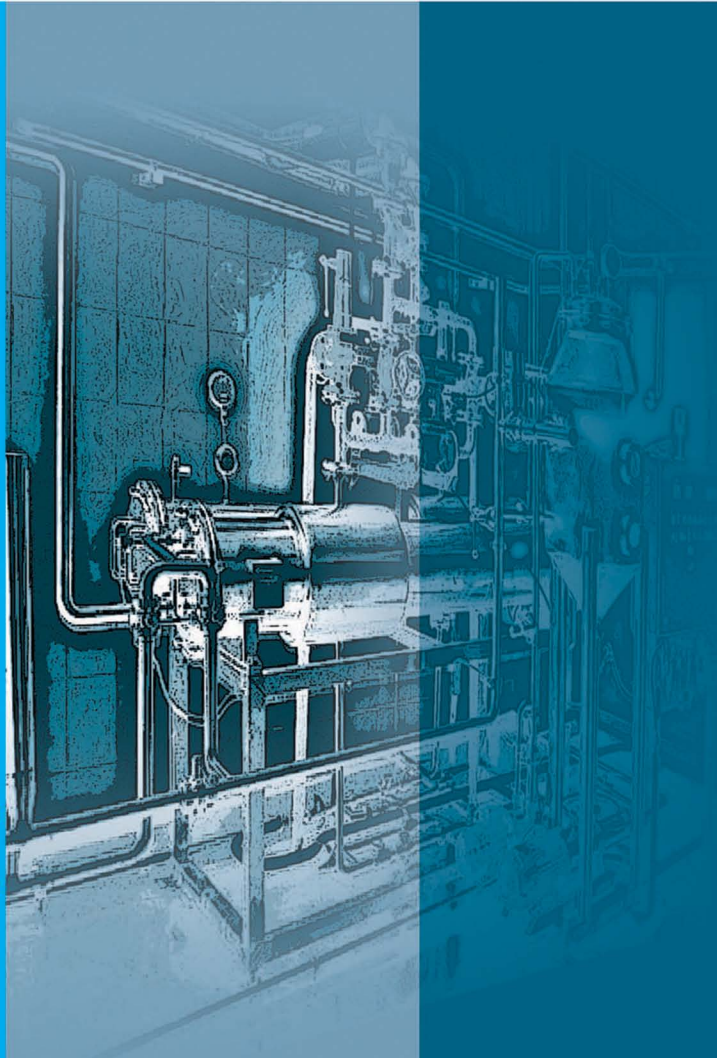


ГИДРАВЛИКА

З. В. ЛОВКИС



З. В. Ловкис

ГИДРАВЛИКА

Допущено Министерством образования
Республики Беларусь в качестве учебного пособия
для студентов учреждений высшего образования
по технологическим специальностям



Минск
«Беларуская навука»
2012

УДК 621.22(075.8)

ББК 31.56я73

Л46

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор А. В. Акулич
(Могилевский государственный университет продовольствия),
доктор технических наук, профессор В. И. Володин
(Белорусский государственный технологический университет),
доктор технических наук, профессор Т. П. Троцкая
(Гродненский государственный аграрный университет)

Ловкис, З. В.

Л46 Гидравлика: учеб. пособие /З. В. Ловкис. – Минск :
Беларус. навука, 2012. – 439 с.
ISBN 978-985-08-1485-2.

В пособии рассмотрены общие вопросы теории гидростатики и гидродинамики, динамических и объемных гидромашин, гидравлического оборудования. Изложен порядок расчета гидротранспорта сырья и продуктов, систем водоснабжения и канализации.

Рекомендовано для студентов высших учебных заведений по технологическим специальностям, аспирантов и инженерно-технических работников.

УДК 621.22(075.8)

ББК 31.56я73

ISBN 978-985-08-1485-2

© Ловкис З. В., 2012

© Оформление. РУП «Издательский
дом «Беларуская навука», 2012

ПРЕДИСЛОВИЕ

Гидравлика – это наука о законах равновесия и движения жидкости, а также о методах их применения для решения различных технических задач. Главнейшие области использования гидравлики – гидротехника, мелиорация, водное хозяйство, гидроэнергетика, пищеперерабатывающая промышленность, водоснабжение, канализация, водный транспорт, машиностроение, авиация и т. д.

Гидравлика, опираясь на такие науки, как высшая математика, физика, теоретическая механика, сопротивление материалов, в свою очередь, служит базой для проектирования оборудования и коммуникаций для передач, гидроприводов, гидравлических машин, гидропневмотранспорта многих отраслей народного хозяйства, а также оборудования и машин для водоснабжения, канализации, орошения и осушения.

При исследовании гидравлических явлений и в расчетах применяют аналитический и экспериментальный методы. В аналитическом методе используют уравнения механики и получают уравнения движения и равновесия жидкости, устанавливающие зависимости между кинематическими и динамическими характеристиками движущейся жидкости.

Ввиду сложности строения жидкостей аналитические исследования проводят для модельных жидкостей, облегчающих применение уравнений механики. Например, используют модель невязкой жидкости, которая в отличие от всех имеющихся в природе и технике лишена вязкости. Жидкость рассматривают как непрерывную сплошную среду, а все параметры, характеризующие ее движение, считают непрерывными. На основе этих

предпосылок можно получить дифференциальные уравнения равновесия и движения жидкости.

Во многих случаях в гидравлике рассматриваются одномерные задачи, в которых достаточно знать только средние по сечениям значения гидравлических параметров, определяющих изучаемое гидравлическое явление.

В пищеперерабатывающей промышленности значение гидравлики и гидравлических машин особо возрастает, так как они применяются на всех этапах производства – от приемки и мойки сырья до фасовки и упаковки готового продукта. По открытым и закрытым трубопроводам перемещаются твердые и жидкие продукты (плодоовощное сырье, морковь, огурцы, свекла, спирт, водные растворы, молоко, полуфабрикаты различной консистенции, соусы, пюре и т. д.). Знание законов гидравлики необходимо для расчета и проектирования систем (емкостей, трубопроводов, насосных станций), эксплуатации систем (водоснабжения, канализации, настройки и регулирования для жидкостных фракций различной плотности и вязкости), установки норм при фасовке и упаковке.

Производство продуктов питания представлено широким спектром жидкотекучих и пастообразных пищевых продуктов. Процесс течения неньютоновских жидкостей, к которым относится большинство жидкотекучих и пастообразных пищевых продуктов, до настоящего времени не имеет достаточного теоретического и экспериментального обоснования. Установлено, что при проектировании трубопроводного транспорта для жидкотекучих и пастообразных пищевых продуктов не учитываются специфические для них явления (например, наличие пристеночного скольжения), а коммуникационные элементы выбираются без учета реологических свойств продукта. Это приводит к увеличению металлоемкости аппаратов, повышению коэффициентов сопротивления системы и соответственно к увеличению энергозатрат и снижению конкурентоспособности продуктов питания.

В настоящее время проектирование оборудования для производства продуктов питания и продуктопроводов производит-

ся на основании опытных данных, инженерной интуиции и общих положений в машиностроении (проектирование по образцам), чего недостаточно для создания оборудования с высокими технико-экономическими показателями и гарантии качества получаемых продуктов. Проектирование оборудования, продуктопроводов и других элементов коммуникаций, а также управление качеством готового продукта невозможно без учета научно обоснованных представлений о процессах переработки, внутрицеховой транспортировки сырья и пищевых продуктов как о совокупности взаимодействия разнообразных рабочих органов оборудования с различными по свойствам продуктами и их изменениями, происходящими в процессе взаимодействия. В связи с этим применение знаний при разработке технологий с учетом зависимостей и функций, полученных с учетом реологических свойств продукта, является перспективным направлением на сегодняшний день.

Знание закономерностей изменения реологических свойств продуктов в зависимости от воздействия на них при переработке рабочих органов оборудования необходимо для научно обоснованного расчета процессов переработки и технологического оборудования.

Книга охватывает в целом комплекс основных вопросов, связанных с использованием гидравлики и гидравлических машин в пищевой и перерабатывающей промышленности.

Раздел I

ГИДРАВЛИКА

Гидравлика – наука, изучающая законы движения и равновесия жидкостей, а также способы приложения этих законов к решению инженерных задач. Процессы, протекающие в жидкостях или с их участием, носят различный характер в зависимости от свойств самих жидкостей (плотности, вязкости, упругости, содержания воздушных составляющих, механических примесей, воды), а также от внешних условий (теплового режима, давления и др.). При изменении свойств жидкостей могут возникнуть нарушения выполняемых процессов и выйти из строя гидравлические машины.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЖИДКОСТЯХ, ИХ ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ

Жидкость – агрегатное состояние вещества, сочетающее в себе свойства твердого (сохранение объема, определенная прочность на разрыв) и газообразного (изменчивость формы) состояний.

Жидкость – физическое тело, обладающее свойством абсолютной текучести, вследствие чего она не имеет собственной формы и в состоянии равновесия принимает форму сосуда, в котором находится.

Молекулы в жидкостях находятся на пределе действия сил межмолекулярного притяжения, поэтому тепловое движение молекул состоит не только из колебательных движений в углах кристаллической решетки, как в твердых телах, но также из хаотичных перемещений (скачков) отдельных молекул из одной группы молекул в другую. В жидкостях, как и в газах, происхо-

дит диффузия молекул частотой $10^{11} \dots 10^{12} \text{ с}^{-1}$. Для высокомолекулярных переохлажденных жидкостей эта частота меньше.

При повышении температуры свойства жидкостей приближаются к свойствам газов, при понижении – к свойствам твердых тел.

Основные критерии оценки качества рабочей жидкости – плотность, вязкостно-температурные свойства, химическая и физическая стабильность, агрессивность по отношению к уплотнениям и др.

1.1. Плотность

Для характеристики распределения массы в пространстве, занятом жидкостью, обычно пользуются величиной, называемой плотностью ρ . Среднее значение плотности среды в некотором малом объеме определяют как отношение массы Δm , заключенной в этом объеме, к самому объему ΔV , т. е.

$$\rho_{\text{ср}} = \Delta m / \Delta V.$$

Плотность при равномерном распределении массы, кг/м^3 :

$$\rho = m / V. \quad (1.1)$$

Если какая-либо среда в каждой своей точке имеет $\rho = 0$, то она называется сплошной.

В технических задачах, рассматриваемых в гидравлике, размеры тел и взаимодействующих с ними частиц жидкости намного превышают межмолекулярные расстояния, которые в жидкостях имеют порядок 10^{-7} см, а в газах при атмосферном давлении – 10^{-5} см. Поэтому жидкости и газы воспринимаются как сплошная среда, масса которой равномерно распределена по объему. При указанных обстоятельствах можно вместо реальной жидкости, состоящей из отдельных молекул, рассматривать жидкость как сплошную среду. Это упрощает использование математического аппарата, делая возможным применение теории непрерывных функций. Наиболее простые решения возможны в этом случае, если среда однородная, т. е. в каждом элементарном объеме $\rho = \text{const}$.

На практике пренебрегают изменением плотности среды и влиянием примесей либо считают их равномерно распределенными по объему.

Плотность (табл. 1.1 приложения)¹ минеральных жидкостей колеблется в пределах $\rho = 830 \dots 940 \text{ кг/м}^3$, а воды – $\rho = 1000 \dots 1010 \text{ кг/м}^3$.

На жидкость и любые другие тела, обладающие массой, действует сила тяжести G . Параметром, характеризующим распределение силы тяжести по объему жидкости V , является удельный (объемный) вес γ , Н/м^3 :

$$\gamma = G/V. \quad (1.2)$$

Следовательно, его можно рассматривать как силу тяжести, приходящуюся на единицу объема жидкости.

Удельный вес и плотность связаны зависимостью, вытекающей из второго закона Ньютона, т. е.

$$\gamma = \rho g, \quad (1.3)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

Плотность жидкости зависит от температуры, поэтому с изменением последней изменяется также и удельный вес жидкости. Указанная зависимость характеризуется температурным коэффициентом объемного расширения $\alpha_{\text{ж}}$, представляющим собой физическую величину, выражающую относительное изменение объема жидкости при изменении температуры на 1 град, т. е.

$$\alpha_{\text{ж}} = \Delta V/V_0/\Delta t, \quad (1.4)$$

где $\Delta V/V_0$ – относительное изменение рассматриваемого начального объема V_0 жидкости (здесь $\Delta V = V - V_0$ (V_0 и V – объемы жидкости соответственно при температурах t_0 и t)); $\Delta t = t - t_0$ (здесь t_0 и t – начальная и конечная температуры жидкости); размерность $\alpha_{\text{ж}} - 1/^\circ\text{C}$.

Следовательно, новый объем жидкости при температуре t

$$V = V_0 + \Delta V = V_0 (1 + \alpha_{\text{ж}} \Delta t). \quad (1.5)$$

¹ Все таблицы учебного пособия даны в приложении.

Плотность жидкости ρ при заданной температуре $t = t_0 + \Delta t$

$$\rho = \rho_0 / (1 + \alpha_{\text{ж}} \Delta t), \quad (1.6)$$

где ρ_0 – начальная плотность.

Значение температурного коэффициента объемного расширения для минеральных масел можно принять в диапазоне давлений 0...20 МПа равным $5 \cdot 10^{-4} < \alpha_{\text{ж}} < 8,4 \cdot 10^{-4}$, причем нижний предел соответствует 40 °С, а верхний – 80 °С. Максимальное значение температурного коэффициента объемного расширения имеют синтетические жидкости (например, для силиконов $7,8 \cdot 10^{-4} < \alpha_{\text{ж}} < 10,0 \cdot 10^{-4}$).

Поскольку плотность капельных жидкостей с изменением температуры в распространенном температурном диапазоне изменяется незначительно, при гидравлических расчетах во многих случаях достаточно принять постоянными значения этих параметров. Но при некоторых условиях такое допущение может привести к нарушениям функционирования гидросистемы в результате объемного расширения жидкости при изменении ее температуры, т. е. в результате нагрева могут произойти переполнение жидкостью резервуаров и их разрушение.

При нагревании жидкости вследствие разницы в значении температурного коэффициента объемного расширения жидкости и металлов происходит повышение давления Δp . При изменении температуры от t_1 до t_2

$$\Delta p = E_{\text{ж}} (\alpha_{\text{ж}} - \alpha_{\text{м}}) (t_2 - t_1), \quad (1.7)$$

где $E_{\text{ж}}$ – объемный модуль упругости жидкости; $\alpha_{\text{ж}}$ и $\alpha_{\text{м}}$ – температурные коэффициенты объемного расширения жидкости и металла, из которого изготовлен гидравлический элемент.

Однако поскольку для распространенных рабочих жидкостей с объемным модулем упругости $E_{\text{ж}} = 1400...2000$ МПа плотность ρ при давлениях порядка 15...20 МПа незначительно отличается от плотности ρ_0 при нулевом давлении, при расчете гидросистем можно допустить, что плотность не зависит от давления.

1.2. Вязкость

Одно из важнейших свойств реальной жидкости, проявляющихся при движении, – вязкость, которая характеризуется способностью жидкости сопротивляться деформации сдвига или скольжению ее слоев при воздействии внешних сил. Различают объемную и тангенциальную вязкость. Объемная вязкость проявляется при сжатии и растяжении жидкости, вызывая сдвиг по фазе между объемной деформацией и давлением и рассеивание энергии при упругих колебаниях. Тангенциальная вязкость показывает способность жидкости сопротивляться сдвигу одного слоя относительно другого. Объемную вязкость рабочих жидкостей обычно не учитывают при проведении технических расчетов.

При течении жидкости вследствие внутреннего трения возникают касательные силы. Согласно закону Ньютона, касательное напряжение трения τ между двумя слоями прямолинейно движущейся вязкой жидкости пропорционально отнесенному к единице длины изменению скорости по нормали к направлению движения, т. е.

$$\tau = \pm \mu dv / (dn), \quad (1.8)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости; $dv / (dn)$ – градиент скорости по нормали к поверхности (здесь v – скорость движения жидкости); n – расстояние между слоями жидкости, перпендикулярное к направлению движения.

Вязкость проявляется лишь при течении жидкости, а в покоящейся жидкости касательные напряжения равны нулю. Отсюда следует, что в жидкостях касательные напряжения зависят от скорости перемещения частиц жидкости относительно друг друга, в то время как в твердых телах касательные напряжения определяются величиной взаимного смещения частиц тела. В этом проявляется одно из характерных отличий жидкостей от твердых тел.

Жидкости, у которых вязкостные напряжения определяют по формуле (1.8), называются ньютоновскими. К ним относятся, например, вода, спирт, пиво, масла, сиропы и др.

В дальнейшем были обнаружены вещества, внешне аналогичные жидкостям, но не подчиняющиеся рассмотренному закону; к ним, например, относятся концентрированные капиллярные растворы и другие так называемые структурные гидросмеси.

В гидравлических расчетах потоков применяют отношение коэффициента динамической вязкости μ к плотности ρ жидкости, которое называется коэффициентом кинематической вязкости, т. е.

$$\nu = \mu/\rho. \quad (1.9)$$

Единица измерения коэффициентов динамической вязкости – Па·с, а кинематической вязкости – м²/с (табл. 1.2). Вязкость масла по ГОСТу дается при температуре 50 °С.

Причина вязкости в жидкостях – межмолекулярное притяжение, которое преодолевается при смещении частиц жидкости относительно друг друга. Поэтому в покоящейся жидкости силы вязкости отсутствуют. С увеличением температуры связь между молекулами уменьшается и соответственно снижаются коэффициенты μ и ν (табл. 1.2).

Для определения вязкости наибольшее распространение получили вискозиметры Пинкевича, Оствальда и Энглера. Нагретая до желаемого состояния жидкость истекает в определенном объеме через калиброванное отверстие, а время истечения фиксируется секундомером.

Коэффициент кинематической вязкости при определении прибором Оствальда вычисляют по формуле

$$\nu = ct,$$

где c – постоянная прибора, определяемая опытным путем из сопоставления протекания испытуемой жидкости и воды; t – время истечения жидкости.

При замере вязкости с помощью вискозиметра Энглера используют относительные вязкости. Время истечения 200 см³ испытуемой жидкости из вискозиметра Энглера называют вязкостью в секундах Энглера. Отношение этого времени к времени истечения дистиллированной воды при температуре 4 °С в том

же вискозиметре называют вязкостью в градусах Энглера ($^{\circ}\text{E}$), причем

$$\nu = 0,0732\text{E}^{\circ} - \frac{0,0631}{^{\circ}\text{E}}. \quad (1.10)$$

С повышением температуры вязкость жидкостей понижается. На рис. 1.1, *a* показаны кривые зависимости вязкости воды и растительного масла от температуры. Чем меньше изменяется вязкость с изменением температуры, тем выше качество и лучшие эксплуатационные свойства рабочей жидкости.

Зависимость вязкости от температуры определяют с помощью уравнения

$$\nu_t = \nu_{50} \left(\frac{50}{t} \right)^n, \quad (1.11)$$

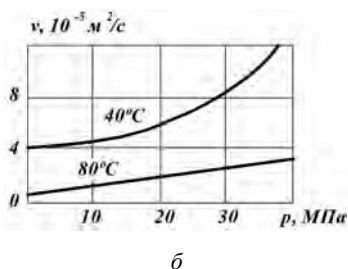
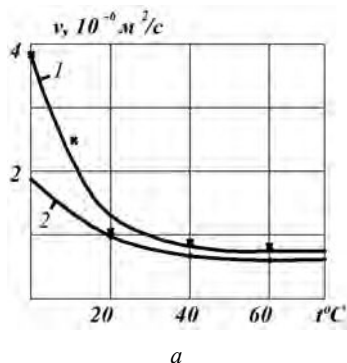


Рис. 1.1. Зависимости вязкости жидкостей: *a* – от температуры (1 – масло; 2 – вода); *б* – от давления (масло)

где n – показатель степени, зависящий от вязкости продукта при температуре 50°C .

Уравнение (1.11) справедливо для легких жидкостей при $n \leq 2,77$ в температурном интервале $30 \dots 150^{\circ}\text{C}$, а для тяжелых жидкостей при $n \geq 2,77$ в интервале $40 \dots 110^{\circ}\text{C}$.

Коэффициент теплопроводности жидкостей $K_{\text{тп}} = 0,3 \text{ ккал}/(\text{см} \cdot \text{с} \cdot ^{\circ}\text{C})$ – количество теплоты, проходящее за 1 с через слой толщиной 1 см и площадь 1 см^2 . При применении жидкостей с высокой зависимостью вязкости от температуры затруднена работа в условиях эксплуатации при низкой температуре.

Изменение параметров вязкости жидкости от температуры приводит к нежелательным явлениям: возрастают утечки, падают подача насоса и мощность, изменяется ди-

намика. При работе в летний и осенний периоды существуют значительные колебания температуры как в течение года, так и за одни сутки. В летнее время перепады температуры за суточное время эксплуатации могут колебаться от 20 °С (на территории европейской части) до 50 °С (на территории Средней Азии).

Для обеспечения высокой долговечности гидравлических машин необходимо учитывать условия эксплуатации.

Вязкость жидкостей зависит также от давления и увеличивается с ростом последнего. При практических расчетах зависимость вязкости жидкостей, транспортируемых по трубопроводам, от давления можно подсчитать по приближенному выражению

$$\nu_p = \nu(1 + kp), \quad (1.12)$$

где ν_p и ν – коэффициенты кинематической вязкости при давлении P и атмосферном; k – коэффициент, зависящий от плотности жидкостей (для легких при $\nu_{50} < 15 \text{ мм}^2/\text{с}$ $k = 0,002$ и для тяжелых при $\nu_{50} > 15 \text{ мм}^2/\text{с}$ $k = 0,003$); p – давление жидкости.

1.3. Газовоздушные составляющие

Вследствие растворимости воздуха в жидкости и трудности его удаления при заполнении рабочего пространства, возникновения кавитационных явлений на вибрирующих смоченных поверхностях, а также гидродинамических понижений давления рабочая жидкость почти всегда неоднородна. Газовоздушная составляющая жидкости может быть как в растворенном состоянии, так и в нерастворенном (в виде пузырьков). Количество пузырьков определяется их свойствами, давлением, скоростью движения жидкости и циркуляцией.

Опыты показывают, что относительный объем газа V_r , который может раствориться в определенном объеме жидкости $V_{ж}$ до ее насыщения, прямо пропорционален давлению на поверхности раздела:

$$V_r = k_r V_{ж} \frac{P_2}{P_1}, \quad (1.13)$$

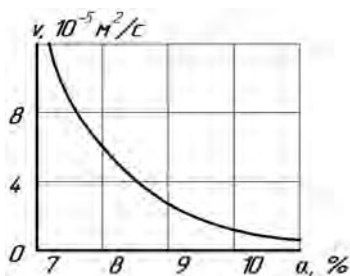


Рис. 1.2. Зависимость вязкости жидкости от содержания в ней воздуха

где k_r – коэффициент растворимости газа в жидкости; P_1 и P_2 – начальное и конечное давление газа, находящегося в контакте с жидкостью.

Для рабочих жидкостей коэффициент растворимости воздуха составляет 0,08...0,1 и обратно пропорционален плотности.

Нерастворенный воздух находится в механической смеси с жидкостью. Размеры пузырьков воздуха обычно 0,4...0,8 мкм. Дисперсная среда, состоящая из капельной жидкости с пузырьками воздуха, называется газожидкостной. Поскольку газ в виде пузырьков всегда присутствует в том или ином количестве в рабочих жидкостях гидросистем, то это влияет на вязкость (рис. 1.2). Обычно содержание пузырьков нерастворенного воздуха находится в пределах 0,5...12%.

Нерастворенный воздух и пена увеличивают окислительное действие и повышают коррозию металлических деталей. Газовоздушная составляющая жидкости приводит к повышению температуры и уменьшению теплообмена за счет изменения давления при работе гидромашин.

1.4. Кавитация

Отличительное свойство жидкостей – кипение, т. е. выделение паров по всему объему жидкости по мере нагревания при работе насоса. Кипение начинается, когда давление в жидкости будет равно делению насыщенных паров жидкости при данной температуре. В гидравлических устройствах давление при обычных температурах может повышаться и достигать $p_{н.п.}$. При этом жидкость в зоне пониженного давления вскипает и в ней образуются пузырьки, заполненные паром. При дальнейшем движении кипящая жидкость попадает в зону с большим давлением, где происходит конденсация паров жидкости. Весь рассмотрен-

ный процесс называется кавитацией. В результате нее могут быть разрушены элементы конструкции устройства. Кроме того, нарушаются сплошность и однородность жидкости, что надо учитывать при выборе расчетных формул.

С появлением кавитации снижается подача жидкости, появляются высокочастотные колебания, что приводит к преждевременному износу и разрушению элементов гидравлики. Кавитационное разрушение деталей гидроагрегатов, согласно гипотезе, происходит в результате высокочастотных местных гидравлических и тепловых ударов частиц жидкости и газа. При понижении давления в отдельных точках гидросистемы жидкость вскипает, выделившиеся пузырьки газа переносятся потоком в область более высокого давления с очень большой скоростью. Под действием кинетической энергии соударяющихся частиц возникают микроудары, сопровождающиеся повышением температуры и давления, что, в свою очередь, вызывает местные разрушения стенок. С целью уменьшения кавитации необходимо создать избыточное давление во всасывающих полостях во избежание разрыва потока жидкости. Для снижения износа детали необходимо упрочнять или применять специальные сплавы.

1.5. Деформация

Упругие свойства жидкостей характеризуются их способностью сопротивляться растягивающим, сжимающим и сдвигающим усилиям. Одна из важнейших особенностей жидкостей – текучесть (легкоподвижность) – следствие скачкообразного теплового движения молекул. Она проявляется в том, что жидкость в обычных условиях не выдерживает существенных растягивающих или сдвигающих усилий и начинает сильно деформироваться. Например, для воды в обычных условиях разрывающее напряжение составляет всего лишь 36 Па, что в 10^7 раз меньше, чем для стали. В инженерных расчетах такой величиной следует пренебречь.

При деформации жидкость меняет форму, но сохраняет объем. Поэтому налитая в покоящийся сосуд жидкость принимает

его форму, но в отличие от газов ограничивается сверху так называемой свободной поверхностью.

В искусственных условиях прочность жидкостей на разрыв может значительно повышаться. Например, в капилляре, вращающемся вокруг перпендикулярной к нему оси, масло выдерживает растягивающее напряжение до 0,78 МПа, а вода – даже до 2,8 МПа.

Жидкости характеризуются сжимаемостью (упругостью), т. е. способностью изменять объем под воздействием давления и восстанавливать его при прекращении этого воздействия. Упругая деформация жидкости – явление для гидроагрегатов и систем, как правило, отрицательное, так как за счет необратимости энергии, расходуемой на сжатие, снижается КПД гидросистем, упругость жидкости приводит к прерывистому движению и потере устойчивости инерционной нагрузки.

Во всех магистралях гидротранспорта сжимаемость жидкости создает эффект жидкостной пружины. Жидкость – упругое тело, которое подчиняется закону Гука при некотором допущении. Коэффициент относительного объемного сжатия β характеризует относительное изменение объема жидкости, приходящееся на единицу изменения давления, 1/Па:

$$\beta = \frac{1}{\Delta p} \frac{\Delta V}{V_0}, \quad (1.14)$$

где $\Delta p = p_2 - p_1$ (здесь p_1 и p_2 – начальное и конечное давление); $\Delta V = V_0 - V$ – изменение объема жидкости при изменении давления на Δp (здесь V_0 и V – соответственно объем жидкости при атмосферном и текущем давлении).

Величина, обратная β , называется модулем объемной упругости жидкости при всестороннем сжатии, т. е.

$$E_{\text{ж}} = \frac{1}{\beta} = V_0 \frac{\Delta p}{\Delta V}. \quad (1.15)$$

Модуль объемной упругости жидкости зависит от действующих давлений, температуры, содержания газовой составляющей и других параметров.

Модуль упругости E жидкостей и твердых тел, МПа:

Вода	2060	Сталь углеродистая	206 000
Спирт	980	Чугун белый	134 000
Масло растительное	1720	Латунь, бронза	118 000
Глицерин	4080	Дюралюминий	70 000
		Сталь легированная	216 000

С повышением давления модуль упругости жидкости увеличивается (рис. 1.3). Для большинства масел модуль наиболее интенсивно уменьшается при сравнительно низких давлениях (меньше 100 МПа). В среднем при изменении давления от 1 до 100 МПа коэффициент сжимаемости минеральных жидкостей в изотермическом режиме сжатия уменьшается на 30...40 %. При более высоком давлении дальнейшего заметного снижения объема масла не отмечается.

При расчетах можно принять для минеральных масел модуль $E = 1200...1700$ МПа, для воды $E = 2250$ МПа, а коэффициент сжимаемости $\beta = 7 \cdot 10^{-4}$ МПа $^{-1}$ в диапазоне давлений 0...20 МПа и при температуре $t = 20$ °С.

При расчетах динамических процессов, происходящих в гидросистемах, пользуются динамическим модулем объемной упругости жидкости E_d , так как мгновенные изменения давления происходят по закону адиабаты:

$$E_d = V \frac{dp}{dV}, \quad (1.16)$$

где V и p – объем и давление жидкости.

При расчете динамических характеристик адиабатный модуль для применяемых минеральных жидкостей в диапазоне давлений 5...20 МПа можно принять $E_d = 1,15 E_j$.

С изменением температуры изменяется модуль объемной упругости по причине влияния темпе-

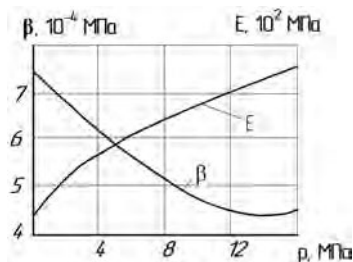


Рис. 1.3. Зависимость модуля объемной упругости и коэффициента сжимаемости от давления жидкости

ратуры на вязкость, причем сжимаемость более вязких жидкостей выше, чем сжимаемость менее вязких жидкостей с повышением температуры.

В жидкости, содержащей газовоздушную составляющую, модуль объемной упругости снижается ввиду того, что сжимаемость воздуха во много раз выше сжимаемости жидкости. При наличии нерастворенного воздуха снижается жесткость гидропривода, что приводит к запаздыванию гидросистемы при отработке сигналов, а иногда способствует возникновению автоколебаний. Рассмотрим влияние нерастворенного воздуха на модуль объемной упругости жидкости.

Пусть в объеме жидкости, находящейся под давлением p , содержится нерастворенный воздух объемом V_B . Изменение объема ΔV_B воздуха при сжатии газогидравлической смеси в изотермическом режиме найдем из следующего соотношения:

$$\Delta V_B = V_B \frac{\Delta p}{p}, \quad (1.17)$$

где Δp – изменение давления.

Принимая, что объемный модуль упругости жидкости сохраняется постоянным при изменении давления на Δp , что практически справедливо при используемых давлениях, находим изменение объема жидкости фазы газогидравлической смеси при изменении давления на Δp :

$$\Delta V_{\text{ж}} = \frac{V_{\text{ж}}}{E_{\text{ж}}} \Delta p. \quad (1.18)$$

Изменение всего объема гидравлической смеси

$$\Delta V_c = \Delta V_{\text{ж}} + \Delta V_B = \frac{V_{\text{ж}} \Delta p}{E_{\text{ж}}} \left(1 + \frac{V_B}{V_{\text{ж}}} \frac{E_{\text{ж}}}{p} \right) \quad (1.19)$$

или после преобразования и упрощения приближенное выражение для определения модуля объемной упругости газогидравлической смеси при сжатии ее в изотермическом режиме от p_0 до p

$$E_c = E_{\text{ж}} \frac{1 + V_{\text{г}} p_0 / V_{\text{ж}} p}{1 + V_{\text{г}} p_0 / V_{\text{ж}} p^2 / E_{\text{ж}}}, \quad (1.20)$$

где $V_{\text{г}}$ – объем газогидравлической смеси.

1.6. Загрязнение

В процессе хранения, перевозки и эксплуатации жидкостей гидросистем происходит постоянное их загрязнение твердыми частицами, водой, смолами и бактериями. Анализ отказов и нарушений работы агрегатов гидросистемы показал, что их надежность и срок службы в большой степени зависят от наличия в рабочих жидкостях загрязнений. По зарубежным данным, из 100 аварийных ситуаций в гидроприводных системах 90 происходят вследствие загрязненности жидкости.

Механические включения (пыль) поступают в емкость гидросистем в процессе выполнения технологических процессов. Примерно 75% всего количества пыли состоит из неорганического вещества, размеры частиц которого колеблются от 1 до 50 мкм. Пылесодержание воздуха изменяется в зависимости от вида работ и времени года в пределах 0,001...0,047 г/м³. В процессе эксплуатации гидросистем периодически меняется уровень жидкости в резервуаре относительно среднего значения. Так как резервуары сообщаются с атмосферой, то периодически поступает определенный объем воздуха. По объему и степени запыленности воздуха можно определить количество пыли, попавшей в резервуар гидросистемы, т. е.

$$q_{\Sigma} = \Sigma V_i q_i,$$

где V_i – общий объем воздуха, проходящего в резервуар ($V_i = 0...0,8$ м³/ч); q_i – содержание пыли в воздухе ($q_i = 0,001...0,047$ г/м³).

Несмотря на фильтрацию воздуха, поступающего в гидросистему, мелкая абразивная пыль проникает через микронеровности гидравлических элементов.

Наличие загрязнителя в жидкостях приводит к затруднению движения или полной остановке гидропривода, нарушению ско-

рости перемещения штока поршня, изнашиванию поверхности седел клапанов и золотников, повреждению уплотнения, рабочих поверхностей насосов, что способствует преждевременному выходу из строя деталей гидропривода. При наличии загрязнителя особенно интенсивное изнашивание наблюдается у качающих узлов насосов и распределительных поясков золотников, что снижает подачу и объемный КПД.

В технике часто применяют жидкие вещества, состоящие из различных по химической природе молекул. Такие вещества называются *гидросмесями*. К ним относятся растворы, состоящие из воды и продукта.

Существуют гидросмеси, которые становятся текучими только после приложения достаточно большого сдвигающего касательного усилия. К ним относятся гидросмеси, которые называются структурными, например пасты. Еще одна особенность жидкостей – капиллярность, т. е. поднятие или опускание уровня жидкости в капиллярных трубках, вызванное поверхностным натяжением. Это явление надо учитывать при конструировании и использовании измерительных приборов: диаметр трубок назначают не менее 6...8 мм, отсчеты берут по уровню жидкости, расположенному на оси трубки.

Математически описать движение жидкости уравнениями, учитывающими все ее физические свойства, оказывается чрезвычайно сложно. Поэтому при решении практических задач применяют различные модели жидкости, в которых учитывают свойства, являющиеся в рассматриваемом процессе главными, а остальные игнорируют.

Широко применяют так называемую гидравлическую модель жидкости. В соответствии с этой моделью различают сплошную, однородную, легкоподвижную и несжимаемую материальную среду.

Критерием правильности выбора модели считается требуемое соответствие результатов расчета опыту. Важная особенность таких моделей состоит в том, что понятие «жидкость» связано не с агрегатным состоянием вещества, а с определенными свойствами, проявляющимися в конкретном процессе с уча-

ствием рассматриваемой среды. Например, при расчете движения кипящей воды использование гидравлической модели может привести к большим погрешностям, так как будут нарушены требования сплошности и однородности.

1.7. Классификация жидкотекучих и пастообразных пищевых продуктов по реологическим характеристикам

Пищевые продукты являются композитными материалами, образованными главным образом из твердого или желеподобного наполнителя и воды. Эти материалы представляются концентрированной суспензией твердой фазы (наполнитель) и вязкой жидкости (как правило, эмульсии или масла). Жидкость, в свою очередь, представляет собой также негомогенную субстанцию.

Классификация пищевых продуктов на группы может быть проведена по схожим реологическим характеристикам, оказывающим существенное влияние на их течение. Большинство представляющих для нас интерес пищевых продуктов характеризуется более сложной связью между скоростью течения и напряжением сдвига. Для неньютоновских жидкостей вязкость изменяется в зависимости от скорости сдвига. Такие жидкости обычно подразделяются на три основных класса:

жидкости со свойствами, не зависящими от продолжительности сдвига;

жидкости со свойствами, зависящими от продолжительности сдвига;

жидкости, демонстрирующие свойства твердого тела.

К первому классу относится большинство пищевых продуктов, и их классифицируют следующим образом.

Вязкие пищевые продукты, подчиняющиеся закону Бингама. Они отличаются от ньютоновских жидкостей только тем, что кривая зависимости между скоростью сдвига и касательным напряжением трения или сдвига не проходит через начало координат (кривая *A*, рис. 1.4). Значение τ_0 при $\frac{dv}{dn} = 0$ является предельным напряжением сдвига, или пределом текучести. Пищевые продукты, характеризующиеся подобным поведением, на-

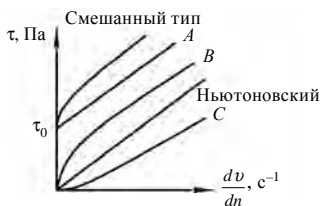


Рис. 1.4. Зависимость напряжения сдвига τ от скорости сдвига $\frac{dv}{dn}$

зывают идеально пластичными, или телами Бингама (жидкий шоколад).

Псевдопластичные пищевые продукты. К ним относится большинство пищевых продуктов, обладающих свойствами неньютоновских жидкостей, и их поведение характеризуется кривой *B* (рис. 1.4). Если продукт псевдопластичен, то его поведение при напряжениях выше предела текучести называют пластичным смешанного типа.

К псевдопластичным жидкостям относятся сгущенное молоко, натуральные соки и другие продукты, чувствительные к напряжению сдвига.

Дилатантные (упрочняющиеся) пищевые продукты. Их реологическое поведение обратно поведению псевдопластичных продуктов, что видно из кривой *C* (рис. 1.4).

Контрольные вопросы и задания

1. Какое отличие жидкостей от твердых тел и газов? Как эти отличия связаны с молекулярным строением?

2. Что такое плотность жидкости, от чего она зависит и в каких единицах измеряется?

3. Что такое вязкость жидкости? Какая существует связь между вязкостью и касательными напряжениями между слоями движущейся жидкости?

4. Может ли в покоящейся жидкости проявляться касательное напряжение?

5. Может ли жидкость включать в себя воздух?

6. Как изменится плотность пресной воды при увеличении давления от $p_1 = p_{ат} = 9,81 \cdot 10^4$ Па до $p_2 = 3 \cdot 10^7$ Па? Первоначальное значение плотности равно 1000 кг/м^3 (в диапазоне от 0 до 10°C). Коэффициент объемного сжатия воды равен $5 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$.

7. Определить дополнительно подаваемый объем, на который сожмется вода в заглушенном с торцов трубопроводе с внутренним диаметром $d = 1$ м, длиной $l = 2000$ м для повышения давления на $\Delta p = 10^6$ Па по сравнению с $p_{нач} = 9,81 \cdot 10^4$ Па. Деформацией стенок трубопровода пренебречь.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Условные обозначения	6
<i>Раздел I. ГИДРАВЛИКА</i>	8
1. Общие сведения о жидкостях, их физические свойства и характеристики	8
1.1. Плотность	9
1.2. Вязкость	12
1.3. Газовоздушные составляющие	15
1.4. Кавитация	16
1.5. Деформация	17
1.6. Загрязнение	21
1.7. Классификация жидкотекучих и пастообразных пищевых продуктов по реологическим характеристикам	23
2. Гидростатика	25
2.1. Силы, действующие в жидкости, и ее напряженное состояние. Гидростатическое давление и его свойства	25
2.2. Основное уравнение гидростатики. Поверхности равного давления	30
2.3. Абсолютное и избыточное давления. Приборы для измерения давления	36
2.4. Сила гидростатического давления на плоские фигуры. Эпюры давления	42
2.5. Сила гидростатического давления на произвольную криволинейную поверхность. Закон Архимеда	48
2.6. Относительный покой жидкости	53
3. Гидродинамика	64
3.1. Методы механики	64
3.2. Определения и параметры потока жидкости. Установившееся и неустановившееся движение	67

3.3. Напорное и безнапорное движение. Расход и средняя скорость потока. Уравнение неразрывности	69
3.4. Режимы движения жидкости	72
3.5. Уравнение Бернулли, его геометрическая и энергетическая интерпретация	74
3.6. Основное уравнение равномерного движения жидкости	82
3.7. Потери напора. Гидравлические сопротивления	84
3.8. Примеры применения уравнения Бернулли в технике	94
3.9. Гидравлический расчет трубопроводов. Параллельное и последовательное соединения. Сложные трубопроводы.	98
3.10. Гидравлический удар	107
3.11. Движение жидкости в открытых руслах	109
3.12. Истечение жидкости через отверстия и насадки	110
3.13. Струи жидкости	117
<i>Раздел II. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ МАШИНЫ</i>	132
4. Динамические насосы и вентиляторы	134
4.1. Центробежные насосы	137
4.2. Основное уравнение центробежных насосов	139
4.3. Работа насоса на сеть	149
4.4. Центробежные насосы, применяемые в пищеперерабатывающей промышленности.	152
4.5. Осевые и вихревые насосы	158
4.6. Водоподъемники.	161
4.7. Вентиляторы	165
5. Объемные гидромашины	169
5.1. Поршневые и плунжерные насосы	171
5.2. Диафрагменные насосы.	174
5.3. Шестеренные гидромашины.	175
5.4. Роторно-пластинчатые насосы и моторы	179
5.5. Кулачковые и импеллерные насосы	181
5.6. Коловратные насосы типа К, КВ, КВГ, КВМ	183
5.7. Роторно-поршневые гидромашины	183
5.8. Роторно-пульсационные аппараты. Гомогенизаторы и диспергаторы	194
5.9. Жидкостно-кольцевые вакуумные насосы	195
5.10. Планетарные (героторные) гидромашины	198
5.11. Винтовые гидромашины	201
5.12. Перистальтические насосы	202
5.13. Бытовой насос «Ручеек».	204
5.14. Бочковые насосы, насос-дозатор.	204

5.15. Гидроцилиндры и вспомогательное гидравлическое оборудование	204
5.16. Гидроаккумуляторы	211
5.17. Испытание гидромашин.	215
6. Дополнительное оборудование для гидравлических систем	223
6.1. Гидравлические клапаны.	223
6.2. Дроссели, краны и делители потока	231
6.3. Гидравлические распределители	234
6.4. Резервуары, охладители.	237
6.5. Фильтры, гидроциклоны, центрифуги, сепараторы	239
6.5.1. Гравитационная очистка	239
6.5.2. Фильтрация и обезвоживание	241
6.5.3. Процессы разделения растворов посредством полупроницаемых мембран.	260
6.5.4. Осаждение и фильтрация под действием центробежной силы	269
6.5.5. Разделение суспензии в гидроциклонах	279
6.6. Трубопроводы, рукава, уплотнения.	285
7. Гидравлический транспорт сырья и продуктов	297
7.1. Физико-механические свойства сырья и гидросмесей.	297
7.2. Общие сведения о гидравлическом транспорте	301
7.3. Теоретический анализ процесса движения продукта в открытом потоке.	311
7.4. Расчет безнапорного гидротранспорта	318
7.5. Расчет установок напорного гидротранспорта	321
7.6. Моечные машины	322
8. Водоснабжение и канализация	327
8.1. Особенности водоснабжения предприятий.	327
8.2. Подготовка и очистка воды.	330
8.3. Виды и нормы водопотребления	338
8.4. Расчет разомкнутой водопроводной сети	343
8.5. Канализация и фильтрация сточных вод	355
8.6. Сооружения для забора поверхностных и подземных вод.	361
8.7. Насосные станции.	363
Приложение	372