

## АНАЛИЗ ФРОНТА ВОЛНЫ ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ УТЕЧКИ ЖИДКОСТИ В ТРУБОПРОВОДЕ

© Р. Р. Уликанов<sup>1\*</sup>, В. Н. Киреев<sup>2</sup>, Л. А. Ковалева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ООО «НИИ Транснефть»

Россия, 117186 г. Москва, Севастопольский проспект, 47а.

<sup>2</sup>Уфимский университет науки и технологий

Россия, Республика Башкортостан, 450076 г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.

\*Email: UlikanovRR@niitnn.transneft.ru

*Интерес исследователей к проблемам и задачам механики движения жидкостей в цилиндрических каналах обусловлен широким применением данных систем для решения вопросов транспорта жидких углеводородов, таких как бензин, дизельное топливо, нефть. В данной работе изучена закономерность изменения фронта волны давления, возникающего при возмущениях движущегося потока жидкости и распространяющегося в обе стороны трубопровода от источника его возникновения. Получено решение задачи, описан алгоритм использования полученных зависимостей по определению координаты источника возникновения возмущения в трубопроводе, оснащенного средствами измерения давления. Произведено опробование полученных результатов на математической модели магистрального трубопровода, расчетная погрешность определения координаты источника возмущения укладывается в 1.5% расстояния между датчиками давления.*

**Ключевые слова:** трубопровод, волна давления, утечка жидкости, жидкие углеводороды, математическое моделирование, параметрическая система обнаружения утечек.

### Введение

В настоящее время в области трубопроводного транспорта жидких углеводородов стоит проблема быстрого и достоверного определения наличия утечек жидкости, т.к. утечки могут приводить к значительным экономическим потерям.

С целью оперативного обнаружения утечек разработаны и внедрены системы обнаружения утечек (СОУ), базирующиеся на различных принципах механики движения жидкости в трубопроводе. Анализ различных методов приводится в работах [1–6]. Краткий обзор существующих СОУ представлен в работе [7–8]. Классификация систем и методов обнаружения утечек рассмотрена в работе [9] и нормативном документе [10].

Тенденция развития СОУ – использование комбинированных методов с дальнейшим построением открытой аналитической системы, способной совмещать множественные конкурирующие оценки утечек, полученные по частным диагностическим алгоритмам в режиме реального времени [11].

Данная работа посвящена разработке метода по определению местоположения источника возникновения возмущения в трубопроводе на основе явления затухания волны давления, распространяющейся в жидкой среде. Отечественными учеными наработан обширный теоретический материал по изучению движения волн давления в жидкости [12–16], при этом не все теоретические представления были применены для решения практических задач, так как уровень техники и технологий не позволял реализовать наработанный потенциал.

Предлагаемый подход позволяет по результатам анализа фронта волны давления идентифицировать причину, вызывающую данное возмущение, таким образом производить мониторинг состояния трубопроводов и идентифицировать такие события как: аварийные утечки, пуск/остановка насосных агрегатов, внезапное перекрытие потока, отбор продукта на нефтеперерабатывающие заводы, АЗС, нефтебазы и пр.

### Постановка задачи

Рассмотрим прямолинейный участок трубопровода длиной  $L$ , который оснащен тремя датчиками давления, установленными в точках с координатами  $x_i, i = 1, 2, 3$ , причем  $x_1 \leq x_2 \leq x_3$  и фиксирующими изменение давления в трубопроводе во времени  $P_i(t), i = 1, 2, 3$  (рис. 1).

Канал заполнен движущейся жидкой, изотропной, однородной, ньютоновской средой. В канале задана утечка жидкости в точке  $x^*$ , формирующая в момент возникновения утечки фронт волны пониженного давления – кривая, соединяющая точки  $a$  и  $b$ , где  $a$  – характерная точка начала фронта волны давления,  $b$  – характерная точка окончания фронта волны давления.

Волна давления, распространяющаяся от точки утечки  $x^*$  вдоль трубопровода в обе стороны, затухает по мере удаления от точки утечки. Пространственное изменение амплитуды волнового фронта давления  $\Delta P$  описывается следующей формулой [12]:

$$\Delta P(x) = \Delta P^* e^{-\gamma|x-x^*|}, \quad (1)$$

где  $\Delta P^*$  – амплитуда возмущения давления в точке утечки жидкости,  $\gamma$  – коэффициент затухания волны давления.

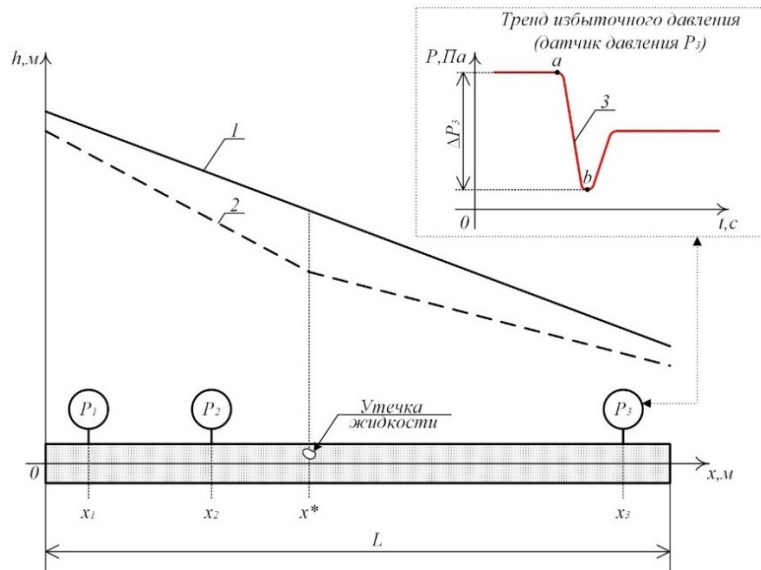


Рис. 1. Схема трубопровода с датчиками давления: линии гидравлического уклона, соответствующие стационарному режиму работы, до образования утечки (1), после образования утечки (2), изменение давления на манометре  $P_3$  в период образования утечки (3).

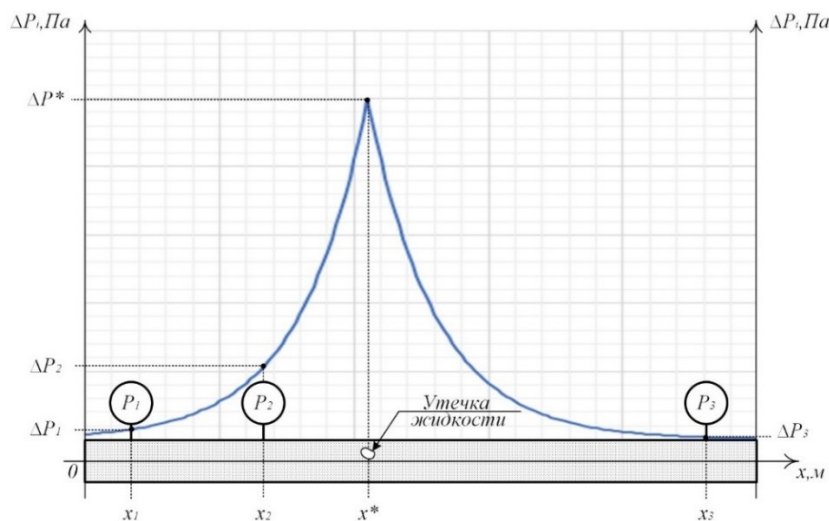


Рис. 2. Пространственное изменение амплитуды волнового фронта давления.

На рис. 2 показан график функции (1), точка излома с координатами  $(x^*; \Delta P^*)$  соответствует месту возникновения утечки, причем  $\Delta P^* \geq \Delta P(x)$  на интервале  $x^* \in [0; L]$ , что позволит однозначно идентифицировать местоположение утечки или местоположение иного другого возмущения давления в жидкости.

При решении практических задач переменные  $\Delta P^*, \gamma, x^*$  в уравнении (1) неизвестны. Для нахождения этих величин необходимо составить систему уравнений, позволяющую однозначно получить решение для  $x^*$  в данной постановке, при наличии трех датчиков давления, имеющую следующий вид:

$$\Delta P_i = \Delta P^* e^{-\gamma|x_i - x^*|}, i = 1, 2, 3, \quad (2)$$

где  $\Delta P_i$  – амплитуда возмущения давления на  $i$ -м датчике давления.

В табл. приведены решения системы уравнений (2) для возможных вариантов расположения утечки жидкости относительно местоположения датчиков давления.

Для исключения неопределенности при возникновении вариантов  $x^* \leq x_1 < x_2 < x_3$  и  $x_1 < x_2 < x_3 \leq x^*$  необходимо размещать датчики давления в начальном и конечном сечениях контролируемого участка трубопровода. В настоящее время подавляющее большинство участков магистральных трубопроводов уже оснащено тремя и более датчиками давления, при этом два из них, зачастую, расположены по концам контролируемого участка.

Решение системы уравнений		
№ п/п	Уравнение	Решение
1	Условие: $x^* \in [0; L]$ $x^* \leq x_1 < x_2 < x_3$ $\Delta P^* \geq \Delta P_1 > \Delta P_2 > \Delta P_3$ Система уравнений: $\begin{cases} \Delta P_1 = \Delta P^* e^{-\gamma(x_1-x^*)} \\ \Delta P_2 = \Delta P^* e^{-\gamma(x_2-x^*)} \\ \Delta P_3 = \Delta P^* e^{-\gamma(x_3-x^*)} \end{cases}$	$\begin{cases} \gamma = \frac{\ln \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2}}{x_2 - x_1}, \\ x^* \in [0; x_1], \\ \Delta P^* \in \left[ \Delta P_1; \frac{\Delta P_1}{e^{-\gamma x_1}} \right]. \end{cases}$
2	Условие: $x^* \in [0; L]$ $x_1 \leq x^* \leq x_2 < x_3$ Возможные комбинации: $\Delta P^* \geq \Delta P_2 > \Delta P_3 > \Delta P_1$ $\Delta P^* \geq \Delta P_2 > \Delta P_1 > \Delta P_3$ $\Delta P^* \geq \Delta P_1 > \Delta P_2 > \Delta P_3$ Система уравнений: $\begin{cases} \Delta P_1 = \Delta P^* e^{\gamma(x_1-x^*)} \\ \Delta P_2 = \Delta P^* e^{-\gamma(x_2-x^*)} \\ \Delta P_3 = \Delta P^* e^{-\gamma(x_3-x^*)} \end{cases}$	$\begin{cases} \gamma = \frac{\ln \frac{\Delta P_3}{\Delta P_2}}{x_2 - x_3}, \\ x^* = 0,5 \left( x_1 + x_3 - (x_3 - x_2) \frac{\ln \Delta P_1 - \ln \Delta P_3}{\ln \Delta P_2 - \ln \Delta P_3} \right), \\ \Delta P^* = \frac{\Delta P_3}{e^{-\gamma(x_3-x^*)}}. \end{cases}$
3	Условие: $x^* \in [0; L]$ $x_1 < x_2 \leq x^* \leq x_3$ Возможные комбинации: $\Delta P^* \geq \Delta P_2 > \Delta P_1 > \Delta P_3$ $\Delta P^* \geq \Delta P_2 > \Delta P_3 > \Delta P_1$ $\Delta P^* \geq \Delta P_3 > \Delta P_2 > \Delta P_1$ Система уравнений: $\begin{cases} \Delta P_1 = \Delta P^* e^{\gamma(x_1-x^*)} \\ \Delta P_2 = \Delta P^* e^{\gamma(x_2-x^*)} \\ \Delta P_3 = \Delta P^* e^{-\gamma(x_3-x^*)} \end{cases}$	$\begin{cases} \gamma = \frac{\ln \frac{\Delta P_2}{\Delta P_1}}{x_2 - x_1}, \\ x^* = 0,5 \left( x_1 + x_3 + (x_2 - x_1) \frac{\ln \Delta P_3 - \ln \Delta P_1}{\ln \Delta P_2 - \ln \Delta P_1} \right), \\ \Delta P^* = \frac{\Delta P_1}{e^{\gamma(x_1-x^*)}}. \end{cases}$
4	Условие: $x^* \in [0; L]$ $x_1 < x_2 < x_3 \leq x^*$ $\Delta P^* \geq \Delta P_3 < \Delta P_2 < \Delta P_1$ Система уравнений: $\begin{cases} \Delta P_1 = \Delta P^* e^{\gamma(x_1-x^*)} \\ \Delta P_2 = \Delta P^* e^{\gamma(x_2-x^*)} \\ \Delta P_3 = \Delta P^* e^{\gamma(x_3-x^*)} \end{cases}$	$\begin{cases} \gamma = \frac{\ln \frac{\Delta P_1}{\Delta P_2}}{x_1 - x_2}, \\ x^* \in [x_3; L], \\ \Delta P^* \in \left[ \Delta P_3; \frac{\Delta P_3}{e^{\gamma(x_3-L)}} \right]. \end{cases}$

В общем случае алгоритм определения источника возмущения следующий:

- 1) определяем амплитуду давления  $\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3$  по показаниям датчиков;
- 2) путем сравнения полученных значений  $\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_3$  между собой определяем вариант расположения возмущения относительно местоположения датчиков давления. В случае выполнения условий, приведенных в (табл.) более чем для одного расположения возмущения, проверяется каждое;
- 3) исходя из полученного варианта/вариантов расположения возмущения определяем местоположение возмущения  $x^*$  по зависимостям (табл.).

В настоящее время магистральные трубопроводы оснащены более чем тремя датчиками давле-

ния, для получения более точного результата координаты источника возникновения возмущения целесообразно составлять несколько систем уравнений для разных наборов датчиков. Далее, используя методы математического анализа, определять координату.

#### Результаты численного моделирования

Для валидации полученных зависимостей было проведено моделирование нестационарного процесса движения волны давления по трубопроводу в программном комплексе (ПК) Cassandra [17], который позволяет рассчитывать математические модели гидравлических трубопроводных систем различной топологии.

В качестве примера рассмотрим магистральный трубопровод, осуществляющий перекачку дизельного топлива, диаметром 500 мм и длиной 373 км, с одной головной и двумя промежуточными насосными станциями. При моделировании в ПК Cassandra волна возмущения задавалась на расстоянии 130 км от начала трубопровода путем пуска насосного агрегата промежуточной насосной станции.

Для определения местоположения утечки с помощью предложенного алгоритма предположим,

что рассматриваемый участок трубопровода оснащен тремя датчиками давления, передающими значение  $P_i(t)$  два раза в секунду: первый датчик давления расположен в начале трубопровода ( $x_1 = 0$ ), третий датчик давления – в конце трубопровода ( $x_3 = 373$  км), для второго датчика давления рассмотрим два возможных положения  $x_2 = 173$  км (справа от источника возмущения) и  $x_2 = 95$  км (слева от источника возмущения).

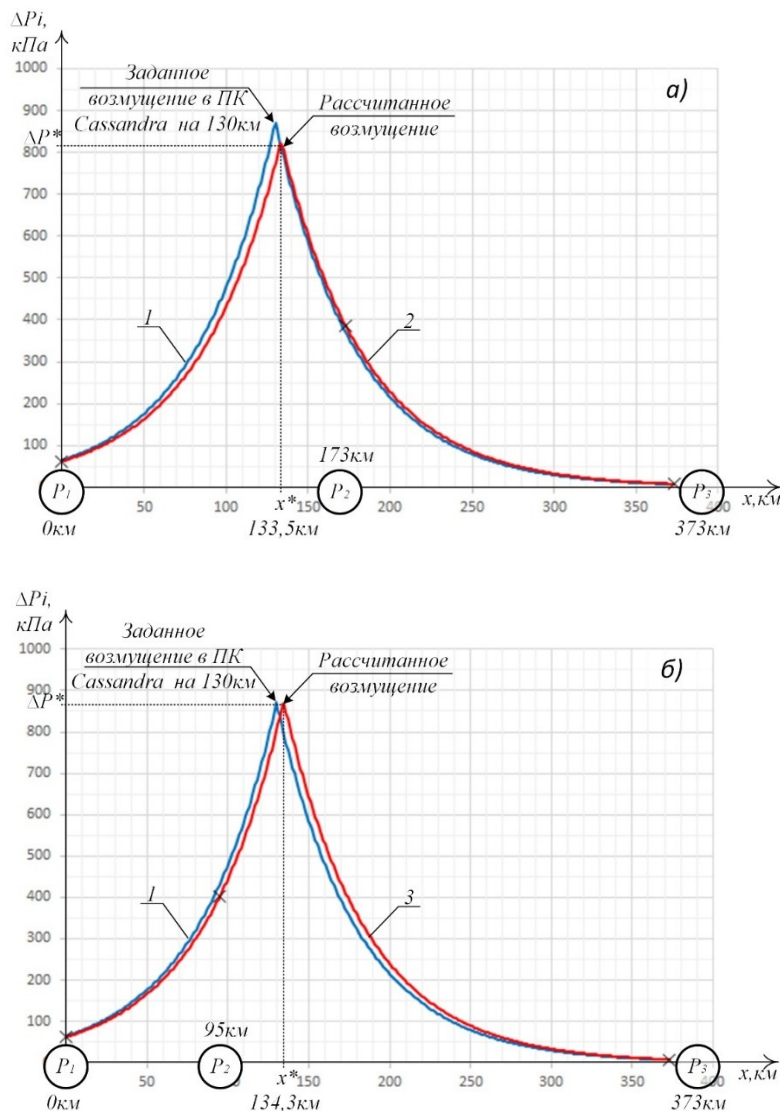


Рис. 3. Изменение амплитуды возмущения/волны давления вдоль трубопровода, полученное по результатам моделирования в ПК Cassandra (линия 1), по зависимостям, приведенным в табл. (линия 2–3). Возмущение расположено между первым и вторым (а) или вторым и третьим (б) датчиками давления.

Сравнение зависимостей изменения амплитуды возмущения давления  $\Delta P(x)$  по длине трубопровода, полученных по результатам моделирования в ПК Cassandra и в соответствии с предложенным в настоящей работе алгоритмом, показано на рис. 3.

Непосредственным результатом моделирования в ПК Cassandra являются временные зависимости давления в различных точках по длине трубопровода. Полученные зависимости были обработаны в программе MS Excel, определены соответствующие амплитуды возмущения  $\Delta P_i$  линия 1 на рис. 3.

Линии 2–3 *рис. 3* построены по показаниям смоделированных (виртуальных) датчиков давления для двух случаев расположения возмущения: (а) расположено между первым и вторым и (б) вторым и третьим датчиками давления.

На *рис. 3* показано удовлетворительное совпадение моделируемых результатов ПК Cassandra и расчетных значений  $\Delta P_i$ , полученных при обработке трендов давления, взятых с трех датчиков давления, расчетная погрешность определения координаты источника возмущения укладывается в 1.5% расстояния между датчиками давления.

### Заключение

Разработан алгоритм определения местоположения источника возмущения, позволяющий определить местоположение утечки жидкости из трубопровода. Показано, что анализ распространения фронта волны давления в цилиндрическом канале позволяет достаточно точно определить координату источника возмущения. Получены аналитические зависимости по определению местоположения и амплитуды источника возмущения при условии оснащения трубопровода датчиками давления. Установлено, что для однозначной идентификации местоположения источника возмущения минимально необходимое количество датчиков давления равно трем. Сравнение результатов, полученных при моделировании в специализированном программном обеспечении (ПК Cassandra), и расчетных данных по предложенному алгоритму показало, что расчетная погрешность определения координаты источника возмущения укладывается в 1.5% расстояния между датчиками давления.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бондарь Д. В., Жолобов В. В., Надежкин О. С. Метод определения параметров утечек в трубопроводах на основе гидродинамических моделей // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2021. Т. 11. №5. С. 515–527.
2. Гольянов А. А. Анализ методов обнаружения утечек на нефтепроводах // Транспорт и хранение нефтепродуктов. 2002. №10. С. 5–14.
3. Кумар Б. К. Обзор традиционных методов обнаружения утечек нефти в трубопроводах // Вестник Казахской национальной академии естественных наук. 2011. №4. С. 9–12.
4. Низамутдинов Р. И., Проскуряков Р. М. Анализ современных отечественных и зарубежных методов обнаружения утечек на нефтепроводах // Естественные и технические науки. 2015. №12. С. 128–130.
5. Абдрахманов Н. Х., Галлямов М. А., Саляхутдинов В. В., Худайбердин Р. Р., Абдрахманова К. Н., Басырова А. Р. Анализ систем обнаружения утечек на магистральных нефтепродуктопроводах // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2017. №3. С. 154–164.
6. Султанов Р. Г., Ишмуратов Т. А., Каримов Л. З., Надршин А. С., Летунов И. А., Галеева А. Д. О некоторых вопросах диагностики состояния трубопроводов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2016. №2. С. 140–150.
7. Кораблев Е. Н., Ягудина Л. В., Влацкая И. В., Клейменов А. В. Современные методы и автоматизированные системы предупреждения и обнаружения незаконных врезок в продуктопроводы // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2012. №1. С. 88–95.
8. Мишкин Г. Б. Краткий обзор систем обнаружения утечек российских производителей // Молодой ученый. 2011. №2. Т. 1. С. 41–47.
9. Мишкин Г. Б. Классификация систем обнаружения утечек на магистральных трубопроводах нефти, газа и нефтепродуктов // Молодой ученый. 2010. Т. 1. №11. С. 56–58.
10. Computational Pipeline Monitoring for Liquids // API Recommended Practice 1130. 2012.
11. Кутуков С. Е. Проблема повышения чувствительности, надежности и быстродействия систем обнаружения утечек в трубопроводах // Нефтегазовое дело. 2004. №2. С. 29–45.
12. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: учеб. пос. для вузов. В 10-ти т. Т. VI. Гидродинамика. 5-е изд., стереот. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001.
13. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа: учеб. для вузов. 7 изд., испр. М.: Дрофа, 2003.
14. Седов Л. И. Механика сплошной среды. Т. 1. М.: Наука, 1994.
15. Шагапов В. Ш., Галиакбарова Э. В., Хакимова З. Р. К теории акустического сканирования поврежденных подземных трубопроводов // Акустический журнал. 2021. Т. 67. №6. С. 583–594.
16. Султанов А. Ш., Шагапов В. Ш. К акустической теории взаимодействия ударной волны, имеющей экспоненциальную зону релаксации, с пористой средой // Прикладная математика и механика. 2008. Т. 72. №6. С. 942–950.
17. Математическая модель «Cassandra». URL: <http://www.energyavtomatika.ru/index.php/ru/menu-model/menu-cassandra> (дата обращения: 18.01.2023).

Поступила в редакцию 31.01.2023 г.

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2023.1.1

**PRESSURE WAVE FRONT ANALYSIS  
TO LOCATE A LEAK OF LIQUID IN A PIPELINE**© **R. R. Ulikanov<sup>1\*</sup>, V. N. Kireev<sup>2</sup>, L. A. Kovaleva<sup>2</sup>**<sup>1</sup>*Transneft R&D**47A Sevastopolsky Avenue, 117186 Moscow, Russia.*<sup>2</sup>*Ufa University of Science and Technology**32 Zaki Validi Street, 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.**\*Email: ulikanovrr@niitnn.transneft.ru*

The interest of researchers in the problems of the mechanics of the movement of fluids in cylindrical channels is due to the widespread use of these systems for solving the problems of transporting liquid hydrocarbons, such as gasoline, diesel fuel, and oil. In this paper, we have studied the regularity of the change in the front of the pressure wave that occurs when a moving fluid flow is disturbed and propagates in both directions of the pipeline from the source of its occurrence. A solution to the problem is obtained, an algorithm is described for using the obtained dependences to determine the coordinates of the source of disturbance in a pipeline equipped with pressure measuring instruments. The obtained results were tested on a mathematical model of the main pipeline, the estimated error in determining the coordinates of the disturbance source fits into 1.5% of the distance between the pressure sensors.

**Keywords:** pipeline, pressure wave, liquid leakage, liquid hydrocarbons, mathematical modeling, parametric leak detection system.

Published in Russian. Do not hesitate to contact us at [bulletin\\_bsu@mail.ru](mailto:bulletin_bsu@mail.ru) if you need translation of the article.

1. Bondar' D. V., Zholobov V. V., Nadezhkin O. S. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefi i nefteproduktov*. 2021. Vol. 11. No. 5. Pp. 515–527.
2. Gol'yanov A. A. *Transport i khranenie nefteproduktov*. 2002. No. 10. Pp. 5–14.
3. Kumar B. K. *Vestnik Kazakhstan'noi natsional'noi akademii estestvennykh nauk*. 2011. No. 4. Pp. 9–12.
4. Nizamutdinov R. I., Proskuryakov R. M. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki*. 2015. No. 12. Pp. 128–130.
5. Abdrakhmanov N. Kh., Gallyamov M. A. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov*. 2017. No. 3. Pp. 154–164.
6. Sultanov R. G., Ishmuratov T. A., Karimov L. Z., Nadrshin A. S., Letunov I. A., Galeeva A. D. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov*. 2016. No. 2. Pp. 140–150.
7. Korablev E. N., Yagudina L. V., Vlatskaya I. V., Kleimenov A. V. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefi i nefteproduktov*. 2012. No. 1. Pp. 88–95.
8. Mishkin G. B. *Molodoi uchenyi*. 2011. No. 2. Vol. 1. Pp. 41–47.
9. Mishkin G. B. *Molodoi uchenyi*. 2010. Vol. 1. No. 11. Pp. 56–58.
10. *Computational Pipeline Monitoring for Liquids*. API Recommended Practice 1130. 2012.
11. Kutukov S. E. *Neftegazovoe delo*. 2004. No. 2. Pp. 29–45.
12. Landau L. D., Lifshits E. M. *Teoreticheskaya fizika: ucheb. pos. dlya vuzov. V 10-ti t. T. VI. Gidrodinamika [Theoretical physics: textbook for universities. In 10 volumes. Vol. 6. Hydrodynamics]*. 5-e izd., stereot. Moscow: FIZMATLIT, 2001.
13. Loitsyanskii L. G. *Mekhanika zhidkosti i gaza: ucheb. dlya vuzov [Mechanics of liquid and gas: textbook for universities]*. 7 izd., ispr. Moscow: Drofa, 2003.
14. Sedov L. I. *Mekhanika sploshnoi sredy. Vol. 1 [Continuum mechanics. Vol. 1]*. Moscow: Nauka, 1994.
15. Shagapov V. Sh., Galiakbarova E. V., Khakimova Z. R. *Akusticheskii zhurnal*. 2021. Vol. 67. No. 6. Pp. 583–594.
16. Sultanov A. Sh., Shagapov V. Sh. *Prikladnaya matematika i mekhanika*. 2008. Vol. 72. No. 6. Pp. 942–950.
17. *Matematicheskaya model' "Cassandra"*. URL: <http://www.energoavtomatika.ru/index.php/ru/menu-model/menu-cassandra> (data obrashcheniya: 18.01.2023).

*Received 31.01.2023.*