) состоит из водооборотного бака 1, напорного бака 2 и центробежного насоса 3. Постоянный уровень жидкости в баке поддерживается сливной трубой 4.

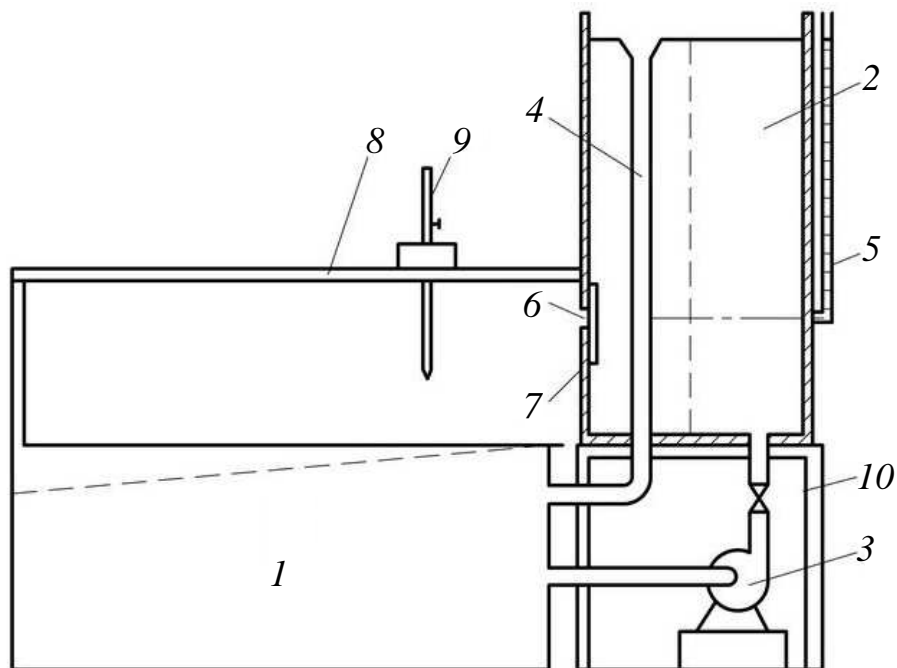


Рис. 5.16. Схема лабораторной установки

Напор над центром тяжести отверстия измеряется водомерным стеклом 5. В стенке напорного бака имеется цилиндрическое отверстие с резьбой 6 для крепления съемных устройств с насадками различной формы. Цилиндрическое отверстие перекрывается резиновым клапаном 7. Для измерения координат струи на горизонтальной рейке 8 установлена мерная игла 9. Объем жидкости измеряется с помощью мерного бака, а время — секундомером.

Порядок выполнения работы

1. Установить насадок в цилиндрическое отверстие.
2. Включить центробежный насос и открыть кран 10 для наполнения бака.
3. При постоянном уровне жидкости в баке открыть резиновый клапан.
4. Измерить объем жидкости и время его истечения.
5. Измерить координаты струи x и z с помощью мерной иглы и записать их в таблицу 5.9.

Таблица 5.9

x_i , см	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
z_i , см													
z , см													
φ													

Все остальные результаты измерения занести в таблицу 5.10.

Таблица 5.10

Объем вытекшей жидкости, V , м ³	Время наполнения мерного сосуда, t , с	Коэффициент				Время опорожнения бака от H_1 до H_2	
		скорости, φ		расхода, μ		опытное	теоретическое
		опытный	справочный	опытный	справочный		

6. Произвести наблюдения за срывом и восстановлением вакуума.
7. Закрывать резиновый клапан и кран. Выключить насос.
8. Зафиксировать начальный напор H_1 , открыть резиновый клапан и включить секундомер. После падения напора до отметки H_2 выключить секундомер.
9. Записать исходные данные: внутренний диаметр насадка (d); напор (H); площадь мерного бака (S_0) и площадь напорного бака (S_H).

Обработка экспериментальных данных

1. Определить расход жидкости по формуле $Q = V / t$.
2. Вычислить коэффициент скорости φ по формуле $\varphi = x / 2\sqrt{zH}$ и найти его среднее значение.
3. Определить коэффициент расхода μ из формулы (5.17).
4. Сравнить полученные опытные значения со справочными.
5. По измеренным координатам построить траекторию полета струи.

6. Рассчитать теоретическое время истечения при переменном напоре по формуле (5.15) и сравнить его с опытным временем истечения.

Проверочный тест 5.7

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
1	Что называется насадками?	
	Короткие трубки, размеры которых относительно невелики по сравнению с размерами отверстий, к которым они присоединены	1.1
	Короткие трубки длиной $l = (3-4)d$, присоединенные к отверстию в стенке	1.2
	Короткие трубки, присоединенные к отверстию в стенке	1.3
	Короткие трубки длиной $l = (5-6)d$, присоединенные к отверстию в стенке	1.4
2	Как измерить величину вакуума в насадке?	
	Необходимо в месте наибольшего сжатия струи присоединить вакуумметр	2.1
	Нужно в месте наибольшего сжатия струи присоединить манометр	2.2
	Следует в месте наибольшего сжатия струи присоединить микроманометр	2.3
	Необходимо в месте наибольшего сжатия струи присоединить дифференциальный манометр	2.4
3	По какой зависимости определяют опытное значение коэффициента расхода μ?	
	$\mu = \varepsilon\varphi$	3.1
	$\mu = \varphi/\varepsilon$	3.2
	$\mu = Q / (S_n \sqrt{2gH})$	3.3
	$\mu = QS_n / \sqrt{2gH}$	3.4

Продолжение теста 5.7

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
4	Почему коэффициент расхода цилиндрического насадка больше коэффициента расхода круглого отверстия такого же диаметра?	
	Потому что сопротивление при движении жидкости через насадок больше	4.1
	Вследствие того, что сопротивление при движении жидкости через насадок уменьшается	4.2
	Потому что возрастают потери на местные сопротивления при движении через насадок	4.3
	Вследствие того, что в месте наибольшего сжатия струи образуется вакуум, приводящий к дополнительному подосу жидкости	4.4
5	В чем состоит физический смысл коэффициента φ скорости насадков?	
	Он характеризует степень неравномерности распределения скорости по поперечному сечению струи	5.1
	Он представляет собой отношение коэффициента расхода к коэффициенту сжатия струи: $\varphi = \mu / \epsilon$	5.2
	Он характеризует изменение скорости вдоль вытекающей струи	5.3
	Он представляет собой отношение действительной скорости к теоретической: $\varphi = v / \sqrt{2gH}$	5.4
6	Укажите причину образования вакуума во входном сечении насадков	
	Интенсивное парообразование в сжатом сечении и отрыв жидкости от стенок насадка	6.1
	Сжатие струи во входном сечении насадка, что приводит к увеличению скорости и понижению давления	6.2
	Рост перепада давления в сечениях до входа жидкости в насадок и в сжатом сечении	6.3

	Рост потерь напора на местные сопротивления при входе жидкости в насадок	6.4
--	--	-----

Продолжение теста 5.7

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
7	По какому выражению можно рассчитать величину вакуума в насадках?	
	$h_{\text{вак}} = 0,54H$	7.1
	$h_{\text{вак}} = 0,64H$	7.2
	$h_{\text{вак}} = 0,84H$	7.3
	$h_{\text{вак}} = 0,74H$	7.4
8	Какова зависимость расхода через насадок от напора в баке, из которого происходит истечение?	
	Изменение напора не оказывает никакого влияния на расход жидкости через насадок	8.1
	С увеличением напора в баке расход жидкости через насадок увеличивается	8.2
	Влияние напора имеет место только при истечении жидкости через конический сходящийся насадок	8.3
	С увеличением напора в баке расход жидкости через насадок уменьшается	8.4
9	В чем состоит физический смысл коэффициента μ насадков?	
	В том, что он представляет собой произведение коэффициентов сжатия и скорости: $\mu = \epsilon\varphi$	9.1
	Он характеризует степень неравномерности струи через насадок	9.2
	Он характеризует изменение площади поперечного сечения вдоль трубы	9.3

	Он представляет собой отношение действительного расхода к теоретическому: $\left[\mu = Q / (S_n \sqrt{2gH}) \right]$	9.4
--	--	-----

Продолжение теста 5.7

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
10	Возможно ли по координатам струи определить коэффициент скорости ϕ насадков?	
	При известных координатах струи коэффициент скорости определяется по формуле $\phi = x/2 \sqrt{zH}$	10.1
	По координатам струи можно определить коэффициент скорости только для внешнего цилиндрического насадка	10.2
	По координатам струи определить величину коэффициента скорости невозможно	10.3
	При известных координатах струи можно определить коэффициент скорости только для конического расходящегося насадка	10.4
11	В чем состоит явление срыва вакуума в насадках?	
	В сжатии струи во входном сечении насадка и образовании зоны с пониженным давлением	11.1
	В изменении формы поперечного сечения по длине струи	11.2
	В снижении расхода жидкости до расхода отверстия такого же диаметра	11.3
	В отгеснении (отрыве) жидкости от стенок насадка вследствие интенсивного парообразования	11.4
12	По какой формуле определяют время полного опорожнения бака при истечении через насадки?	

	$t_{\Pi} = 2S_6(\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2}) / (\mu S_H \sqrt{2g})$	12.1
	$t_{\Pi} = V / Q$	12.2
	$t_{\Pi} = Q / v$	12.3
	$t_{\Pi} = (2S_6 H_1) / (\mu S_H \sqrt{2g H_1})$	12.4

Продолжение теста 5.7

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
13	Как рассчитывают действительную скорость истечения жидкости через насадки?	
	Как частное от деления расхода жидкости на площадь поперечного сечения струи в сжатом сечении: $v = Q / S_{сж}$	13.1
	Как частное от деления расхода жидкости на периметр сечения насадка: $v = Q / x$	13.2
	По формуле $v = \varphi \sqrt{2gH}$	13.3
	По формуле $v = \sqrt{2gH}$	13.4
14	Почему при истечении жидкости через насадки коэффициенты скорости и расхода равны?	
	Потому что эти коэффициенты определяются для выходного сечения, в котором отсутствует сжатие струи	14.1
	Потому что в сжатом сечении струи образуется вакуум	14.2
	Потому что давление в сжатом сечении меньше, чем в выходном	14.3
	Потому что скорость в сжатом сечении больше, чем в выходном	14.4
15	В каком случае время истечения жидкости из бака будет меньшим: через круглое отверстие или цилиндрический насадок одинаковых диаметров?	

	Через круглое отверстие, так как при одинаковых размерах $\mu_{\text{отв}} < \mu_{\text{н}}$	15.1
	Время истечения в обоих случаях будет одинаковым	15.2
	Через цилиндрический насадок, так как при одинаковых размерах $\mu_{\text{н}} > \mu_{\text{отв}}$	15.3
	Наличие цилиндрического насадка не влияет на время истечения жидкости	15.4

Продолжение теста 5.7

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
16	По какой формуле определяют время истечения жидкости при переменном напоре?	
	$t = 2S_6 (\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2}) / (\mu S_{\text{н}} \sqrt{2g})$	16.1
	$t = V / Q$	16.2
	$t = 2S_6 H_1 / (\mu S_{\text{н}} \sqrt{2g H_1})$	16.3
	$t = 2S_6 \sqrt{H} / (\mu S_{\text{н}} \sqrt{2g})$	16.4
17	Что является причиной различия (уменьшения) между действительной и теоретической скоростью ($\phi < 1$)?	
	Действие сил тяжести на жидкость, вытекающую через насадок	17.1
	Наличие сил сопротивления (местные потери напора) в движущейся жидкости	17.2
	Наличие перепада давлений в сечениях у входа жидкости в насадок и сжатом сечении	17.3
	Действие сил инерции переносного движения при истечении через насадок	17.4
18	Какой из насадков имеет наиболее высокие значения коэффициентов расхода и скорости?	
	Внешний цилиндрический насадок	18.1
	Конический сходящийся насадок	18.2
	Конический расходящийся насадок	18.3
	Коноидальный насадок	18.4
19	Как определить расход жидкости через насадок при проведении опытов?	

	Он равен произведению средней скорости на площадь поперечного сечения насадка: $Q = vS_H$	19.1
	Он равен частному от деления объема вытекшей жидкости на время ее истечения: $Q = V/t$	19.2
	Он равен произведению средней скорости на периметр поперечного сечения насадка: $Q = v\chi_H$	19.3
	Он равен частному от деления объема вытекшей жидкости на площадь мерного бака: $Q = V/S_6$	19.4

Окончание теста 5.7

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
20	Как рассчитывают расход жидкости через насадок?	
	Он равен произведению средней скорости на площадь поперечного сечения струи в сжатом сечении: $Q = vS_{сж}$	20.1
	По выражению $Q = S_H \sqrt{2gH}$	20.2
	По выражению $Q = \mu S_H \sqrt{2gH}$	20.3
	Он равен произведению средней скорости на периметр поперечного сечения насадка: $Q = v\chi_H$	20.4

Примечание. Коды правильных ответов: 1.4, 2.2, 3.1, 4.1, 5.3, 6.1, 7.1, 8.4, 9.3, 10.2, 11.4, 12.3, 13.4, 14.1, 15.2, 16.2, 17.1, 18.3, 19.4, 20.4.

5.8. ИССЛЕДОВАНИЕ ДРОССЕЛЬНЫХ РАСХОДОМЕРНЫХ УСТРОЙСТВ

Цели работы:

- определение опытных значений коэффициентов расхода нормальной диафрагмы (или трубы Вентури) при различных расходах жидкости по трубопроводу;
- построение тарировочной кривой $Q = f(\Delta H)$ и графика зависимости $\mu_{оп} = f(Re)$ расходомерного устройства.

Введение в тему

Расходом называют количество жидкости, проходящее через поперечное сечение трубопровода в единицу времени. Различают расходы: объемный (Q , м³/с), массовый (M , кг/с), весовой (G , Н/с). Устройства для определения расхода называют расходомерами (мерные баки, механические счетчики, ротаметры, дроссельные расходомеры переменного перепада давлений, мерные водосливы и т. д.). Чаще всего определяют объемный расход Q , тогда массовый расход будет равен $M = \rho Q$, а весовой — $G = \rho g Q$, где ρ — плотность жидкости.

На практике для измерения расходов жидкости (газа или пара) в напорных трубопроводах часто используют дроссельные расходомеры переменного перепада давления. Расходомеры такого типа состоят из дроссельного устройства (диафрагмы, сопла, трубы Вентури) и подключенного к нему посредством соединительных трубок пьезометров (дифманометров) (рис. 5.17).

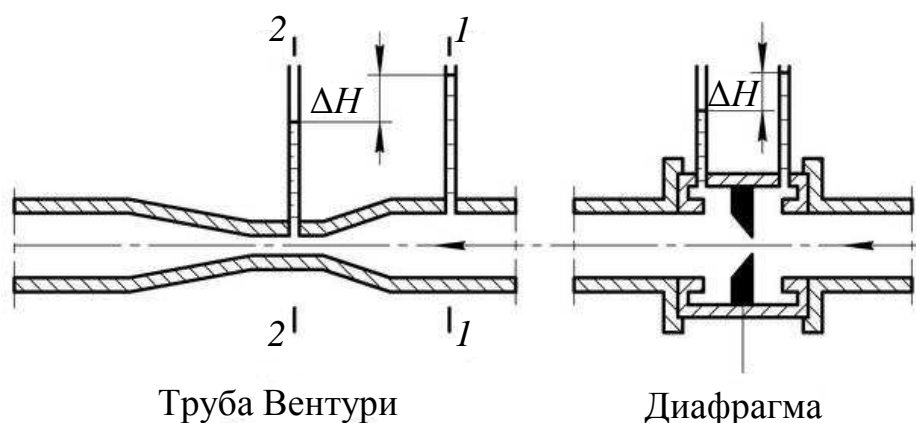


Рис. 5.17. Дроссельные расходомеры переменного перепада давления

Назначение дроссельного устройства — создавать сужение потока; назначение пьезометров (дифманометров) — измерять перепад давлений, обусловленный сужением потока (на участке дросселирования). Между получаемыми таким путем перепадами напоров и расходами жидкости имеется определенная функциональная зависимость для вычисления расхода по измеренному перепаду. Данная зависимость устанавливается с помощью уравнения Бернулли и уравнения неразрывности ($Q = \text{const}$)

потока движущейся жидкости для сечений 1-1 и 2-2, выбранных соответственно перед сужающим устройством и в месте наибольшего сужения потока.

Эта зависимость имеет вид

$$Q = \mu S_0 \sqrt{2\Delta p / \rho} = \mu S_0 \sqrt{2g\Delta H}, \quad (5.19)$$

где S_0 — площадь поперечного сечения сужающего устройства; Δp или ΔH — соответственно перепад давления или напоров в сечениях; ρ — плотность жидкости; g — ускорение силы тяжести; μ — коэффициент расхода сужающего устройства, представляющий собой соотношение

$$\mu = \varepsilon / \sqrt{\alpha_c + \zeta - \alpha_1 (S_c / S_1)^2},$$

где ε — коэффициент сжатия потока $\varepsilon = S_0 / S$; α_1 и α_c — коэффициенты Кориолиса для потока в выбранных сечениях; ζ — коэффициент гидравлического сопротивления на участке между выбранными сечениями; S_0 и S_c — соответственно площадь сечения трубопровода и площадь наиболее сжатого сечения потока за сужающим устройством.

Физический смысл коэффициента расхода (μ) можно уяснить из уравнения расхода (5.19). Коэффициент расхода дроссельного устройства показывает количество жидкости, проходящей в единицу времени через единицу площади поперечного сечения дроссельного устройства, при условии, что средняя скорость потока в этом сечении определяется формулой скорости свободного падения тела с высоты ΔH (высоты, равной разности статических напоров до сужения и в месте наибольшего сужения потока).

Из-за сложности гидродинамических явлений, возникающих при движении жидкости через дроссельное устройство, величину коэффициента расхода не удастся вычислить теоретическим путем, поскольку величины коэффициентов α_c , α_1 и ζ для данной конструкции расходомера не могут быть точно определены. Поэтому с достаточной для практических расчетов точностью значения коэффициента μ для каждого расходомерного устройства могут быть определены экспериментальным путем — методом пересчета из уравнения расхода. Для стандартных сужающих устройств значения

коэффициента с учетом влияния различных факторов приведены в литературе.

Как видно из рис. 5.17, наименьшее гидравлическое сопротивление создает труба Вентури, однако она сложна в изготовлении. Диафрагма имеет наибольшее гидравлическое сопротивление и вызывает значительные потери напора. Кроме того, острая кромка отверстия диафрагмы быстро изнашивается, что влечет за собой изменение коэффициента расхода. Однако она является конструктивно более простым устройством и поэтому получила широкое применение на практике.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис. 5.18) состоит из напорного бака 1 с успокоительной решеткой 2, в котором поддерживается постоянный напор за счет перелива жидкости через сливную трубу 3. К напорному баку присоединен трубопровод 4, на котором установлена труба Вентури 5 и диафрагма 6. На конце трубопровода имеется регулировочный кран 7, с помощью которого можно изменять расход жидкости по трубопроводу. Для измерения перепада статических напоров в соответствующих сечениях расходомерных устройств предназначены пьезометры 9. Измерение объема вытекающей

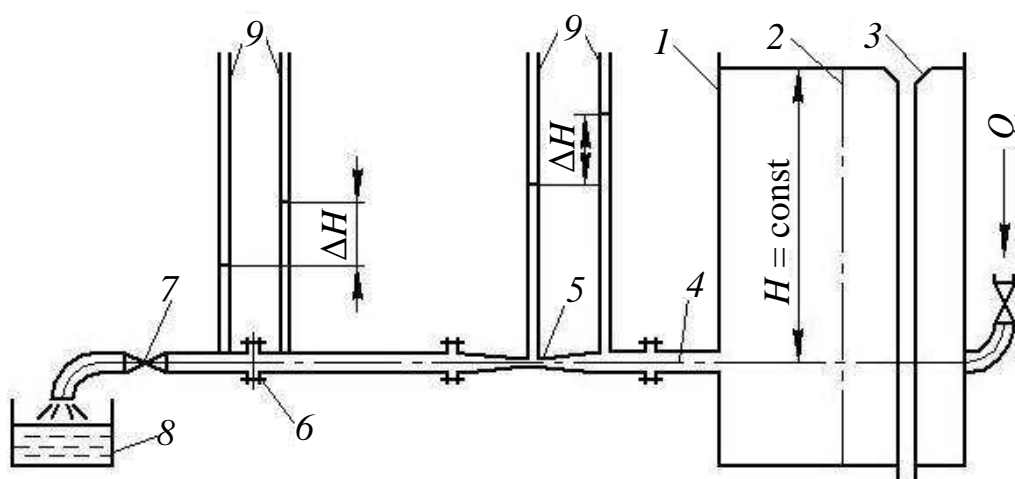


Рис. 5.18. Схема лабораторной установки

Вентури 5 и диафрагма 6. На конце трубопровода имеется регулировочный кран 7, с помощью которого можно изменять расход жидкости по трубопроводу. Для измерения перепада статических напоров в соответствующих сечениях расходомерных устройств предназначены пьезометры 9. Измерение объема вытекающей

жидкости проводится мерным баком δ , а время истечения — секундомером.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторной установкой.
2. Записать исходные данные: тип расходомерного устройства; род жидкости и ее температуру; внутренние диаметры основного трубопровода и расходомерного устройства; площадь мерного бака.
3. Убедиться в отсутствии в пьезометрах воздуха (при $Q = 0$ их показания должны быть одинаковыми).
4. Установить необходимый уровень жидкости в напорном баке (имеет место постоянный перелив через сливную трубу).
5. Открыть полностью регулировочный кран и провести замеры объема вытекшей жидкости и времени истечения, а также снять показания соответствующих пьезометров.

Таблица 5.11

№ п/п	Отсчеты по пьезометрам, м		Глубина воды, h , м	Объем вытекшей жидкости, V , м ³	Время наполнения, t , с	Расход жидкости, Q , м ³ /с	Средняя скорость, u , м/с	Число Re	Перепад напора, ΔH , м	Кэф. расхода, μ		Отклонение, %
	H_1	H_2								опытный	справочный	

6. Прикрывая кран, установить последовательно указанное преподавателем число различных расходов и провести те же измерения. Результаты измерений и расчетов занести в таблицу 5.11.

Обработка экспериментальных данных

1. Определить перепад статических напоров $\Delta H = H_1 - H_2$.
2. Рассчитать объем вытекшей жидкости $V = S_6 h$.
3. Найти расход жидкости по трубопроводу $Q = V/t$.

4. Вычислить среднюю скорость движения жидкости по трубопроводу $v = Q/S$, где S — площадь поперечного сечения трубопровода.

5. Определить число Рейнольдса $Re = \nu d / \nu$, где d — диаметр основного трубопровода; ν — кинематическая вязкость жидкости, определяемая в зависимости от температуры.

6. Рассчитать опытный коэффициент расхода $\mu_{оп}$ по формуле (5.20).

7. По соответствующим графикам в зависимости от соотношения d/D и числа Re найти справочное значение коэффициента расхода μ_c .

8. Определить расхождение значений $\mu_{оп}$ и μ_c :

$$[(\mu_{оп} - \mu_c) / \mu_c] 100 \%$$

9. Построить тарировочную кривую $Q = f(\Delta H)$ и график зависимости $\mu_{оп} = f(Re)$.

Проверочный тест 5.8

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
1	Дайте определение расхода жидкости	
	Количество жидкости, проходящее через поперечное сечение трубопровода в единицу времени	1.1
	Количество жидкости, проходящее через поперечное сечение трубопровода за какой-то промежуток времени	1.2
	Количество жидкости, проходящее через поперечное сечение трубопровода длиной один метр	1.3
	Количество жидкости, поступившее в мерный бак из трубопровода за какой-то промежуток времени	1.4
2	Какие расходомеры называют расходомерами переменного перепада давлений?	

	Расходомерные устройства, в которых жидкость, протекающая через прибор, приводит во вращения крыльчатку или вертушку	2.1
	Расходомерные устройства, состоящие из стенки, устанавливаемой поперек потока и имеющей вырез, через который переливается жидкость	2.2
	Расходомерные устройства, состоящие из дроссельного устройства и подключенных к нему пьезометров (дифманометров)	2.3
	Расходомерные устройства, состоящие из пьезометрической трубки и трубки полного напора	2.4
3	Какое влияние температура жидкости оказывает на число Рейнольдса?	
	С увеличением температуры число Re уменьшается	3.1
	Температура жидкости не оказывает никакого влияния на число Re	3.2
	С увеличением температуры число Re увеличивается	3.3
	Влияние температуры на число Re проявляется только при движении воды	3.4

Продолжение теста 5.8

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
4	Какое из расходомерных устройств (диафрагма или труба Вентури) имеет большее гидравлическое сопротивление? Почему?	
	Труба Вентури, так как она более сложна в изготовлении по сравнению с диафрагмой	4.1
	Диафрагма, так как она является конструктивно более простым устройством	4.2
	Диафрагма, так как происходит резкое изменение поперечного сечения, что вызывает значительные потери напора	4.3
	Труба Вентури, так как она имеет более плавные очертания составляющих элементов	4.4
5	По какому выражению определяют весовой	

	расход, если известен объемный?	
	$G = \rho Q$	5.1
	$G = \rho g Q$	5.2
	$G = Q / \rho g$	5.3
	$G = Q / \rho$	5.4
6	Какие виды расходов различают?	
	Расходы жидкостей и газов	6.1
	Объемный, весовой и массовый расходы	6.2
	Расходы, определяемые объемным способом, по средней скорости, расходомерами	6.3
	Расходы по трубам, лоткам, каналам	6.4
7	Для чего предназначено дроссельное устройство?	
	Для пропуска жидкости со скоростью, отличной от скорости в основном трубопроводе	7.1
	Создавать сужение потока, приводящее к возникновению перепада давлений	7.2
	Для измерения потерь напора при движении через него жидкости	7.3
	Создавать определенные препятствия для движения жидкости по трубопроводу	7.4

Продолжение теста 5.8

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
8	По какой формуле рассчитывают расход жидкости Q через расходное устройство?	
	$Q = \mu S_0 \sqrt{2g\Delta H}$	8.1
	$Q = V / \tau$	8.2
	$Q = vS$	8.3
	$Q = \mu S_0 \sqrt{2\rho g\Delta H}$	8.4
9	В чем состоит физический смысл коэффициента расхода?	
	Он характеризует расход жидкости через трубопровод, на котором установлено расходомерное устройство	9.1

	Он показывает, какое количество жидкости проходит через поперечное сечение трубопровода в мерный бак	9.2
	Он характеризует интенсивность изменения скорости при движении жидкости через расходомерное устройство	9.3
	Он показывает, какое количество жидкости проходит через единицу площади поперечного сечения дроссельного устройства при условии определения скорости по выражению $v = \sqrt{2g\Delta H}$	9.4
10	Назовите способы определения расхода жидкости	
	Гидрометрический, гидравлический, физический, гидрологический	10.1
	При помощи мерных баков, механических счетчиков, ротаметров, дроссельных расходомеров, мерных водосливов	10.2
	Объемный, весовой, массовый	10.3
	Объемный, по средней скорости, при помощи расходомерных устройств	10.4

Продолжение теста 5.8

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
11	Какими приборами измеряют перепад давлений (напоров) в расходомерных устройствах?	
	При помощи трубки Пито – Прандтля	11.1
	При помощи манометров	11.2
	При помощи пьезометров (дифманометров)	11.3
	При помощи вакуумметров	11.4
12	Как определяется расход жидкости Q объемным способом?	
	Он равен объему вытекшей жидкости, умноженному на время его вытекания: $Q = V\tau$	12.1

	Он равен произведению площади мерного бака на глубину жидкости в нем: $Q = S_s h$	12.2
	Он равен частному от деления площади мерного бака на глубину жидкости в нем: $Q = S_s / h$	12.3
	Он равен объему вытекшей жидкости, деленному на время его вытекания: $Q = V / \tau$	12.4
13	Назовите причину образования перепада статических напоров в расходомерных устройствах	
	Вязкость движущейся жидкости	13.1
	Сужение потока на участке дросселирования	13.2
	Структура движущегося потока	13.3
	Неравномерность распределения скоростей в сечениях	13.4
14	По какому выражению определяют коэффициент расхода, μ?	
	$\mu = Q / S_0 \sqrt{2g\Delta H}$	14.1
	$\mu = QS_0 / \sqrt{2g\Delta H}$	14.2
	$\mu = Q / S_0 \sqrt{2\rho g\Delta H}$	14.3
	$\mu = Q / S_0 \sqrt{2\Delta p}$	14.4

Продолжение теста 5.8

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
15	Какова связь между перепадом напоров ΔH и расходом Q для расходомерных устройств?	
	С увеличением перепада напоров ΔH расход жидкости увеличивается при ее движении как через диафрагму, так и через трубку Вентури	15.1
	С увеличением перепада напоров ΔH расход жидкости увеличивается только при движении ее через трубу Вентури	15.2

	С увеличением перепада напоров ΔH расход жидкости увеличивается только при движении ее через диафрагму	15.3
	С увеличением перепада напоров ΔH расход жидкости снижается при ее движении как через диафрагму, так и через трубу Вентури	15.4
16	По какой зависимости определяют число Рейнольдса?	
	$Re = v\nu / R$	16.1
	$Re = vR / \nu$	16.2
	$Re = vd / \nu$	16.3
	$Re = vS / \nu$	16.4
17	Каким способом осуществляется изменение расхода жидкости по трубопроводу на лабораторной установке?	
	Путем изменения наклона трубопровода	17.1
	Путем регулирования производительности насоса	17.2
	Путем ограничения подачи воды от насоса в напорный бак трубопровода	17.3
	При помощи регулировочного крана, установленного на трубопроводе	17.4

Окончание теста 5.8

Код вопроса	Проверочный вопрос	Коды ответов
	Ответы на проверочный вопрос	
18	Каким образом обеспечивается постоянный напор H при проведении опытов?	
	За счет перелива жидкости через сливную трубу	18.1
	За счет наличия на трубопроводе регулировочного крана	18.2
	За счет наличия на трубопроводе расходомерных устройств	18.3
	За счет работы центробежного насоса	18.4

19	Как определяют среднюю скорость движения жидкости по трубопроводу?	
	По выражению $v = L / t$	19.1
	Она равна частному от деления расхода жидкости на площадь поперечного (живого) сечения ($v = Q / S$)	19.2
	По выражению $v = \sqrt{2gH}$	19.3
	Она равна частному от деления объема вытекшей жидкости на площадь поперечного (живого) сечения трубопровода ($v = V / S$)	19.4
20	По какой зависимости определяют массовый расход, если известен объемный Q?	
	$M = Q / \rho$	20.1
	$M = Q\rho g$	20.2
	$M = Q\rho$	20.3
	$M = Q / \rho g$	20.4

Примечание. Коды правильных ответов: 1.1, 2.3, 3.3, 4.3, 5.2, 6.2, 7.2, 8.1, 9.4, 10.4, 11.3, 12.4, 13.2, 14.1, 15.1, 16.3, 17.4, 18.1, 19.2, 20.3.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

П1.1. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ И ПЕРЕНОСНЫЕ СВОЙСТВА ВОДЫ ПРИ ДАВЛЕНИИ $p = 0,101\ 325$ МПа*

T	ρ	a	c_p / c_v	$\mu \cdot 10^6$	$\nu \cdot 10^6$
275	999,94	1 411,5	1,000 2	1 681,8	0,016 819
280	999,91	1 434,3	1,000 3	1 433,5	0,014 337
285	999,52	1 454,4	1,001 8	1 239,2	0,012 398
290	998,8	1 472,3	1,004 5	1 084	0,010 853
295	997,81	1 487,9	1,008	957,84	0,009 599
300	996,56	1 501,5	1,012 2	853,83	0,008 568
305	995,08	1 513,3	1,017 1	766,94	0,007 707
310	993,38	1 523,4	1,022 4	693,54	0,006 982
315	991,5	1 531,9	1,028 2	630,92	0,006 363
320	989,43	1 538,9	1,034 4	577,04	0,005 832
325	987,19	1 544,5	1,041 0	530,31	0,005 372
330	984,79	1 548,9	1,047 9	489,5	0,004 971
335	982,23	1 552,0	1,055 1	453,66	0,004 619
340	979,54	1 554,0	1,062 6	421,99	0,004 308
345	976,7	1 555,0	1,070 4	393,87	0,004 033
350	973,73	1 554,9	1,078 4	368,78	0,003 787
355	970,63	1 554,0	1,086 7	346,32	0,003 568
360	967,4	1 552,1	1,095 3	326,11	0,003 371
365	964,06	1 549,3	1,104	307,87	0,003 194
370	960,59	1 545,8	1,113	291,36	0,003 033
373,13	958,37	1 543,2	1,118 7	281,81	0,002 941

* T — температура, К; ρ — плотность, кг/м³; a — скорость звука, м/с; c_p / c_v — отношение изобарной и изохорной теплоемкостей; μ — коэффициент динамической вязкости, Па · с; ν — коэффициент кинематической вязкости, м²/с.

П1.2. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ И ПЕРЕНОСНЫЕ СВОЙСТВА ВОДЫ НА ЛИНИИ КИПЕНИЯ

T	P	ρ'	a	c_p / c_v	$\mu \cdot 10^6$	$\nu \cdot 10^6$
273,16	0,000 612	999,79	1 402,3	1,000 6	179,12	1,791 2
275	0,000 698	999,89	1 411,4	1,000 2	168,2	1,682 2
280	0,000 992	999,86	1 434,1	1,000 3	143,37	1,433 9

Окончание прил. П1.2

T	P	ρ'	a	c_p / c_v	$\mu \cdot 10^6$	$\nu \cdot 10^6$
285	0,001 389	999,47	1 454,3	1,001 8	123,93	1,239 9
290	0,001 92	998,76	1 472,1	1,004 4	108,4	1,085 4
295	0,002 621	997,76	1 487,7	1,008	95,787	0,960 02
300	0,003 537	996,51	1 501,4	1,012 2	85,384	0,856 83
305	0,004 719	995,03	1 513,1	1,017	76,695	0,770 77
310	0,006 231	993,34	1 523,2	1,022 4	69,354	0,698 19
315	0,008 145	991,46	1 531,7	1,028 2	63,091	0,636 35
320	0,010 546	989,39	1 538,7	1,034 4	57,702	0,583 21
325	0,013 531	987,15	1 544,3	1,041	53,029	0,537 19
330	0,017 213	984,75	1 548,7	1,047 9	48,949	0,497 07
335	0,021 718	982,2	1 551,9	1,055 1	45,364	0,461 86
340	0,027 188	979,5	1 553,9	1,062 6	42,197	0,430 8
345	0,033 783	976,67	1 554,9	1,070 4	39,385	0,403 26
350	0,041 682	973,7	1 554,8	1,078 4	36,877	0,378 73
355	0,051 08	970,61	1 553,9	1,086 7	34,63	0,356 79
360	0,062 194	967,39	1 552	1,095 3	32,61	0,337 09
365	0,075 26	964,05	1 549,3	1,104	30,787	0,319 35
370	0,090 535	960,59	1 545,8	1,113	29,136	0,303 31
375	0,108 3	957,01	1 541,5	1,122 2	27,636	0,288 77

П1.3. ИЗОБАРНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ РАСШИРЕНИЯ (β , $1 / T$) ВОДЫ НА ЛИНИИ КИПЕНИЯ

$T, ^\circ\text{C}$	$\beta \cdot 10^3$	$T, ^\circ\text{C}$	$\beta \cdot 10^3$
10	0,09	90	0,71
20	0,21	100	0,77
30	0,30	120	0,90
40	0,38	140	1,02
50	0,46	160	1,14
60	0,52	180	1,30
70	0,59	200	1,45
80	0,65	220	1,60

П1.4. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ И ПЕРЕНОСНЫЕ СВОЙСТВА ПАРА НА ЛИНИИ КОНДЕНСАЦИИ

T	P	ρ'	a	c_p/c_v	$\mu \cdot 10^6$	$\nu \cdot 10^6$
273,16	0,000 612	0,004 855	409	1,328 5	9,216 3	18,985
275	0,000 698	0,005 507	410,33	1,328 4	9,259 6	16,815
280	0,000 992	0,007 681	413,92	1,328	9,381 5	12,214
285	0,001 389	0,010 571	417,48	1,327 7	9,509	8,995 7
290	0,001 92	0,014 363	420,99	1,327 5	9,641 4	6,712 9
295	0,002 621	0,019 281	424,46	1,327 3	9,778 4	5,071 6
300	0,003 537	0,025 59	427,89	1,327 2	9,919 5	3,876 4
305	0,004 719	0,033 598	431,28	1,327 1	10,064	2,995 5
310	0,006 231	0,043 663	434,63	1,327 2	10,213	2,339
315	0,008 145	0,056 195	437,93	1,327 3	10,364	1,844 3
320	0,010 546	0,071 662	441,18	1,327 5	10,518	1,467 7
325	0,013 531	0,090 59	444,39	1,327 8	10,675	1,178 3
330	0,017 213	0,113 57	447,54	1,328 2	10,833	0,953 88
335	0,021 718	0,141 27	450,64	1,328 7	10,994	0,778 27
340	0,027 188	0,174 4	453,68	1,329 3	11,157	0,639 73
345	0,033 783	0,213 78	456,67	1,33	11,321	0,529 57
350	0,041 682	0,260 29	459,58	1,330 9	11,487	0,441 33
355	0,051 08	0,314 87	462,44	1,331 9	11,654	0,370 13
360	0,062 194	0,378 58	465,22	1,333	11,823	0,312 29
365	0,075 26	0,452 53	467,93	1,334 4	11,992	0,265
370	0,090 535	0,537 92	470,57	1,335 9	12,162	0,226 09
375	0,108 3	0,636 05	473,13	1,337 6	12,332	0,193 89

П1.5. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ И ПЕРЕНОСНЫЕ СВОЙСТВА ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА ПРИ ДАВЛЕНИИ

$p = 0,101\ 325$ МПа

T	ρ	a	c_p/c_v	$\mu \cdot 10^6$	$\nu \cdot 10^6$
373,15	0,597 61	472,2	1,336 9	12,269	0,205 31
378,15	0,589 09	475,73	1,336	12,456	0,211 44
383,15	0,580 85	479,16	1,335	12,643	0,217 67
388,15	0,572 88	482,52	1,333 9	12,832	0,223 99
393,15	0,565 15	485,82	1,332 8	13,022	0,230 42
398,15	0,557 66	489,07	1,331 8	13,213	0,236 94

Окончание прил. П1.5

T	ρ	a	c_p / c_v	$\mu \cdot 10^6$	$\nu \cdot 10^6$
403,15	0,550 39	492,27	1,330 8	13,405	0,243 56
408,15	0,543 32	495,43	1,329 7	13,598	0,250 28
413,15	0,536 45	498,56	1,328 8	13,792	0,257 1
418,15	0,529 76	501,64	1,327 8	13,987	0,264 02
423,15	0,523 26	504,69	1,326 8	14,182	0,271 04
428,15	0,516 92	507,71	1,325 9	14,379	0,278 16
433,15	0,510 75	510,7	1,325	14,576	0,285 38
438,15	0,504 73	513,67	1,324 1	14,774	0,292 71
443,15	0,498 86	516,6	1,323 2	14,972	0,300 13
448,15	0,493 13	519,5	1,322 3	15,172	0,307 66
453,15	0,487 54	522,38	1,321 4	15,371	0,315 28
458,15	0,482 08	525,24	1,320 5	15,572	0,323 01
463,15	0,476 75	528,07	1,319 7	15,773	0,330 84
468,15	0,471 54	530,88	1,318 9	15,974	0,338 77
473,15	0,466 45	533,67	1,318	16,176	0,346 8
478,15	0,461 46	536,44	1,317 2	16,379	0,354 94
483,15	0,456 59	539,19	1,316 4	16,582	0,363 17
488,15	0,451 83	541,91	1,315 6	16,785	0,371 5
493,15	0,447 16	544,62	1,314 8	16,989	0,379 94
498,15	0,442 6	547,31	1,314	17,194	0,388 47
503,15	0,438 12	549,98	1,313 2	17,398	0,397 11
508,15	0,433 74	552,63	1,312 5	17,603	0,405 84
513,15	0,429 45	555,26	1,311 7	17,808	0,414 68
518,15	0,425 25	557,88	1,311	18,014	0,423 61
523,15	0,421 13	560,48	1,310 2	18,22	0,432 64
528,15	0,417 09	563,07	1,309 5	18,426	0,441 78
533,15	0,413 12	565,63	1,308 7	18,632	0,451 01
538,15	0,409 24	568,19	1,308	18,839	0,460 34
543,15	0,405 43	570,73	1,307 3	19,046	0,469 77
548,15	0,401 69	573,25	1,306 5	19,253	0,479 3
553,15	0,398 01	575,76	1,305 8	19,46	0,488 92
558,15	0,394 41	578,25	1,305 1	19,667	0,498 65
563,15	0,390 87	580,73	1,304 4	19,875	0,508 47
568,15	0,387 4	583,2	1,303 7	20,082	0,518 39
573,15	0,383 99	585,65	1,303	20,29	0,528 4

П1.6. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ И ПЕРЕНОСНЫЕ СВОЙСТВА ВОЗДУХА ПРИ ДАВЛЕНИИ $p = 0,101\ 325$ МПа

T	ρ	c_p / c_v	a	$\mu \cdot 10^6$	$\nu \cdot 10^6$
233,15	1,515 6	1,404 3	306,2	15,152	0,099 97
238,15	1,483 6	1,404 1	309,48	15,417	0,103 92
243,15	1,453	1,403 9	312,72	15,681	0,107 92
248,15	1,423 6	1,403 7	315,93	15,942	0,111 99
253,15	1,395 3	1,403 5	319,1	16,201	0,116 11
258,15	1,368 2	1,403 3	322,24	16,458	0,120 3
263,15	1,342 1	1,403 1	325,35	16,714	0,124 54
268,15	1,317	1,402 9	328,43	16,967	0,128 84
273,15	1,292 8	1,402 7	331,48	17,218	0,133 19
278,15	1,269 4	1,402 5	334,5	17,468	0,137 6
283,15	1,247	1,402 4	337,49	17,716	0,142 07
288,15	1,225 2	1,402 2	340,45	17,962	0,146 6
293,15	1,204 3	1,402	343,38	18,206	0,151 17
298,15	1,184	1,401 8	346,29	18,448	0,155 81
303,15	1,164 5	1,401 6	349,17	18,689	0,160 49
308,15	1,145 5	1,401 3	352,03	18,928	0,165 23
313,15	1,127 2	1,401 1	354,86	19,165	0,170 03
318,15	1,109 4	1,400 9	357,67	19,401	0,174 87
323,15	1,092 2	1,400 7	360,45	19,635	0,179 77
328,15	1,075 5	1,400 4	363,21	19,868	0,184 72
333,15	1,059 4	1,400 2	365,94	20,099	0,189 73
338,15	1,043 7	1,399 9	368,65	20,329	0,194 78
343,15	1,028 4	1,399 7	371,34	20,557	0,199 88
348,15	1,013 7	1,399 4	374,01	20,784	0,205 04
353,15	0,999 28	1,399 1	376,66	21,009	0,210 24
358,15	0,985 31	1,398 8	379,29	21,233	0,215 49
363,15	0,971 72	1,398 5	381,89	21,455	0,220 8
368,15	0,958 51	1,398 2	384,48	21,677	0,226 15
373,15	0,945 65	1,397 9	387,04	21,896	0,231 55
378,15	0,933 13	1,397 6	389,59	22,115	0,237
383,15	0,920 93	1,397 3	392,12	22,332	0,242 5
388,15	0,909 06	1,396 9	394,63	22,548	0,248 04
393,15	0,897 48	1,396 6	397,12	22,763	0,253 63
398,15	0,886 2	1,396 2	399,59	22,977	0,259 27

Окончание прил. П1.6

T	ρ	c_p / c_v	a	$\mu \cdot 10^6$	$\nu \cdot 10^6$
403,15	0,875 2	1,395 9	402,04	23,189	0,264 96
408,15	0,864 47	1,395 5	404,48	23,4	0,270 69
413,15	0,854	1,395 1	406,89	23,61	0,276 47
418,15	0,843 78	1,394 7	409,3	23,819	0,282 29
423,15	0,833 8	1,394 3	411,68	24,027	0,288 16
428,15	0,824 05	1,393 9	414,05	24,234	0,294 08
433,15	0,814 53	1,393 5	416,4	24,439	0,300 04
438,15	0,805 23	1,393 1	418,74	24,644	0,306 04
443,15	0,796 14	1,392 6	421,06	24,847	0,312 09
448,15	0,787 25	1,392 2	423,36	25,049	0,318 19
453,15	0,778 56	1,391 7	425,65	25,251	0,324 33
458,15	0,770 06	1,391 3	427,92	25,451	0,330 51
463,15	0,761 74	1,390 8	430,18	25,65	0,336 73
468,15	0,753 6	1,390 3	432,43	25,849	0,343
473,15	0,745 63	1,389 9	434,66	26,046	0,349 32
478,15	0,737 83	1,389 4	436,88	26,243	0,355 67
483,15	0,730 19	1,388 9	439,08	26,438	0,362 07
488,15	0,722 71	1,388 4	441,27	26,633	0,368 51
493,15	0,715 38	1,387 9	443,44	26,826	0,374 99
498,15	0,708 2	1,387 4	445,6	27,019	0,381 52
503,15	0,701 16	1,386 9	447,75	27,211	0,388 09
508,15	0,694 26	1,386 3	449,89	27,402	0,394 69
513,15	0,687 49	1,385 8	452,01	27,592	0,401 35
518,15	0,680 85	1,385 3	454,12	27,781	0,408 04
523,15	0,674 34	1,384 7	456,22	27,97	0,414 77
528,15	0,667 96	1,384 2	458,31	28,157	0,421 54
533,15	0,661 69	1,383 7	460,38	28,344	0,428 36
538,15	0,655 54	1,383 1	462,45	28,53	0,435 22
543,15	0,649 51	1,382 6	464,5	28,715	0,442 11
548,15	0,643 58	1,382	466,54	28,9	0,449 05
553,15	0,637 76	1,381 4	468,57	29,084	0,456 02
558,15	0,632 05	1,380 9	470,59	29,266	0,463 04
563,15	0,626 44	1,380 3	472,59	29,449	0,470 1
568,15	0,620 92	1,379 8	474,59	29,63	0,477 19
573,15	0,615 5	1,379 2	476,58	29,811	0,484 33

**П1.7. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ И ПЕРЕНОСНЫЕ СВОЙСТВА
ГЕЛИЯ-4 ПРИ ДАВЛЕНИИ $p = 0,101\ 325$ МПа**

T	ρ	c_p / c_v	a	$\mu \cdot 10^6$	$\nu \cdot 10^6$
233,15	0,209 09	1,666 5	898,94	16,79	0,803 01
238,15	0,204 7	1,666 5	908,52	17,033	0,832 08
243,15	0,200 5	1,666 5	917,99	17,274	0,861 57
248,15	0,196 46	1,666 5	927,37	17,514	0,891 49
253,15	0,192 58	1,666 5	936,66	17,753	0,921 83
258,15	0,188 85	1,666 5	945,85	17,99	0,952 6
263,15	0,185 27	1,666 5	954,96	18,226	0,983 78
268,15	0,181 81	1,666 5	963,98	18,461	1,015 4
273,15	0,178 49	1,666 5	972,91	18,695	1,047 4
278,15	0,175 28	1,666 5	981,77	18,927	1,079 8
283,15	0,172 19	1,666 5	990,54	19,158	1,112 6
288,15	0,169 2	1,666 5	999,24	19,388	1,145 9
293,15	0,166 32	1,666 5	1 007,9	19,618	1,179 5
298,15	0,163 53	1,666 5	1 016,4	19,846	1,213 6
303,15	0,160 83	1,666 5	1 024,9	20,073	1,248
308,15	0,158 23	1,666 5	1 033,3	20,299	1,282 9
313,15	0,155 7	1,666 5	1 041,6	20,524	1,318 2
318,15	0,153 25	1,666 6	1 049,9	20,748	1,353 8
323,15	0,150 88	1,666 6	1 058,1	20,971	1,389 9
328,15	0,148 59	1,666 6	1 066,3	21,193	1,426 3
333,15	0,146 36	1,666 6	1 074,4	21,415	1,463 2
338,15	0,144 19	1,666 6	1 082,4	21,635	1,500 4
343,15	0,142 09	1,666 6	1 090,4	21,854	1,538
348,15	0,140 05	1,666 6	1 098,3	22,073	1,576
353,15	0,138 07	1,666 6	1 106,1	22,291	1,614 4
358,15	0,136 15	1,666 6	1 113,9	22,508	1,653 2
363,15	0,134 27	1,666 6	1 121,7	22,724	1,692 4
368,15	0,132 45	1,666 6	1 129,3	22,939	1,731 9
373,15	0,130 68	1,666 6	1 137	23,154	1,771 8
378,15	0,128 95	1,666 6	1 144,6	23,367	1,812 2
383,15	0,127 27	1,666 6	1 152,1	23,58	1,852 8
388,15	0,125 63	1,666 6	1 159,6	23,792	1,893 9
393,15	0,124 03	1,666 6	1 167	24,004	1,935 3
398,15	0,122 47	1,666 6	1 174,4	24,214	1,977 1

Окончание прил. П1.7

T	ρ	c_p/c_v	a	$\mu \cdot 10^6$	$\nu \cdot 10^6$
403,15	0,120 95	1,666 6	1 181,8	24,424	2,019 3
408,15	0,119 47	1,666 6	1 189,1	24,634	2,061 9
413,15	0,118 03	1,666 6	1 196,3	24,842	2,104 8
418,15	0,116 62	1,666 6	1 203,5	25,05	2,148 1
423,15	0,115 24	1,666 6	1 210,7	25,257	2,191 7
428,15	0,113 89	1,666 6	1 217,8	25,464	2,235 7
433,15	0,112 58	1,666 6	1 224,9	25,67	2,280 1
438,15	0,111 3	1,666 6	1 232	25,875	2,324 9
443,15	0,110 04	1,666 6	1 239	26,079	2,37
448,15	0,108 81	1,666 6	1 245,9	26,283	2,415 5
453,15	0,107 61	1,666 6	1 252,9	26,487	2,461 3
458,15	0,106 44	1,666 6	1 259,7	26,689	2,507 5
463,15	0,105 29	1,666 6	1 266,6	26,892	2,554
468,15	0,104 17	1,666 6	1 273,4	27,093	2,600 9
473,15	0,103 07	1,666 6	1 280,2	27,294	2,648 2
478,15	0,101 99	1,666 6	1 286,9	27,494	2,695 8
483,15	0,100 93	1,666 6	1 293,6	27,694	2,743 8
488,15	0,099 9	1,666 6	1 300,3	27,893	2,792 1
493,15	0,098 887	1,666 6	1 307	28,092	2,840 8
498,15	0,097 895	1,666 6	1 313,6	28,29	2,889 8
503,15	0,096 922	1,666 6	1 320,1	28,487	2,939 2
508,15	0,095 969	1,666 6	1 326,7	28,684	2,988 9
513,15	0,095 034	1,666 6	1 333,2	28,881	3,039
518,15	0,094 117	1,666 6	1 339,7	29,077	3,089 4
523,15	0,093 218	1,666 6	1 346,1	29,272	3,140 2
528,15	0,092 336	1,666 6	1 352,5	29,467	3,191 3
533,15	0,091 47	1,666 6	1 358,9	29,662	3,242 8
538,15	0,090 621	1,666 6	1 365,2	29,856	3,294 6
543,15	0,089 787	1,666 6	1 371,6	30,049	3,346 7
548,15	0,088 968	1,666 6	1 377,9	30,242	3,399 2
553,15	0,088 164	1,666 6	1 384,1	30,434	3,452
558,15	0,087 374	1,666 6	1 390,4	30,626	3,505 2
563,15	0,086 599	1,666 6	1 396,6	30,818	3,558 7
568,15	0,085 837	1,666 6	1 402,8	31,009	3,612 5
573,15	0,085 088	1,666 6	1 408,9	31,199	3,666 7

**П1.8. ИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ КОЭФФИЦИЕНТ СЖИМАЕМОСТИ
($\chi, 1/\text{Па}$) НЕКОТОРЫХ ЖИДКОСТЕЙ ПРИ ДАВЛЕНИИ
 $p = 0,101\ 325\ \text{МПа}$ ***

Жидкость	$\chi \cdot 10^9$	Жидкость	$\chi \cdot 10^9$
Вода	0,462	Бром	0,591
Ртуть	0,0402	Спирт	1,12
Керосин	0,786	Эфир	1,87
Бензин	0,770	Сероуглерод	0,908
Глицерин	0,255	Масло (оливковое)	0,642
Бензол	0,906	Жидкий гелий	81,5

* — изотермический коэффициент сжимаемости,.

**П1.9. ИЗОБАРНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ РАСШИРЕНИЯ
НЕКОТОРЫХ ЖИДКОСТЕЙ ПРИ ДАВЛЕНИИ $p = 0,101\ 325\ \text{МПа}$**

Жидкость	$\beta \cdot 10^3$	Жидкость	$\beta \cdot 10^3$
Ртуть	0,09	Эфир	0,71
Керосин	0,21	Глицерин	0,77
Спирт этиловый	0,30	Масло	0,90

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

П2.1. ТАБЛИЦЫ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ ДВУХАТОМНЫХ ГАЗОВ ($K = 1,4$)

λ	τ	π	ε	q	M
0,00	1,000 0	1,000 0	1,000 0	0,000 0	0,000 0
0,01	1,000 0	0,999 9	0,999 9	0,015 8	0,009 1
0,02	0,999 9	0,999 8	0,999 8	0,031 5	0,018 3
0,03	0,999 9	0,999 5	0,999 7	0,047 3	0,027 4
0,04	0,999 7	0,999 0	0,999 3	0,063 1	0,036 5
0,05	0,999 6	0,998 6	0,999 0	0,078 8	0,045 7
0,06	0,999 4	0,997 9	0,998 5	0,094 5	0,054 8
0,07	0,999 2	0,997 1	0,997 9	0,110 2	0,063 9
0,08	0,998 9	0,996 3	0,997 4	0,125 9	0,073 1
0,09	0,998 7	0,995 3	0,996 7	0,141 5	0,082 2
0,10	0,998 3	0,994 2	0,995 9	0,157 1	0,091 4
0,11	0,998 0	0,992 9	0,994 9	0,172 6	0,100 5
0,12	0,997 6	0,991 6	0,994 0	0,188 2	0,109 7
0,13	0,997 2	0,990 1	0,992 9	0,203 6	0,119 0
0,14	0,996 7	0,988 6	0,991 8	0,219 0	0,128 0
0,15	0,996 3	0,987 0	0,990 7	0,234 4	0,137 2
0,16	0,995 7	0,985 1	0,989 3	0,249 7	0,146 0
0,17	0,995 2	0,983 2	0,988 0	0,264 9	0,156 0
0,18	0,994 6	0,981 2	0,986 6	0,280 1	0,165 0
0,19	0,994 0	0,979 1	0,985 0	0,295 2	0,174 0
0,20	0,993 3	0,976 8	0,983 4	0,310 2	0,183 0
0,21	0,992 7	0,974 5	0,981 7	0,325 2	0,192 0
0,22	0,991 9	0,972 0	0,979 9	0,340 1	0,202 0
0,23	0,991 2	0,969 5	0,978 1	0,354 9	0,210 9
0,24	0,990 4	0,966 8	0,976 2	0,369 6	0,220 2
0,25	0,989 6	0,964 0	0,974 2	0,384 2	0,229 0
0,26	0,988 7	0,961 1	0,972 1	0,398 7	0,238 7
0,27	0,987 9	0,958 1	0,969 9	0,413 1	0,248 0
0,28	0,986 9	0,955 0	0,967 7	0,427 4	0,257 3
0,29	0,986 0	0,951 8	0,965 3	0,441 6	0,267 0

Продолжение прил. П2.1

λ	τ	π	ε	q	M
0,30	0,985 0	0,948 5	0,963 0	0,455 7	0,276 0
0,31	0,984 0	0,945 1	0,960 5	0,469 7	0,285 0
0,32	0,982 9	0,941 5	0,957 9	0,483 5	0,294 7
0,33	0,981 9	0,937 9	0,955 2	0,497 2	0,304 0
0,34	0,980 7	0,934 2	0,952 5	0,510 9	0,313 4
0,35	0,979 6	0,930 3	0,949 7	0,524 3	0,322 8
0,36	0,978 4	0,926 5	0,946 9	0,537 7	0,332 2
0,37	0,977 2	0,922 4	0,943 9	0,550 9	0,341 7
0,38	0,975 9	0,918 3	0,940 9	0,564 0	0,351 1
0,39	0,974 7	0,914 1	0,937 8	0,576 9	0,360 6
0,40	0,973 3	0,909 7	0,934 6	0,589 7	0,370 1
0,41	0,972 0	0,905 3	0,931 4	0,602 4	0,379 6
0,42	0,970 6	0,900 8	0,928 1	0,614 9	0,389 2
0,43	0,969 2	0,896 2	0,924 7	0,627 2	0,398 7
0,44	0,967 7	0,891 5	0,921 2	0,639 4	0,408 3
0,45	0,966 3	0,886 8	0,917 8	0,651 5	0,417 9
0,46	0,964 7	0,881 9	0,914 2	0,663 3	0,427 5
0,47	0,963 2	0,877 0	0,910 5	0,675 0	0,437 2
0,47	0,963 2	0,877 0	0,910 5	0,675 0	0,437 2
0,48	0,961 6	0,871 9	0,906 7	0,686 5	0,446 8
0,49	0,960 0	0,866 8	0,902 9	0,697 9	0,456 5
0,50	0,958 3	0,861 6	0,899 1	0,709 1	0,466 3
0,51	0,956 7	0,856 3	0,895 1	0,720 1	0,476 0
0,52	0,954 9	0,850 9	0,891 1	0,730 9	0,485 8
0,53	0,953 2	0,845 5	0,887 1	0,741 6	0,495 6
0,54	0,951 4	0,840 0	0,882 9	0,752 0	0,505 4
0,55	0,949 6	0,834 4	0,878 7	0,762 3	0,515 2
0,56	0,947 7	0,828 7	0,874 4	0,772 4	0,525 1
0,57	0,945 9	0,823 0	0,870 1	0,782 3	0,535 0
0,58	0,943 9	0,817 2	0,865 7	0,792 0	0,545 0
0,59	0,942 0	0,811 2	0,861 2	0,801 5	0,554 9
0,60	0,940 0	0,805 3	0,856 7	0,810 9	0,564 9
0,61	0,938 0	0,799 2	0,852 1	0,819 8	0,575 0

Продолжение прил. П2.1

λ	τ	π	ε	q	M
0,62	0,935 9	0,793 2	0,847 5	0,828 8	0,585 0
0,63	0,933 9	0,787 0	0,842 8	0,837 5	0,595 1
0,64	0,931 7	0,780 8	0,838 0	0,845 9	0,605 3
0,65	0,929 6	0,774 5	0,833 2	0,854 3	0,615 4
0,66	0,927 4	0,768 1	0,828 3	0,862 3	0,625 6
0,67	0,925 2	0,761 7	0,823 3	0,870 1	0,635 9
0,68	0,922 9	0,755 3	0,818 3	0,877 8	0,646 1
0,69	0,920 7	0,748 8	0,813 3	0,885 2	0,656 5
0,70	0,918 3	0,742 2	0,808 2	0,892 4	0,666 8
0,71	0,916 0	0,735 6	0,803 0	0,899 3	0,677 2
0,72	0,913 6	0,728 9	0,797 8	0,906 1	0,687 6
0,73	0,911 2	0,722 1	0,792 5	0,912 6	0,698 1
0,74	0,908 7	0,715 4	0,787 2	0,918 9	0,708 6
0,75	0,906 3	0,708 6	0,781 9	0,925 0	0,719 2
0,76	0,903 7	0,701 7	0,776 4	0,930 8	0,729 8
0,77	0,901 2	0,694 8	0,771 0	0,936 4	0,740 4
0,78	0,898 6	0,687 8	0,765 5	0,941 8	0,751 1
0,79	0,896 0	0,680 9	0,759 9	0,946 9	0,761 9
0,80	0,893 3	0,673 8	0,754 3	0,951 8	0,772 7
0,81	0,890 7	0,666 8	0,748 6	0,956 5	0,783 5
0,82	0,887 9	0,659 7	0,742 9	0,961 0	0,794 4
0,83	0,885 2	0,652 6	0,737 2	0,965 2	0,805 3
0,84	0,882 4	0,645 4	0,731 4	0,969 1	0,816 3
0,85	0,879 6	0,638 2	0,725 6	0,972 9	0,827 4
0,86	0,876 7	0,631 0	0,719 7	0,976 4	0,838 4
0,87	0,873 9	0,623 8	0,713 8	0,979 6	0,849 6
0,88	0,870 9	0,616 5	0,707 9	0,982 6	0,860 8
0,89	0,868 0	0,609 2	0,701 9	0,985 4	0,872 1
0,90	0,865 0	0,601 9	0,695 9	0,987 9	0,883 3
0,91	0,862 0	0,594 6	0,689 8	0,990 2	0,894 7
0,92	0,858 9	0,587 3	0,683 8	0,992 3	0,906 2
0,93	0,855 9	0,580 0	0,677 6	0,994 1	0,917 7
0,94	0,852 7	0,572 6	0,671 5	0,995 7	0,929 2
0,95	0,849 6	0,565 3	0,665 3	0,997 0	0,940 9
0,96	0,846 4	0,557 9	0,659 1	0,998 1	0,952 6

Продолжение прил. П2.1

λ	τ	π	ε	q	M
0,97	0,843 2	0,550 5	0,652 8	0,9989	0,9644
0,98	0,839 9	0,543 1	0,646 6	0,9953	0,9761
0,99	0,836 7	0,535 7	0,640 3	0,9999	0,9880
1,00	0,833 3	0,528 3	0,634 0	1,000 0	1,000 0
1,01	0,830 0	0,520 9	0,627 6	0,999 9	1,012 0
1,02	0,826 6	0,513 5	0,621 2	0,999 5	1,024 1
1,03	0,823 2	0,506 1	0,614 8	0,998 9	1,036 3
1,04	0,819 7	0,498 7	0,608 4	0,998 0	1,048 6
1,05	0,816 3	0,491 3	0,601 9	0,996 9	1,060 9
1,06	0,812 7	0,484 0	0,595 5	0,995 7	1,073 3
1,07	0,809 2	0,476 6	0,589 0	0,994 1	1,085 8
1,08	0,805 6	0,469 3	0,582 6	0,992 4	1,098 5
1,09	0,802 0	0,461 9	0,576 0	0,990 3	1,111 1
1,10	0,798 3	0,454 6	0,569 4	0,988 0	1,123 9
1,11	0,794 7	0,447 3	0,562 9	0,985 6	1,136 7
1,12	0,790 9	0,440 0	0,556 4	0,982 9	1,149 6
1,13	0,787 2	0,432 8	0,549 8	0,980 0	1,162 7
1,14	0,783 4	0,425 5	0,543 2	0,976 8	1,175 8
1,15	0,779 6	0,418 4	0,536 6	0,973 5	1,189 0
1,16	0,775 7	0,411 1	0,530 0	0,969 8	1,202 3
1,17	0,771 9	0,404 0	0,523 4	0,965 9	1,215 7
1,18	0,767 9	0,396 9	0,516 8	0,962 0	1,229 2
1,19	0,764 0	0,389 8	0,510 2	0,957 7	1,242 8
1,20	0,760 0	0,382 7	0,503 5	0,953 1	1,256 6
1,21	0,756 0	0,375 7	0,496 9	0,948 4	1,270 8
1,22	0,751 9	0,368 7	0,490 3	0,943 5	1,284 3
1,23	0,747 8	0,361 7	0,483 7	0,938 4	1,297 4
1,24	0,743 7	0,354 8	0,477 0	0,933 1	1,312 6
1,25	0,739 6	0,347 9	0,470 4	0,927 5	1,326 8
1,26	0,735 4	0,341 1	0,463 8	0,921 7	1,341 3
1,27	0,731 2	0,334 3	0,457 2	0,915 9	1,355 8
1,28	0,726 9	0,327 5	0,450 5	0,909 6	1,370 5
1,29	0,722 7	0,320 8	0,443 9	0,903 3	1,385 3
1,30	0,718 3	0,314 2	0,437 4	0,896 9	1,400 2
1,31	0,714 0	0,307 5	0,430 7	0,890 1	1,415 3

Продолжение прил. П2.1

λ	τ	π	ε	q	M
1,32	0,709 6	0,301 0	0,424 1	0,883 1	1,430 5
1,33	0,705 2	0,294 5	0,417 6	0,876 1	1,445 8
1,34	0,700 7	0,288 0	0,411 0	0,868 8	1,461 3
1,35	0,696 2	0,281 6	0,404 5	0,861 4	1,476 9
1,36	0,691 7	0,275 3	0,398 0	0,853 8	1,492 7
1,37	0,687 2	0,269 0	0,391 4	0,845 9	1,508 7
1,38	0,682 6	0,262 8	0,385 0	0,838 0	1,524 8
1,39	0,678 0	0,256 6	0,378 5	0,829 9	1,541 0
1,40	0,673 3	0,250 5	0,372 0	0,821 6	1,557 5
1,41	0,668 7	0,244 5	0,365 6	0,813 1	1,574 1
1,42	0,663 9	0,238 5	0,359 2	0,804 6	1,590 9
1,43	0,659 2	0,232 6	0,352 8	0,795 8	1,607 8
1,44	0,654 4	0,226 7	0,346 4	0,786 9	1,625 0
1,45	0,649 6	0,220 9	0,310 1	0,777 8	1,642 3
1,46	0,644 7	0,215 2	0,333 8	0,768 7	1,659 8
1,47	0,639 8	0,209 5	0,327 5	0,759 3	1,677 6
1,48	0,634 9	0,204 0	0,321 2	0,749 9	1,695 5
1,49	0,630 0	0,198 5	0,315 0	0,740 4	1,713 7
1,50	0,625 0	0,193 0	0,308 8	0,730 7	1,732 1
1,51	0,620 0	0,187 6	0,302 7	0,720 9	1,750 6
1,52	0,614 9	0,182 4	0,296 5	0,711 0	1,769 4
1,53	0,609 9	0,177 1	0,290 4	0,700 9	1,788 5
1,54	0,604 7	0,172 0	0,284 4	0,690 9	1,807 8
1,55	0,599 6	0,166 9	0,278 4	0,680 7	1,827 3
1,56	0,594 4	0,161 9	0,272 4	0,670 3	1,847 1
1,57	0,589 2	0,157 0	0,266 5	0,659 9	1,867 2
1,58	0,583 9	0,152 2	0,260 6	0,649 4	1,887 5
1,59	0,578 6	0,147 4	0,254 7	0,638 9	1,908 1
1,60	0,573 3	0,142 7	0,248 9	0,628 2	1,929 0
1,61	0,568 0	0,138 1	0,243 1	0,617 5	1,950 1
1,62	0,562 6	0,133 6	0,237 4	0,606 7	1,971 6
1,63	0,557 2	0,129 1	0,231 7	0,595 8	1,993 4
1,64	0,551 7	0,124 8	0,226 1	0,585 0	2,015 5
1,65	0,546 3	0,120 5	0,220 5	0,574 0	2,038 0
1,66	0,540 7	0,116 3	0,215 0	0,563 0	2,060 7

Продолжение прил. П2.1

λ	τ	π	ε	q	M
1,67	0,535 2	0,112 1	0,209 5	0,552 0	2,083 9
1,68	0,529 6	0,108 1	0,204 1	0,540 9	2,107 3
1,69	0,524 0	0,104 1	0,198 8	0,529 8	2,131 3
1,70	0,518 3	0,100 3	0,193 4	0,518 7	2,155 5
1,71	0,512 6	0,096 5	0,188 1	0,507 5	2,180 2
1,72	0,506 9	0,092 8	0,183 0	0,496 5	2,205 3
1,73	0,501 2	0,089 1	0,177 8	0,485 2	2,230 8
1,74	0,495 4	0,085 6	0,172 7	0,474 1	2,256 7
1,75	0,489 6	0,082 1	0,167 7	0,463 0	2,283 1
1,76	0,483 7	0,078 7	0,162 8	0,452 0	2,310 0
1,77	0,477 9	0,075 4	0,157 8	0,440 7	2,337 4
1,78	0,471 9	0,072 2	0,153 0	0,429 6	2,365 3
1,79	0,466 0	0,069 1	0,148 2	0,418 5	2,393 7
1,80	0,460 0	0,066 0	0,143 5	0,407 5	2,422 7
1,81	0,454 0	0,063 0	0,138 9	0,396 5	2,452 3
1,82	0,447 9	0,060 2	0,134 3	0,385 5	2,482 4
1,83	0,441 8	0,057 3	0,129 8	0,374 6	2,513 2
1,84	0,435 7	0,054 6	0,125 0	0,363 8	2,544 9
1,85	0,429 6	0,052 0	0,121 0	0,353 0	2,576 6
1,86	0,423 4	0,049 4	0,116 7	0,342 3	2,609 4
1,87	0,417 2	0,046 9	0,112 4	0,331 6	2,642 9
1,88	0,410 9	0,044 5	0,108 3	0,321 1	2,677 2
1,89	0,404 7	0,042 2	0,104 2	0,310 5	2,712 3
1,90	0,398 3	0,039 9	0,100 2	0,300 2	2,748 1
1,91	0,392 0	0,037 7	0,096 2	0,289 8	2,784 9
1,92	0,385 6	0,035 6	0,092 3	0,279 7	2,822 5
1,93	0,379 2	0,033 6	0,088 5	0,269 5	2,861 2
1,94	0,372 7	0,031 6	0,084 8	0,259 6	2,900 7
1,95	0,366 2	0,029 7	0,091 2	0,249 7	2,941 4
1,96	0,359 7	0,027 9	0,077 6	0,240 0	2,983 1
1,97	0,353 2	0,026 2	0,074 1	0,230 4	3,030 1
1,98	0,346 6	0,024 5	0,070 7	0,220 9	3,070 1
1,99	0,340 0	0,022 9	0,067 4	0,211 6	3,115 5
2,00	0,333 3	0,021 4	0,064 2	0,202 4	3,162 2
2,01	0,326 7	0,019 9	0,061 0	0,193 4	3,210 4

Продолжение прил. П2.1

λ	τ	π	ε	q	M
2,02	0,319 9	0,018 5	0,057 9	0,184 5	3,260 3
2,03	0,313 2	0,017 2	0,054 9	0,175 8	3,311 3
2,04	0,306 4	0,015 9	0,052 0	0,167 2	3,364 2
2,05	0,299 6	0,014 7	0,049 1	0,158 8	3,419 0
2,06	0,292 7	0,013 6	0,046 4	0,150 7	3,475 9
2,07	0,285 9	0,012 5	0,043 7	0,142 7	3,534 3
2,08	0,278 9	0,011 5	0,041 1	0,134 8	3,595 1
2,09	0,272 0	0,010 5	0,038 6	0,127 2	3,658 3
2,10	0,265 0	0,009 6	0,036 1	0,119 8	3,724 0
2,11	0,258 0	0,008 7	0,033 8	0,112 5	3,792 2
2,12	0,250 9	0,007 9	0,031 5	0,105 5	3,863 3
2,13	0,243 9	0,007 2	0,029 4	0,098 6	3,937 6
2,14	0,236 7	0,006 5	0,027 3	0,092 1	4,015 0
2,15	0,229 6	0,005 8	0,025 _{м3}	0,085 7	4,096 1
2,16	0,222 4	0,005 2	0,023 3	0,079 5	4,179 1
2,17	0,215 2	0,004 6	0,021 5	0,073 5	4,270 2
2,18	0,207 9	0,004 1	0,019 7	0,067 8	4,364 2
2,19	0,200 6	0,003 6	0,018 0	0,062 3	4,463 3
2,20	0,193 3	0,003 2	0,016 4	0,057 0	4,567 4
2,21	0,186 0	0,002 8	0,014 9	0,052 0	4,677 8
2,22	0,178 6	0,002 4	0,013 5	0,047 2	4,795 4
2,23	0,171 2	0,002 1	0,012 1	0,042 7	4,920 1
2,24	0,163 7	0,001 8	0,011 6	0,040 8	5,053 3
2,25	0,156 3	0,001 51	0,009 66	0,034 3	5,195 8
2,26	0,148 7	0,001 27	0,008 13	0,029 0	5,349 4
2,27	0,141 2	0,001 06	0,007 49	0,026 8	5,514 7
2,28	0,133 6	0,000 87	0,006 52	0,023 4	5,694 0
2,29	0,126 0	0,000 71	0,005 64	0,020 4	5,889 1
2,30	0,118 3	0,000 57	0,004 82	0,017 5	6,103 3
2,31	0,110 6	0,000 45	0,004 07	0,014 8	6,339 9
2,32	0,102 9	0,000 35	0,003 40	0,012 4	6,600 8
2,33	0,095 2	0,000 27	0,002 80	0,010 3	6,893 5
2,34	0,087 4	0,000 20	0,002 26	0,008 3	7,225 4
2,35	0,079 6	0,000 14	0,001 70	0,006 3	7,605 3
2,36	0,071 7	$0,988 \cdot 10^{-4}$	0,001 38	0,005 1	8,045 0

Окончание прил. П2.2

λ	τ	π	ε	q	M
2,37	0,063 8	$0,657 \cdot 10^{-4}$	0,001 03	0,003 8	8,561 9
2,38	0,055 9	$0,413 \cdot 10^{-4}$	0,000 74	0,002 8	9,188 2
2,39	0,048 0	$0,242 \cdot 10^{-4}$	0,000 50	0,001 9	9,962 4
2,40	0,040 0	$0,128 \cdot 10^{-4}$	0,000 32	0,001 2	10,957 0
2,41	0,032 0	$0,584 \cdot 10^{-5}$	0,000 18	0,000 7	12,306 0
2,42	0,023 9	$0,211 \cdot 10^{-5}$	$0,884 \cdot 10^{-4}$	0,000 3	14,287 0
2,43	0,015 8	$0,499 \cdot 10^{-6}$	$0,315 \cdot 10^{-4}$	0,000 1	17,631 0
2,44	0,007 7	$0,316 \cdot 10^{-7}$	$0,410 \cdot 10^{-5}$	$0,058 \cdot 10^{-4}$	25,367 0
2,449	0	0	0	0	0

**П2.2. ТАБЛИЦЫ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ
МНОГОАТОМНЫХ ГАЗОВ ($K = 1,33$)**

λ	τ	π	ε	q	M
0,00	1,000 0	1,000 0	1,000 0	0,000 0	0,000 0
0,01	1,000 0	0,999 9	0,999 9	0,015 9	0,009 3
0,02	0,999 9	0,999 8	0,999 9	0,031 8	0,018 5
0,03	0,999 9	0,999 5	0,999 7	0,047 6	0,027 8
0,04	0,999 8	0,999 1	0,999 3	0,063 5	0,037 1
0,05	0,999 7	0,998 6	0,999 0	0,079 3	0,046 3
0,06	0,999 5	0,998 0	0,998 5	0,095 2	0,056 3
0,07	0,999 3	0,997 2	0,997 9	0,111 0	0,064 9
0,08	0,999 1	0,996 4	0,997 3	0,126 7	0,074 2
0,09	0,998 9	0,995 4	0,996 5	0,142 5	0,083 4
0,10	0,998 6	0,994 4	0,995 8	0,158 2	0,092 7
0,11	0,998 3	0,993 2	0,994 9	0,173 8	0,102 0
0,12	0,998 0	0,991 8	0,993 8	0,189 4	0,111 3
0,13	0,997 6	0,990 4	0,992 8	0,205 2	0,120 6
0,14	0,997 2	0,988 9	0,991 7	0,220 5	0,129 9
0,15	0,996 8	0,987 2	0,990 3	0,236 0	0,139 2
0,16	0,996 4	0,985 4	0,989 0	0,251 4	0,148 5
0,17	0,995 9	0,983 6	0,987 7	0,266 7	0,157 8
0,18	0,995 4	0,981 6	0,986 2	0,282 0	0,167 2
0,19	0,994 9	0,979 6	0,984 6	0,297 2	0,176 5

Продолжение прил. П2.2

λ	τ	π	ε	q	M
0,20	0,994 3	0,977 4	0,983 0	0,312 3	0,185 8
0,21	0,993 8	0,975 1	0,981 2	0,327 3	0,195 2
0,22	0,993 2	0,972 8	0,979 5	0,342 3	0,204 5
0,23	0,992 5	0,970 2	0,977 5	0,357 1	0,213 9
0,24	0,991 8	0,967 5	0,975 5	0,371 9	0,223 3
0,25	0,991 2	0,964 8	0,973 4	0,386 6	0,232 7
0,26	0,990 4	0,961 9	0,971 2	0,401 1	0,242 0
0,27	0,989 7	0,959 0	0,969 0	0,415 6	0,251 5
0,28	0,988 9	0,956 0	0,966 7	0,430 0	0,260 9
0,29	0,988 1	0,952 9	0,964 4	0,444 3	0,270 3
0,30	0,987 3	0,949 6	0,961 9	0,458 4	0,279 7
0,31	0,986 4	0,946 3	0,959 4	0,472 4	0,289 2
0,32	0,985 5	0,942 8	0,956 7	0,486 3	0,298 6
0,33	0,984 6	0,939 3	0,954 0	0,500 1	0,308 1
0,34	0,983 6	0,935 6	0,951 2	0,513 7	0,317 6
0,35	0,982 7	0,931 9	0,948 4	0,527 3	0,327 1
0,36	0,981 7	0,928 1	0,945 5	0,540 7	0,336 6
0,37	0,980 6	0,924 1	0,942 4	0,553 9	0,346 2
0,38	0,979 6	0,920 1	0,939 3	0,567 0	0,355 7
0,39	0,978 5	0,915 9	0,936 1	0,579 9	0,365 3
0,40	0,977 3	0,911 8	0,932 9	0,592 8	0,374 9
0,41	0,976 2	0,907 5	0,929 6	0,605 5	0,384 5
0,42	0,975 0	0,903 0	0,926 2	0,617 9	0,394 1
0,43	0,973 8	0,898 5	0,922 7	0,630 3	0,403 7
0,44	0,972 6	0,894 0	0,919 2	0,642 5	0,413 4
0,45	0,971 3	0,889 3	0,915 6	0,654 5	0,423 0
0,46	0,970 0	0,885 0	0,912 3	0,666 6	0,430 5
0,47	0,968 7	0,879 7	0,908 1	0,678 0	0,442 4
0,48	0,967 4	0,874 9	0,904 4	0,689 6	0,452 2
0,49	0,996 0	0,869 9	0,900 5	0,760 9	0,461 9
0,50	0,964 6	0,864 8	0,896 6	0,712 1	0,471 7
0,51	0,963 2	0,859 6	0,892 5	0,723 0	0,481 5
0,52	0,961 7	0,854 4	0,888 4	0,733 9	0,491 3
0,53	0,960 2	0,849 1	0,884 3	0,744 5	0,501 1

Продолжение прил. П2.2

λ	τ	π	ε	q	M
0,54	0,958 7	0,843 6	0,879 9	0,754 8	0,511 0
0,55	0,957 2	0,838 2	0,875 7	0,765 1	0,520 8
0,56	0,955 6	0,832 7	0,871 4	0,775 2	0,530 8
0,57	0,954 0	0,827 1	0,867 0	0,785 0	0,540 7
0,58	0,952 4	0,821 4	0,862 5	0,794 6	0,550 6
0,59	0,950 7	0,815 6	0,857 9	0,804 0	0,560 6
0,60	0,949 0	0,809 8	0,853 3	0,813 3	0,570 6
0,61	0,947 3	0,804 0	0,848 7	0,822 4	0,580 7
0,62	0,945 6	0,798 0	0,843 9	0,831 2	0,590 7
0,63	0,943 8	0,792 1	0,839 3	0,839 9	0,600 8
0,64	0,942 0	0,786 0	0,834 4	0,848 3	0,610 9
0,65	0,940 2	0,779 8	0,829 4	0,856 4	0,621 1
0,66	0,938 3	0,773 7	0,824 6	0,864 5	0,631 3
0,67	0,936 4	0,767 4	0,819 5	0,872 2	0,641 5
0,68	0,934 5	0,761 2	0,814 5	0,879 8	0,651 7
0,69	0,932 6	0,754 8	0,809 4	0,887 1	0,662 0
0,70	0,930 6	0,748 3	0,804 1	0,894 1	0,672 3
0,71	0,928 6	0,741 9	0,798 9	0,901 1	0,682 6
0,72	0,926 6	0,735 4	0,793 7	0,907 7	0,693 0
0,73	0,924 5	0,728 9	0,788 4	0,914 3	0,703 4
0,74	0,922 4	0,722 3	0,783 0	0,920 4	0,713 9
0,75	0,920 3	0,715 7	0,777 7	0,926 5	0,724 3
0,76	0,918 2	0,709 0	0,772 2	0,932 2	0,734 8
0,77	0,916 0	0,702 3	0,766 6	0,937 7	0,745 4
0,78	0,913 8	0,695 5	0,761 1	0,943 0	0,756 1
0,79	0,911 6	0,688 7	0,755 5	0,948 1	0,766 6
0,80	0,909 4	0,681 9	0,749 9	0,952 9	0,777 2
0,81	0,907 1	0,675 0	0,744 2	0,957 5	0,788 0
0,82	0,904 8	0,668 1	0,738 4	0,961 8	0,798 7
0,83	0,902 4	0,661 2	0,732 6	0,966 0	0,809 5
0,84	0,900 1	0,654 2	0,726 8	0,969 8	0,820 3
0,85	0,897 7	0,647 2	0,721 0	0,973 5	0,831 2
0,86	0,895 3	0,640 2	0,715 1	0,976 9	0,842 1
0,87	0,892 8	0,633 2	0,709 2	0,980 2	0,853 1
0,88	0,890 3	0,626 1	0,703 2	0,983 0	0,864 1

Продолжение прил. П2.2

λ	τ	π	ε	q	M
0,89	0,887 8	0,619 1	0,697 3	0,985 9	0,875 1
0,90	0,885 3	0,612 0	0,691 3	0,988 3	0,886 2
0,91	0,882 7	0,604 8	0,685 2	0,990 4	0,897 4
0,92	0,880 1	0,597 7	0,679 1	0,992 5	0,908 6
0,93	0,877 5	0,590 6	0,673 0	0,994 3	0,919 8
0,94	0,874 9	0,583 4	0,666 9	0,995 7	0,931 1
0,95	0,872 2	0,576 3	0,660 8	0,997 2	0,942 4
0,96	0,869 5	0,569 1	0,654 5	0,998 1	0,953 8
0,97	0,866 7	0,561 9	0,648 3	0,9989	0,965 3
0,98	0,864 0	0,554 7	0,642 0	0,999 5	0,976 8
0,99	0,861 2	0,547 6	0,635 9	1,000 0	0,988 4
1,00	0,858 4	0,540 4	0,629 6	1,000 0	1,000 0
1,01	0,855 5	0,533 2	0,623 3	1,000 0	1,011 7
1,02	0,852 7	0,526 0	0,616 9	0,999 5	1,023 4
1,03	0,849 7	0,518 8	0,610 5	0,998 9	1,035 2
1,04	0,846 8	0,511 6	0,604 2	0,998 1	1,047 1
1,05	0,843 9	0,504 5	0,597 9	0,997 2	1,059 0
1,06	0,840 9	0,497 3	0,591 4	0,995 8	1,071 0
1,07	0,837 9	0,490 2	0,585 0	0,994 4	1,083 0
1,08	0,834 8	0,483 0	0,578 6	0,992 6	1,095 1
1,09	0,831 7	0,475 9	0,572 2	0,990 7	1,107 3
1,10	0,828 6	0,468 8	0,565 8	0,988 6	1,119 6
1,11	0,825 5	0,461 7	0,559 3	0,986 2	1,131 9
1,12	0,822 3	0,454 6	0,552 8	0,983 5	1,144 3
1,13	0,819 2	0,447 5	0,546 3	0,980 6	1,156 7
1,14	0,815 9	0,440 5	0,539 9	0,977 7	1,169 3
1,15	0,812 7	0,433 5	0,533 4	0,974 4	1,181 9
1,16	0,809 4	0,426 5	0,526 9	0,970 9	1,194 6
1,17	0,806 1	0,419 6	0,520 5	0,967 4	1,207 3
1,18	0,802 8	0,412 6	0,514 0	0,963 4	1,220 2
1,19	0,799 4	0,405 7	0,507 5	0,959 3	1,233 1
1,20	0,796 1	0,398 6	0,500 7	0,954 5	1,246 1
1,21	0,792 6	0,392 0	0,494 6	0,950 6	1,259 2
1,22	0,789 2	0,385 2	0,488 1	0,945 9	1,272 3
1,23	0,785 7	0,378 4	0,481 6	0,941 0	1,285 6

Продолжение прил. П2.2

λ	τ	π	ε	q	M
1,24	0,782 2	0,371 6	0,475 1	0,935 7	1,299 0
1,25	0,778 7	0,364 9	0,468 6	0,930 5	1,312 4
1,26	0,775 2	0,358 3	0,462 2	0,925 2	1,325 9
1,27	0,771 6	0,351 6	0,455 7	0,919 3	1,339 6
1,28	0,768 0	0,345 0	0,449 3	0,913 5	1,353 3
1,29	0,764 3	0,338 5	0,442 9	0,907 5	1,367 1
1,30	0,760 6	0,332 0	0,436 5	0,901 4	1,382 0
1,31	0,757 0	0,325 5	0,430 0	0,894 9	1,395 0
1,32	0,753 2	0,319 1	0,423 6	0,888 3	1,409 1
1,33	0,749 5	0,312 8	0,417 3	0,881 6	1,423 4
1,34	0,745 7	0,306 5	0,411 0	0,874 9	1,437 7
1,35	0,741 9	0,300 2	0,404 6	0,867 7	1,452 1
1,36	0,738 0	0,294 0	0,398 4	0,860 6	1,466 7
1,37	0,734 2	0,287 8	0,392 0	0,853 1	1,481 4
1,38	0,730 3	0,281 7	0,385 7	0,845 5	1,496 0
1,39	0,726 4	0,275 7	0,379 6	0,838 1	1,411 0
1,40	0,722 4	0,269 7	0,373 3	0,830 3	1,529 0
1,41	0,718 4	0,263 7	0,367 1	0,822 1	1,541 2
1,42	0,714 4	0,257 8	0,360 9	0,814 0	1,556 4
1,43	0,710 4	0,252 0	0,354 8	0,806 0	1,571 9
1,44	0,706 3	0,246 3	0,348 7	0,797 6	1,587 5
1,45	0,702 2	0,240 6	0,342 6	0,789 1	1,603 1
1,46	0,698 1	0,234 9	0,336 5	0,780 5	1,618 8
1,47	0,694 0	0,229 4	0,330 5	0,771 8	1,634 9
1,48	0,689 8	0,223 8	0,324 5	0,762 9	1,651 0
1,49	0,685 6	0,218 4	0,318 6	0,754 0	1,667 2
1,50	0,681 3	0,213 8	0,312 6	0,744 9	1,683 6
1,51	0,677 1	0,207 7	0,306 7	0,735 7	1,700 2
1,52	0,672 8	0,202 4	0,300 9	0,726 5	1,716 9
1,53	0,668 5	0,197 3	0,295 1	0,717 2	1,733 8
1,54	0,664 1	0,192 1	0,289 3	0,707 7	1,750 8
1,55	0,659 7	0,187 1	0,283 6	0,698 2	1,768 0
1,56	0,655 3	0,182 1	0,277 9	0,688 6	1,785 4
1,57	0,650 9	0,177 2	0,272 2	0,678 9	1,802 9
1,58	0,646 4	0,172 3	0,266 6	0,669 1	1,820 7

Продолжение прил. П2.2

λ	τ	π	ε	q	M
1,49	0,642 0	0,167 8	0,261 0	0,659 3	1,838 6
1,60	0,637 4	0,162 8	0,255 4	0,649 2	1,856 7
1,61	0,632 9	0,158 2	0,250 0	0,639 4	1,875 0
1,62	0,628 3	0,153 7	0,244 6	0,629 4	1,893 5
1,63	0,623 7	0,149 2	0,239 2	0,619 3	1,912 2
1,64	0,619 1	0,144 8	0,233 8	0,609 2	1,931 1
1,65	0,614 4	0,140 4	0,228 6	0,599 1	1,950 3
1,66	0,609 7	0,136 2	0,223 3	0,588 9	1,969 6
1,67	0,605 0	0,132 0	0,218 1	0,578 6	1,989 2
1,68	0,600 3	0,127 8	0,213 0	0,568 4	2,008 9
1,69	0,595 5	0,123 8	0,207 9	0,556 1	2,029 0
1,70	0,590 7	0,119 8	0,202 9	0,547 8	2,049 3
1,71	0,585 9	0,115 9	0,197 9	0,537 4	2,069 8
1,72	0,581 0	0,112 1	0,192 9	0,527 1	2,090 6
1,73	0,576 1	0,108 3	0,188 1	0,516 8	2,111 2
1,74	0,571 2	0,104 7	0,183 3	0,506 5	2,133 0
1,75	0,566 3	0,101 1	0,178 5	0,496 1	2,154 6
1,76	0,561 3	0,097 5	0,173 8	0,485 8	2,176 5
1,77	0,556 3	0,094 1	0,169 1	0,475 5	2,198 7
1,78	0,551 3	0,090 7	0,164 5	0,465 2	2,221 1
1,79	0,546 2	0,087 4	0,162 0	0,455 0	2,243 9
1,80	0,541 1	0,084 2	0,155 5	0,444 7	2,267 0
1,81	0,536 0	0,081 0	0,151 1	0,434 5	2,290 5
1,82	0,530 9	0,077 9	0,146 8	0,424 3	2,314 3
1,83	0,525 7	0,074 9	0,142 5	0,414 2	2,338 4
1,84	0,520 5	0,072 0	0,138 3	0,404 1	2,362 9
1,85	0,515 3	0,069 1	0,134 1	0,392 7	2,387 7
1,86	0,510 0	0,066 3	0,130 0	0,384 1	2,413 0
1,87	0,504 7	0,063 6	0,126 0	0,374 1	2,438 6
1,88	0,499 4	0,060 9	0,122 0	0,364 3	2,464 7
1,89	0,494 1	0,058 3	0,118 1	0,354 5	2,491 1
1,90	0,488 7	0,055 8	0,114 2	0,344 7	2,518 0
1,91	0,483 3	0,053 4	0,110 5	0,335 1	2,545 4
1,92	0,477 9	0,051 0	0,106 7	0,325 6	2,573 1
1,93	0,472 4	0,048 7	0,103 1	0,316 1	2,601 5

Продолжение прил. П2.2

λ	τ	π	ε	q	M
1,94	0,467 0	0,046 5	0,099 5	0,306 4	2,630 2
1,95	0,461 5	0,044 3	0,096 0	0,297 3	2,659 6
1,96	0,455 9	0,042 2	0,092 5	0,288 1	2,689 4
1,97	0,450 4	0,040 2	0,089 2	0,279 0	2,719 8
1,98	0,444 8	0,038 2	0,085 8	0,270 0	2,750 7
1,99	0,439 1	0,036 3	0,082 6	0,261 1	2,782 2
2,00	0,433 5	0,034 4	0,079 4	0,252 3	2,814 3
2,01	0,427 9	0,032 6	0,076 3	0,243 6	2,847 1
2,02	0,422 1	0,030 9	0,073 3	0,235 1	2,880 6
2,03	0,416 4	0,029 3	0,070 3	0,226 7	2,914 7
2,04	0,410 6	0,027 7	0,067 4	0,218 3	2,949 6
2,05	0,404 8	0,026 1	0,064 5	0,210 1	2,985 2
2,06	0,399 0	0,024 7	0,061 8	0,202 2	3,021 5
2,07	0,393 1	0,023 2	0,059 1	0,194 2	3,058 7
2,08	0,387 3	0,021 9	0,056 4	0,186 4	3,096 7
2,09	0,381 4	0,020 5	0,053 9	0,178 8	3,135 6
2,10	0,375 4	0,019 3	0,051 4	0,171 3	3,175 4
2,11	0,369 5	0,018 1	0,048 9	0,164 0	3,216 2
2,12	0,363 5	0,016 9	0,046 6	0,156 9	3,257 9
2,13	0,357 4	0,015 8	0,044 3	0,150 0	3,300 7
2,14	0,351 4	0,014 8	0,042 0	0,142 9	3,344 6
2,15	0,345 3	0,013 8	0,039 9	0,136 2	3,389 7
2,16	0,339 2	0,012 8	0,037 8	0,129 6	3,436 0
2,17	0,333 1	0,011 9	0,035 7	0,123 2	3,483 6
2,18	0,326 9	0,011 0	0,033 8	0,117 0	3,532 4
2,19	0,320 7	0,010 2	0,031 9	0,110 9	3,582 8
2,20	0,314 5	0,009 4	0,030 0	0,105 0	3,634 4
2,21	0,308 3	0,0087	0,0282	0,0993	3,6877
2,22	0,302 0	0,008 0	0,026 6	0,093 7	3,742 8
2,23	0,295 7	0,007 5	0,024 9	0,088 3	3,799 5
2,24	0,289 4	0,006 8	0,023 3	0,083 0	3,857 9

Продолжение прил. П2.2

λ	τ	π	ε	q	M
2,25	0,283 0	0,006 20	0,021 8	0,078 0	3,918 5
2,26	0,276 6	0,005 60	0,020 4	0,073 1	3,981 1
2,27	0,270 2	0,005 12	0,019 0	0,068 4	4,045 8
2,28	0,263 8	0,004 65	0,017 6	0,063 8	4,113 1
2,29	0,257 3	0,004 21	0,016 3	0,059 5	4,182 8
2,30	0,250 8	0,003 79	0,015 1	0,055 3	4,255 1
2,31	0,244 3	0,003 41	0,014 0	0,051 2	4,330 4
2,32	0,237 7	0,003 06	0,012 9	0,047 4	4,408 6
2,33	0,231 1	0,002 73	0,011 8	0,043 7	4,490 3
2,34	0,224 5	0,002 43	0,010 8	0,040 2	4,575 6
2,35	0,217 9	0,002 15	0,009 9	0,036 9	4,664 7
2,36	0,211 2	0,001 90	0,009 0	0,033 7	4,757 8
2,37	0,204 5	0,001 67	0,008 1	0,030 7	4,855 7
2,38	0,197 8	0,001 46	0,007 4	0,027 8	4,958 6
2,39	0,191 0	0,001 27	0,006 6	0,025 2	5,066 5
2,40	0,184	0,001 09	0,005 9	0,022 6	5,180 7
2,41	0,177 4	0,000 95	0,005 3	0,020 5	5,301 1
2,42	0,170 6	0,000 80	0,004 7	0,018 1	5,428 8
2,43	0,163 7	0,000 68	0,004 1	0,016 0	5,564 5
2,44	0,156 8	0,000 57	0,003 6	0,014 1	5,708 9
2,45	0,149 9	0,000 48	0,003 2	0,012 4	5,863 0
2,46	0,142 9	0,000 39	0,002 7	0,010 8	6,028 8
2,47	0,135 9	0,000 32	0,002 4	0,009 3	6,206 7
2,48	0,128 9	0,000 26	0,002 0	0,007 9	6,399 0
2,49	0,121 9	0,000 21	0,001 7	0,006 7	6,607 9
2,50	0,114 8	0,000 163	0,001 420	0,005 03	6,835 5
2,51	0,107 7	0,000 126	0,001 169	0,004 66	7,085 1
2,52	0,100 6	$0,955 \cdot 10^{-4}$	0,000 949	0,003 80	7,361 4
2,53	0,093 4	$0,710 \cdot 10^{-4}$	0,000 759	0,003 05	7,668 1
2,54	0,086 3	$0,514 \cdot 10^{-4}$	0,000 596	0,002 40	8,012 5
2,55	0,079 1	$0,362 \cdot 10^{-4}$	0,000 457	0,001 85	8,402 8
2,56	0,071 8	$0,240 \cdot 10^{-4}$	0,000 342	0,001 39	8,850 6

Окончание прил. П2.2

λ	τ	π	ε	q	M
2,57	0,064 6	$0,160 \cdot 10^{-4}$	0,000 248	0,001 01	9,371 6
2,58	0,057 3	$0,986 \cdot 10^{-5}$	0,000 172	0,000 70	9,989 2
2,59	0,049 9	$0,568 \cdot 10^{-5}$	0,000 114	0,000 47	10,738 7
2,60	0,042 6	$0,299 \cdot 10^{-5}$	$0,702 \cdot 10^{-4}$	0,000 29	11,673 6
2,61	0,035 2	$0,139 \cdot 10^{-5}$	$0,394 \cdot 10^{-4}$	0,000 16	12,888 3
2,62	0,027 8	$0,536 \cdot 10^{-6}$	$0,193 \cdot 10^{-4}$	$0,802 \cdot 10^{-4}$	14,557 9
2,63	0,020 4	$0,153 \cdot 10^{-6}$	$0,750 \cdot 10^{-5}$	$0,313 \cdot 10^{-4}$	17,077 7
2,64	0,012 9	$0,243 \cdot 10^{-7}$	$0,188 \cdot 10^{-5}$	$0,782 \cdot 10^{-5}$	21,536 6
2,65	0,005 4	$0,728 \cdot 10^{-9}$	$0,135 \cdot 10^{-6}$	$0,567 \cdot 10^{-5}$	33,399 1
2,657	0	0	0	0	∞

ЛИТЕРАТУРА

1. Альтшуль, А. Д. Гидравлика и аэродинамика: основы механики жидкости / А. Д. Альтшуль, П. Г. Киселев. — М.: Наука, 1975.
2. Альтшуль, А. Д. Гидравлические сопротивления / А. Д. Альтшуль. — М.: Недра, 1970.
3. Варгафтик, Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н. Б. Варгафтик. — М.: Наука, 1972.
4. Гусаков, Н. А. Механика жидкости и газа: учеб. пособие / Н. А. Гусаков. — М.: Наука, 1996.
5. Дейч, М. Е. Газодинамика двухфазных сред / М. Е. Дейч, Г. А. Филиппов. — М.: Энергия, 1981.
6. Дейч, М. Е. Гидрогазодинамика / М. Е. Дейч, А. Е. Зарянкин. — М.: Энергоатомиздат, 1984.
7. Дешш, Дж. Механика жидкости / Дж. Дешш, Д. Харлеман. — М.: Энергия, 1971.
8. Давидсон, В. Б. Основы газовой динамики в задачах / В. Б. Давидсон. — М.: Высш. шк., 1965.
9. Емцев, Б. Т. Техническая гидромеханика / Б. Т. Емцев. — М.: Наука, 1987.
10. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик. — М.: Наука, 1975.
11. Ильина, Т. К. Основы гидравлического расчета инженерных сетей / Т. К. Ильина. — М.: Ассоциация строительных вузов, 2005.
12. Курант, Р. Сверхзвуковые течения и ударные волны / Р. Курант, К. Фридрихс. — М.: 1950.
13. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика: в 10 т. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. — М.: Наука, 1986. — Т. 6: Гидродинамика.
14. Леонтьев, А. И. Газовая динамика. Механика жидкости и газа: учеб. / А. И. Леонтьев. — М.: Наука, 1997.
15. Овсянников, Л. В. Лекции по основам газовой динамики / Л. В. Овсянников. — М.: 2003.
16. Повх, И. Л. Техническая гидромеханика / И. Л. Повх. — М.: Наука, 1976.
17. Примеры расчетов по гидравлике: учеб. пособие / под ред. А. Д. Альтшуля. — М.: Стройиздат, 1976.

18. Ривкин, С. Л. Теплофизические свойства воды и водяного пара / С. Л. Ривкин, А. А. Александров. — М.: Энергия, 1980.
19. Седов, Л. И. Плоские задачи гидродинамики и аэродинамики / Л. И. Седов. — М.: Наука, 1980.
20. Сена, Л. А. Единицы физических величин и их размерности: учеб.-справ. рук. / Л. А. Сена. — М.: Наука, 1988.
21. Серрин, Дж. Математические основы классической механики жидкости / Дж. Серрин. — М.: Наука, 1963.
22. Сборник задач по гидравлике и газовой динамике для нефтяных вузов / под ред. Г. Д. Розенберга. — М.: Недра, 1990.
23. Фабрикант, Н. Я. Аэродинамика / Н. Я. Фабрикант. — М.: Наука, 1964.
24. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. — М.: Наука, 1974.
25. Чжен, П. Отрывные течения / П. Чжен. — М.: Мир, 1972.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	4
Контрольные вопросы	13
1. СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗА.....	14
1.1. Свойства жидкостей (общие).....	14
1.2. Плотность и удельный вес	17
1.3. Сжимаемость и температурное расширение.....	18
1.4. Вязкость	21
1.5. Поверхностное натяжение	23
Примеры решения задач по темам главы.....	25
Контрольные задачи по темам главы	26
Контрольные вопросы по темам главы	29
2. РАВНОВЕСИЕ ЖИДКОСТИ И ГАЗА	30
2.1. Давление в покоящейся жидкости	30
Примеры решения задач	32
Контрольные задачи	35
2.2. Сила статического давления жидкости на плоскую стенку	37
Примеры решения задач	39
Контрольные задачи	42
2.3. Сила статического давления жидкости на криволинейные стенки. Закон Архимеда.....	46
Примеры решения задач	48
Контрольные задачи	51
2.4. Относительный покой жидкости.....	52
Примеры решения задач	55
Контрольные задачи	58
Контрольные вопросы по темам главы	60
3. КИНЕМАТИКА И ДИНАМИКА ЖИДКОСТИ И ГАЗА	63
3.1. Основные понятия кинематики жидкости и газа	63
3.1. Уравнения сохранения	66
3.2. Уравнение Бернулли.....	71
Примеры решения задач	75
Контрольные задачи	77

3.4. Относительное движение жидкости и твердого тела.....	80
Примеры решения задач	84
Контрольные задачи	87
3.5. Гидравлический расчет трубопроводных систем.....	88
Примеры решения задач	93
Контрольные задачи	96
Контрольные вопросы по темам главы	99
4. ГАЗОВАЯ ДИНАМИКА	101
4.1. Звуковые колебания.....	101
Примеры решения задач	105
Контрольные задачи	107
4.2. Относительное движение газа и твердых тел со сверхзвуковыми скоростями.....	108
Примеры решения задач	111
Контрольные задачи	114
4.3. Ударная волна	115
Примеры решения задач	119
Контрольные задачи	122
Контрольные вопросы по темам главы	126
5. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ	128
5.1. Исследование режимов движения жидкости в круглой трубе.....	128
Проверочный тест 5.1	132
5.2. Определение коэффициента гидравлического трения в трубопроводах	138
Проверочный тест 5.2.....	143
5.3. Определение коэффициента местных сопротивлений.....	150
Проверочный тест 5.3.....	154
5.4. Построение эпюры скоростей турбулентного потока в круглой трубе.....	160
Проверочный тест 5.4.....	166
5.5. Графическое представление уравнения Бернулли для трубопровода переменного сечения	172
Проверочный тест 5.5.....	178
5.6. Исследование истечения жидкости через малые отверстия...	185
Проверочный тест 5.6.....	190
5.7. Исследование истечения жидкости через насадки.....	196
Проверочный тест 5.7.....	202

5.8. Исследование дроссельных расходомерных устройств	208
Проверочный тест 5.8.....	213
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	220
П1.1. Термодинамические и переносные свойства воды при давлении $p = 0,101\ 325$ МПа*	220
П1.2. Термодинамические и переносные свойства воды на линии кипения	220
П1.3. Изобарный коэффициент расширения ($\beta, 1 / T$) воды на линии кипения	221
П1.4. Термодинамические и переносные свойства пара на линии конденсации.....	222
П1.5. Термодинамические и переносные свойства перегретого водяного пара при давлении $p = 0,101\ 325$ МПа.....	222
П1.6. Термодинамические и переносные свойства воздуха при давлении $p = 0,101\ 325$ МПа.....	224
П1.7. Термодинамические и переносные свойства гелия-4 при давлении $p = 0,101\ 325$ МПа.....	226
П1.8. Изотермический коэффициент сжимаемости ($\chi, 1 / \text{Па}$) некоторых жидкостей при давлении $p = 0,101\ 325$ МПа*	228
П1.9. Изобарный коэффициент расширения некоторых жидкостей при давлении $p = 0,101\ 325$ МПа.....	228
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	229
П2.1. Таблицы газодинамических функций двухатомных газов ($k = 1,4$).....	229
П2.2. Таблицы газодинамических функций многоатомных газов ($k = 1,33$)	236
ЛИТЕРАТУРА	245

Учебное издание

Андрижиевский Анатолий Альгертович
Клепацкий Петр Михайлович
Санкович Евгений Савельевич

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ
ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ**

Учебное пособие

Редактор *Ю. В. Кравцова*
Компьютерная верстка *Ю. В. Кравцова*

Подписано в печать 10.12.2007. Формат 60 × 84/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 16,2. Уч.-изд. л. 14,5.
Тираж 200. Заказ .

Учреждение образования
«Белорусский государственный технологический университет».
220006. Минск, Свердлова, 13а.
ЛИ № 02330/0133255 от 30.04.2004.

Отпечатано в лаборатории полиграфии учреждения образования
«Белорусский государственный технологический университет».
220006. Минск, Свердлова, 13.
ЛП № 02330/0056739 от 22.01.2004.