

ГИДРАВЛИКА. ГЕОТЕХНИКА. ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО.

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 626

DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.559-568

Экспериментальные исследования волновых процессов в трубопроводной системе

Андрей Игоревич Ревин, Инна Валерьевна Бузякова

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. В целях проведения качественного и количественного анализа волновых процессов, а также верификации эффективности применения современного комплекса проведен ряд натурных испытаний. Данные экспериментальные исследования осуществлялись как в контролируемых лабораторных условиях, так и непосредственно в рамках производственных объектов реального сектора экономики.

Материалы и методы. Испытания в лабораторных условиях выполнялись на базе автономной некоммерческой организации «Курганский центр испытаний, сертификации и стандартизации трубопроводной арматуры» (АНО «КЦИСС») в г. Кургане, Курганской области, созданной для предоставления услуг в области оценки соответствия и подтверждения качества оборудования, изделий и технологий, в том числе для объектов использования атомной энергии, нефтехимических, нефтегазодобывающих, перерабатывающих производств и других опасных промышленных объектов и производств, а также общепромышленных объектов и производств, включая реализацию мероприятий по повышению безопасности данных объектов. В соответствии с п. 7 Решения «Концерна Росэнергоатом» от 26.06.2019 № Р 1.2.2.06.001.0435–2019 «О модернизации второго и третьего канала системы технической воды ответственных потребителей группы «А» энергоблока № 4 Калининской АЭС» и п. 6.10 условий действия лицензии № ГН-03-101-4122 от 20.10.2021 проведено измерение величин пульсаций давления с использованием разработанного комплекса мониторинга волновых процессов в трубопроводных системах технической воды ответственных потребителей группы «А» 4VF энергоблока № 4 Калининской АЭС в период переходного режима эксплуатации, связанного с выполнением автоматического ступенчатого пуска оборудования систем безопасности АЭС.

Результаты. Полученные результаты показывают, что, согласно проведенным экспериментам с применением разработанного комплекса мониторинга волновых процессов, изменение давления в трубопроводной системе имеет высокочастотный характер, что соответствует природе волновых процессов.

Выводы. Эксперименты в условиях различных нестационарных режимов в диагностируемых трубопроводах наглядным образом продемонстрировали работоспособность предлагаемого комплекса мониторинга волновых процессов в трубопроводной системе.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гидроудар, мониторинг волновых процессов, трубопроводная система, «Большая гидравлическая петля», пульсация давления, высокочастотные динамические процессы, контрольно-измерительные приборы

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ревин А.И., Бузякова И.В. Экспериментальные исследования волновых процессов в трубопроводной системе // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 4. С. 559–568. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.559-568

Автор, ответственный за переписку: Инна Валерьевна Бузякова, buzyakova@mail.ru.

Experimental studies of wave processes in the pipeline system

Andrey I. Revin, Inna V. Buzyakova

*Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. In order to conduct a qualitative and quantitative analysis of wave processes, as well as to verify the effectiveness of the modern complex, a number of field tests were conducted. These experimental studies were carried out both in controlled laboratory conditions and directly within the production facilities of the real sector of the economy.

Materials and methods. Laboratory tests were carried out on the basis of the Kurgan Centre for Testing, Certification and Standardization of Pipeline Fittings (ANO "KCISS"), an autonomous non-commercial organization in Kurgan, Kurgan region, established to provide services in the field of conformity assessment and quality assurance of equipment, products and technologies, including for nuclear energy facilities, petrochemical, oil and gas production, processing plants and other hazardous industrial facilities and productions, as well as general industrial facilities and productions, including the implementation

of measures to improve data security objects. In accordance with clause 7 of the Decision of “Rosenergoatom Concern” dated 26.06.2019 No. R 1.2.2.06.001.0435–2019 “The modernization of the second and third channels of the industrial water system of responsible consumers of Group A of Power unit No. 4 of Kalinin NPP” and clause 6.10 of the terms of license No. GN-03-101-4122 from 10/20/2021. Pressure pulsation values were measured using the developed wave process monitoring system in the process water pipeline systems of responsible consumers of Group “A” 4VF of power unit No. 4 of Kalinin NPP during the transition period of operation associated with the automatic step-by-step start-up of NPP safety equipment.

Results. The results show that, according to the experiments conducted using the developed monitoring system for wave processes, pressure changes in the pipeline system have a high-frequency character, which corresponds to the nature of wave processes.

Conclusions. Experiments under conditions of various non-stationary modes in the diagnosed pipelines have clearly demonstrated the operability of the proposed monitoring system for wave processes in the pipeline system.

KEYWORDS: hydraulic impact, monitoring of wave processes, pipeline system, “Large hydraulic loop”, pressure pulsation, high-frequency dynamic processes, control and measuring devices

FOR CITATION: Revин А.И., Бузякова И.В. Experimental studies of wave processes in the pipeline system. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(4):559-568. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.4.559-568 (rus.).

Corresponding author: Inna V. Buzyakova, buzyakova@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

При эксплуатации трубопроводной системы неизбежно возникают пульсации давления рабочей среды, вызывающие гидродинамическое воздействие и возбуждающие механические вибрации трубопроводов, а также присоединенных механических конструкций. Вибрация трубопроводов и оборудования многократно возрастает на резонансных режимах, что приводит, в том числе, и к повышению погрешности контрольно-измерительных приборов [1].

Надежное и бесперебойное функционирование трубопроводных систем напрямую зависит от своевременного предотвращения возможных аварий и аварийных ситуаций, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации основного технологического оборудования [2–4]. Эффективная работа системы требует постоянного контроля за состоянием всех параметров трубопровода, а также оперативного реагирования на любые отклонения от нормы, чтобы минимизировать риски появления чрезвычайных происшествий, что обеспечивается благодаря системному подходу к оценке технического состояния, базирующегося на проведении как периодических обследований различными методами и средствами технического диагностирования, так и методами непрерывного мониторинга [5–8].

Значительный вклад в развитие теории волновых процессов в жидких средах внесли многие известные ученые. Одним из основоположников гидродинамики, который смог раскрыть механизм влияния волновых процессов в жидких средах на трубопровод и оборудование, был отечественный ученый Н.Е. Жуковский. Также в данной области вели свои исследования следующие ученые: И.Н. Аршеневский, А.И. Богомолова, А.Г. Гумеров, В.В. Берлин, А.И. Жакин, И.А. Чарный, Е.Е. Жмудь, И.С. Громека, К.Г. Асатур, В.Б. Галеев, Г.В. Аронович, М.В. Лурье, Л.Д. Ландау, Д.А. Фокс, Е.В. Вязунов, В.Л. Стритер, Р.И. Нигматулин, Е.Б. Уайли и др. [9]. Исследования, выполненные известными учеными Жаком и Пьером Кюри, внесли значительный вклад в развитие технологий и привели к существен-

ному прогрессу в области создания современных приборов, предназначенных для контроля сложных гидродинамических процессов [10, 11]. Результаты трудов ученых дали возможность разработать приборы, позволяющие более точно контролировать параметры транспортируемой по трубопроводам среды в условиях пульсирующего давления, что имеет важное значение во многих отраслях промышленности и научных исследованиях.

В последнее время защищены несколько диссертационных работ по схожим темам, авторы — О.Г. Капинос, С.В. Павлов, Н.В. Твардовская, В.Г. Гасенко, А.Ю. Верушин и др. Работы, посвященные вопросам непрерывного мониторинга технического состояния трубопроводных систем, немногочисленны и преимущественно сосредоточены на вопросах создания средств для мониторинга [12–17]. К примеру, технологии, используемые на промышленных предприятиях для обеспечения постоянного контроля за параметрами перекачиваемой среды в трубопроводах, не регистрируют параметры нестабильного потока среды в реальном времени, что напрямую сказывается на безопасности эксплуатации трубопроводов [18–20].

Цель эксперимента — получение осциллограммы давления в трубопроводе при закрытии обратного затвора, а также анализ полученных результатов и сравнение их с расчетными данными. Для достижения цели необходимо экспериментально определить величину ударного давления и скорость прохождения волны давления по испытательному стенду в условиях прямого гидравлического удара.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При разработке комплекса современного стендового оборудования, способного обеспечить имитацию всех основных негативных внешних факторов, воздействующих на трубопроводные системы в реальных условиях эксплуатации и безопасное достижение экстремальных и критических нагрузок на испытываемые изделия, применяемые в таких отраслях промышленности, как атомная и тепловая энергети-



Рис. 1. Стенд «Большая гидравлическая петля»

Fig. 1. The “Large hydraulic loop” stand

ки, нефтегазодобывающая и перерабатывающая, химическая и горнодобывающая, для данного центра было предусмотрено создание стенда ресурсных испытаний «Большая гидравлическая петля» (рис. 1), на котором предусматривалась апробация описываемого метода мониторинга волновых процессов.

Испытания осуществлялись в соответствии с программой и методикой испытаний трубопроводного оборудования, в рамках которой ставилась задача по изменению и учету параметров волнового процесса.

Для возникновения гидроудара в системе стенда на рабочем участке DN 300 был смонтирован обратный затвор DN 300. Закрытие запорного органа затвора происходило принудительно, по команде. При этом в системе стенда возникал гидроудар, величина которого зависела от скорости потока среды (расхода).

Величина давления гидроудара фиксировалась устройством мониторинга волновых процессов с записью на ПК.

В испытание входили следующие этапы:

- 1) установление стенда комплекса мониторинга волновых процессов;
- 2) установление открытого положения обратного клапана (создающего гидроудар);
- 3) заполнение стенда водой открытием задвижек на входе и выходе магистрали трубопровода;

- 4) кратковременный пуск насоса и проверка места соединений трубопровода стенда под давлением на герметичность;

- 5) выполнение настройки записи системы измерений;

- 6) включение насоса и установление в системе расхода, соответствующего скорости потока $v = 2$ м/с;

- 7) установление температуры воды 20 °С. Выдержка 3–5 мин. При постоянном расходе фиксируются показания комплекса мониторинга волновых процессов;

- 8) проведение срабатывания обратного клапана и фиксация (с записью ПК) величины возникшего гидроудара;

- 9) в данном режиме производится 3 срабатывания с остановкой насоса, перезапуском системы и интервалами выдержки не менее 5 мин.

В результате выполнено три эксперимента с последующим сравнением результатов при скоростях потока среды в трубопроводе 2 м/с. Результаты мониторинга показаны на рис. 2.

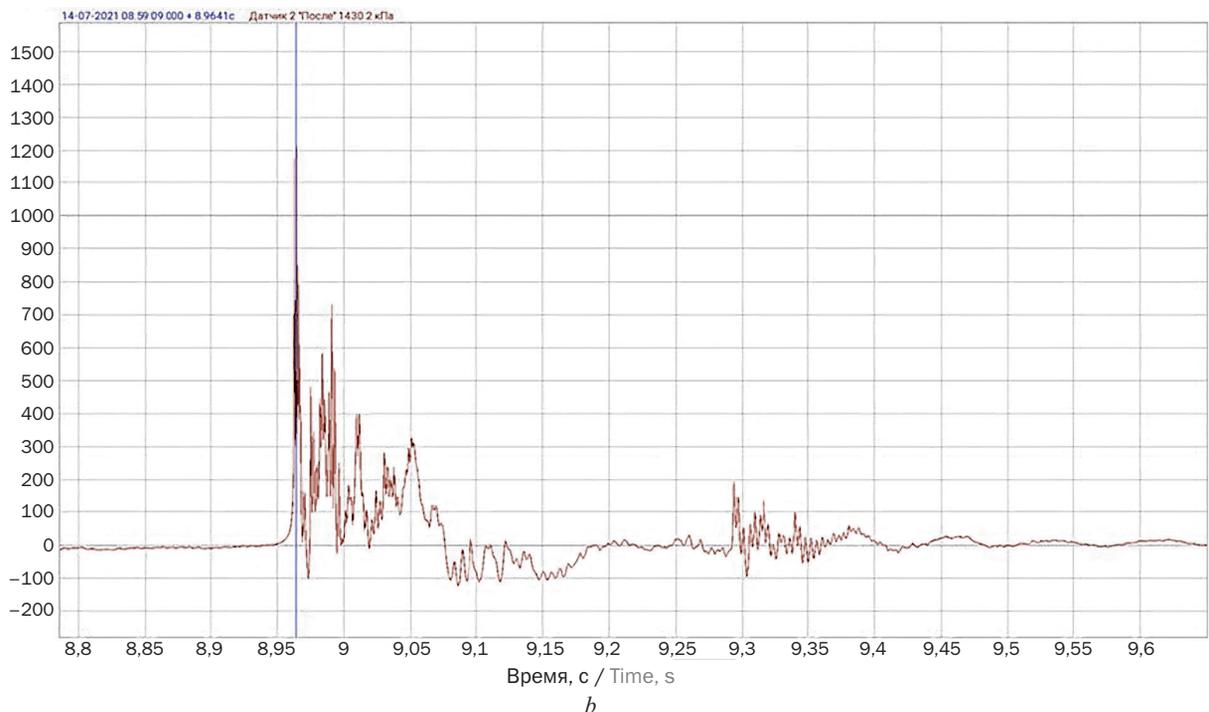
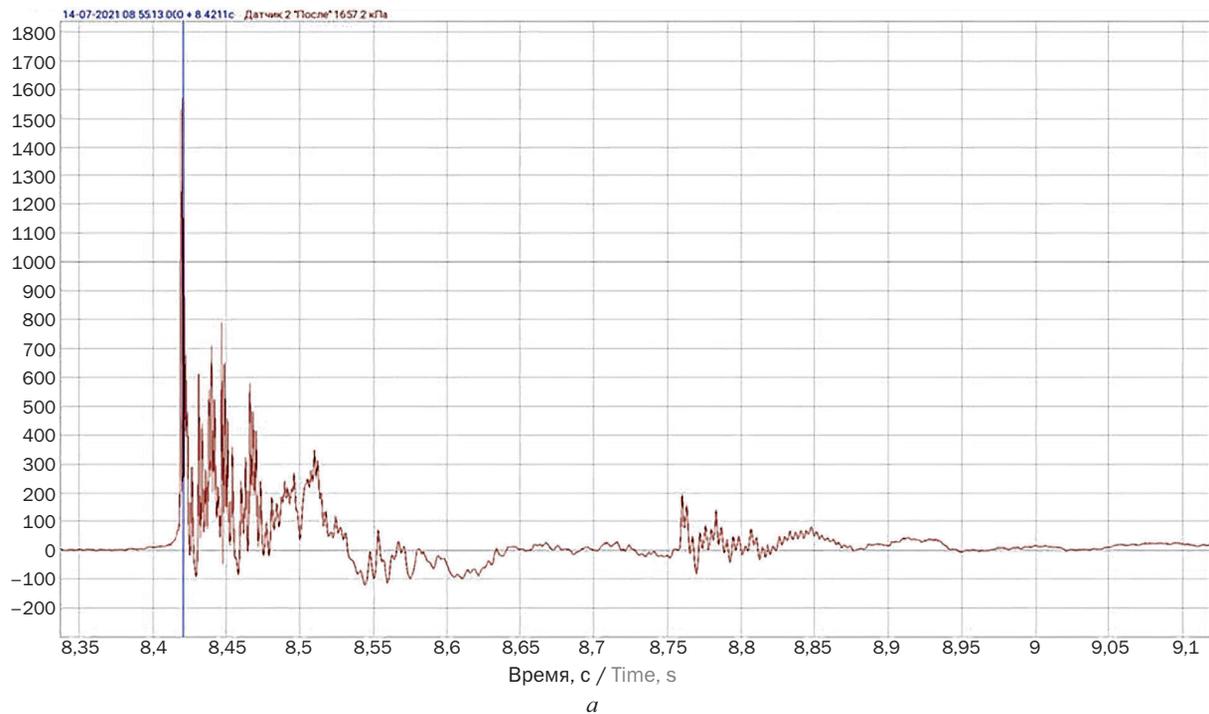
Измерения пульсаций давления в трубопроводных системах технической воды ответственных потребителей группы «А» 4VF выполнялись во время проведения АСП СБ-3 по программе 04.GX. ПМ.0008.69 «Программа комплексных испытаний систем безопасности энергоблока № 4 Калининской АЭС» на высотных отметках 6,6; 19,34; 33,4 м.

Отключение насосного агрегата произошло по сигналу обесточивания, а включение насосного агрегата — через 17 с. Изменение давления, зафиксированное приборами мониторинга, эксплуатируемыми на АЭС, приведено на рис. 3.

Результаты замеров максимальной пульсации давления во время осуществления АСП в трубопроводных системах технической воды ответственных потребителей группы «А» 4VF Калининской АЭС в момент пуска насосного агрегата, выполненные с помощью комплекса мониторинга волновых процессов, представлены на рис. 4.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно проведенным экспериментам, на стенде «Большая гидравлическая петля» прослеживается повторяемость получаемых результатов (частота и амплитуда волнового процесса в каждом из трех экспериментов). Также видно, что графики отражают высокую скорость изменения давления по временной шкале в трубопроводе при неустановившемся режиме в условиях переходного процесса. В соответствии с анализом осциллограмм абсолютного давления в стенде «Большая гидравлическая



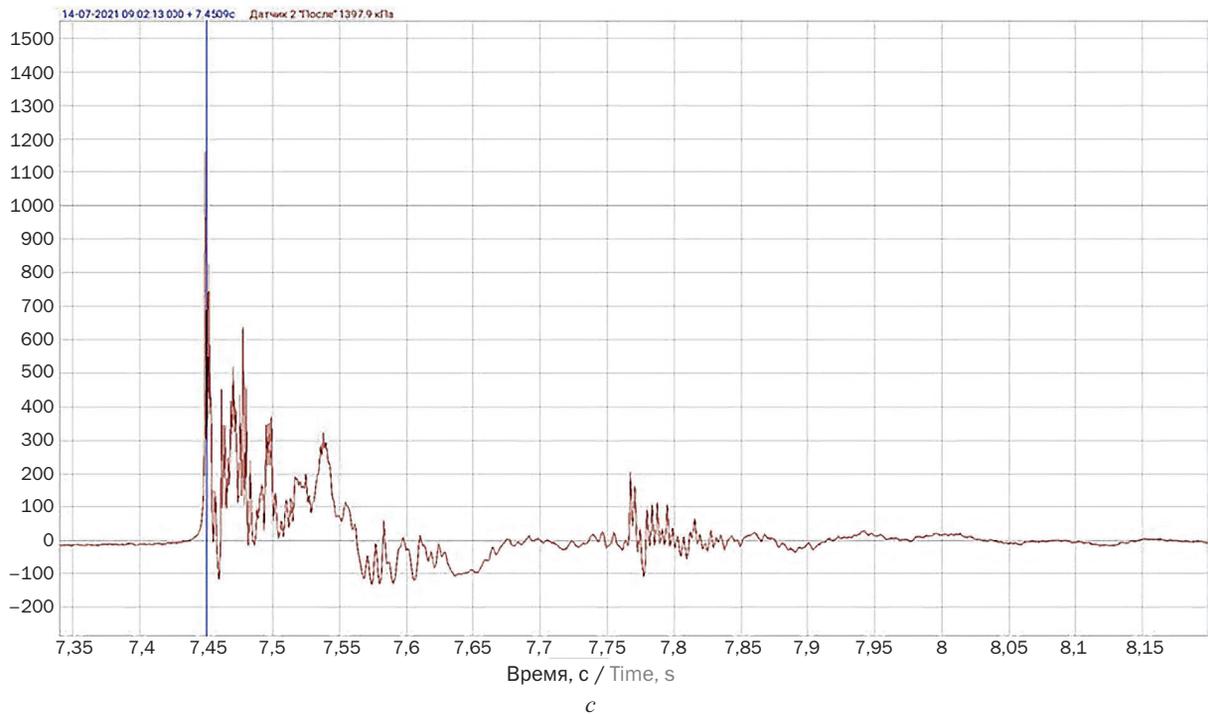


Рис. 2. Скорость среды $V = 2,0$ м/с: a — цикл № 1; b — цикл № 2; c — цикл № 3

Fig. 2. The velocity of the medium $V = 2.0$ m/s: a — cycle No. 1; b — cycle No. 2; c — cycle No. 3

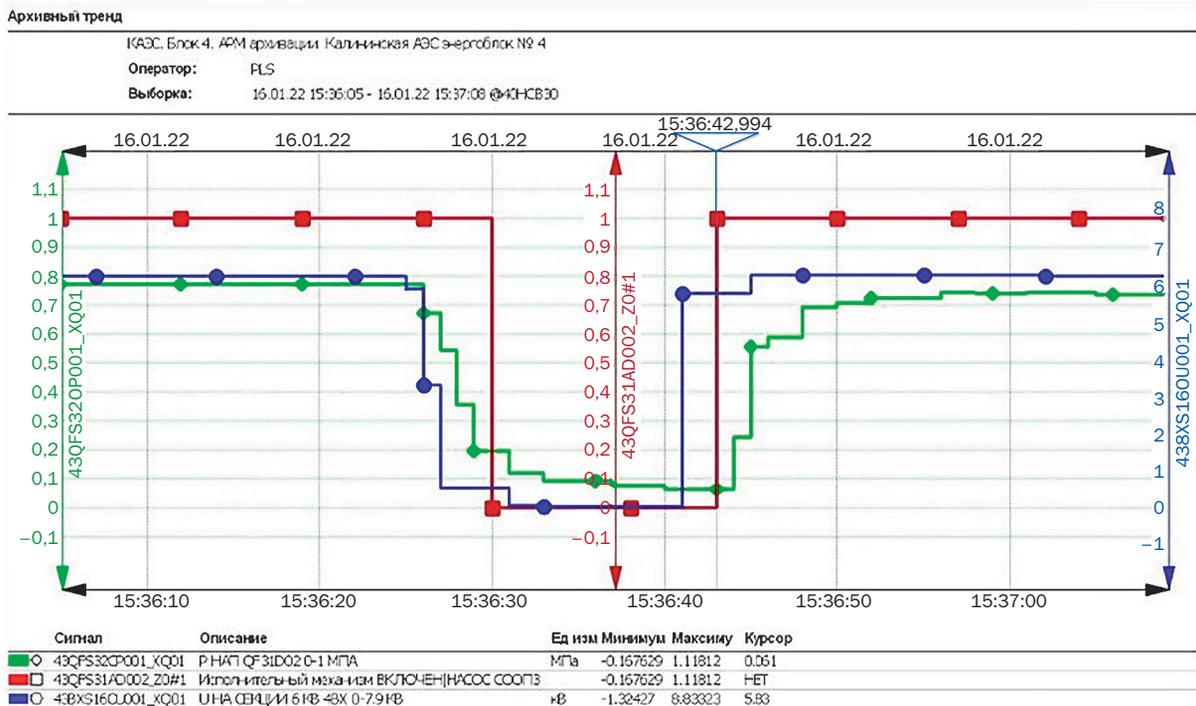


Рис. 3. Тренд отключения и включения насосного агрегата

Fig. 3. Trend of switching off and switching on the pump unit

петля» (рис. 1, 2, a, b) время прохождения волны на участке 10 м составило 0,007 с, соответственно скорость волны давления согласно формуле:

$$a = \frac{L}{\frac{t}{n} \cdot 1}$$

где L — длина трубопровода; t — время; n — количество волн, прошедших контрольную точку за единицу времени, имеет значение, равное 1428,57 м/с.

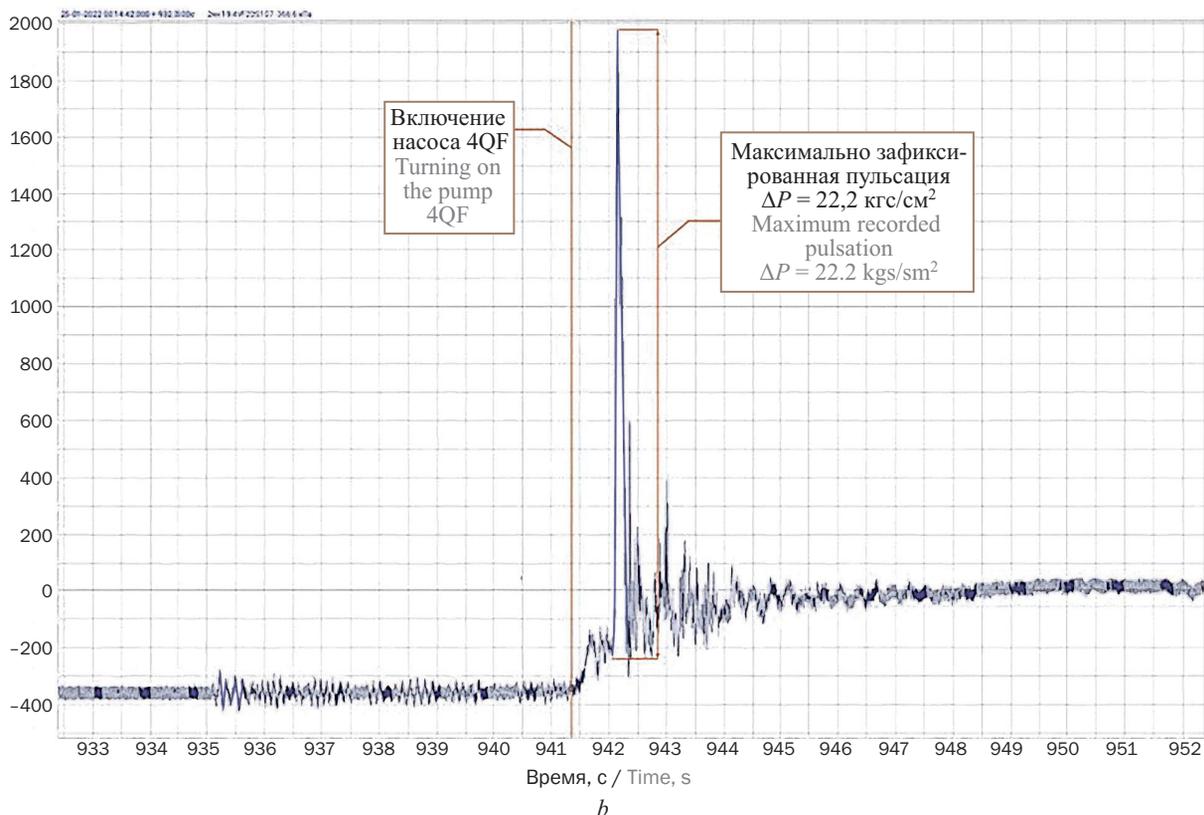
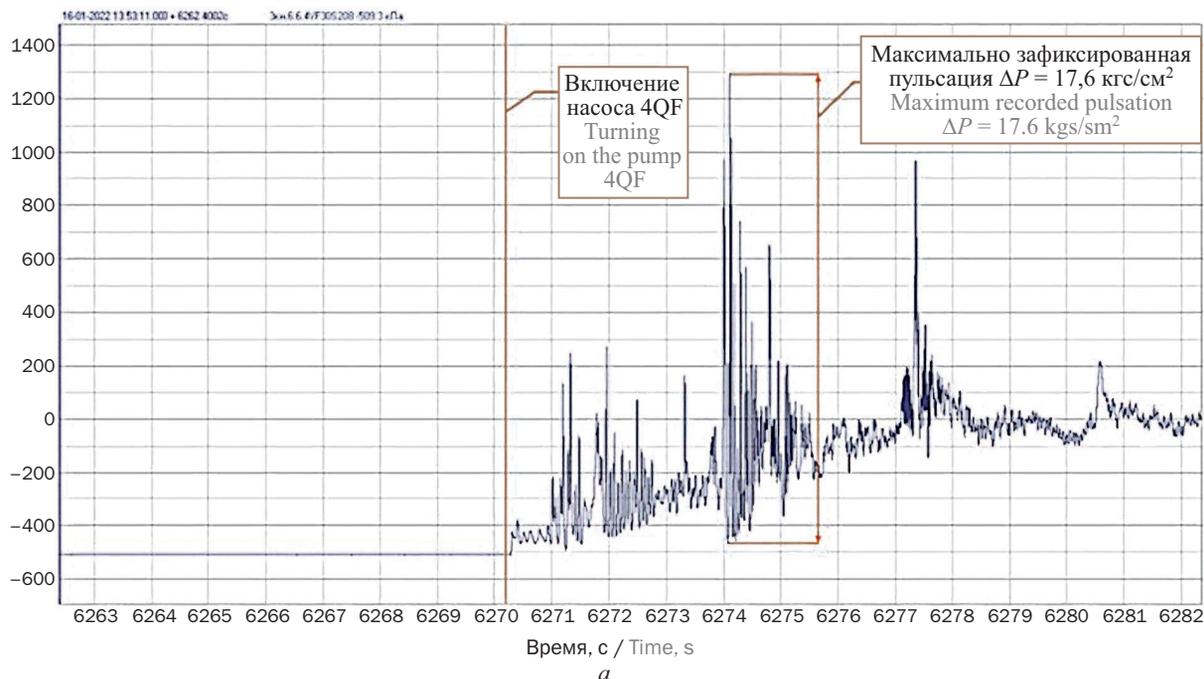
Также, согласно анализу графиков абсолютноного давления (рис. 2), количество измерений за период воздействия основной ударной волны (0,007 с),

произведенных комплексом мониторинга волновых процессов, составило 70 значений, что соответствует 10 000 измерений в секунду. Такая частота опроса подтверждает математическую модель скорости волны и полностью удовлетворяет требованиям для получения объективных данных при мониторинге волновых процессов.

Полученные результаты на Калининской АЭС показывают, что, согласно проведенным экспериментам с применением разработанного комплекса монито-

ринга волновых процессов, изменение давления в трубопроводной системе имеет высокочастотный характер, что соответствует природе волновых процессов.

Анализ результатов показал, что на энергоблоке № 4 Калининской АЭС в период переходного процесса режима эксплуатации, связанного с проведением автоматического ступенчатого пуска оборудования систем безопасности АЭС, наблюдается гидравлический удар, характеризующийся наличием пульсаций давления.



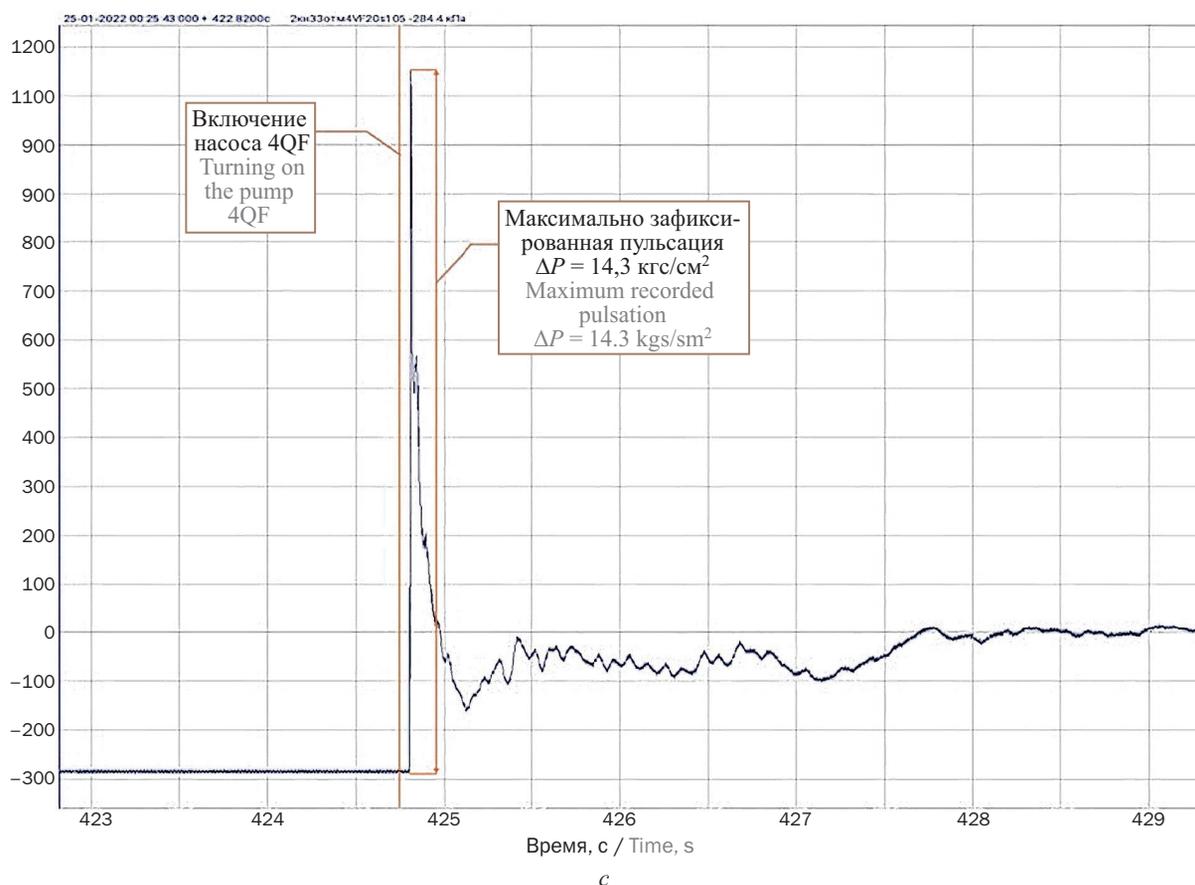


Рис. 4. Показания с датчика, расположенного на высотной отметке: *a* — 6,6 м; *b* — 19,34 м; *c* — 33,4 м

Fig. 4. Readings from a sensor located at an altitude of: *a* — 6.6 m; *b* — 19.34 m; *c* — 33.4 m

Однако сведения, полученные с разработанного комплекса, значительно отличаются от данных, полученных с приборов предприятия за счет своих уникальных параметров. На рис. 4 изображены тренды с разработанного комплекса, на котором зафиксирован пуск насоса, и они показывают наличие существенной пульсации давления в момент пуска насоса. Представленные результаты указывают на наличие волн давления, распространяющихся по трубопроводу со скоростью звука и превышающих данные с приборов предприятия.

Сравнительный анализ тренда от Калининской АЭС и графиков с разработанного комплекса мониторинга волновых процессов показывает, что применяемые, согласно требованиям существующей нормативной документации, средства мониторинга не удовлетворяют требованиям для получения объективных данных при мониторинге волновых процессов и не способны фиксировать в полном объеме изменение давления при переходных режимах.

Контроль за волновыми процессами не ведется по причине того, что средства мониторинга эти нагрузки не выявляют, в построении моделей технологических процессов информация о возникающих при эксплуатации гидродинамических нагрузках не используется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные в ходе эксперимента результаты показали, что для точного мониторинга и своевременного предотвращения аварий на трубопроводах, в системах мониторинга необходимо применять технологии, способные улавливать высокочастотные динамические процессы, в том числе волны давления при пульсациях и гидроударах, так как они могут значительно повысить эффективность работы трубопроводных систем, позволяя предсказывать возможные аварии и принимать меры до того, как они произойдут. Примером служит применение данного комплекса на технологическом трубопроводе Калининской АЭС, оснащенной средствами визуального контроля и непрерывного мониторинга в соответствии с требованиями нормативных и проектных документов. А также дальнейшее сравнение полученных результатов с данными от разработанного метода и комплекса, который обеспечил необходимые параметры мониторинга для получения полной картины изменения давления в трубопроводе и смог зафиксировать волновой процесс, который неминуемо привел бы к разрушению трубопроводной системы. Вовремя выявленные волны давления позволили своевременно принять корректирующие меры по недопущению негативного сценария.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ревин А.И., Лядов Е.В., Бузякова И.В. История зарождения вопросов гидравлики // Вестник евразийской науки. 2024. Т. 16. № 3. С. 45. EDN QWABDG.
2. Ревин А.И., Бузякова И.В. Обеспечение экологической безопасности путем оптимизации требований к мониторингу гидродинамических процессов в трубопроводе // Вестник евразийской науки. 2024. Т. 16. № 5. EDN VICGYI.
3. Вадулина Н.В., Ачивакова Л.Р., Салимов А.О., Абдрахманова К.Н., Абдуллин Р.С. Обеспечение безопасности при пневмоиспытании трубопровода // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2017. № 4. С. 109–124. EDN ZELQQR.
4. Сачков К.В., Гареев Ф.Р., Шагитов Р.Р., Абдуллин Л.Р., Абдуллин Р.С. Оценка опасности эксплуатации нефтезаводского оборудования на основе показателя риска // Нефтепромышленное дело. 2010. № 9. С. 54–57. EDN MVLADR.
5. Ледовский Г.Н., Самоленков С.В., Кабанов О.В. Эффективность систем защиты оборудования нефтеперекачивающих станций при повышенных волнах давления // Записки Горного института. 2013. Т. 206. С. 99–102. EDN SDBPHF.
6. Lusyannikov A.V., Agafonov E.D., Egorov A.V., Lusyannikova N.N., Shram V.G., Kovaleva M.A. Algorithm for non-parametric modeling of the cutting process of dense snow formations with snow plow blade // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1399. P. 044051. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/4/044051
7. Иконников О.А., Агафонов Е.Д., Познякова В.Ю. Задачи диагностики и регулирования режимов работы энергоблока ОАО «Красноярская ГРЭС-2», г. Зеленогорск // Системы управления и информационные технологии. 2020. № 4 (82). С. 76–80. DOI: 10.36622/VSTU.2020.13.14.018. EDN PEYYFX.
8. Валитова К.А., Шамсутдинова И.И. Технологии, применяемые при гидравлическом разрыве пласта // Научно-исследовательский центр «Technical Innovations». 2021. № 3. С. 44–49. EDN QWXXTZ.
9. Слабожанин Г.Д., Слабожанин Д.Г. История развития гидравлики // Polish Journal of Science. 2020. № 31–1 (31). С. 50–56. EDN CHPMQO.
10. Рахматуллин Ш.И., Гумеров А.Г., Верушин А.Ю. О влиянии параметров клапана-гасителя на величину гидроудара в нефтепроводе // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2009. № 2 (76). С. 76–78. EDN KYFOAB.
11. Шагиев Р.Г., Верушин А.Ю. Моделирование гидравлических ударов в трубопроводах морских нефтеотгрузочных терминалов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2009. № 3 (77). С. 34–41. EDN KYPDJD.
12. Сачков К.В., Абдуллин Р.С. Оценка вероятности реализации аварий в нефтегазовом комплексе. Уфа, 2010. 16 с.
13. Хасан М.А., Самсонова В.А., Хусниров М.Х. Определение факторов оценки соответствия предприятий нефтепродуктообеспечения требованиям промышленной безопасности // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2012. № 1. С. 214–220. EDN RLEUFR.
14. Цыпленков С.В., Агафонов Е.Д. Концепция комплексной системы контроля энергоэффективности механизированной добычи нефти // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23. № 4. С. 180–196. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-4-180-196. EDN UGXANT.
15. Капинос О.Г., Твардовская Н.В. Гидравлические удары в напорных трубопроводах при надземной прокладке // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2023. Т. 20. № 1. С. 79–90. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-79-90. EDN IFFTBU.
16. Kapinos O.G., Tvardovskaya N.V. Risks of hydraulic shocks in pressure pipelines during above-ground laying in permafrost conditions // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 460. P. 07026. DOI: 10.1051/e3sconf/202346007026
17. Gasenko V.G., Demidov G.V., Il'in V.P., Shmakov I.A. Simulation of wave processes in a vapor-liquid medium // Numerical Analysis and Applications. 2012. Vol. 5. Issue 3. Pp. 213–221. DOI: 10.1134/s1995423912030032
18. Ляшенко А.Л., Морева С.Л., Кабанов О.В., Ледовский Г.Н. Моделирование гидравлического удара в трубопроводах // Актуальные проблемы гидролитосферы (диагностика, прогноз, управление, оптимизация и автоматизация) : сб. докл. 2015. С. 632–640. EDN UJZDCZ.
19. Капинос О.Г., Твардовская Н.В. Учет разрывов сплошности потока при гидравлических ударах на этапе проектирования напорных трубопроводов из полимерных материалов // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2022. Т. 19. № 1. С. 116–126. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-19-1-116-126. EDN AWSMWP.
20. Chernikov N.A., Tvardovskaya N.V., Okhremenko I.M. Influence of financing water protection measures in the field of transport on water quality of water bodies // BRICS Transport. 2023. Vol. 2. Issue 2. Pp. 1–6. DOI: 10.46684/2023.2.2

Поступила в редакцию 10 марта 2025 г.

Принята в доработанном виде 21 марта 2025 г.

Одобрена для публикации 25 марта 2025 г.

О Б АВТОРАХ: Андрей Игоревич Ревин — аспирант; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; revin-ai@yandex.ru;

Инна Валерьевна Бузякова — кандидат географических наук, доцент, доцент кафедры инженерных изысканий и геоэкологии; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; buzyakova@mail.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Revin A.I., Lyadov E.V., Buzyakova I.V. History of hydraulic issues. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024; 16(3):45. EDN QWABDG. (rus.).
2. Revin A.I., Buzyakova I.V. Ensuring environmental safety by optimizing the requirements for monitoring hydrodynamic processes in the pipeline. *The Eurasian Scientific Journal*. 2024; 16(5). EDN VICGYI. (rus.).
3. Vadulina N.V., Achivakova L.R., Salimov A.O., Abdrakhmanova K.N., Abdullin R.S. Ensuring safety at pneumotest of the pipeline. *Oil and Gas Business*. 2017; 4:109-124. EDN ZELQQR. (rus.).
4. Sachkov K.V., Gareev F.F., Shagitov R.R., Abdullin L.R., Abdullin R.S. Assessment of danger of petroleum plant equipment operation on the basis of risk indicator. *Oilfield Engineering*. 2010; 9:54-57. EDN MVLADR. (rus.).
5. Ledovskiy G.N., Samolenkov S.V., Kabanov O.V. Effectiveness of protection systems for oil pumping station equipment at elevated pressure waves. *Journal of Mining Institute*. 2013; 206:99-102. EDN SDBPHF. (rus.).
6. Lysyannikov A.V., Agafonov E.D., Egorov A.V., Lysyannikova N.N., Shram V.G., Kovaleva M.A. Algorithm for non-parametric modeling of the cutting process of dense snow formations with snow plow blade. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; 1399:044051. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/4/044051
7. Ikonnikov O.A., Agafonov E.D., Poznyakova V.Yu. Problems of diagnostics and control of the power unit operating modes at JS “Krasnoyarskaya GRES-2”, Zelenogorsk. *Control Systems and Information Technologies*. 2020; 4(82):76-80. DOI: 10.36622/VSTU.2020.13.14.018. EDN PEYYFX. (rus.).
8. Valitova K.A., Shamsutdinova I.I. Technologies used in hydraulic fracturing. *Scientific Research Center “Technical Innovations”*. 2021; 3:44-49. EDN QWXXTZ. (rus.).
9. Slabozhanin G., Slabozhanin D. History of hydraulics development. *Polish Journal of Science*. 2020; 31-1(31):50-56. EDN CHPMQO. (rus.).
10. Rakhmatullin Sh.I., Gumerov A.G., Verushin A.Yu. Influence of damp valve parameters on the force of hydraulic impact in the oil pipeline. *Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*. 2009; 2(76):76-78. EDN KYFOAB. (rus.).
11. Shagiev R.G., Verushin A.Yu. Surge simulation in marine oil-loading terminal pipelines. *Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*. 2009; 3(77):34-41. EDN KYPDJD. (rus.).
12. Sachkov K.V., Abdullin P.C. *Assessment of the probability of accidents in the oil and gas complex*. Ufa, 2010; 16. (rus.).
13. Hasan M.A., Samsonova V.A., Khusniyarov M.Kh. The estimation factors definition of the conformity estimation of the petroleum product enterprises to the requirements of industrial safety. *Oil and Gas Business*. 2012; 1:214-220. EDN RLEUFR. (rus.).
14. Tsyplenkov S.V., Agafonov E.D. The concept of an integrated system of energy efficiency control of artificial oil lift. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2021; 23(4):180-196. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-4-180-196. EDN UGXANT. (rus.).
15. Kapinos O., Tvardovskaya N. Hydraulic hits in penstocks with above-ground laying. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2023; 20(1):79-90. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-1-79-90. EDN IFFTBU. (rus.).
16. Kapinos O.G., Tvardovskaya N.V. Risks of hydraulic shocks in pressure pipelines during aboveground laying in permafrost conditions. *E3S Web of Conferences*. 2023; 460:07026. DOI: 10.1051/e3s-conf/202346007026
17. Gasenko V.G., Demidov G.V., Il'in V.P., Shmakov I.A. Simulation of wave processes in a vapor-liquid medium. *Numerical Analysis and Applications*. 2012; 5(3):213-221. DOI: 10.1134/s1995423912030032
18. Lyashenko A.L., Moreva S.L., Kabanov O.V., Ledovskiy G.N. Simulation of hydraulic shock in pipelines. *Actual problems of the hydrolithosphere (diagnostics, forecast, management, optimization and automation) : collection of reports*. 2015; 632-640. EDN UJZDCZ. (rus.).
19. Kapinos O., Tvardovskaya N. Accounting for flow discontinuities while water hammers at engineering stage of pressure pipelines made of polymeric materials. *Proceedings of Petersburg Transport University*. 2022; 19(1):116-126. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-19-1-116-126. EDN AWSMWP. (rus.).
20. Chernikov N.A., Tvardovskaya N.V., Okhremenko I.M. Influence of financing water protection measures in the field of transport on water quality of water bodies. *BRICS Transport*. 2023; 2(2):1-6. DOI: 10.46684/2023.2.2

Received March 10, 2025.

Adopted in revised form on March 21, 2025.

Approved for publication on March 25, 2025.

BIONOTES: **Andrey I. Revin** — postgraduate student; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; revin-ai@yandex.ru;

Inna V. Buzyakova — Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Engineering Surveys and Geoecology; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; buzyakova@mail.ru.

Contribution of the authors: all the authors contributed to this article equivalently.

The authors declare that there is no conflict of interests.