



DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-228-234

УДК 504.4

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ОБОРУДОВАНИЯ, СНИЖАЮЩЕГО ВРЕДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМАХ

Е.К. Синиченко¹, И.И. Грицук^{1,2,3}, Л.Е. Щесняк¹

¹ Российский университет дружбы народов (РУДН)

Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

² Институт водных проблем РАН (ИВП РАН)

Российская Федерация, 119333, Москва, ул. Губкина, 3

³ Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет

Российская Федерация, 125319, Москва, Ленинградский проспект, 64

Развитие трубопроводных систем и создание новых схем с включением дополнительного оборудования предъявляют высокие требования к безопасности и безотказности работы нагнетающих установок, насосных станций, а также к элементам трубопроводов, отвечающих за своевременную защиту системы в случае возникновения экстренных ситуаций. Практика эксплуатации длинных и коротких трубопроводов показывает, что колебания давления и расхода, вызываемые работой нагнетательных установок, а также перегрузки ударного характера, вызываемые, в частности, срабатыванием запорных элементов, являются причиной воздействия на трубопровод дополнительных динамических нагрузок, что может привести к авариям и катастрофам с тяжелыми последствиями, человеческими жертвами. Во время переходного процесса в отдельных сечениях трубопровода, особенно на входе и выходе нагнетательной установки, изменение давления может быть столь резким, что возможно разрушение стенок трубопровода. Поэтому проблема создания эффективных средств гашения волновых процессов и гидравлических ударов не теряет актуальности на протяжении многих десятилетий. В статье кратко описана история развития методов расчета неустановившегося движения вязкой и сжимаемой жидкости. Обозначены основные проблемы, возникающие в практике эксплуатации гидравлических систем, включающих различные виды оборудования, необходимого для надежного функционирования систем. Приведены ссылки на статьи, в которых дается анализ различных аспектов, связанных с данной тематикой.

Ключевые слова: трубопроводные системы, стабилизатор давления, гидроудар

Введение

Расчетами, связанными с неустановившимся движением жидкости и гидравлическим ударом в частности ученые занимаются уже достаточно давно. Первые серьезные исследования движения жидкости в трубопроводах, расчеты гидравлического удара связаны с именем Н.Е. Жуковского [1]. Им были выведены дифференциальные уравнения движения невязкой жидкости, а также разработаны способы снижения скачков давления с помощью воздушного колпака [2].

Теория расчета неустановившегося движения вязкой и сжимаемой жидкости в трубах была разработана И.А. Чарным [3]. Он ввел гипотезу квазистационар-

ности потока, а С.А. Христианович применил ее для вычисления неустановившегося течения в руслах. Идея гипотезы состоит в том, что сила трения жидкости о стенку трубы в нестационарном режиме принимается такой же, как и при стационарном течении со скоростью, равной мгновенной скорости рассматриваемого стационарного течения. Согласно И.А. Чарному, уравнения (движения и неразрывности) неустановившегося движения несжимаемой жидкости могут быть записаны в виде

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho g z + p + \alpha \rho \frac{v^2}{2} \right) + \alpha' \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\rho \lambda}{2D} v |v| = 0, \quad [\text{Н/М}^3] \quad (1)$$

$$v \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial t} + \rho c^2 \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \quad [\text{Н}/(\text{м}^2 \cdot \text{сек})], \quad (2)$$

где p — абсолютное гидродинамическое давление; v — средняя по живому сечению скорость; g — ускорение свободного падения; z — геометрическая высота; ρ — плотность жидкости; t — время; λ — коэффициент гидравлического трения по длине; D — диаметр трубопровода; c — скорость распространения волны давления; α и α' — коэффициенты Кориолиса и Бусинеска, принято, что $\alpha = \alpha' = 1$.

Современные тенденции

Развитие оборонной промышленности и формирование ракетных комплексов потребовали от ученых создания надежных систем, обеспечивающих равномерную подачу жидкого топлива от топливных баков к двигателям. Для решения этой задачи потребовалось развитие теории, описывающей работу различного оборудования при неустановившемся движении жидкости. Этой проблемой занимались А.П. Владиславлев, А.А. Козобков, В.А. Малышев, Р.Ф. Ганиев, Х.Н. Низамов [4] и др. Способы и средства защиты от колебаний давления в авиационных трубопроводах изложены в монографии В.А. Шорина [5], где описаны газожидкостные стабилизаторы емкостного типа, гасители типа параллельного резонансного контура и др. Продолжением исследований Р.Ф. Ганиева и Х.Н. Низамова являются работы Ф.В. Рекача (с соавт.) [7; 9; 11], в которых рассчитаны гидравлические схемы, включающие стабилизатор давления диссипативного принципа действия точными методами, а также проведен анализ допустимых динамических нагрузок на трубопровод. Изучению данной актуальной проблематики посвящены работы таких иностранных ученых, как А. Ismaier, E. Schlueker [12], Z. Liu, J. Jiang, X. Yang [13], M.R. Nikpour, A.H. Nazemi, A. Hosseinzadeh Dalir, F. Shoja, P. Varjaland [14], S. Henclik [15] и др.

С развитием вычислительной техники появляются новые возможности для расчета уже более сложных гидравлических схем, включающих различное инновационное оборудование. При этом имеется возможность исследовать параметры неустановившегося движения жидкости для определенных временных характеристик включения-выключения и срабатывания оборудования (насосных стан-

ций, запорной арматуры, стабилизаторов давления, сбрасывающих устройств и т.д.). Наибольшее развитие получил численный метод характеристик, позволяющий интегрировать квазилинейные гиперболические уравнения неустановившегося движения жидкости. Данный метод использует схему расчета, отличающуюся простотой и экономичностью с ограничением на шаг интегрирования (условие Куранта — Фридриха — Леви), и обеспечивает точность расчетов до 15%. Метод широко применяется для решения задач гидравлического удара в однофазной (а в дальнейшем и многофазной) жидкости в работах Д.А. Фокса [6] и др., и кратко описан в [8]. Для удобства расчетов в качестве основных характеристик потока принимается расход $Q = F \cdot v$ и абсолютный гидродинамический напор (выраженный в метрах водяного столба) $H = p/(\rho g)$. Вместо (1) и (2) получим:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(gFz + gFH + \frac{Q^2}{2F} \right) + \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\lambda}{2DF} Q|Q| = 0, \quad [\text{м}^3/\text{сек}^2] \quad (3)$$

$$\frac{Q}{F} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c^2}{gF} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \quad [\text{м}/\text{сек}]. \quad (4)$$

Одним из актуальных направлений развития данной тематики для промышленных и гражданских гидравлических объектов является расчет длинных и коротких трубопроводов с включением в гидравлическую схему различного оборудования с заданными характеристиками работы. Значительное внимание учеными было уделено анализу и развитию стабилизаторов давления новых типов. Так, в работе [7] рассчитан стабилизатор давления, работающий при средних (от 2 до 5 МПа) и высоких (от 5 до 20 МПа) давлениях. Упругая камера (УК) является одним из основных элементов стабилизатора давления. Она представляет собой замкнутое объемное тело, которое при повышении давления уменьшает свой объем, а при понижении — увеличивает. Также в работе подробно описаны назначение и расчет стабилизатора давления при работе. Технические характеристики УК (рабочее давление, податливость, объем жидкости, вмещаемой камерой, химические и физические условия работы камеры и т.д.) определяют качество работы стабилизатора давления.

В статье [7] описан стабилизатор давления, который гасит вредные колебания в определенном диапазоне частот, проведен анализ эффективности работы оборудования при тех или иных условиях. Показано, что данный жесткий стабилизатор, разделяя поток жидкости, способен хорошо гасить колебательные частоты, на которые он рассчитывается. При этом он также уменьшает амплитуды колебаний в достаточно широком спектре частот. Работа [10] посвящена правильному подбору суммарной площади перфорационных отверстий для оптимального снижения гидроудара до 30% при оптимальном подборе перфорационных отверстий. В статье [11] исследуется неустановившееся движение жидкости при отключении центробежных насосов с разными моментами инерции и диаграммами Сьютера, а также анализируется влияние нарушения сплошности потока

жидкости на колебательный процесс в трубопроводе. В статье [10] разработано мембранно-сбрасывающее устройство, проведен расчет характеристик при возникновении в системе гидроудара, использована идея «демпфирующего» влияния протяженного участка трубопровода с низкой скоростью распространения волн повышенного давления на нежелательное повышение давления в системе. В статье [7] проведены вычисления упрощенной тепловой сети г. Нижнего Новгорода с точки зрения возникновения аварийных ситуаций. Рассмотрены случаи возможного отключения электроэнергии, вследствие чего срабатывает запорная арматура и возникают области распространения повышенного давления. В статьях [8; 9] представлены теоретические материалы, обобщающие опыт расчета трубопроводов с различными физическими характеристиками жидкости. В статье [10] рассчитаны эллиптические упругие камеры точными методами, а в [11] проведены вычисления сложной гидравлической системы, содержащей несколько колец. В дальнейшем авторами планируются численные эксперименты с включением в схемы различных видов оборудования и исследование их взаимодействия.

Заключение

Современные методы численного интегрирования позволяют достаточно точно описывать неустановившееся движение вязкой жидкости. В расчетах можно задавать физические и иные характеристики проектируемого или уже существующего оборудования с четким указанием временных факторов работы. Особенно это касается элементов запорной арматуры и способа пуска насосных агрегатов. Технический прогресс ставит новые проблемы, возникающие при эксплуатации гидравлических систем и оборудования, которые успешно решаются специалистами. В настоящий момент имеются отечественные (ZULU) и иностранные (голландская WANDA) программы численного расчета неустановившегося движения жидкости, помогающие моделировать и исследовать конкретные инженерные задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Жуковский Н.Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. М.—Л.: Гостехиздат, 1949. 103 с.
- [2] Жуковский Н.Е. Собрание сочинений. Т. 2: Гидродинамика. 763 с.; Т. 3: Гидравлика. Прикладная математика. 700 с. М.—Л.: Оборонгиз, 1949.
- [3] Чарный И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. 2-е изд. М.: Недра, 1975. 296 с.
- [4] Ганиев Р.Ф., Низамов Х.Н., Дербуков Е.И. Волновая стабилизация и предупреждение аварий в трубопроводах. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1996. 260 с.
- [5] Шорин В.П. Устранение колебаний в авиационных трубопроводах. М.: Машиностроение, 1980. 155 с.
- [6] Фокс Д.А. Гидравлический анализ неустановившегося течения в трубопроводах / пер. с англ. М.: Энергоиздат, 1981. 247 с.
- [7] Рекач Ф.В., Синиченко Е.К., Попов А.М. Расчет тепловой сети г. Нижнего Новгорода с точки зрения возникновения возможных аварийных ситуаций // Вестник Российского университета дружбы народов. 2013. № 3. С. 76—82.

- [8] Рекач Ф.В., Синиченко Е.К. Дифференциальные уравнения неустановившегося движения многофазной жидкости // Вестник Российского университета дружбы народов. 2014. № 3. С. 58–60.
- [9] Рекач Ф.В. Сравнение методов неустановившегося движения жидкости в круговых цилиндрических оболочках // Строительная механика конструкций и сооружений. 2015. № 4. С. 44–47.
- [10] Рекач Ф.В., Синиченко Е.К., Грицук И.И. Расчет точными методами стабилизатора давления с эллиптическими упругими камерами // Вестник Российского университета дружбы народов. 2016. № 1. С. 17–21.
- [11] Рекач Ф.В. Расчет неустановившегося движения в жидкости в круговых цилиндрических оболочках для сложной схемы, содержащей несколько колец // Строительная механика конструкций и сооружений. 2016. № 5. С. 75–79.
- [12] Ismaier A., Schluoker E. Fluid dynamic interaction between water hammer and centrifugal pumps, Nuclear Engineering and Design. 239 (2009). No. 12. 3151–3154.
- [13] Liu Z., Jiang J., Yang X. Research and instance analysis on joint water hammer protection of long-distance water supply system, Proceedings of the 6th International Symposium on Fluid Machinery and Fluid Engineering, Wuhan, China. 2014.
- [14] Nikpour M.R., Nazemi A.H., Hosseinzadeh Dalir A., Shoja F., Varjaland P. Experimental and numerical simulation of water hammer, Arabian Journal for Science and Engineering, 39 (2014). No. 4. 2669–2675.
- [15] Henclik S. The influence of elastic pipe supports and structural damping on water hammer with fluid-structure interaction, Proceedings of the 11th International Conferences on Pressure Surges, Lisbon, Portugal. 2012. С. 365–380.

© Синиченко Е.К., Грицук И.И., Щесняк Л.Е., 2018

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 15 января 2018

Дата принятия к печати: 28 апреля 2018

Для цитирования:

Синиченко Е.К., Грицук И.И., Щесняк Л.Е. Современные тенденции развития оборудования, снижающего вредные колебания давления в трубопроводных системах // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2018. Т. 19. № 2. С. 228–234. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-228-234

Сведения об авторах:

Синиченко Евгений Константинович — кандидат технических наук, доцент департамента архитектуры и строительства Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов:* гидравлика, инженерная гидрология. *Контактная информация:* e-mail: sinichenko_ek@pfur.ru

Грицук Илья Игоревич — кандидат технических наук, доцент департамента архитектуры и строительства Инженерной академии, Российский университет дружбы народов, старший научный сотрудник, Институт водных проблем РАН (ИВП РАН), доцент кафедры гидравлики, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет. *Область научных интересов:* гидравлика, инженерная гидрология. *Контактная информация:* e-mail: gritsuk_ii@pfur.ru

Щесняк Леонид Евгеньевич — аспирант департамента архитектуры и строительства Инженерной академии, Российский университет дружбы народов. *Область научных интересов:* гидравлика, инженерная гидрология. *Контактная информация:* e-mail: obeorne@mail.ru

MODERN TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF EQUIPMENT REDUCING HARMFUL PRESSURE FLUCTUATIONS IN PIPING SYSTEMS

E.K. Sinichenko¹, I.I. Gritsuk^{1,2,3}, L.E. Shesnyak¹

¹ Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)
6, Miklukho-Maklaya str., Moscow, 117198, Russian Federation

² Russian Academy of Sciences Water Problems Institute (IWP RAS)
3, Gubkina str., Moscow, 119333, Russian Federation

³ Moscow Automobile and Road Construction State Technical University
64, Leningradsky prospect, Moscow, 125319, Russian Federation

Abstract. The development of pipeline systems and the creation of new schemes, with the inclusion of additional equipment, poses high demands on the safety and reliability of the operation of injection plants, pumping stations, as well as on the elements of pipelines responsible for timely protection of the system in the event of emergency situations. The practice of operating long and short pipelines shows that fluctuations in pressure and flow caused by the operation of injection plants, as well as overloads of impact type, caused, in particular, by the operation of shut-off elements, result in additional dynamic loads on the pipeline, which can lead to accidents and catastrophes with severe consequences, human casualties. During the transient process in the individual sections of the pipeline, especially at the inlet and outlet of the injection plant, the pressure change can be so abrupt that it is possible to destroy the walls of the pipeline. Therefore, the problem of creating effective means of damping wave processes and hydraulic shocks has not lost its relevance for many decades. The article briefly describes the history of development of calculation methods of unsteady movement of a viscous and compressible fluid. The main problems are denoted in the practical operation of hydraulic systems, including various types of equipment. The references to articles which provide analysis of various aspects related to this subject are given.

Key words: piping systems, pressure stabilizer, water hammer

REFERENCES

- [1] Zhukovskij N.E. O gidravlicheskom udare v vodoprovodnykh trubakh [About hydraulic shock in water pipes]. M.; L.: Gostekhizdat Publ., 1949. 103 p. (In Russ.)
- [2] Zhukovskij N.E. Sbranie sochinenii. T. 2: Gidrodinamika. 763 s.; T. 3: Gidravlika. Prikladnaya matematika. [Collected Works. V. 2: Hydrodynamics. 763 p.; V. 3: Hydraulics. Applied Mathematics]. 700 p. M.; L.: Gostekhizdat Publ., 1949. (In Russ.)
- [3] Charnyy I.A. Neustanovivsheesya dvizhenie real'noi zhidkosti v trubakh [Unsteady motion of real liquid in pipes]. 2-nd edition. Moscow: Nedra Publ., 1975. 296 p. (In Russ.)
- [4] Ganiev R.F., Nizamov Kh.N., Derbukov E.I. Volnovaya stabilizatsiya i preduprezhdenie avarii v truboprovodakh [Wave stabilization and accident prevention in pipelines]. Moscow: Bauman Press Publ., 1996. 260 p. (In Russ.)
- [5] Shorin V.P. Ustranenie kolebanii v aviatsionnykh truboprovodakh [Elimination of fluctuations in aircraft pipelines]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1980. 155 p. (In Russ.)
- [6] Foks D.A. Gidravlicheskie analiz neustanovivshegosya techeniya v truboprovodakh [Hydraulic analysis of unsteady flow in pipelines] (trans. From English). Moscow: Energoizdat Publ., 1981. 247 p. (In Russ.)
- [7] Rekach F.V., Sinichenko E.K., Popov A.M. Analysis of heat-supply system of Nizhney Novgorod from the point of view of emergency situations occurrence. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2013. No. 3. P. 76–82. (In Russ.)

- [8] Rekach F.V., Sinichenko E.K. Differential equations of unsteady motion of multiphase liquid. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2014. No. 3. P. 58—60. (In Russ.)
- [9] Rekach F.V. Methods of comparison in analysis of unsteady liquid motion in circular cylindrical shells. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2015. No. 4. P. 44—47. (In Russ.)
- [10] Rekach F.V., Sinichenko E.K., Gritsuk I.I. Analysis of pressure stabilizer with elliptic chambers by exact method. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2016. No. 1. P. 17—21. (In Russ.)
- [11] Rekach F.V. Analysis of unsteady liquid motion in circular cylindrical shells for complex scheme including several rings. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2016. No. 5. P. 75—79. (In Russ.)
- [12] Ismaier A., Schlueker E., Fluid dynamic interaction between water hammer and centrifugal pumps, *Nuclear Engineering and Design*. 239 (2009). No. 12. 3151—3154.
- [13] Liu Z., Jiang J., Yang X., Research and instance analysis on joint water hammer protection of long-distance water supply system, *Proceedings of the 6th International Symposium on Fluid Machinery and Fluid Engineering*, Wuhan, China, 2014.
- [14] Nikpour M.R., Nazemi A.H., Hosseinzadeh Dalir A., Shoja F., Varjaland P., Experimental and numerical simulation of water hammer, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39 (2014). No. 4. 2669—2675.
- [15] Henclik S., The influence of elastic pipe supports and structural damping on water hammer with fluid-structure interaction, *Proceedings of the 11th International Conferences on Pressure Surges*, Lisbon, Portugal, 2012. P. 365—380.

Article history:

Received: January 18, 2018

Accepted: April 28, 2018

For citation:

Sinichenko E.K., Gritsuk I.I., Shesnyak L.E. (2018). Modern trends in the development of equipment reducing harmful pressure fluctuations in piping systems. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 19(2), 228—234. DOI 10.22363/2312-8143-2018-19-2-228-234

Bio Note:

Evgeniy K. Sinichenko — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Architecture and Civil Engineering of the Academy of Engineering of Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests:* hydraulics, engineering hydrology. *Contact information:* e-mail: sinichenko_ek@pfur.ru

Ilya I. Gritsuk — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Architecture and Civil Engineering of the Academy of Engineering of Peoples' Friendship University of Russia. Senior research associate, Russian Academy of Sciences Water Problems Institute (IWP RAS). Associate Professor at the Department of hydraulics, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University. *Research interests:* hydraulics, engineering hydrology. *Contact information:* e-mail: gritsuk_ii@pfur.ru

Leonid E. Shesnyak — post-graduate student of the Department of Architecture and Civil Engineering of the Academy of Engineering of Peoples' Friendship University of Russia. *Research interests:* hydraulics, engineering hydrology. *Contact information:* e-mail: obeorne@mail.ru