

IV. НАУЧНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ПРОЦЕССА

DOI: 10.26897/2618-8732-2021-24-64-68

УДК 628. (1-21):628.113

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗЛОЖЕНИЯ ВОПРОСА О СЖИМАЕМОСТИ ЖИДКОСТИ В КУРСАХ ГИДРАВЛИКИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ И ПРИРОДООХРАННЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ

Бурлаченко А.В.

В статье проанализированы особенности учёта сжимаемости жидкости при решении задач гидравлики и эксплуатации гидравлических систем. Особое внимание уделено полноте рассмотрения физических свойств жидкостей при изучении дисциплины «Гидравлика» в соответствии с формированием научно-исследовательских компетенций и направления профессиональной подготовки бакалавров.

Ключевые слова: автодорожные и природоохранные гидротехнические сооружения, сжимаемость жидкости, гидравлические системы, потенциальная энергия сжатия.

SOME FEATURES OF PRESENTING THE QUESTION OF COMPRESSIBILITY OF A LIQUID IN HYDRAULICS COURSES FOR CONSTRUCTION AND ENVIRONMENTAL PROTECTIONS

Burlachenko V.A.

The article analyzes the features of taking into account the compressibility of a liquid in solving problems of hydraulics and the operation of hydraulic systems. Particular attention is paid to the completeness of the consideration of the physical properties of liquids in the study of the discipline "Hydraulics" in accordance with the formation of research competencies and the direction of professional training of bachelors.

Keywords: road and environmental hydraulic structures, fluid compressibility, hydraulic systems, potential energy of compression.

Известно, что жидкость, занимающая по расположению молекул и воздействию молекулярных сил промежуточное положение между газом и твёрдым телом, обладает меньшей сжимаемостью чем газ. Однако, и жидкость, и газ – текучи, поэтому рассматривая в строительстве и машиностроении термин «жидкость» говорят и о собственно жидкости (несжимаемая, весьма мало сжимаемая, капельная) и о газе [1, 2]. Под *сжимаемостью* понимают способность жидкостей уменьшать объём при увеличении давления.

Вопрос о сжимаемости жидкости, как правило, излагается в вводной части курса гидравлики в разделе «Свойства жидкости», причём этому вопросу уделяется относительно мало внимания в учебной литературе. Потребность в рассмотрении данного вопроса вызвана необходимостью концентрации внимания при подготовке современных специалистов на вопросах практического применения изучаемых дисциплин для проведения гидравлических исследований открытых потоков, основных природоохранных и дорожных гидротехнических сооружений (ГТС), их безопасной эксплуатации. Учитывая рост объёма самостоятельной работы студентов при курсовом и выпускном проектировании с использованием основных положений проектирования водопропускных сооружений, знание основ гидравлики особенно важно, как при подготовке студентов направлений/специальностей 20.03.02. «Природообустройство и водопользование», 35.03.11 «Гидромелиорация», так и 08.03.01 «Строительство», 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений», 20.03.01 «Техносфер-

ная безопасность» и необходимо при изучении соответствующих курсов: Водопрпускные сооружения водных объектов, Расчёты водопрпускных сооружений природоохранных комплексов, Расчётное обоснование природоохранных ГТС, Ландшафтные парковые водные системы и сооружения, Инженерные системы водоснабжения и водоотведения, Насосы и насосные установки, Гидравлика и гидрология, Реконструкция переходов, Эксплуатация и мониторинг водных объектов и др. [1, 3, 4, 6]. Более полные фундаментальные знания по гидравлике и свойствах жидкости позволяют студентам освоить базовые вопросы методики гидравлических расчётов и исследований при изучении открытых потоков и основных водопрпускных сетевых и дорожных гидротехнических сооружений, приобрести навыки инженерного поиска для нахождения оптимального решения на основе имеющихся у него исходных данных, материалов гидравлических исследований и изучения специальной литературы [2, 5, 7, 9-11].

Анализ литературных источников по гидравлике показывает, что отмеченное относится в равной степени к учебной литературе для строительных, водохозяйственных, механических, сельскохозяйственных, энергетических, мелиоративных и других специальностей. Так в учебнике для строительных специальностей [9] содержатся практически без комментариев лишь несколько связанных с явлением сжимаемости жидкости определений (определение упругой сжимаемости и модуля упругости с указанием числового значения последнего).

Сжимаемость жидкости обычно характеризуется коэффициентом объёмного сжатия β_V , либо модулем упругости (сжимаемости) $E_{жс}$ [10]. Размерность коэффициента β_V - Па⁻¹.

$$\beta_V = - 1/V \cdot (\partial V / \partial P) \quad (1)$$

То есть это относительное изменение объёма жидкости на единицу изменения давления, где V - первоначальный объём жидкости; ∂V - изменение этого объёма при увеличении давления на величину ∂P . Знак минус в формуле (1) обусловлен соответствию приращения давления P уменьшению объёма жидкости V [10]. Модуль упругости $E_{жс}$ является величиной обратной коэффициенту β_V , то есть

$$E_{жс} = 1 / \beta_V \quad (2)$$

При этом в зависимости от условий изменения V от P различают изотермические (при постоянной температуре) и адиабатические (при быстро протекающем объёмном сжатии) процессы в водном тракте, соответственно термический и адиабатический коэффициенты объёмного сжатия и модули упругости.

В учебнике для мелиоративных специальностей направления Гидромелиорации, Природообустройство и водопользование [2] сжимаемость жидкости рассмотрена несколько подробнее. В нём излагаются понятия с коэффициентом объёмного сжатия, модуля упругости жидкости, приводятся значения этой величины для характерных жидкостей. Отмечается, что с учётом малой сжимаемости жидкости для условий работы гидротехнических сооружений она может рассматриваться как несжимаемая среда. В числе случаев, когда необходимо учитывать сжимаемость жидкости, приводятся примеры влияния сжимаемости воды на положение уровня мирового океана и значительного изменения давления в гидравлических системах при возникновении различного рода возмущений.

В учебных пособиях для транспортных специальностей строительного профиля при изучении ключевых вопросов лабораторных гидравлических исследований основных дорожных гидротехнических сооружений: водосливов, дорожных водопрпускных труб, малых мостов, фильтрующих дорожных насыпей и дамб при ламинарной и турбулентной фильтрации рассматривается тот же перечень характеристик сжимаемости жидкости [3]. Подчёркивается, что при решении большинства задач транспортного строительства жидкость можно считать практически несжимаемой. Примерно в таком же аспекте этот вопрос трактуется и в учебниках для механических [4] и ряда других специальностей [5].

В учебнике для систем водоснабжения и водоотведения [10] при изучении общих закономерностей с целью упрощения задачи вводится понятие идеальной жидкости. При этом всё-таки, отмечается, что реальные жидкости хоть и малосжимаемы, но имея силы трения при движении, существенно отличаются от идеальной жидкости. Например, приведены известные справочные данные, что при повышении давления на $9,8 \cdot 10^4$ (1 атм.) объём воды уменьшается на 1/20000 часть первоначальной величины. На этом основании делается вывод, что в деятельности инженера-сантехника изменение давления не достигает обычно больших величин, поэтому сжимаемостью воды можно пренебречь, считая вес и плотность не зависящими от давления [10].

Такой подход к изложению вопроса о сжимаемости жидкости удобен с позиций обоснования возможности рассмотрения жидкости как несжимаемой. Однако при этом происходит заметное обеднение представления о жидкости, поскольку именно сжимаемость жидкостей объясняет многие ха-

рактёрные черты их поведения в различных конкретных ситуациях. Это в особенности относится к жидкостным гидравлическим системам, являющихся предметом изучения машиностроительной гидравлики.

Действительно, среди того многообразия функций, которые выполняют жидкости в различных сферах человеческой жизни и деятельности, в качестве главных для жидкостей напорных систем, рассматриваемых в курсах гидравлики для механических специальностей, могут быть выделены функции аккумуляции энергии (имеется в виду участие в процессе преобразования энергии, например, из электрической энергии в энергию жидкости), передачи её на необходимые расстояния и реализация этой энергии в работе различных исполнительных механизмов и устройств. Указанные функции могут выполняться жидкостями по-разному, в зависимости от того, какая форма энергии жидкости используется для этих целей. Однако, если иметь в виду наиболее распространённую форму – энергию сжатия, удельная величина которой определяется соотношением $P/\rho g$ [6], где P – давление в жидкости, ρ – её плотность, g – ускорение силы тяжести, то главенствующую роль в выполнении указанных функций играет способность жидкости к сжатию, причём не просто только способность к сжатию, а и целый ряд специфических особенностей этого свойства жидкостей.

С учётом формул (1) и (2) можно выразить

$$B_V = (1/\rho) \cdot (\partial\rho/\partial P) \quad (3)$$

$$\text{и } E_{жс} = \rho \partial P / \partial \rho, \quad (4)$$

что представляет собой для жидкости закон Гука [2].

$$\text{Отсюда } \rho \approx \rho_0 / [1 - (P - P_0) / E_{жс}] \quad (5)$$

Поскольку значение $E_{жс}$ зависит от температуры и давления, то жидкость не точно следует закону Гука. Кроме того, модуль упругости большинства жидкостей настолько велик, что позволяет в большом числе случаев рассматриваемых конструкций и механизмов считать жидкость практически несжимаемой. Значения $E_{жс}$ при различной температуре приводятся во всех гидротехнических справочниках проектировщика и учебной литературе. В обычных условиях для воды $E_{жс} = 2,1 \cdot 10^9$ Па.

Известно, что потенциальная энергия сжатия, содержащаяся в физическом теле, находящимся в состоянии упругого сжатия, равна работе, выполненной в процессе сжатия рассматриваемого тела силами, осуществлявшими это сжатие и реализовавшими при этом энергию каких-то других тел. То есть, без процесса уменьшения объёма тела внешними силами оно не может аккумулировать в себе энергию, полученную извне, не может служить звеном процесса преобразования энергии. Таким образом, способность жидкости к сжатию является главным фактором, позволяющим в напорных системах передавать жидкости в результате работы тех или иных насосных установок необходимое количество энергии, преобразованное в энергию сжатия. Довольно важными являются и некоторые особенности способности жидкости подвергаться сжатию. К таким особенностям, в частности, относятся относительно малая величина сжимаемости, характеризующаяся приводимыми в учебниках значениями коэффициентов сжатия жидкости. Действительно, малая сжимаемость жидкости и связанная с этим компактность элементов систем гидравлического привода делают возможным создание гидравлических машин, обеспечивающих повышение давления в жидкостях до многих десятков МПа.

Этому способствует также и другая характерная черта сжимаемости жидкости – сохранение при самых высоких значениях давления способности к упругим деформациям. Упругость деформаций жидкости обеспечивает весьма малую продолжительность времени распространения в ней возникающих на том или ином участке системы местных возмущений. Свойство жидкости сохранять упругость деформаций сжатия при любых давлениях (включая фазовые переходы) является причиной относительно малых потерь энергии при эксплуатации гидросистем [7].

Важность рассматриваемого свойства жидкости позволяет использовать его в качестве отправной позиции при выводе некоторых основных закономерностей гидростатики. С учётом сжимаемости жидкости может быть выведено, в частности, основное уравнение гидростатики [6]. Сжимаемость жидкости и связанные с этим энергетические превращения могут быть использованы и для углубления трактовки некоторых основных законов гидростатики. Так, закон Паскаля может быть сформулирован следующим образом: «Работа внешних сил, сжимающих жидкость, находящуюся в замкнутом объёме, преобразуется в энергию сжатия, равномерно распределённую по рассматриваемому объёму». Именно эта особенность поведения жидкости, выражаемая законом Паскаля, обуславливает простоту распределения энергии жидкости в гидравлических системах между несколькими исполнительными органами, что является одним из важных положительных качеств гидравлических систем.

В меньшей степени перечисленные обстоятельства важны в курсах гидравлики для строительных специальностей направления Природообустройство и водопользование, Гидромелиорация, где

практически не затрагиваются вопросы аккумулирования энергии, а движение жидкости (в основном безнапорное) рассматривается как результат соответствующих затрат энергии жидкости безотносительно к тому, каким образом эта энергия получена. Однако представляется, что вопросом сжимаемости жидкости (включая энергетический аспект этого явления) в соответствующих разделах курсов для строительных специальностей могут быть увязаны некоторые особенности бурного движения жидкости, в частности, возникновения аэрации бурных потоков, корректировка расчётов сопрягающих сооружений и других ГТС, например, устройств, основанных на конструктивных элементах гидротарана, рост тенденции применения которых в мелиорации, в АПК и в быту наблюдается в последнее десятилетие [12].

Таким образом, необходимо при составлении или актуализации современных рабочих программ дисциплин в соответствии с направлением и направленностью подготовки студентов произвести анализ содержания дисциплины «Гидравлика», взаимосвязи всех её разделов, установить целесообразную последовательность изложения материала и оценить полноту рассмотрения основных аспектов свойств жидкости в согласовании со всеми взаимосвязанными дисциплинами.

Литература

1. Суэтина Т.А., Румянцева А.Н., Артемьева Т.В., Жажа Е.Ю. Основы гидравлики и теплотехники: Учебник. - М.: Академия, 2020. - 240 с.
2. Штеренлихт, Д.В. Гидравлика: уч. пособие / Д.В. Штеренлихт. - М.: КолосС, 2006. - 656 с.
3. Черных О.Н., Ханов Н.В. Методика совершенствования учебного процесса в лабораторном комплексе кафедры гидротехнических сооружений // Вестник учебно-методического объединения по образованию в области природообустройства и водопользования. 2017. № 10. С. 44-52.
4. Черных О.Н. Творческие аспекты образования специалистов направления Природообустройство и водопользование на примере расчётно-графических работ по некоторым вариативным дисциплинам направленности Природоохранные гидротехнические сооружения // Вестник Научно-методического совета по природообустройству и водопользованию. 2020. № 18. С. 35-42.
5. Альтшуль, А.Д. Гидравлика и аэродинамика: учеб. пособие для вузов / А.Д. Альтшуль, П.Г. Киселёв. - М.: Стройиздат, 1975. - 327 с.
6. Черных О.Н. Формирование профессиональной компетентности в области «Природообустройство и водопользование» и проблема сохранения гидроландшафтного историко-культурного наследия ТСХА в учебной практике студентов // Вестник учебно-методического объединения по образованию в области природообустройства и водопользования. 2018. № 12. С. 86-94.
7. Калицун, В.И. Гидравлика, водоснабжение и канализация: уч. пособие / В.И. Калицун, В.С. Кедров, Ю.М. Ласков. - М.: Стройиздат, 2002. - 397 с.
8. Волков В.И., Черных О.Н., Алтунин В.И. Лабораторные исследования открытых водосбросов: учебное пособие. М.: МГУП, 2013. - 150 с.
9. Чугаев Р.Р. Гидравлика: учебник для вузов. - Л.: Энергоиздат. Ленингр. отделение, 1982. - 672 с.
10. Сайридинов С.Ш. Гидравлика систем водоснабжения и водоотведения: уч. пособие. - М.: АСВ, 2012. - 352 с.
11. Корнеев И.В., Черных О.Н., Алтунин В.И. Некоторые аспекты формирования компетенций студентов по направлению подготовки Природообустройство и водопользование // Вестник учебно-методического объединения по образованию в области природообустройства и водопользования. 2016. № 9. С. 16-21.
12. Черных О.Н., Ханов Н.В. Научные основы устройств гидропластики. – Иркутск: Мегаринт. 2017. – 212 с.

References

1. Suetina T.A., Rumyantseva A.N., Artemyeva T.V., Zhazha E.Yu. Osnovy gidravliki i teplotekhniki. Uchebnik. - M.: Izdatelskiy tsentr «Akademiya». 2020. - 240 s.
2. Shterenlikht. D.V. Gidravlika: uch. posobiye / D.V. Shterenlikht. - M.: KolosS. 2006. - 656 s.
3. Chernykh O.N. Khanov N.V. Metodika sovershenstvovaniya uchebnogo protsessa v laboratornom komplekse kafedry gidrotekhnicheskikh sooruzheniy // Vestnik uchebno-metodicheskogo obyedineniya po obrazovaniyu v oblasti prirodoobustroystva i vodopolzovaniya. 2017. № 10. S. 44-52.
4. Chernykh O.N. Tvorcheskkiye aspekty obrazovaniya spetsialistov napravleniya Prirodoobu stroystvo i vodopolzovaniye na primere raschetno-graficheskikh rabot po nekotorym variativnym distsiplinam napravlenno-sti Prirodookhrannyye gidrotekhnicheskkiye sooruzheniya // Vestnik uchebno-metodicheskogo obyedineniya po obrazovaniyu v oblasti prirodoobustroystva i vodopolzovaniya. 2020. № 18. S. 35-42.
5. Altshul. A.D. Gidravlika i aerodinamika: ucheb. posobiye dlya vuzov / A.D. Altshul. P.G. Kiselev. - M.: Stroyizdat. 1975. - 327 s.
6. Chernykh O.N. Formirovaniye professionalnoy kompetentnosti v oblasti «Prirodoobustroystvo i vodo-polzovaniye» i problema sokhraneniya gidrolandshaftnogo istoriko-kulturnogo naslediya TSKhA v uchebnoy praktike studentov //

Vestnik uchebno-metodicheskogo obyedineniya po obrazovaniyu v oblasti prirodoobu-stroystva i vodopolzovaniya. 2018. №12. S.86-94.

7. Kalitsun. V.I. Gidravlika. vodosnabzheniye i kanalizatsiya: uch. posobiye / V.I. Kalitsun. V.S. Kedrov. Yu.M. Laskov. - M.: Stroyizdat. 2002. - 397 s.

8. Volkov V.I., Chernykh O.N., Altunin V.I. Laboratornyye issledovaniya otkrytykh vodosbrosov: uchebnoye posobiye. M.: Iz-vo FGBOU VPO MGUP. 2013.- 150 s.

9. Chugayev R.R. Gidravlika: uchebnik dlya vuzov. - L.: Energoizdat. Leningr. otdeleniye. 1982. – 672 s.

10. Sayriddinov S.Sh. Gidravlika sistem vodosnabzheniya i vodootvedeniya uch. posobiye. – M.: Izdatelstvo ASV. 2012. – 352 s.

11. Korneyev I.V., Chernykh O.N., Altunin V.I. Nekotoryye aspekty formirovaniya kompetentsiy studentov po napravleniyu podgotovki Prirodoobustroystvo i vodopolzovaniye // Vestnik uchebno-metodicheskogo obyedineniya po obrazovaniyu v oblasti prirodoobustroystva i vodopolzovaniya. 2016. № 9. S. 16-21.

12. Chernykh O.N., Khanov N.V. Nauchnyye osnovy ustroystv gidroplastiki. Irkutsk: Megaprint. 2017. 212 s.

Данные об авторе:

Бурлаченко Алёна Владимировна, доцент кафедры «Гидравлика», кандидат технических наук.

e-mail: chtara@mail.ru

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)

Ленинградский проспект, 64, 125319, Москва, Россия

Data about the author:

Burlachenko Alena Vladimirovna, Associate Professor of the Department of Hydraulics, Candidate of Technical Sciences.

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)

Leningradsky Prospekt, 64, 125319, Moscow, Russia

Рецензент: Ханов Н.В., д.т.н., профессор кафедры гидротехнических сооружений РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева.