

УДК 620.165.29

Д. А. Гринюк, И. Г. Сухорукова, Н. М. Олиферович
Белорусский государственный технологический университет
РАЗВИТИЕ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ

В статье проведен анализ методов контроля герметичности. Оценку герметичности производят в разных направлениях человеческой деятельности. И если в прошлом веке анализ данного параметра, который относится к системам неразрушающего контроля, производился в основном визуально оператором с использованием дополнительных приборов и веществ, то на сегодняшний момент выпускается широкая номенклатура установок и систем автоматического и автоматизированного контроля. В анализе показано, что существующие ранее классификации методов контроля герметичности требуют других подходов. Рекомендовано разделить методы оценки протечек на несколько направлений исходя из области применения и направления использования. Предложено выделить отдельно методы, которые применяются на постоянной основе при производстве изделий в промышленности. Здесь важны удобство работы с оборудованием, скорость выполнения тестов, точность, способность производить испытания в автоматическом режиме, соответствие нормативным документам и т. д.

Отдельно можно выделить методы контроля герметичности, которые применяются в условиях производства. Для данного направления характерны требования к мобильности, дистанционности, обеспечение нормативных и экологических норм эксплуатации. Отличительной особенностью является привлечение вычислительных методов анализа – от старых до современных методов машинного обучения.

Использование трубопроводов и трубопроводных систем – это один из экологических и энергоэффективных методов транспортировки и распределения жидкостей. Особенностью методов, которые применяются в данном направлении, является распределенность объекта наблюдения на большой площади, сложность доступа при нахождении в земле или воде и т. д. Предотвращение утечек и раннее их обнаружение очень важно для непрерывной работы, экологии и коммерческой выгоды. Это способствует развитию отдельного класса аппаратных и вычислительных методов оценки герметичности.

Ключевые слова: герметичность, запорная арматура, классификация методов измерения.

Для цитирования: Гринюк Д. А., Сухорукова И. Г., Олиферович Н. М. Развитие систем контроля герметичности // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2025. № 1 (290). С. 36–46.

DOI: 10.52065/2520-6141-2025-290-7.

D. A. Hryniuk, I. G. Suhorukova, N. M. Oliferovich
Belarusian State Technological University
DEVELOPMENT OF LEAK DETECTION SYSTEMS

The article analyzes the methods of leak control. Leak assessment is performed in different areas of human activity. In the last century, the analysis of this parameter, which relates to non-destructive testing systems, was performed mainly visually by the operator using additional devices and substances, but today a wide range of automatic and automated control systems and installations is produced. The analysis shows that previously existing classifications of leak control methods require other approaches. It is recommended to divide the leak assessment methods into several areas based on the area of application and direction of use. It is proposed to single out separately the methods that are used on a permanent basis in the production of products in industry. Here, ease of use with equipment, speed of testing, accuracy, the ability to perform tests in automatic mode, compliance with regulatory documents, etc. are important. Separately, we can highlight the leak control methods that are used in production conditions. This area is characterized by requirements for mobility, remoteness, ensuring regulatory and environmental standards of operation. A distinctive feature is the involvement of computational methods of analysis, from old to modern methods of machine learning.

Pipelines and pipeline systems are one of the ecological and energy-efficient methods of transportation and distribution of liquids. The peculiarity of the methods that are used in this direction is the distribution of the object of observation over a large area, the complexity of access, when they are in the ground or water, etc. Preventing leaks and their early detection is very important for continuous operation, ecology and commercial benefits. This contributes to the development of a separate class of hardware and computational methods for assessing leak.

Keywords: leak control, valves, classification of measurement methods.

For citation: Hryniuk D. A., Suhorukova I. G., Olfierovich N. M. Development of leak detection systems. *Proceedings of BSTU, issue 3, Physics and Mathematic. Informatics*, 2025, no. 1 (290), pp. 36–46 (In Russian). DOI: 10.52065/2520-6141-2025-290-7.

Введение. Сегодня понятие «герметичность» все более актуализируется. Этому способствует повышение качества продукции, износ старой арматуры, увеличение трубопроводной инфраструктуры и т. д. Увеличение капитальных затрат на решение вопросов во многих странах также связано с численностью и качеством человеческих ресурсов. Изучение данной темы в литературных источниках указывает на наибольший интерес инженеров и ученых к разработке приборов и методов контроля герметичности трубопроводной сети, а также диагностике промышленной арматуры по месту установки. Развитие данного направления в условиях производства и ремонта демонстрирует умеренный прогресс и совершенствование в соответствии с общими трендами промышленности.

В последнее время организация автоматических испытаний на герметичность обусловлена требованиями ISO 9000, повышением требований к качеству продукции, необходимостью электронного документооборота, защиты окружающей среды, защиты прав потребителей, обеспечения условий работы операторов на рабочем месте.

Герметичность. В работе сделана попытка классификации методов контроля герметичности [1]. Выбранный подход строился на выявлении всех методов, которые используются для контроля герметичности и их систематизации. Один такой вариант не позволяет решать задачи, для которых производят классификацию. Это во многом является следствием самого понятия «герметичность».

Чаще всего герметичность определяют по пороговому значению расхода утечки. Значения могут формироваться стандартами предприятия, отрасли или государственными документами.

Самой популярной единицей измерения герметичности в литературе является миллибар на литр в секунду (мбар·л/с). То есть если в объеме одного литра давление падает на 1 мбар в течение 1 с, это соответствует скорости утечки (оттока газа) 1 мбар·л/с. Единица 1 мбар·л/с = Па·м³/с = торр·л/с = атм·м³/с.

В нормативных документах СССР часто нормы герметичности выражаются через поток Q контрольной среды через течь, создающий в объеме V изделия в 1 м³ падение или повышение P на 1 Па за время τ в 1 с:

$$Q = \frac{PV}{\tau}, \text{ Вт (м}^3 \cdot \text{Па/с)}.$$

Доступно большое количество методов проверки на утечку, которые включают все подходы от очень простых до более сложных систем. Наиболее часто применяемые методы проверки на утечку – это подводное испытание на пузырьки, использование мыльной краски, распада под давлением и вакуумом, детекторов трассирующего газа (галоген, гелий и водород). Первые три метода из-за их характеристик и чувствительности могут использоваться только для обнаружения крупных утечек (утечки хладагента 300 г/год или более). Методы проверки утечки газа-индикатора намного точнее предыдущей группы, но во многих случаях их теоретическая чувствительность больше, чем требуется. Однако на практике это ограничивается условиями окружающей среды и работы.

То есть часто герметичность – это относительный термин. Требование к герметичности объекта всегда связано с условиями места его использования. Метод испытания на герметичность, уровень герметизации и допустимая скорость утечки должны быть установлены в соответствии с этими условиями во время изготовления элемента. Например, отдельные детали в двигателях внутреннего сгорания должны быть водонепроницаемыми или маслонепроницаемыми; другие не должны допускать утечки топлива или газа. Как правило, испытание объекта на герметичность должно проводиться как можно на более ранней стадии производственного процесса. Это должно дать представление о том, будет ли компонент герметичным в последующих условиях эксплуатации. При испытании на погружение воздух выходит из детали и образовавшиеся пузырьки поднимаются, как только достигают диаметра 1 мм. Один пузырек в 30 с дает утечку 0,001 см³/мин. Для шины легкового автомобиля (внутренний объем около 40 л) такая утечка приведет к падению давления в шине на 0,1 атм в течение 10 лет. При увеличении скорости истечения в 10 раз такое же изменение давления произойдет за год. Возникает вопрос: остается ли шина герметичной? В некоторых отраслях, например при производстве и ремонте арматуры, нормы расхода определены, в других – что считать герметичным – определяется по-разному, в зависимости от приложения, производителя и по другим причинам.

Методы контроля. Герметичность относится к методам неразрушающего контроля и используется для широкого класса задач и объектов. При построении классификаций следует производить декомпозицию методов контроля герметичности,

так как перечисленные методы очень часто имеют узкую направленность в конкретной области промышленности. Так, к примеру, даже контроль герметичности клапанов может преследовать различные цели. Одним из вариантов декомпозиции методов контроля герметичности является их деление по следующим направлениям:

1) методы контроля в условиях производства объекта тестирования;

2) методы контроля герметичности в условиях эксплуатации на предприятиях;

3) методы контроля герметичности трубопроводов и сопутствующей аппаратуры, когда они представляют разветвленную сеть, охватывающую обширные территории.

Для приборов и методов первого пункта важными будут: точность, повторяемость, время теста, удобство для оператора, автоматизируемость, интеграция в информационную структуру предприятия. Здесь важно понимание физики и метрологии. Применяемые алгоритмы обычно детерминированные [2].

Методы второго пункта должны обеспечивать мобильность, проверку по месту без остановки производства. Они больше относятся к методам диагностики. Например, оценка протечки запорной арматуры, которая установлена в трубопроводах. Для анализа приборов данного направления широко применяют математические методы для диагностики утечки. Это дает хороший результат из-за диагностики утечек на небольшой площади.

Методы контроля герметичности трубопроводов, которые представляют собой развернутые сети, также требуют мобильности. Только здесь больше неопределенности: трубопроводы часто являются скрытыми, так как проложены в земле. Использование различных методов математической обработки наиболее характерно для данного направления. Важным является не столько величина протечки, сколько необходимость локализации места потери герметичности, а также сам факт наличия протечки.

Некоторые методы могут использоваться в разных местах. Одним из наиболее универсальных является метод оценки герметичности по изменению давления, тогда как акустический метод контроля применяется только в условиях эксплуатации.

Методы испытания на герметичность в условиях производства и ремонта. Выбор и применение методов оценки герметичности в данной области не являются однородными. Отдельно здесь следует выделить методы контроля герметичности запорной арматуры. Этот класс объектов исследования часто должен соответствовать нормативным документам, которые характерны для страны или группы стран. Некоторые из них:

ГОСТ 33257–2015 [3], API Standard 521 [4], ANSI/API Standard 598 [5], ISO 5208 [6], Standard MSS SP-61-2013 [7], ANSI/API Standard 6D [8], European Standard. EN-12266-1:2012 [9], British Standards Institute (BSI), BS 6755-1 [10] и ANSI/FCI 70-2-2013 [11]. Производство элементов пневмо- и гидросистем, деталей двигателей внутреннего сгорания подчиняется внутренним документам предприятий или техническому заданию.

Запорная арматура. Клапан, или запорная арматура, – это механическое устройство, которое можно использовать для управления, регулирования или направления потока жидкости путем открытия, закрытия или частичного перекрытия трубопровода или канала. Клапаны имеют множество применений и встречаются практически в каждом промышленном процессе. На электростанциях клапаны устанавливаются для управления объемом потока, необходимым для системы; слива компонента при необходимости; защиты компонента от избыточного давления; выпуска воздуха, который попадает в системы.

Клапаны бывают разных типов, форм и размеров. Наиболее распространенными типами клапанов, используемых сегодня, являются задвижки, пробковые, шаровые, дроссельные, обратные, предохранительные клапаны. Как правило, клапаны можно разделить на три основные функциональные области: запорные (изоляционные), обратные и дросселирующие. Запорные или изолирующие клапаны выполняют функцию блокировки или изоляции потока жидкости через них в полностью закрытом положении, при этом позволяют жидкости течь через них в полностью открытом. Обратные клапаны пропускают жидкость только в одном направлении. Дроссельные клапаны позволяют контролировать и регулировать поток в любой точке – от полностью открытого до полностью закрытого положения.

Требования к герметичности для разных клапанов могут сильно отличаться в зависимости от назначения и типоразмера. С точки зрения организации работ по испытаниям они характеризуются удобством сопряжения, что позволяет добиться высокой степени автоматизации процесса тестирования.

Приборы контроля герметичности при производстве и ремонте имеют цели оценки качества и классификации. При этом измерение утечек запорной арматуры по месту эксплуатации имеет несколько другие цели и требования.

На диаграмме (рис. 1) обобщены характеристики различных методов проверки на герметичность [12]. Также указаны возможности увеличения точности за счет усложнения методики и приборов контроля.

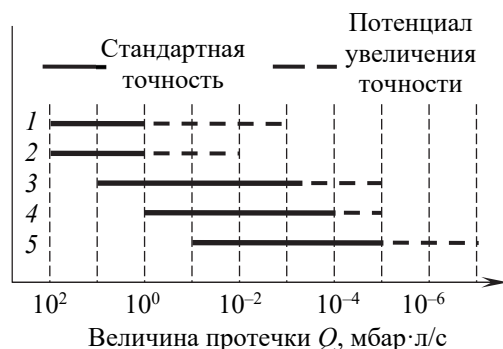


Рис. 1. Базовый и дополнительные пределы контроля герметичности для основных промышленных методов:

- 1 – подводный визуальный контроль;
- 2 – автоматические методы с использованием воздуха;
- 3 – контроль гелия при атмосферном давлении;
- 4 – интегральные тесты при атмосферном давлении;
- 5 – интегральные тесты под вакуумом

Одним из самых старых и популярных методов контроля является подводный визуальный осмотр. Это относительно точный метод при условии соблюдения установленных правил и норм. Автоматические установки данного типа обычно оборудованы измерителями концентрации. А в качестве газа используют гелий [13]. Данный метод подходит для широкого класса объектов разного размера и формы. Он недорогой, определение утечки мгновенное и может быть быстро локализовано. Из недостатков следует отметить высокие требования к оператору, высокую длительность, необходимость часто производить сушку объектов исследований. Для обеспечения требуемой точности нужен длительный период калибровки. Для хорошей воспроизводимости требуется осуществить до 50 испытаний на эталонных моделях.

Методы автоматического контроля. В промышленных условиях наибольшее применение находят методы автоматического контроля. Установки, как правило, оснащены измерительными преобразователями с аналоговыми или цифровыми выходами, которые подключены к аппаратуре управления, регистрации, анализа и формирования протокола испытания. Наиболее популярные решения приведены на рис. 2.

В таких методах в большинстве используются воздух для проверки на герметичность. Особенно он хорош для серийных деталей. Основные преимущества:

- надежность проведения испытаний;
- достоверность и точность количественных измерений;
- скорость проведения испытаний;
- финансовая доступность основных компонентов оборудования;

- низкие нагрузки на объект испытания;
- легкость калибровки;
- отсутствие сложности интеграции в современные системы MES-системы.

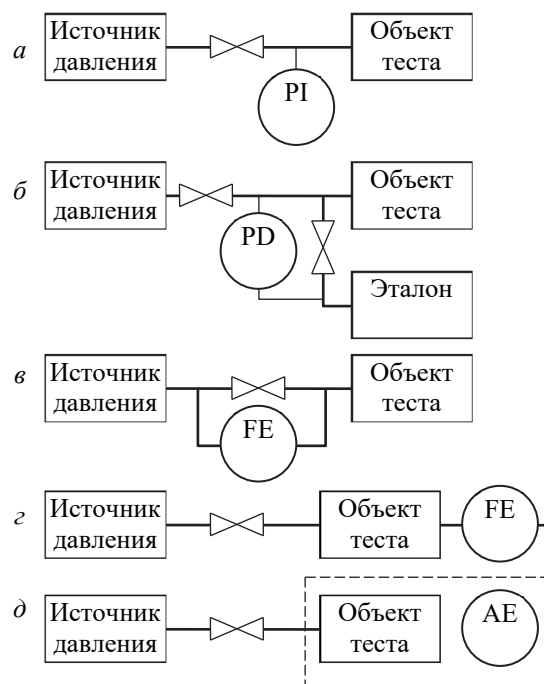


Рис. 2. Основные схемы автоматизированных методов контроля герметичности на производстве:

- а – объемный (контроль давления);
- б – объемный (контроль перепада давления);
- в – массовый (линия высокого давления);
- г – массовый (линия низкого давления);
- д – путем контроля концентрации

Контроль герметичности по первому методу (рис. 2, а) производится по контролю изменения давления. Это один из самых простых и универсальных методов, но имеет ограничение по точности. Длительность – средняя.

Использование датчика дифференциального давления (рис. 2, б) повышает чувствительность, однако усложняет аппаратное оформление. Эталонная часть должна быть максимально эквивалентна тестируемой, поэтому при смене типоразмеров приходится перенастраивать [14].

Вариант использования массового расхода (рис. 2, в) обеспечивает еще лучшую чувствительность, чем предыдущие методы. Также он характеризуется более широким диапазоном давления испытания и коротким временем проведения тестов. Контроль массового расхода позволяет исключить погрешности пересчета, которые характерны для предыдущих методов. Стоимость такого оборудования, как правило, значительно выше, чем у предыдущих.

Установки по вариантам рис. 2, г, д не столь универсальны. Схема на рис. 2, г очень часто применяется для контроля герметичности запорной

арматуры. Для измерения расхода утечки используют подсчет пузырьков различными способами, рассчитывают косвенно путем измерения перепада давления или непосредственно используют расходомер.

Процедура проведения испытаний. При выборе метода испытания на герметичность важно обращать внимание на все аспекты процедуры испытания. Так, при использовании испытаний давлением важными элементами являются характеристики испытательного давления, допустимая скорость утечки, объем испытаний, а также время испытаний.

Скорость утечки существенно зависит от давления испытания. При этом для большинства объектов могут проявляться нелинейные эффекты. Используемое оборудование испытания должно по максимуму моделировать условия эксплуатации. Это касается выбора между вакуумом и избыточным давлением с соответствующим диапазоном.

В некоторых случаях требуется устанавливать связь между значением давления испытания и величиной утечки. Обычно если величина утечки значительна, то ее скорость примерно пропорциональна испытательному давлению, но при малых значениях скорости утечки, обычно имеет нелинейный характер.

На результаты испытаний могут повлиять некоторые внешние факторы, например влага. Не всегда являются постоянными малые утечки. Появляются большие трудности в применимости на практике результатов испытаний, если оборудование, например предохранительные клапаны котлов и химических установок, эксплуатируется при высоких температурах. Экономика тоже играет большую роль. Нет никакого смысла очень точно определять величину скорости утечек, которые имеют значение значительно ниже допустимых.

Установки автоматических испытаний очень часто определяют величину протечки по перепаду давления тестирования. Однако по этим значениям нельзя судить напрямую о количественной величине протечки. На практике можно увидеть два варианта испытаний: на объемный расход (фактически избыточное давление) и на массовый расход.

В первом варианте к детали прилагается соответствующее давление от источника сжатого воздуха, деталь отделяется от источника и путем контроля давления в детали определяется величина протечки. Второй вариант, массовый контроль, предполагает контроль количества вещества, которое переходит от источника воздуха в исследуемый объект. Испытание давления на герметичность встречается чаще в промышленности. При малых объемах испытаний можно обнару-

жить утечки объемом до $0,1 \text{ см}^3/\text{мин}$. Такое оборудование обычно компактно, надежно и пригодно для широкого диапазона допустимой величины протечки. Точность в основном определяется величиной давления и чувствительностью измерительной аппаратуры.

Считается, что метод дифференциального давления может обеспечить большую точность при более высоких испытательных давлениях, чем метод избыточного давления. Зависимость точности измерения будет определяться чувствительностью измерительного преобразователя.

Следует отметить, что метод дифференциального давления в большей степени моделирует условия работы деталей. Однако температурные эффекты, влияние деформаций уплотнений в процессе испытаний на величину протечки могут проявляться более существенно.

Чувствительность первого метода существенно зависит от свободного объема исследуемой детали. Чем больше объем, тем меньше чувствительность метода. Контроль массового расхода дает измерительный сигнал, который не зависит от размера испытательного объема. Также на него оказывают меньшее влияние атмосферное давление и температура. Нет необходимости делать пересчеты, как это происходит в первом методе.

Алгоритмы измерения. Обычно автоматический процесс испытания на герметичность состоит как минимум из четырех фаз: I – заполнение; II – балансировка, III – измерение, IV – сброс (рис. 3).

Первые два этапа часто являются самыми нестабильными по времени. В течение этих этапов давление должно стабилизироваться. Турбулентность, возникающая в процессе заполнения, должна успокоиться, уплотнения должны приобрести стабильную деформацию.

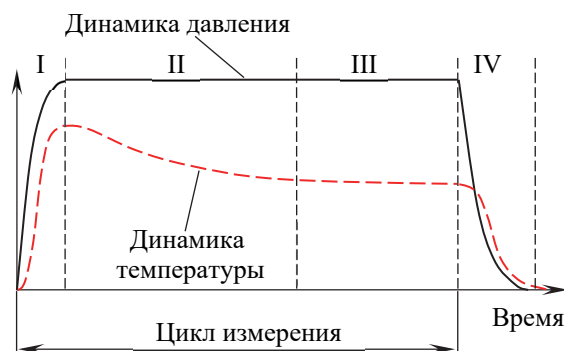


Рис. 3. Динамические процессы при измерении:

- I – время установки давления;
- II – установка температурных процессов;
- III – период измерения; IV – сброс давления

Как правило, более длительными бывают тепловые процессы. Температура испытательного воздуха обычно не совпадает с температурой детали. Также в процессе заполнения испытательный

воздух расширяется и, как следствие, охлаждается. Воздух в детали, наоборот, сжимается и нагревается. При прохождении через узкие места воздух может нагреваться вследствие силы трения. Если температура воздуха, как следствие сжатия, расширения и трения, обычно уравнивается достаточно быстро (на рис. 3 отражены именно эти процессы), то дрейфы температуры из-за балансировки температуры между деталью и воздухом могут происходить в некоторых случаях с большей длительностью. Процесс утечки может также оказывать свое влияние, что требует адаптивной фильтрации [15].

Идеальное изотермическое состояние труднодостижимо. Изменение температуры в детали оказывает влияние на давление. Часто этап балансировки сокращают. Используя газовые законы, границу между II и III можно сдвинуть и производить измерение протечки на более ранней фазе. В патентах можно встретить и другие предложения по сокращению полного времени тестирования.

Интересно отметить, что большинство уравнений расчета не учитывают уровень испытательного давления. Считается, что испытательное давление не влияет на величину изменения давления в испытательной камере.

Другими словами, величина падения давления в испытательной части всегда одинакова для одной и той же скорости утечки, независимо от того, составляет ли давление в испытательной части 1 бар или 10 бар. Однако скорость утечки через пористую область становится больше по мере приращения большего давления.

Методы контроля герметичности при эксплуатации. Количество методов, которые активно используются на промышленных предприятиях с запорной арматурой, системой трубопроводов и прочих элементов, гораздо больше, чем при их производстве и ремонте. Контроль герметичности также осуществляется часто нерегулярно и по мере необходимости. В источниках информации можно встретить разные подходы к классификации методов контроля герметичности [16] в условиях производства. Классификация на рис. 4 отражает методы контроля общего заводского применения.

Многие стандарты, которые упомянуты выше, применяются и в этой области. Однако при контроле герметичности арматуры и трубопроводной арматуры руководствуются не только нормативными документами.

Появление значимых утечек на производстве может существенно влиять на экономические показатели. На электростанциях, которые используют дымовые газы и пар для выработки электроэнергии, сотни единиц различного вида запорной арматуры, которые учувствуют в перераспреде-

лении материальных потоков высокого давления. И даже небольшие утечки могут давать существенный экономический эффект. Следует отметить, что герметичность запорной арматуры приходится часто оценивать с помощью косвенных измерений. Отличительной особенностью использования данного метода для анализа размеров утечек является применение большого количества новых способов обработки данных наряду со старыми спектральными методами.

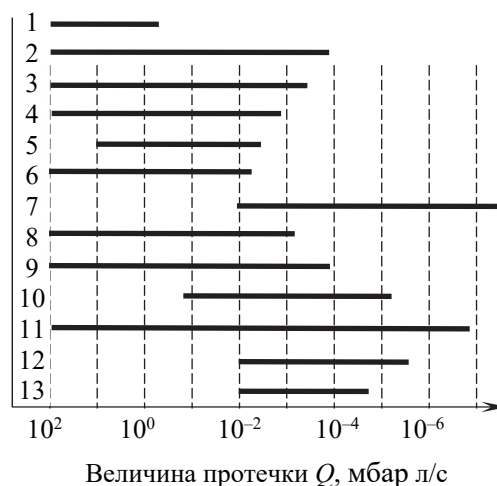


Рис. 4. Базовые пределы методов контроля герметичности:

- 1 — ультразвук; 2 — пузырьковый (с мылом);
- 3 — пузырьковый (гелий, спирт);
- 4 — погружения в воду (пузырьки);
- 5 — акустический; 6 — падение давления (без диф. давления); 7 — падение давления (с диф. давлением); 8 — падение вакуума;
- 9 — термопроводимость;
- 10 — использование галогенов;
- 11 — детектор водорода; 12 — вакуумная камера для проверки на утечку гелия изнутри;
- 13 — проверка на утечку гелия снаружи внутри

В целом оценка скорости утечки может быть выполнена двумя способами. Первый использует аналитические методы, основанные на известных физических соотношениях, из которых выводятся эмпирические выражения. Эти модели требуют эмпирических входных данных, поскольку проблема слишком сложна для моделирования с помощью чисто аналитических выражений. Наиболее релевантный пример этого метода был опубликован в работе [17], согласно которому скорость утечки двух типов клапанов определялась с помощью известной зависимости между акустической эмиссией и скоростью утечки. Второй способ оценки утечек — прямое сравнение с другими клапанами, которые, как известно, имеют утечки. Данные с этих эталонных негерметичных клапанов собираются на испытательном стенде. Метод сравнения между новым негерметичным клапаном

и эталонным набором может быть выполнен, например, с помощью регрессии [18]. В качестве данных для автоматического обнаружения и оценки могут быть использованы метод акустической эмиссии [19, 20, 21], измерение вибраций [22], динамика давления [23], тепловые эффекты [24].

Анализ данных можно проводить на основании частотных спектров для предоставления характеристик сигнатуры, определения среднеквадратических отклонений во временной области [25], вейвлет-преобразований [26], нейронных сетей [27], машинного обучения [28].

Такое разнообразие подходов затрудняет выбор лучшего варианта. Одни варианты обработки измерительной информации с датчика давления или акустического преобразователя (рис. 5) достаточно просты, другие требуют применения устройств с высокой вычислительной способностью. Лучший вариант до сих пор обсуждается [29].

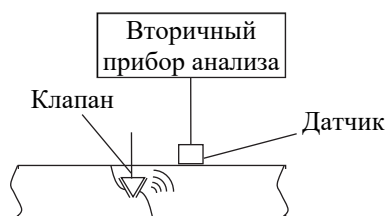


Рис. 5. Система акустического контроля герметичности

Считается, что метод акустической эмиссии (АЭ) может обеспечить более раннее обнаружение проблем с клапаном по сравнению с вибрацией, поскольку он менее восприимчив к шумам оборудования и более чувствителен к потокам жидкости и деформациям материала на микроскопическом уровне. АЭ с его широким диапазоном частот (от 100 кГц до 4 МГц) может улавливать характеристики динамики клапана и динамики потока, что обеспечивает более прямой способ обнаружения аномальных ударов и потоков клапана во время залипания. Относительно АЭ количество методов анализа во временной и частотной областях достаточно велико: кратковременное преобразование Фурье (STFT), быстрое преобразование Фурье (FFT), дискретное вейвлет-преобразование (DWT), вейвлет-пакетное преобразование (WPT), метод разложения ансамбля эмпирических мод (EEMD), метод локального среднего разложения (LMD) и алгоритм снижения размерности на основе главных компонент (PCA) и базисное преследование и сопоставление волн.

Контроль герметичности распределенных систем. Данное направление разработки методов и практик определения герметичности трубопроводных систем в последние годы развивается наиболее интенсивно. Это обусловлено многими причинами. Трубопроводная сеть постоянно рас-

ширяется, но данный вид транспорта не является абсолютно надежным. Трубы подвержены коррозии, существует также много внешних причин, которые приводят к утечкам. Потери в трубопроводах приводят в основном к экономическим потерям, тогда как утечки на газо- и нефтепроводах влекут за собой также экологические угрозы, ухудшают безопасность и т. д. Существуют и другие продукты, которые перемещаются с помощью трубопроводов со своими рисками.

В последнее время было опубликовано несколько обзоров в данном направлении, например [30, 31, 32, 33, 34].

Другие указывают на трудность построения четкой классификации и необходимость проведения декомпозиции методов обнаружения утечек по различным согласованным категориям. Выделяют следующие критерии [32]:

- аппаратная (техническое оформление метода контроля утечек);
- вычислительная (какие методы обработки лежат в основе)
- мобильность (физические аспекты как структура, мобильность, размещение);
- размещение (близость к трубопроводным системам) и т. д.

Каждый из коллективов авторов предоставляет свое видение подходов к классификации методов контроля герметичности. Классификации похожи, но придерживаются в каждом случае своих методологии и критериев. Один из вариантов представлен на рис. 6.

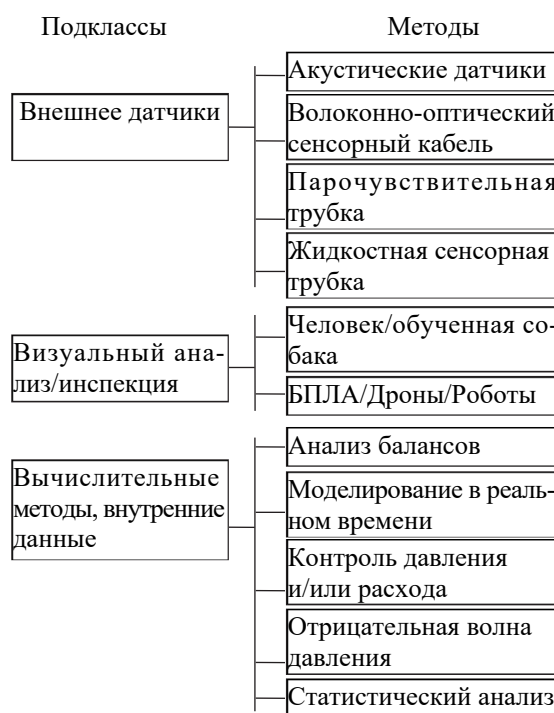


Рис. 6. Методы анализа герметичности распределенных трубопроводных систем

Как и в предыдущем случае, при обнаружении утечек трубопроводных систем используется большое количество математических методов обработки данных.

Статистический анализ является наиболее распространенным методом: анализ главных компонент (PCA); анализ независимых компонент (ICA), используется для пространственного уплотнения данных без потери достоверной информации; системы байесовского анализа (BIS); системы нечеткой обработки (FIS); линейный фильтр Калмана (KF); регрессия опорных векторов (SVR); теория графов; вейвлет-анализ; лагранжевые модели. Широко используются инструменты машинного обучения: искусственные нейронные сети (ANN); опорные векторные машины (SVM). Комбинация выше указанных методов позволяет построить гибридные решения по поиску утечек. Достаточно часто для обнаружения утечек используют методы модели переходного процесса в реальном времени (RTTM) и волновой анализ отрицательного давления (NPW) [35]. При RTTM утечка определяется по заметному отличию расчетных величин от замеров расхода в начале и конце трубы и промежуточных давлений. Фиксация прохождения волн падения давления, которые исходят от места утечки, лежит в основе NPW. Последние методы часто комбинируют.

Из обсуждения проблемы контроля герметичности распределенных сетей следует, что, в отличие от предыдущих областей, эффективную систему обнаружения утечек и их локализации невозможно построить без серьезного анализа данных, составления математических моделей наблюдаемых трубопроводных систем.

Некоторые авторы высказывают идею, что наиболее верной стратегией является использование гибридных решений. При этом выбирать следует, по возможности, ортогональные варианты.

Математические методы позволяют обнаружить наличие утечки, однако для локализации

рекомендуется использовать методы АЭ, растворы или визуальный анализ. Также хорошо использовать для этой цели волоконно-оптическое зондирование DTS или DAS. Однако для этого требуются большие первоначальные капитальные затраты. Следует отметить, что существуют ограничения на использование некоторых технологий для морских трубопроводов.

Заключение. Из приведенного анализа в статье следует, что в последние два десятилетия проблема анализа герметичности актуализировалась. Однако в зависимости от приложения развитие методов анализа герметичности происходит в разном ключе. На предприятиях, где анализ герметичности является встроенной операцией технологического цикла, имеется устойчивый набор приборов и установок, чаще всего промышленного изготовления. В данном направлении происходит только совершенствование методик испытаний, развитие дизайна для удобства оператора, повышение быстродействия автоматизации с интеграцией в общую систему управления предприятия.

В двух других направлениях происходит интенсивное развитие методологии диагностики протечек. Много усилий направлено на использование машинного обучения, нейронных сетей и других вычислительных методов, которые появились относительно недавно. Использование машинного обучения, которое так популярно в последнее время, сдерживается необходимостью и длительностью процесса обучения на реальных объектах.

В настоящее время активно развиваются методы диагностики с использованием беспилотных систем. В области сенсорики динамично развиваются детекторы ионизации пламени, инфракрасные камеры, ультразвуковые обнаружители утечек, а также оптические системы дистанционного зондирования и тепловизионный анализ.

Список литературы

1. Сухорукова И. Г. Анализ методов измерения герметичности конструкций для автоматического испытания запорной арматуры // Труды БГТУ. 2010. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 125–129.
2. Hilleret N. Leak Detection. CERN, Geneva, Switzerland. 203–212. 1999. Report number, CERN-OPEN-2000-280.
3. Методы контроля и испытаний. Арматура трубопроводная: ГОСТ 33257-2015. М.: Стандартинформ, 2016. 58 с.
4. American Petroleum Institute (API). API Standard 521: Pressure-relieving and Depressuring Systems. 6th ed. Washington, D.C: API Publishing, 2014. 260 p.
5. American Petroleum Institute (API). ANSI/API Standard 598: Valve Inspection and Testing. 11th ed. Washington, D.C: API Publishing, 2023. 17 p.
6. International Standard Organization (ISO). ISO 5208: Industrial valves – Pressure testing of metallic valves. 4th ed. Switzerland: ISO Publishing, 2015. 13 p.
7. Manufacturers Standardization Society of the Valve and Fittings Industry, Inc. (MSS). Standard MSS SP-61-2019: Pressure Testing of Valves. Vienna, Virginia: MSS Publishing, 2019. 8 p.
8. American Petroleum Institute (API). ANSI/API Standard 6D: Specification for Pipeline and Piping Valves. 24th ed. Washington, D.C: API Publishing, 2014. 112 p.

9. European Standard. EN-12266-1:2012: Industrial Valves – Testing of Metallic Valves. Part 1. Pressure Tests, Test Procedures and Acceptance Criteria – Mandatory Requirements. Brussels: European Committee for Standardization, 2012. 17 p.
10. British Standards Institute (BSI). BS 6755-1: 1986. Testing of valves. Part 1. Specification for production pressure testing requirements. London: BSI Publishing, 1986. 14 p.
11. American National Standard Institute (ANSI). ANSI/FCI 70-2-2021. Control Valve Seat Leakage. Cleveland, OH: Fluids Controls Institute, 2021. 12 p.
12. Leak Test Handbook Measuring, Testing, Practical Use. URL: https://www.jwf.com/fileadmin/userupload/downloadfiles/200423-jwf-lecktestfibel_EN_LOWRES.pdf (accessed 13.12.2024).
13. Werner G. B. Helium leak detectors: from a laboratory device to dedicated industrial leak test units // Vacuum. 1993. Vol. 44, issues 5–7. P. 627–632. DOI: 10.1016/0042-207X(93)90112-N.
14. Сухорукова И. Г., Гринюк Д. А., Оробей И. О. Повышение чувствительности измерителя протечек запорной арматуры // Труды БГТУ. 2015. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 132–136.
15. Сухорукова И. Г., Гринюк Д. А., Оробей И. О. Влияние условий фильтрации и сглаживания в информационных каналах на критерий серий // Труды БГТУ. 2016. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 117–121.
16. Study on Leak Testing Methods / R. Bhosale [et al.]. 2017. URL: <https://www.researchgate.net/publication/323219717> (accessed 13.12.2024).
17. Kaewwaewnoi W., Prateepasen A., Kaewtrakulpong P. Investigation of the relationship between internal fluid leakage through a valve and the acoustic emission generated from the leakage // Measurement. 2010. Vol. 43. P. 274–282.
18. Wagner H. Innovative techniques to deal with leaking valves // Tech Papers ISA. 2004. Vol. 454. P. 105–117.
19. A study of the characteristics of the acoustic emission signals for condition monitoring of check valves in nuclear power plants / J. H. Lee [et al.] // Nuclear Eng Des. 2006. Vol. 236. P. 1411–1421.
20. Novel leakage detection method by improved adaptive filtering and pattern recognition based on acoustic waves / Z. Chi [et al.] // International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence. 2022. Vol. 36 (2). P. 2259001. DOI: 10.1142/S0218001422590017.
21. Pouye A., Rondeau A., Lafargue E. Acoustic Emissions – Application on Industrial Valve Leak Rate Quantification // 29th International Congress on Sound and Vibration 9–13 July 2023. Prauge, Czech Republic, 2023. P. 1–8.
22. Thompson G., Zolkiewski G. Experimental investigation into the detection of internal leakage of gases through valves by vibration analysis // Proc Inst Mech Eng. Part E. J Process Mech Eng., 1997. Vol. 211. P. 195–207.
23. Online valve monitoring systems used on off-shore platforms in the north sea / T. Juvik [et al.] // In 21st International Conference on Off-shore Mechanics and Arctic Engineering. Oslo, Norway, 5, 2002. P. 1–5. DOI: 10.1115/OMAE2002-28403.
24. Hamilton S., Charalambous B. Leak Detection: Technology and Implementation. IWA Publishing. 2013. 112 p. DOI: 10.2166/9781789060850.
25. Quantification of valve leakage rates / E. Meland // American Institute of Chemical Engineers Journal. 2012. Vol. 58 (4). P. 1181–1193. DOI: 10.1002/aic.12630.
26. Investigation of Pressure Signal and Leak Detection in Pipes by Using Wavelet Transform in Transient Flow / R. N. Vafaei [et al.] // Engineering Proceedings. 2024. Vol. 69 (1). P. 76. DOI: 10.3390/engproc2024069076.
27. Convolutional neural networks-based valve internal leakage recognition model / S.-B. Zhu [et al.] // Measurement. 2021. Vol. 178. P. 109395. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109395.
28. Machine learning modeling for spectral transient-based leak detection / V. Asghari [et al.] // Automation in Construction. 2023. Vol. 146. P. 104686. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104686.
29. Detection and estimation of valve leakage losses in reciprocating compressor using acoustic emission technique / H. Y. Sim [et al.] // Measurement. 2020. Vol. 152. P. 107315. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.107315.
30. A review on current technologies and future direction of water leakage detection in water distribution network / M. R. Islam [et al.] // IEEE Access. 2022. Vol. 10. P. 107177–107201. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3212769.
31. Literature review of data analytics for leak detection in water distribution networks: A focus on pressure and flow smart sensors / X. Wan [et al.] // Journal of Water Resources Planning and Management. 2022. Vol. 148 (10). P. 03122002. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001597.
32. Review and analysis of pipeline leak detection methods / N. V. S. Korlapati [et al.] // Journal of Pipeline Science and Engineering. 2022. Vol. 2, issue 4. P. 100074. DOI: 10.1016/j.jpse.2022.100074.
33. Leak detection and localization in water distribution networks: Review and perspective / L. Romero-Ben [et al.] // Annual Reviews in Control. 2023. Vol. 55. P. 392–419. DOI: 10.1016/j.arcontrol.2023.03.012.

34. A Review of Leakage Detection Strategies for Pressurised Pipeline in Steady-State / D. Zaman [et al.] // *Engineering Failure Analysis*. 2019. P. 104264. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.104264.

35. Альперович И. В. Численные эксперименты с методом RTFS на математической модели отборов из нефтепровода при стационарном режиме перекачки // *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья*. 2023. № 2. С. 11–15.

References

1. Sukhorukova I. G. Analysis of methods for measuring the tightness of structures for automatic testing of shut-off valves. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2010, no. 6, Physics and Mathematics. Informatics, pp. 125–129 (In Russian).
2. Hilleret N. Leak Detection. CERN, Geneva, Switzerland, 203–212, 1999, Report number, CERN-OPEN-2000-280.
3. GOST 33257–2015. Methods of control and testing. Pipeline fittings. Moscow, Standartinform Publ., 2016, 58 p. (In Russian).
4. American Petroleum Institute (API). API Standard 521: Pressure-relieving and Depressuring Systems. 6th ed. Washington, D.C., API Publishing, 2014. 260 p.
5. American Petroleum Institute (API). ANSI/API Standard 598: Valve Inspection and Testing. 11th ed. Washington, D.C., API Publishing, 2023. 17 p.
6. International Standard Organization (ISO). ISO 5208: Industrial valves – Pressure testing of metallic valves. 4th ed. Switzerland, ISO Publishing, 2015. 13 p.
7. Manufacturers Standardization Society of the Valve and Fittings Industry, Inc. (MSS). Standard MSS SP-61-2019: Pressure Testing of Valves. Vienna, Virginia, MSS Publishing, 2013. 8 p.
8. American Petroleum Institute (API). ANSI/API Standard 6D: Specification for Pipeline and Piping Valves. 24rd ed. Washington, D.C, API Publishing, 2014. 112 p.
9. European Standard. EN-12266-1:2012: Industrial Valves – Testing of Metallic Valves. Part 1. Pressure Tests, Test Procedures and Acceptance Criteria – Mandatory Requirements. Brussels, European Committee for Standardization Publ., 2012. 17 p.
10. British Standards Institute (BSI). BS 6755-1: 1986. Testing of valves. Part 1. Specification for production pressure testing requirements, 1986. 14 p.
11. American National Standard Institute (ANSI). ANSI/FCI 70-2-2013. Control Valve Seat Leakage. Cleveland, OH, Fluids Controls Institute Publ., 2013. 12 p.
12. Leak Test Handbook Measuring, Testing, Practical Use. Available at: https://www.jwf.com/fileadmin/userupload/downloadfiles/200423-jwf-lecktestfibel_EN_LOWRES.pdf (accessed 13.12.2024).
13. Werner G. B. Helium leak detectors: from a laboratory device to dedicated industrial leak test units. *Vacuum*, 1993, vol. 44, issues 5–7, pp. 627–632. DOI: 10.1016/0042-207X(93)90112-N.
14. Suhorukova I. G., Hryniuk D. A., Orobey I. O. Increasing the sensitivity of the leakage meter for shut-off valves. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 6: Physics and Mathematics. Informatics, pp. 132–136 (In Russian).
15. Suhorukova I. G., Hryniuk D. A., Orobey I. O. The influence of filtering and smoothing conditions in information channels on the series criterion. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 6: Physics and Mathematics. Informatics, pp. 117–121 (In Russian).
16. Bhosale R., Kumbhar P., Mahajan K., Yachkal A., Katarkar Anil. Study on Leak Testing Methods, 2017. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/323219717> (accessed 13.12.2024).
17. Kaewwaewnoi W., Prateepasen A., Kaewtrakulpong P. Investigation of the relationship between internal fluid leakage through a valve and the acoustic emission generated from the leakage. *Measurement*, 2010, vol. 43, pp. 274–282.
18. Wagner H. Innovative techniques to deal with leaking valves. *Tech Papers ISA*, 2004, vol. 454, pp. 105–117.
19. Lee J. H., Lee M. R., Kim J. T., Luk V., Jung Y. H. A study of the characteristics of the acoustic emission signals for condition monitoring of check valves in nuclear power plants. *Nuclear Eng Des*, 2006, vol. 236, pp. 1411–1421.
20. Chi Z., Jiang J., Diao X., Chen Q., Ni L., Wang Z., Shen G. Novel leakage detection method by improved adaptive filtering and pattern recognition based on acoustic waves. *Int. J. of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2022, vol. 36 (2), p. 2259001. DOI: 10.1142/S0218001422590017.
21. Pouye A., Rondeau A., Lafargue E. Acoustic Emissions – Application on Industrial Valve Leak Rate Quantification. *29th International Congress on Sound and Vibration 9–13 July, 2023*. Prague, Czech Republic, 2023, pp. 1–8.
22. Thompson G, Zolkiewski G. Experimental investigation into the detection of internal leakage of gases through valves by vibration analysis. *Proc Inst Mech Eng. Part E. J Process Mech Eng*, 1997, vol. 211, pp. 195–207.

23. Juvik T., Hermansen T., Carr R., Hale S. Online valve monitoring systems used on off-shore platforms in the north sea. In *21st International Conference on Off-shore Mechanics and Arctic Engineering*. Oslo, Norway, 5, 2002, pp. 1–5. DOI: 10.1115/OMAE2002-28403.
24. Hamilton S., Charalambous B. Leak Detection: Technology and Implementation. IWA Publishing, 2013, 112 p. DOI: 10.2166/9781789060850.
25. Meland E., Thornhill N., Lunde E., Rasmussen M. Quantification of valve leakage rates. *American Institute of Chemical Engineers Journal*, 2012, vol. 58 (4), pp. 1181–1193.
26. Vafaei R. N., Nadian H. A., Ranzi R., Rahmanshahi M., Bejestan M. S. Investigation of Pressure Signal and Leak Detection in Pipes by Using Wavelet Transform in Transient Flow. *Engineering Proceedings*, 2024, vol. 69 (1), p. 76. DOI: 10.3390/engproc2024069076.
27. Zhu S.-B., Li Z.-L., Li X., Xu H.-h., Wang X., Convolutional neural networks-based valve internal leakage recognition model. *Measurement*, 2021, vol. 178, pp. 109395. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.109395.
28. Asghari V., Kazemi M. H., Duan H.-F., Hsu S.-C., Keramat A. Machine learning modeling for spectral transient-based leak detection. *Automation in Construction*, 2023, vol. 146, p. 104686. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104686.
29. Sim H. Y., Ramli R., Saifizul A., Soong M. F. Detection and estimation of valve leakage losses in reciprocating compressor using acoustic emission technique. *Measurement*, 2020, vol. 152, p. 107315. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.107315.
30. Islam M. R., Azam S., Shanmugam B., Mathur D. A review on current technologies and future direction of water leakage detection in water distribution network. *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 107177–107201. DOI: 10.1109/access.2022.3212769.
31. Wan X., Kuhanestani P. K., Farmani R., Keedwell E. Literature review of data analytics for leak detection in water distribution networks: A focus on pressure and flow smart sensors. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2022, vol. 148 (10), p. 03122002. DOI: 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001597.
32. Korlapati N. V. S., Khan F., Noor Q., Mirza S., Vaddiraju S. Review and analysis of pipeline leak detection methods. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 2022, vol. 2, issue. 4, p. 100074. DOI: 10.1016/j.jpse.2022.100074.
33. Romero-Ben L., Alves D., Blesa J., Cembrano G., Puig V., Duviella E. Leak detection and localization in water distribution networks: Review and perspective. *Annual Reviews in Control*, 2023, vol. 55, pp. 392–419. DOI: 10.1016/j.arcontrol.2023.03.012.
34. Zaman D., Tiwari M. K., Gupta A. K., Sen D. A. Review of Leakage Detection Strategies for Pressurised Pipeline in Steady-State. *Engineering Failure Analysis*, 2019, p. 104264. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.104264.
35. Alperovich I. V. Numerical experiments with the RTFS method on a mathematical model of selections from an oil pipeline under a steady-state pumping mode. *Transport i khraneniye nefteproduktov i uglevodorodnogo syr'ya* [Transportation and storage of petroleum products and hydrocarbon raw materials], 2023, no. 2, pp. 11–15. (In Russian).

Информация об авторах

Гринюк Дмитрий Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: hryniukda@gmail.com

Сухорукова Ирина Геннадьевна – старший преподаватель кафедры программной инженерии. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: irina_x@rambler.ru

Олиферович Надежда Михайловна – старший преподаватель кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: oliferovich@belstu.by

Information about the authors

Hryniuk Dzmitry Anatol'yevich – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: hryniukda@gmail.com

Suhorukova Irina Gennad'yevna – Senior Lecturer, the Department of Software Engineering. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: irina_x@rambler.ru

Oliferovich Nadezhda Mikhaylovna – Senior Lecturer, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: oliferovich@belstu.by

Поступила после доработки 15.01.2025