

УДК 621.644.8
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4325
Шифр специальности ВАК: 2.8.5

Методика определения местоположения утечек и несанкционированных врезок на нефтепроводах

А.А. Дульченко^{1✉}, Р.А. Шестаков¹, Ю.С. Матвеева²

¹ Российский государственный университет нефти и газа
(национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Россия, г. Москва
² Университет дистанционного обучения в Хагене, Германия, г. Хаген

✉ dulchenko.anna@yandex.ru

Аннотация. Актуальность. Трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов является одним из наиболее эффективных и экономически выгодных видов транспорта в современном мире. Несмотря на это, данный вид транспорта может быть экологически опасен в случае возникновения утечек, вызванных, например, коррозией, нарушением правил эксплуатации, несанкционированными врезками. Неоперативные локализация и ликвидация утечек и несанкционированных отборов зачастую являются не только причиной значительных финансовых потерь, но и аварий и загрязнения местности разной степени тяжести и масштаба. В наши дни вопрос определения произошедшей утечки и ее местоположения за минимальное время остается открытым. В связи с этим разработка новых и совершенствование существующих методов обнаружения утечек и врезок в трубопроводы является актуальной задачей в наши дни. **Цель:** исследование влияния сдвига полного напора, происходящего при учете изменения мощности насосных агрегатов вследствие утечки продукта, на точность локализации утечки или несанкционированной врезки, а также усовершенствование существующих методов определения координаты утечки при помощи учета изменения напора, развиваемого нефтеперекачивающей станцией. **Методы:** моделирование возникновения утечки или несанкционированной врезки с различным процентом потерь продукта, построение линий гидравлического уклона с утечками различной интенсивности в различных координатах, сравнительный анализ результатов, полученных при рассмотрении существующих методик и методики, предложенной авторами. **Результаты.** Смоделированы утечки в различных координатах, и определена возможность работы предложенного метода поиска координаты утечек, также рассчитаны погрешности при определении места утечки или врезки, зависящие от перепадов мощности насосов при истечении продукта из нефтепровода. Предложена формула локализации утечек или врезок, учитывающая изменение мощности насосных агрегатов и, как следствие, полного напора.

Ключевые слова: нефть, трубопровод, нефтепровод, утечка, локализация, несанкционированная врезка, численное моделирование, определение координаты, потери при транспортировке

Для цитирования: Дульченко А.А., Шестаков Р.А., Матвеева Ю.С. Методика определения местоположения утечек и несанкционированных врезок на нефтепроводах // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 6. – С. 26–36. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4325

UDC 621.644.8
DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4325

Methodology for location of leakages and unauthorized tie-ins on oil pipelines

A.A. Dulchenko^{1✉}, R.A. Shestakov¹, Yu.S. Matveeva²

¹ National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, Russian Federation
² FernUniversität in Hagen, Hagen, Germany

✉ dulchenko.anna@yandex.ru

Abstract. Relevance. Pipeline transportation of oil and oil products is one of the most efficient and cost-effective modes of transport in the modern world. Despite this, this type of transport can also be environmentally hazardous in case of leakages caused, for example, by corrosion, violation of operating rules, unauthorized tie-ins. Non-operational localization and liquidation of leakages and unauthorized tie-ins is often not only the cause of significant financial losses, but also accidents and pollution of the area of varying severity and scale. Nowadays, the issue of determining the leakage that has occurred and its location in the shortest possible time remains open. In this regard, the development of new and improvement of existing methods for detecting leakages and tie-ins in pipelines is an urgent task today. **Aim.** To study the effect of the total head shift, which occurs when taking into account the change in the power of pumping units due to product leakage, on the accuracy of determining the localization of leakage or unauthorized tie-in; to improve the existing methods for determining the leakage coordinate taking into account the change in the total head developed by the oil pumping station. **Methods.** Modeling the occurrence of a leakage or unauthorized tie-in with a different percentage of product losses, constructing hydraulic slope lines with leakages of varying intensity in different coordinates, a comparative analysis of the results obtained from the considered existing methods and those proposed by the authors. **Results.** The authors have modeled the leakages in various coordinates and determined the possibility of the proposed method operation for finding the coordinates of leakages. They calculated as well the errors in determining the location of the tie-in or leakage, depending on the pump power drops when the product flows out of the oil pipeline. The paper introduces the formula for the localization of leakages or tie-ins, considering the change in the power of pumping units and, as a result, the total head.

Keywords: oil, pipeline, oil pipeline, leakage, localization, unauthorized tie-in, numerical modeling, coordinate determination, transportation losses

For citation: Shestakov R.A., Dulchenko A.A., Matveeva Yu.S. Methodology for location of leakages and unauthorized tie-ins on oil pipelines. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 6, pp. 26–36. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4325

Введение

При множестве известных способов локализации утечек и несанкционированных врезок (УНВ) найти их оперативно и точно не всегда удастся, несмотря на автоматизацию работ и модернизацию методов и устройств поиска УНВ [1–3]. Определение факта их наличия также затруднительно и зачастую зависит от квалификации врезки и процента отбора. Несмотря на существование формул определения координаты УНВ [4–6], в реальных ситуациях они дают существенную погрешность: начиная с сотен метров, заканчивая десятками километров [7, 8].

Одной из причин может служить отсутствие учета так называемого «сдвига» полного напора в начальной координате – на нефтеперекачивающей станции (НПС) [9, 10]. При откачке продукта из нефтепровода происходит изменение мощности всей НПС из-за изменения расхода продукта на участке трубопровода, и по этой же причине меняется полный напор транспортируемого продукта на выходе из НПС. Таким образом, происходит увеличение перепада напоров, связанного с УНВ, а полный напор НПС уменьшается [11–14].

В [15] рассматривается возможность локализации УНВ при учете перепада мощностей на насосной станции. При известных, снятых параметрах давления и мощности происходит пересчет расходного коэффициента и дальнейшее сравнение с требуемым значением расхода [16, 17]. Далее определяется время, за которое продукт проходит от одной НПС до последующей. В случае неравенства расходов подается сигнал на датчики измерения времени для их остановки. По зафиксированному времени происходит расчет координаты УНВ.

Рассмотрим, влияет ли данное уменьшение полного напора, связанное с откачкой продукта, на точность определения места врезки. При известных параметрах в начале и конце участка построим линии гидравлического уклона. Известно, что при наличии утечки или несанкционированной врезки происходит искажение линии, в самой координате УНВ наблюдается максимальный перепад напоров между «эталонном» без врезки и искаженной линией гидравлического уклона. Возникает предположение, что, если провести согласно начальным и конечным данным две линии гидравлического уклона, точка их пересечения будет соответствовать координате местоположения УНВ.

Материалы и методы исследования Метод гидравлической локации УНВ

Приведем методику расчета, принимая известными значениями в ней значения расходов [18–21] и давлений в начальной и конечной координатах участка с учетом изменения расхода и давления из-за совершенного несанкционированного отбора или возникшей утечки [22–24]. В таком случае рассчитаем полные напоры в начальной и конечной координатах, учитывая и не учитывая влияние изменения развиваемого насосными агрегатами напора из-за изменения подачи транспортируемой жидкости.

Расчет полного напора в начальной координате производим, используя формулу (1) [25]:

$$H_n = H_{\text{диф}} + z + \frac{v^2}{2g} + h_n, \quad (1)$$

где $H_{\text{диф}}$ – напор, развиваемый работающими насосами, м; z – высотная отметка, м; v – скорость потока, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; $h_{\text{п}}$ – подпор, м.

Зная, что на насосной станции работают три насосных агрегата, определим напор, развиваемый насосами, по формуле (2) [26]:

$$H_{\text{диф}} = n(a - bQ^2), \quad (2)$$

где a – коэффициент аппроксимации, м; b – коэффициент аппроксимации, м/(м³/ч)²; n – количество работающих насосов; Q – объемный расход нефти, м³/ч.

Определение коэффициентов a и b осуществляется согласно методике, описанной в [26]. В работе коэффициенты a и b принимают значение 285 м и $0,644 \cdot 10^{-5}$ м/(м³/ч)².

Расчет полного напора в конечной координате производим, используя формулу (3) [26]:

$$H_{\text{к}} = z_{\text{к}} + 1,02i(L - x) \cdot 10^3, \quad (3)$$

где $z_{\text{к}}$ – высотная отметка в конце участка, м; L – длина участка нефтепровода, км; x – соответствующая координата, км; i – гидравлический уклон.

Гидравлический уклон определяется по формуле (4) [26]:

$$i = \frac{\lambda v^2}{d 2g}, \quad (4)$$

где λ – коэффициент гидравлического сопротивления; d – диаметр трубопровода, м; v – скорость течения жидкости, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с².

Коэффициент гидравлического сопротивления λ определяется в зависимости от режима течения жидкости в трубопроводе, расчет которого проводится в соответствии с ГОСТ 34563-2019 «Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов» или [26]. В связи с тем, что в дальнейших расчетах коэффициент гидравлического сопротивления используется в формуле определения гидравлического уклона i , при любом значении λ расчет будет справедлив.

Скорость течения жидкости рассчитывается по формуле (5) [26]:

$$v = \frac{4Q}{\pi d^2}, \quad (5)$$

где Q – объемный расход нефти, м³/с; d – диаметр нефтепровода, м.

Также принимаем во внимание, что при изменении развиваемого насосными агрегатами напора учитывается уже возросшее значение расхода транспортируемой жидкости на участке до УНВ и, как следствие, полезной мощности, что в совокупности приведет к уменьшению полного напора на выходе из НПС при установлении стационарных условий [27–29].

Определение погрешности

Построим линии гидравлического уклона (ЛГУ) (рис. 1, 2). Первая ЛГУ не учитывает влияние насоса. Второе построение будет основано на учете снижения полного напора, то есть между начальной точкой «эталонной» линии и начальной точкой уклона с врезкой и откачкой будет определенное расстояние. Рассмотрим случай при количестве отбора равном 5 %.

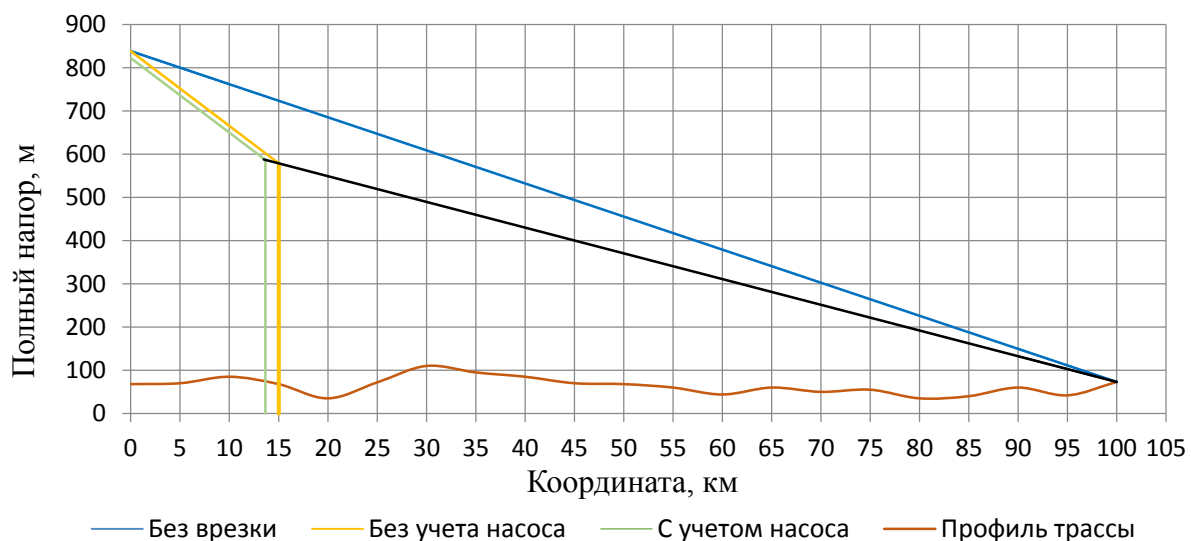


Рис. 1. Определение координаты врезки, совершенной на 15 км, при откачке 5 %
 Fig. 1. Determining the coordinates of a tie-in made at 15 km, with pumping of 5 %

Как видно из рис. 1, линии, проведенные согласно данным в начале участка (с учетом и без учета насоса между двумя НПС), пересекаются с линией, проведенной согласно конечным данным, в разных точках. Найдя координаты точек пересечения, сведем результаты в таблицу и проанализируем отклонения от реальной координаты врезки.

Анализируя таблицу, можно сделать вывод о том, что, если не учитывать изменение полного напора, погрешность локализации утечки довольно небольшая и в данном случае составляет 20 м. Однако в случае с учетом влияния насоса на гидравлическую систему погрешность возрастает уже до 1,14 км. Оперативно найти УНВ с погрешностью 1,14 км гораздо сложнее.

Рассмотрим также варианты, предполагая, что врезки произошли в других координатах – на 30, 40, 70, 80 и 85 км. Полученные данные также сведены в таблицу.

Таким образом, можно заметить, что, если не учитывать изменение напора, данный способ локализации врезки дает отклонение до 70 м, а в координатах 40, 70 и 80 км погрешность и вовсе равна нулю. В то же время при учете «сдвига» напора в начальной точке максимальная погрешность достигает 8,8 %, что составляет 2,64 км.

Рассмотрим случаи, если процент откачки составляет соответственно 2, 3 и 4 %. Из данных, представленных в таблице, видно, что при уменьшении процента откачки погрешность локализации увеличивается. Особенно хорошо это заметно в случае наличия «сдвига» полного напора. Более подробно рассмотрим вариант с УНВ 1 % (рис. 2) и результаты при данном проценте утечки также в таблице.

Таблица. Сравнение результатов локализации с учетом и без учета насоса

Table. Comparison of the results of localization with and without pumps

Координата, км Coordinate, km	Процент утечки, % Percentage of leakage, %	Без учета насоса, км Without pump, km	Погрешность, % Error, %	С учетом насоса, км With pump, km	Погрешность, % Error, %
15	5	15,02	0,13	13,86	7,60
15	4	14,98	0,13	13,44	10,40
15	3	14,99	0,07	13,11	12,60
15	2	15,68	4,55	12,82	14,53
15	1	15,07	0,47	12,25	18,33
30	5	29,93	0,23	27,36	8,80
30	4	29,94	0,20	26,91	10,30
30	3	30,02	0,07	26,34	12,20
30	2	29,87	0,43	25,69	14,37
30	1	29,86	0,47	24,34	18,87
40	5	40,00	0,00	36,98	7,55
40	4	39,95	0,12	35,99	10,03
40	3	39,94	0,15	35,19	12,03
40	2	40,00	0,00	34,58	13,55
40	1	39,91	0,23	32,7	18,25
70	5	70,00	0,00	66,76	4,63
70	4	70,04	0,06	63,25	9,64
70	3	69,86	0,20	62,78	10,31
70	2	70,00	0,00	61,82	11,69
70	1	70,90	1,28	58,75	16,07
80	5	80,00	0,00	76,22	4,73
80	4	79,92	0,10	73,28	8,40
80	3	80,00	0,00	72,45	9,44
80	2	80,11	0,14	70,98	11,28
80	1	79,86	0,18	68,51	14,36
85	5	84,95	0,06	79,53	6,44
85	4	85,04	0,05	78,96	7,11
85	3	84,89	0,13	77,65	8,65
85	2	85,13	0,15	78,35	7,82
85	1	84,86	0,16	74,05	12,88

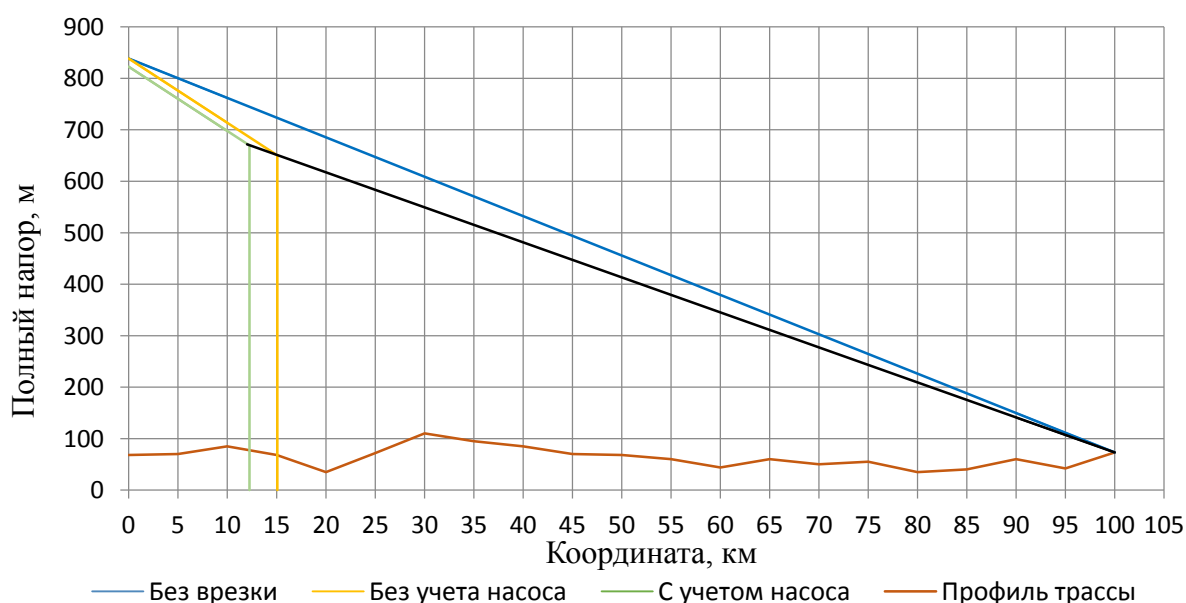


Рис. 2. Определение координаты врезки, совершенной на 15 км, при откачке 1 %
Fig. 2. Determining the coordinates of a tie-in made at 15 km, with pumping of 1%

В приведенной таблице видно, что при откачке в 1 % даже без учета насоса, расположенного между двумя НПС и совершающего откачку, погрешность измерений очень велика. Ни в одном из приведенных на рис. 2 графиков линии не пересеклись в требуемых точках 15, 30, 40, 70, 80 и 85 км. Максимальная погрешность здесь составила 1,28 %, то есть 900 м. В случае учета насоса максимальное отклонение – 10,95 км. Причем чем ближе к концу участка, тем больше в километрах отличие от реального местоположения врезки.

Представим в виде диаграммы зависимость погрешности в определении координаты от процента утечки, а также от координаты, в которой она произошла. Как следует из анализа диаграммы на рис. 3, погрешность в данном методе довольно хаотична и ее максимумы, если рассматривать зависимость от координаты, возникают при различных координатах, хотя можно заметить, что на 80 и 85 км максимальной погрешности не наблюдается ни в одном из рассматриваемых случаев. Также, если рассматривать каждую координату при различных процентах утечек, прослеживается максимум погрешности при утечке 1 %, кроме случая с УНВ на 15 км, где максимум находится на утечке 2 %. В случае учета сдвига напора (рис. 4) из-за перепада мощностей насосных агрегатов погрешность более «структурированная». Ее рост происходит с уменьшением процента утечки. Анализ зависимости от координат показывает, что точность возрастает к концу участка, независимо от степени

утечки. Максимальные погрешности наблюдаются на 15 и 30 км.

Таким образом, рассмотрев влияние насосного оборудования в стационарном режиме на локализацию утечек и несанкционированных врезок, предлагается модифицировать предложенный в [26] метод гидравлической локации УНВ.

Поиск координаты УНВ предлагается осуществлять по формуле (6):

$$x = L \frac{|\Delta i_2|}{|\Delta i_1| + |\Delta i_2|}. \quad (6)$$

Гидравлический уклон определяется (7):

$$i_{AA1} = \frac{H_A - H_{A1}}{l_1}, \quad (7)$$

где H_A – полный напор, м; H_{A1} – напор в выбранном сечении, м; l_1 – расстояние от начального до выбранного сечения, км.

А изменение гидравлических уклонов, переставших быть равными при возникновении утечки, рассчитывается по формулам (8, 9):

$$\Delta i_1 = \frac{H_A - H_{A1}}{l_1}, \quad (8)$$

$$\Delta i_2 = \frac{H_{B1} - H_B}{l_2}. \quad (9)$$

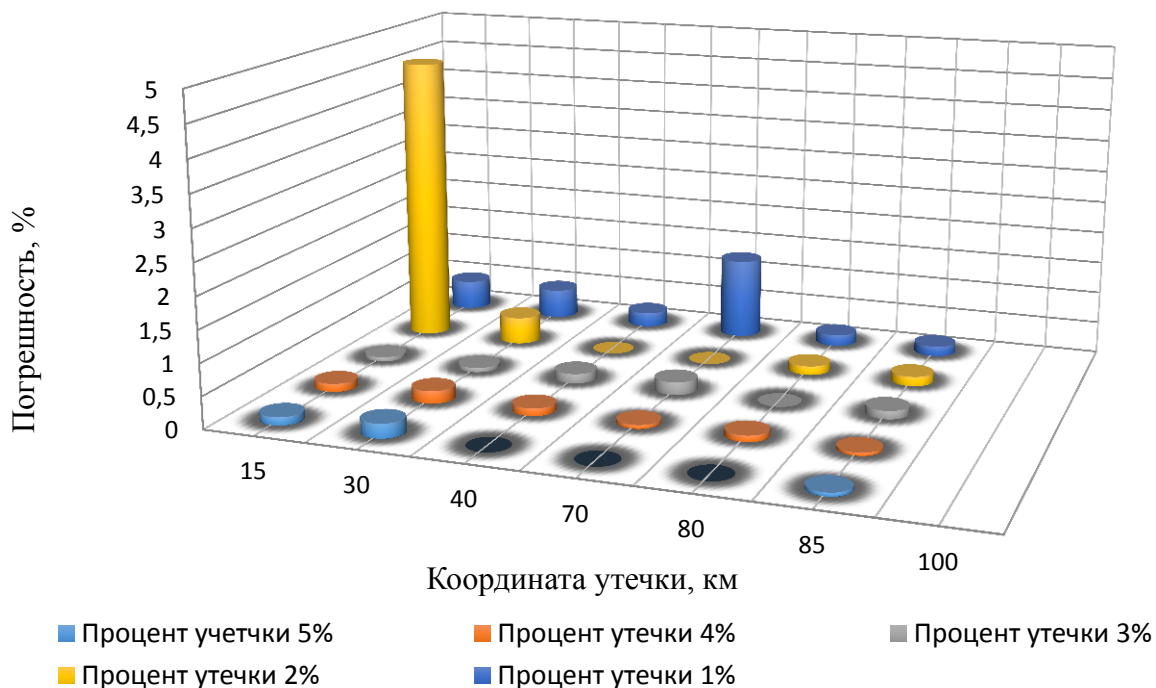


Рис. 3. Зависимость погрешности локализации от координаты и процента утечки
 Fig. 3. Dependence of the localization error on the coordinate and the leakage percentage

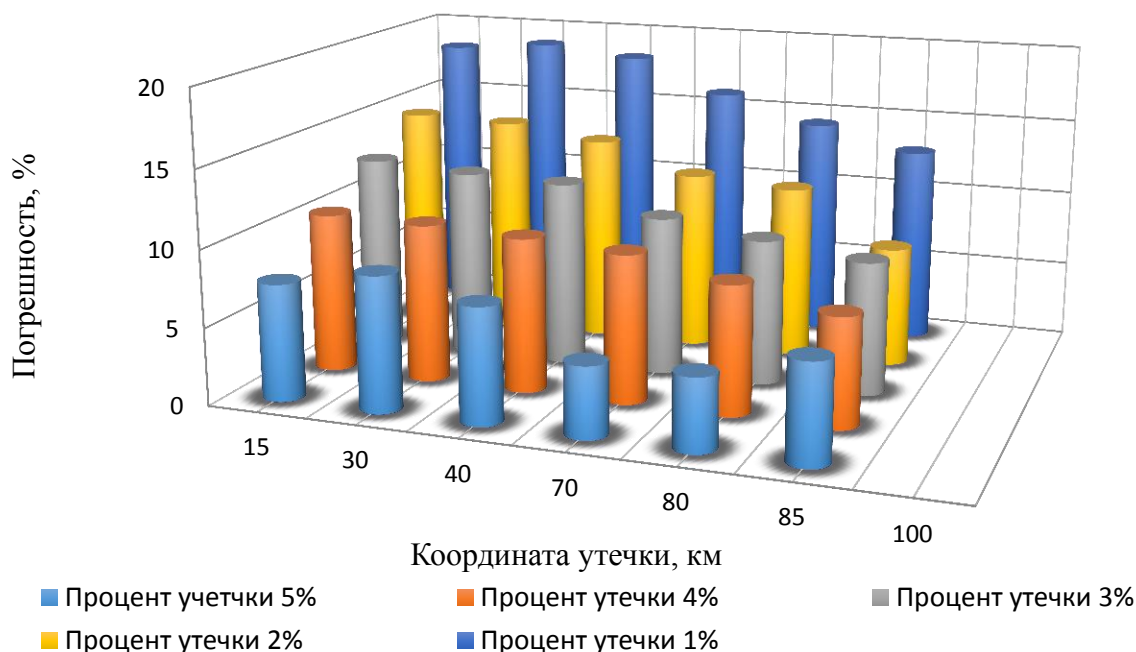


Рис. 4. Зависимость погрешности локализации от координаты и процента утечки при учете «сдвига» полного напора
Fig. 4. Dependence of the localization error on the coordinate and percentage of leakage, considering the "shift" of the total head

Причем полный напор в данной методике принято рассчитывать по формуле (10):

$$H_n = \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z, \quad (10)$$

где v – скорость потока, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; p – давление в начальном сечении, МПа; ρ – плотность жидкости, кг/м³; z – высотная отметка, м.

Так как исследовано и доказано влияние насосного оборудования на поиск координаты вследствие влияния на полный напор без учета нестационарных условий процесса, то при расчете координаты произошедшей утечки или несанкционированной врезки формула расчета принимает следующий вид (11):

$$H_n = n \left(a - bQ_n^2 \right) + \frac{v_n^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z. \quad (11)$$

Усовершенствование метода обнаружения УНВ

Подводя итоги, вернемся к не совсем верному предположению о постоянстве полного напора в начальном сечении при возникновении УНВ. Доказано и проанализировано влияние перепада мощности насосных агрегатов на полный напор [30–32]. Тогда можно предположить возможность определения координаты утечки или несанкционированной врезки, учитывая изменение полного напора, связанного с изменением мощности. Продемон-

стрируем на рис. 5 предполагаемую произошедшую врезку.

На рис. 5: $F(x)$ – врезка не происходила, $F_d(x)$, $F_n(x)$ – функции до и после местоположения несанкционированной врезки.

Тогда рассмотрим каждую функцию отдельно более подробно. Известно, что гидравлический уклон рассчитывается по формуле (4) [26], тогда приведем функцию до местоположения утечки как (12):

$$F_d(x) = H_n - \lambda_n \frac{x}{d} \frac{v_n^2}{2g}, \quad (12)$$

где H_n – напор в начальном сечении, м; λ_n – коэффициент гидравлического сопротивления [26]; d – диаметр трубопровода, м; v_n – скорость течения жидкости, м/с (5); g – ускорение свободного падения, м/с²; x – координата, в которой произошла утечка, км.

Полный напор, рассчитанный по формуле (1), преобразуем, учитывая влияние насосного оборудования, и получим (13):

$$H_n = n \left(a - bQ_n^2 \right) + z + \frac{v_n^2}{2g} + h_n, \quad (13)$$

где n – количество работающих насосов; a и b – коэффициенты аппроксимации; Q_n – объемный расход нефти, м³/ч; z – высотная отметка, м; v_n –

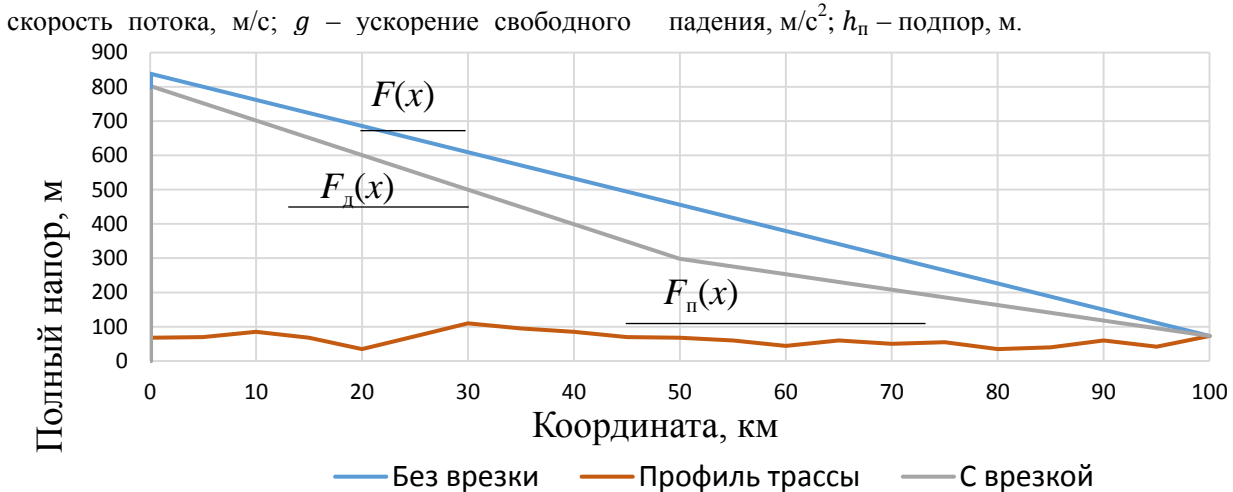


Рис. 5. Моделирование несанкционированной врезки в нефтепровод
 Fig. 5. Modeling of unauthorized tie-in into an oil pipeline

Так как рассматривается случай возникновения УНВ между промежуточными нефтеперекачивающими станциями, примем подпор $h_{\text{п}} = \text{const}$. При УНВ, произошедшей между головной нефтеперекачивающей станцией и последующей НПС, подпор $h_{\text{п}}$ необходимо не учитывать как постоянную величину.

В таком случае функция после местоположения врезки $F_{\text{п}}(x)$ будет рассчитываться как (14):

$$F_{\text{п}}(x) = H_{\text{к}} + \lambda_{\text{к}} \frac{L - x}{d} \frac{v_{\text{к}}^2}{2g}, \quad (14)$$

где $H_{\text{к}}$ – напор в конечном сечении, м; $\lambda_{\text{к}}$ – коэффициент гидравлического сопротивления [26]; d – диаметр трубопровода, м; $v_{\text{к}}$ – скорость течения жидкости, м/с (6); g – ускорение свободного падения, м/с²; L – длина диагностируемого участка, км; x – координата, в которой произошла утечка, км.

Для начала предположим, что ни утечек, ни врезок не происходило, в таком случае (15):

$$|F_{\text{д}}(x) - F_{\text{п}}(x)| = \varepsilon. \quad (15)$$

В таком случае получаем:

$$x = \frac{d2g(H_{\text{н}} - H_{\text{к}})}{(\lambda_{\text{н}}v_{\text{н}}^2 - \lambda_{\text{к}}v_{\text{к}}^2)} + \frac{\lambda_{\text{к}}v_{\text{к}}^2L}{(\lambda_{\text{н}}v_{\text{н}}^2 - \lambda_{\text{к}}v_{\text{к}}^2)}. \quad (16)$$

Подставляя уравнение (2) в приведенное уравнение (16), получим (17):

$$x = \frac{d2gn(a - bQ_{\text{н}}^2)}{(\lambda_{\text{н}}v_{\text{н}}^2 - \lambda_{\text{к}}v_{\text{к}}^2)} + \frac{d2gz + \frac{v_{\text{н}}^2}{2g} + h_{\text{п}} - H_{\text{к}}}{(\lambda_{\text{н}}v_{\text{н}}^2 - \lambda_{\text{к}}v_{\text{к}}^2)} + \frac{\lambda_{\text{к}}v_{\text{к}}^2L}{(\lambda_{\text{н}}v_{\text{н}}^2 - \lambda_{\text{к}}v_{\text{к}}^2)}. \quad (17)$$

Однако, как было описано выше, при произошедшей УНВ $F_{\text{д}}(x)$ и $F_{\text{п}}(x)$ будут различаться на некоторую величину ε .

Принимая во внимание факт, что разница между функциями при произошедшей врезке будет равна некоторой ε (18):

$$|F_{\text{д}}(x) - F_{\text{п}}(x)| \leq \varepsilon. \quad (18)$$

В данных обстоятельствах разность функций не может описываться уравнением, а будет являться неравенством (13). Этот факт связан с зависимостью скорости, коэффициента гидравлического сопротивления, а также непосредственно дифференциального напора нефтеперекачивающей станции (что доказано выше) от изменяющейся величины расхода. Из этого неравенства должно следовать, что искомая величина x – необходимая нам координата произошедшей несанкционированной врезки или утечки, определяется по формуле (19):

$$x = \frac{(H_{\text{н}} - H_{\text{к}})2dg}{\lambda_{\text{н}}v_{\text{н}}^2 - \lambda_{\text{к}}v_{\text{к}}^2} + \frac{\lambda_{\text{к}}v_{\text{к}}^2L}{\lambda_{\text{н}}v_{\text{н}}^2 - \lambda_{\text{к}}v_{\text{к}}^2}. \quad (19)$$

Тогда, согласно зависимости (2), итоговой формулой будет являться (20):

$$x = \frac{n(a - bQ_n^2)d2g}{\lambda_n v_n^2 - \lambda_k v_k^2} + \frac{\left(z + \frac{v_n^2}{2g} + h_n - H_k\right)2dg}{\lambda_n v_n^2 - \lambda_k v_k^2} + \frac{\lambda_k v_k^2 L}{\lambda_n v_n^2 - \lambda_k v_k^2} \pm \varepsilon. \quad (20)$$

Проведем численное моделирование согласно предложенной авторами методике обнаружения УНВ.

Исходя из предположений о том, что утечка произошла в координате $x=30$ км, примем существование некоторого участка нефтепровода длиной $L=100$ км, диаметром $d=\varnothing 720 \times 8$ мм, также принимая во внимание, что $z=68$ м, $h_n=60$ м. Известно, что расход на участке до врезки составил $3027,1 \text{ м}^3/\text{ч}$, после – $2125,5 \text{ м}^3/\text{ч}$. Примем $\varepsilon=0,05$.

Рассчитываем скорости по формуле (5), коэффициенты гидравлического сопротивления – согласно [26], подставляем полученные значения в формулу (20) и получаем координату $x = 30 \pm 1,676$ км, вычисленная погрешность составляет 5 %.

Заключение

Подводя итог, можно сделать вывод о том, что было рассмотрено влияние уменьшения полного

напора, развиваемого насосными агрегатами нефтеперекачивающей станции, на точность определения места утечки или несанкционированной врезки в связи с изменением подачи транспортируемой жидкости. Проведено численное моделирование при условии известных значений расходов и давлений в начальной и конечной координатах участка с учетом изменения расхода, давления и полного напора в начальном сечении участка при утечке или несанкционированной врезке.

Определено, что условие изменения расхода при утечке или несанкционированном отборе и, как следствие, изменение полного напора может значительно увеличивать погрешность при локализации – можно проследить ее зависимость от координаты и расхода утечки.

Предложена формула определения координаты утечки или несанкционированной врезки относительно начала участка трубопровода, которая учитывает гидравлическую характеристику насосного оборудования нефтеперекачивающей станции в стационарных условиях процесса и, как следствие, изменение полного напора на выходе из нефтеперекачивающей станции вследствие изменения подачи насосов, что привело к существенному снижению погрешности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Можяев С.А., Коршунов С.А., Чионов А.М. Оценка параметров волоконно-оптических систем мониторинга возникновения утечек с целью обеспечения достоверности их работы // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2021. – Т. 11. – № 6. – С. 614–621.
2. Зверев Ф.С. Модифицированный метод материального баланса для оперативного обнаружения утечек нефти или нефтепродукта из магистральных трубопроводов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2009. – № 3. – С. 48–51.
3. Gamboa-Medina M.M., Ribeiro Reis L.F. Sampling design for leak detection in water distribution networks // Procedia Engineering. – São Carlos: Elsevier, 2017. – P. 460–469.
4. 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.
5. Поляков В.А., Шестаков Р.А. К вопросу обеспечения точности измерений системы обнаружения утечек в нефтепроводе // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2015. – № 4 (20). – С. 76–79.
6. Бондарь Д.В., Коршунов С.А., Дацов Ю.В. Перспективы применения волоконно-оптических датчиков физических величин в качестве средств измерения в системах обнаружения утечек // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2019. – Т. 9. – № 2. – С. 191–199.
7. Сачедина К., Мохани А. Обзор методов постоянного и периодического контроля состояния трубопроводов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2018. – Т. 8. – № 6. – С. 668–679.
8. Kowalczyk Z., Gunawickrama K. Leak detection and isolation for transmission pipelines via non linear state estimation // Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes. – Budapest: Pergamon, 2000. – P. 921–926.
9. Hessel G., Schmitt W., Weff F.-P. A new method for acoustic leak detection at complicated geometrical structures // Supervision and Safety for Technical Processes. – 1994. – № 4. – P. 147–152.
10. A deep learning approach for motion segment estimation for pipe leak detection robot / С. Uyanik, E. Erdemir, E. Kaplanoglu, A. Sekmen // Procedia Computer Science. – Netherlands: Elsevier, 2019. – P. 37–44.
11. Сунагатуллин Р.З., Коршунов С.А., Дацов Ю.В. Анализ влияния характеристик измерительного оборудования на работу параметрических методов обнаружения утечек // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2018. – Т. 8. – № 5. – С. 548–557.
12. Шестаков Р.А., Дульченко А.А. Влияние утечек и несанкционированных отборов на параметры гидравлической системы // Деловой журнал Neftegaz.RU. – 2023. – № 3 (135). – С. 30–35.
13. Чионов А.М., Коршунов С.А. Зависимость погрешности определения координаты утечки от параметров оснащённости трубопровода средствами измерения давления // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2023. – Т. 13. – № 2. – С. 104–108.

14. Candelieri A., Conti D., Archetti F. A graph based analysis of leak localization in urban water networks // *Procedia Engineering*. – Netherlands: Elsevier, 2014. – P. 228–237.
15. Способ определения величины и места утечки в магистральном трубопроводе между двумя смежными насосными станциями насосно-трубопроводного комплекса по перекачке нефти и нефтепродуктов: пат. Рос. Федерация № 2362134; заявл. 13.11.2007; опубл. 20.07.2009, Бюл. № 20. – 21 с.
16. Оценка достоверности определения координаты утечки в нефтепроводе / А.М. Чионов, А.А. Амерханов, И.С. Симонов, С.В. Петренко // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2019. – Т. 9. – № 4. – С. 378–386.
17. Dataset on water–glycerol flow in a horizontal pipeline with and without leaks / J.F. Noguera-Polania, J. Hernández-García, D.F. Galaviz-López // *Data in Brief*. – USA: Elsevier, 2020. – P. 105950.
18. Логинов И.Н., Коршунов С.А. Математический алгоритм для обнаружения утечек малой интенсивности // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2021. – Т. 11. – № 5. – С. 528–534.
19. Чионов А.М., Амерханов А.А., Кудрицкий А.В. Стохастическая модель материального баланса для обнаружения утечек в нефтепроводе // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2019. – Т. 9. – № 6. – С. 633–639.
20. Blesa J., Nejari F., Sarrate R. Robustness analysis of sensor placement for leak detection and location under uncertain operating conditions // *Procedia Engineering*. – 2014. – № 89. – P. 1553–1560.
21. Arifin B.M.S., Zukui Li, Shah L. Sirish. Pipeline leak detection using particle filters // *IFAC-PapersOnLine*. – London: Elsevier, 2015. – P. 076–081.
22. Lay-Ekuakille Aime, Vito Telesca. Flow distribution imaging and sensing for leaks in pipelines using decimated signal diagonalization // *Measurement: Sensors*. – United Kingdom: Elsevier, 2020. – P. 100014.
23. Soares Alexandre Kepler, Covas Di'dia I.C., Reis Luisa Fernanda R. Leak detection by inverse transient analysis in an experimental PVC pipe system // *Journal of Hydroinformatics*. – Great Britain: IWA Publishing, 2011. – P. 153–166.
24. Consideration on leak/fault detection system in mass transfer networks / C. Lupu, D. Chirita, S. Iftime, R. Miclaus // *Energy Procedia*. – Netherlands: Elsevier, 2017. – P. 58–66.
25. Лурье М.В., Макаров П.С. Гидравлическая локация утечек нефтепродуктов на участке трубопровода // *Транспорт и хранение нефтепродуктов*. – 1998. – № 12. – С. 65–69.
26. Мастобаев Б.Н., Нечваль А.М., Гареев М.М. Трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов: справочное пособие. – М.: Изд-во «Недра», 2017. – Т. 1. – 494 с.
27. Аралов О.В., Буянов И.В., Яровой А.Т. Выбор преобразователей расхода для систем обнаружения утечек в магистральных нефтепродуктопроводах // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2022. – Т. 12. – № 2. – С. 169–177.
28. Сафаров А.М. Определение степени загрязнения при аварийных утечках нефти и нефтепродуктов. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2010. – 15 с.
29. Brennan M.J., Karimi M., Almeida F.C.L. On the role of vibro-acoustics in leak detection for plastic water distribution pipes // *Procedia Engineering*. – 2017. – № 199. – P. 1350–1355.
30. Поляков В.А. Методы и нормы технологического проектирования нефтепроводов: учебное пособие. – М.: Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, 2019. – 113 с.
31. Галиуллин Р.М. Информационно-измерительная система обнаружения и определения местоположения несанкционированных врезок на нефтепродуктопроводах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Самара, 2005. – 24 с.
32. Qiang Fu, HongJie Wan, Fupeng Qiu. Pipeline leak detection based on fiber optic early-warning system // *Procedia Engineering*. – 2009. – № 7. – P. 88–93.

Информация об авторах

Анна Алексеевна Дульченко, студент кафедры нефтепродуктообеспечения и газоснабжения, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр., 65, корп. 1. dulchenko.anna@yandex.ru

Роман Алексеевич Шестаков, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтепродуктообеспечения и газоснабжения, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Россия, 119991, г. Москва, Ленинский пр., 65, корп. 1. shestakov.r@gubkin.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4437-0612>

Юлия Сергеевна Матвеева, студент Университета дистанционного обучения в Хагене, Германия, 58097, г. Хаген, Университет штрассе, 47. yulia2@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1157-6200>

Поступила в редакцию: 11.07.2023

Поступила после рецензирования: 18.09.2023

Принята к публикации: 19.04.2024

REFERENCES

1. Mozhaev S.A., Korshunov S.A., Chionov A.M. Estimation of the parameters of fiber-optic systems for monitoring the occurrence of leaks in order to ensure the reliability of their work. *Science and technology of oil and gas pipeline transport oil products*, 2021, no. 6, pp. 614–621. (In Russ.)

2. Zverev F.S. Modified material balance method for the operational detection of oil or oil product leaks from main pipelines. *Environmental protection in the oil and gas complex*, 2009, no. 3, pp. 48–51. (In Russ.)
3. Gamba-Medina M.M., Ribeiro Reis L.F. Sampling design for leak detection in water distribution networks. *Procedia Engineering*. São Carlos, Elsevier Publ., 2017. pp. 460–469.
4. Bondar D.V., Zholobov V.V., Nadezhkin O.S. A method for determining the parameters of leaks in pipelines based on hydrodynamic models. *Science and technology of oil and gas pipeline transport oil products*, 2021, vol. 11, no. 5, pp. 515–527. (In Russ.)
5. Polyakov V.A., Shestakov R.A. On the issue of ensuring the accuracy of measurements of the leak detection system in an oil pipeline. *Science and technology of oil and gas pipeline transport oil products*, 2015, no. 4 (20), pp. 76–79. (In Russ.)
6. Bondar D.V., Korshunov S.A., Datsov Yu.V. Prospects for the use of fiber-optic sensors of physical quantities as measuring instruments in leak detection systems. *Science and technology of oil and gas pipeline transport oil products*, 2019, vol. 9, no. 2, pp. 191–199. (In Russ.)
7. Sachedina K., Mohani A. Review of methods of continuous and periodic monitoring of the state of pipelines. *Science and technology of oil and gas pipeline transport oil products*, 2018, vol. 8, no. 6, pp. 668–679. (In Russ.)
8. Kowalczuk Z., Gunawickrama K. Leak detection and isolation for transmission pipelines via non linear state estimation. *Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes*. Budapest, Pergamon Publ., 2000. pp. 921–926.
9. Hessel G., Schmitt W., Weff F.-P. A new method for acoustic leak detection at complicated geometrical structures. *Supervision and Safety for Technical Processes*, 1994, no. 4, pp. 147–152.
10. Uyanik C., Erdemir E., Kaplanoglu E., Sekmen A. A deep learning approach for motion segment estimation for pipe leak detection robot. *Procedia Computer Science*. Netherlands, Elsevier Publ., 2019. pp. 37–44.
11. Sunagatullin R.Z., Korshunov S.A., Datsov Yu.V. Analysis of the influence of measuring equipment characteristics on the operation of parametric leak detection methods. *Science and technology of oil and gas pipeline transport oil products*, 2018, vol. 8, no. 5, pp. 548–557. (In Russ.)
12. Shestakov R.A., Dulchenko A.A. Influence of leaks and unauthorized withdrawals on the parameters of the hydraulic system. *Business magazine Neftegaz.RU*, 2023, no. 3 (135), pp. 30–35. (In Russ.)
13. Chionov A.M., Korshunov S.A. Dependence of the error in determining the leak coordinate on the parameters of pipeline equipment with pressure measuring instruments. *Science and technology of oil and gas pipeline transport oil products*, 2023, vol. 13, no. 2, pp. 104–108. (In Russ.)
14. Candelieri A., Conti D., Archetti F. A graph based analysis of leak localization in urban water networks. *Procedia Engineering*. Netherlands, Elsevier Publ., 2014. pp. 228–237.
15. Krichke V.O., Krichke V.V., Groman A.O. *Method for determining the magnitude and location of a leak in the main pipeline between two adjacent pumping stations of a pumping and pipeline complex for pumping oil and oil products*. Patent RF, no. 2362134, 2009. (In Russ.)
16. Chionov A.M., Amerkhanov A.A., Simonov I.S., Petrenko S.V. Estimation of the reliability of determining the coordinates of a leak in an oil pipeline. *Science and technology of oil and gas pipeline transport oil products*, 2019, vol. 9, no. 4, pp. 378–386. (In Russ.)
17. Noguera-Polania J.F., Hernández-García J., Galaviz-López D.F. Dataset on water–glycerol flow in a horizontal pipeline with and without leaks. *Data in Brief*. USA, Elsevier Publ., 2020. pp. 105950.
18. Loginov I.N., Korshunov S.A. Mathematical algorithm for detecting low-intensity leaks. *Science and technology of pipeline transport of oil and oil products*, 2021, vol. 11, no. 5, pp. 528–534. (In Russ.)
19. Chionov A.M., Amerkhanov A.A., Kudritsky A.V. Stochastic material balance model for detecting leaks in an oil pipeline. *Science and technology of pipeline transport of oil and oil products*, 2019, vol. 9, no. 6, pp. 633–639. (In Russ.)
20. Blesa J. Nejjari F., Sarrate R. Robustness analysis of sensor placement for leak detection and location under uncertain operating conditions. *Procedia Engineering*, 2014, no. 89, pp. 1553–1560.
21. Arifin B.M.S., Zukui Li, Shah Sirish L. Pipeline leak detection using particle filters. *IFAC-PapersOnLine*. London, Elsevier Publ., 2015. pp. 076–081.
22. Lay-Ekuakille Aime, Telesca Vito. Flow distribution imaging and sensing for leaks in pipelines using decimated signal diagonalization. *Measurement: Sensors*. United Kingdom, Elsevier Publ., 2020. pp. 100014.
23. Soares Alexandre Kepler, Covas Di' dia I. C., Reis Luisa Fernanda R. Leak detection by inverse transient analysis in an PVC pipe system. *Journal of Hydroinformatics*. Great Britain, IWA Publ., 2011. pp. 153–166.
24. Lupu C., Chirita D., Iftime S., Miclaus R. Consideration on leak/fault detection system in mass transfer networks. *Energy Procedia*. Netherlands, Elsevier Publ., 2017. pp. 58–66.
25. Lurie M.V., Makarov P.S. Hydraulic location of oil leaks on the pipeline section. *Transport and storage of petroleum products*, 1998, no. 12, pp. 65–69. (In Russ.)
26. Mastobaev B.N., Nechval A.M., Gareev M.M. *Pipeline transport of oil and oil products: reference manual*. Moscow, Nedra Publ., 2017. Vol. 1, 494 p.
27. Aralov O.V., Buyanov I.V., Yarovoy A.T. Choice of flow transducers for leak detection systems in main oil and oil product pipelines. *Science and Technology of Oil and Oil Products Pipeline Transport*, 2022, vol. 12, no. 2. pp. 169–177. (In Russ.)
28. Safarov A.M. *Determination of the degree of pollution in case of emergency oil and oil products leaks*. Ufa, Ufa State Oil Technical University Publ., 2010. 15 p. (In Russ.)
29. Brennan M.J., Karimi M., Almeida F.C.L. On the role of vibro-acoustics in leak detection for plastic water distribution pipes. *Procedia Engineering*, 2017, no. 199, pp. 1350–1355.
30. Polyakov V.A. *Methods and norms of technological design of oil pipelines*. Moscow, Russian State University of Oil and Gas (National Research University) named after I.M. Gubkin Publ., 2019. 113 p. (In Russ.)
31. Galiullin R.M. *Information-measuring system for detecting and locating unauthorized tie-ins on oil product pipelines*. Cand. Diss. Abstract. Samara, 2005. 24 p.

32. Qiang Fu, HongJie Wan, Fupeng Qiu. Pipeline leak detection based on fiber optic early-warning system. *Procedia Engineering*, 2009, no. 7, pp. 88–93.

Information about the authors

Anna A. Dulchenko, Student, National University of Oil and Gas «Gubkin University», 65, bld. 1, Leninsky avenue, Moscow, 119991, Russian Federation. dulchenko.anna@yandex.ru

Roman A. Shestakov, Cand. Sc., Associate Professor, National University of Oil and Gas «Gubkin University», 65, bld. 1, Leninsky avenue, Moscow, 119991, Russian Federation. shestakov.r@gubkin.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4437-0612>

Yulia S. Matveeva, Student, FernUniversität in Hagen, 47, Universitätsstraße, Hagen, 58097, Germany. yulia2@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1157-6200>

Received: 11.07.2023

Revised: 18.09.2023

Accepted: 19.04.2024