

**Чекурін В.Ф.**

Інститут прикладних проблем механіки і математики імені Я.С. Підстригача  
Національної академії наук України

**Химко О.М.**

Національний університет «Львівська політехніка»

## МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ВИЯВЛЕННЯ ТА ІДЕНТИФІКАЦІЇ ВИТОКІВ У МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДАХ

*Розроблено структуру та алгоритм функціонування системи виявлення витоків із магістральних газопроводів. Робота системи базується на раніше запропонованих авторами математичних моделях та методах. Вхідними даними для неї є результати моніторингу газодинамічних параметрів потоків у трубопроводі за стаціонарних режимів експлуатації. Запропонована система розглядається як складова частина комп'ютеризованої системи управління газотранспортними системами, збудованої на засадах MES. Результати роботи можна використати під час створення таких систем.*

**Ключові слова:** програмно-технічні рішення, автоматизація управління виробництвом, виявлення та ідентифікація витоків, алгоритмічні методи, обчислювальний моніторинг.

**Постановка проблеми.** Неконтрольована розгерметизація трубопроводу створює аварійно-небезпечні ситуації, екологічні загрози і може призводити до значних економічних втрат. Порушення суцільності трубопроводів і зумовлені ними витoki можуть спричинити: наскрізні дефекти тіла труби, які виникають внаслідок корозійних процесів, розриви нитки трубопроводу, зумовлені тектонічними процесами чи господарською діяльністю, несанкціоноване приєднання відводів до трубопроводів тощо. Щоб знизити рівень загроз, пов'язаних із витокami флюїдів із трубопроводів, використовують системи виявлення витоків (СВВ). Їхнє застосування в деяких країнах регламентують спеціальні нормативні документи. У США це рекомендації Американського інституту нафти API 1130 [4]. У ФРН застосовують норми "Technische Regeln für Fernleitungen" (TRFL) [5].

Проблема виявлення витоків із магістральних газопроводів актуальна і для української газотранспортної системи (ГТС) [3; 4]. Тому розроблення комп'ютеризованих систем для виявлення та ідентифікації витоків із магістральних газопроводів має важливе наукове і практичне значення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Існує кілька підходів вирішення цієї проблеми. Останнім часом інтенсивно розвиваються методи, які базуються на аналізі змін фізичних параметрів флюїду

всередині трубопроводу. Серед них варто виокремити методи обчислювального моніторингу, які базуються на неперервному вимірюванні параметрів потоку флюїду в трубі з метою виявлення інформативних ознак, які свідчать про наявність витoku [5]. Основним складником СВВ, які базуються на таких методах, є програмне забезпечення, що реалізує алгоритм відбору даних та виявлення в них інформативних ознак на фоні шумів, які супроводжують нормальне функціонування транспортної магістралі, та сигналів, спричинених чинниками, які не пов'язані із розгерметизацією. Тобто СВВ такого типу являють собою так звані Software Intensive System. До цього класу належать, зокрема, СВВ, які базуються на методах моделювання перехідних процесів у реальному часі RTTM (англ. Real Time Transient Modeling) [6].

Відомі світові компанії, такі як Argosy Technologies, Krone, PSI, Siemens, пропонують готові програмно-технічні рішення для виявлення й ідентифікації витоків флюїдів із трубопроводів, які використовують методи обчислювального моніторингу. Проте їхня вартість занадто висока. До того ж, ці рішення не враховують реалій української газотранспортної системи, а їхня адаптація до наших умов, як і подальший супровід, вимагає значних додаткових затрат. Оскільки компанії виробники, як правило, не розкривають деталей реалізації цих систем, існує суспільний запит на

розроблення теоретичних засад, математичного апарату, принципів функціонування, структури й алгоритмів роботи систем виявлення витоків із магістральних газопроводів. Все це дасть змогу створювати такі системи ab initio (лат. «від початку») власними силами, враховуючи в технічному завданні специфічні властивості української ГТС, її актуальний стан та перспективи розвитку.

У статті [7] запропоновані математична модель, методи та алгоритми, сформульовані та чисельно досліджені відповідні обернені задачі для виявлення та ідентифікації витоків із магістральних трубопроводів за даними моніторингу, отриманими за стаціонарних режимів їхньої експлуатації.

**Постановка завдання.** Метою роботи є розроблення на цій основі архітектури і алгоритмів функціонування СВВ як складника комп'ютеризованої системи управління (КСУ) газотранспортними системами, створеної на засадах MES (Manufacturing Execution Systems).

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

**Теоретичні засади функціонування СВВ.**

Згідно з методом, розробленим у статті [7], виявлення та ідентифікація витоків базується на даних моніторингу тиску  $P$  та температури  $T$  газу в трубі, а також температури  $T_{amb}$  середовища, в якому вона прокладена, на вході та виході газопроводу та ще у кількох точках вздовж його траси (рис. 1).

Дані моніторингу цих параметрів, отримані за стаціонарних режимів функціонування газопроводу, використовуються як вхідні для обернених задач виявлення витоків, визначення місця розгерметизації та оцінки його інтенсивності (рис. 2).

Математичні методи, які використовуються у цьому підході, базуються на нелінійній моделі

динаміки газу у трубі, яка містить рівняння неперервності, балансу імпульсу та нелінійне рівняння стану для газових сумішей. Для випадку стаціонарного потоку ця модель зведена до нелінійного диференціального рівняння першого порядку [8]. Для виявлення витоків, визначення місця розгерметизації трубопроводу та оцінки інтенсивності витоків запропоновані варіаційні формулювання відповідних обернених задач. Для розв'язування цих задач розроблені ітераційні алгоритми, які базуються на методі Ньютона [9, с. 262] та чисельному розв'язуванні двох крайових задач для нелінійного диференціального рівняння. Крайові умови для цих задач формулюються із використанням даних моніторингу. Для розв'язування цих задач використовуються алгоритми, які базуються на методах Рунге-Кутти [9, с. 439].

**Аналіз предметної області.** Як бачимо, функціонування системи базується на даних моніторингу газодинамічних процесів у трубі. Ці дані можуть використовувати також і різні підсистеми, які входять до складу комп'ютеризованої системи управління (КСУ) ГТС, наприклад, підсистеми моделювання режимів роботи ГТС, оптимізації її конфігурації чи режимів експлуатації компресорних станцій тощо. Тож, СВВ доцільно створювати як складову частину КСУ ГТС. Тому важливо визначити місце СВВ у структурі КСУ ГТС і її взаємодію з іншими підсистемами КСУ.

Архітектура і функціональність КСУ ГТС, досліджувалися, зокрема, у публікаціях [10–13]. У статтях [12; 13] запропоновано створювати такі системи на засадах MES за методологією, представленою стандартом ANSI/ISA-95 (ISO/IEC-62264). Аналіз функціональності КСУ ГТС проведений у

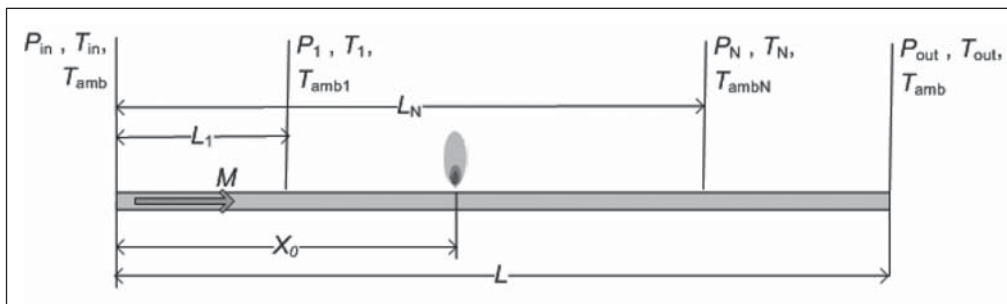


Рис. 1. Схема газопроводу з витком

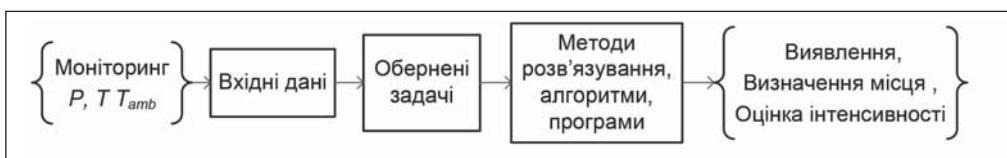


Рис. 2. Загальна схема реалізації методу

статті [10], визначає чотири основні функції управління, які спрямовані на бізнес процеси, інформаційні процеси, забезпечення транспортування газу та експлуатацію споруд ГТС (рис. 3).

На схемі рис. 3 показано місце у структурі функцій управління ГТС для функцій виявлення та ідентифікації витоків. Як випливає з цього рисунку, СВВ входить до складу системи управління транспортуванням газу (СУТГ), яка є невід’ємною частиною КСУ ГТС. Функції СУТГ в організаційній структурі ГТС виконує диспетчерське управління. Згідно з відомою моделлю PERA функціональної ієрархії виробничих підприємств [14] ці функції належать до третього рівня (оперативного) управління. На рис. 4 ця модель показана у застосуванні до управлінні ГТС, в частині її діяльності в забезпеченні транспортування газу.

Концепція MES-систем була створена для автоматизації управління на оперативному рівні.

Нульовий рівень моделі PERA визначає технологічні процеси, які реалізуються використанням технологічного обладнання ГТС.

Перший рівень моделі відповідає за безпосереднє керування фізичними процесами та пер-

винний контроль їхніх параметрів. Тут діють сенсори й актуатори. Інформаційні процеси тут протікають у реальному часі фізичних процесів – їхні параметри змінюються на часових періодах порядку секунд і менших.

Другий рівень відповідає за контроль і моніторинг параметрів фізичних процесів нульового рівня, роботу технологічного обладнання, стану довкілля тощо. Для цього він використовує сигнали, які надходять із першого сенсорного рівня. Процеси другого рівня характеризуються проміжками порядку годин, хвилин, секунд і меншими.

Третій рівень є проміжним між нижніми рівнями та рівнем бізнес-планування та логістики. Тривалості процесів на цьому рівні визначаються днями, робочими змінами, годинами, хвилинами і секундами.

Четвертий рівень функціональної ієрархії (рівень бізнес-логістики та планування) охоплює управління комерційними процесами, які визначають виробничу діяльність усього підприємства.

Загальна структура програмно-апаратного комплексу КСУ ГТС розглянута у статті [13].

**Структура СВВ та алгоритм її функціонування.** СВВ, як зазначалося, діє на третьому

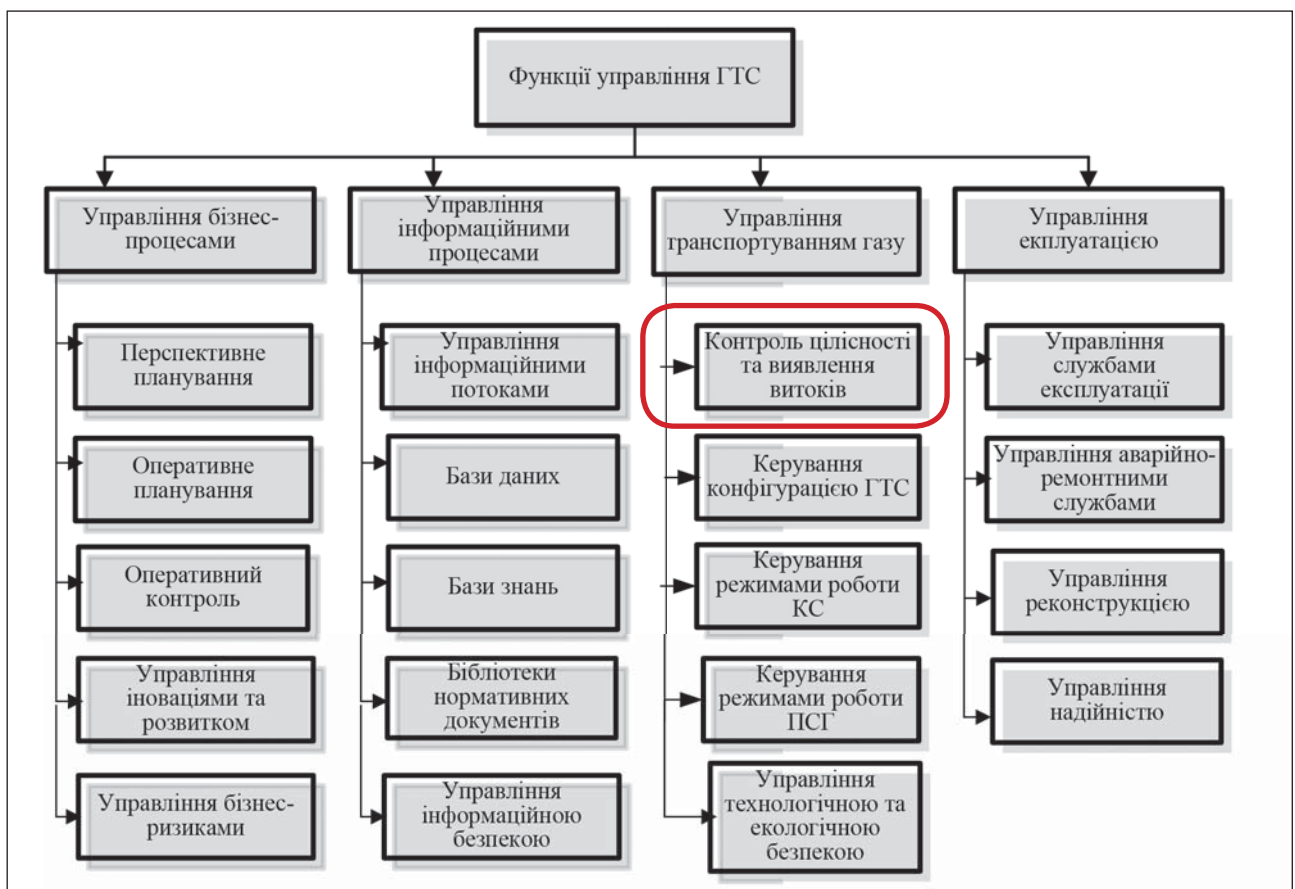


Рис. 3. Функції КСУ ГТС

рівні моделі PERA як складова частина системи управління транспортуванням газу. Результати моніторингу інформативних параметрів для СВВ формуються на першому та другому рівнях. СВВ отримує їх із другого рівня (наприклад від SCADA системи), використовуючи комунікаційні мережі другого та третього рівнів. На цій основі система формує вхідні дані для обернених задач. За необхідності отримує необхідну інформацію з баз даних інформаційної системи, використовуючи мережу третього рівня, отже, створює цифрову модель цих задач і здійснює відповідні обчислення. Результати обчислень система передає мережею третього рівня до баз даних інформаційної системи. Тут доступ до цієї інформації можуть отримати суб'єкти третього та четвертого

рівнів. Таким чином, СВВ використовує інформаційні ресурси та комунікаційні канали КСУ ГТС.

Основними елементами СВВ (рис. 5) є системи відбору даних, виявлення витоків, визначення місця витoku та система ідентифікації параметрів моделі. До складу СВВ входять також система аудиту з журналом та система інформування. СВВ взаємодіє із SCADA системою ГТС, базами даних структурних елементів ГТС і параметрів математичної моделі. Система ідентифікації параметрів моделі використовує дані моніторингу для уточнення значень параметрів математичної моделі, які можуть змінюватися в процесі експлуатації ГТС.

На основі отриманих даних (рис. 6) СВВ здійснює чисельну реалізацію цих задач і приймає рішення щодо наявності чи відсутності витoku на контрольованій ділянці. Інформації про прийняте рішення передається у систему аудиту і фіксується у відповідному журналі, захищеному від модифікації, та в систему інформування. Інформація про виявлену подію разом із необхідними даними передається в систему визначення місця витoku. У разі виявлення розгерметизації ця система формулює задачу визначення місця витoku для ділянки, в якій виявлено розгерметизацію, розв'язує. Результат розв'язування цієї задачі, який містить координату місця витoku, його інтенсивність та точності, з якими ці дані були встановлені, передається в бази даних інформаційної системи та в систему інформування.

Зібрані у кожному циклі дані і результати розрахунків, проведених підсистемами виявлення, визначення місця витoku, передаються у підсистему ідентифікації параметрів. На цій основі вона формулює обернені задачі визначення параметрів моделі, які можуть змінюватися в процесі експлуатації ГТС. Це термодинамічні властивості транспортованого газу, гідравлічні опори труб та місцеві опори, коефіцієнти теплообміну газу з довкіллям тощо. Результати розв'язування цих задач передаються в базу даних параметрів математичної моделі і використовуються у подальших циклах роботи СВВ.

**Висновки.** Запропонована структурна модель та алгоритм роботи СВВ, яка реалізує запропоновані раніше підходи та математичний апарат для розв'язування задач виявлення

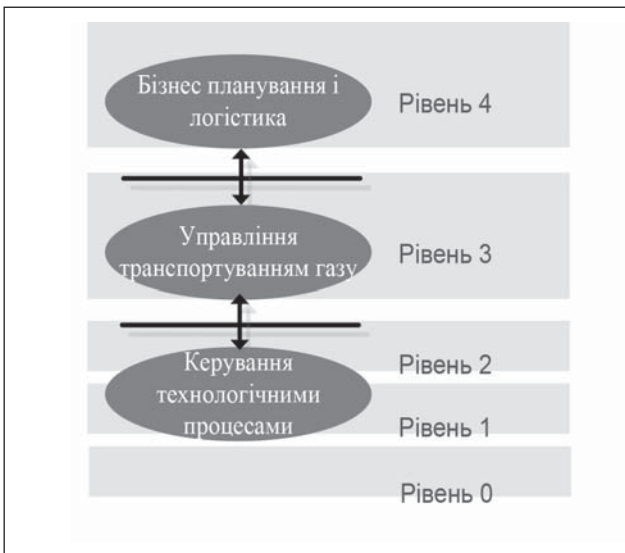


Рис. 4. Модель PERA ієрархії управління ГТС

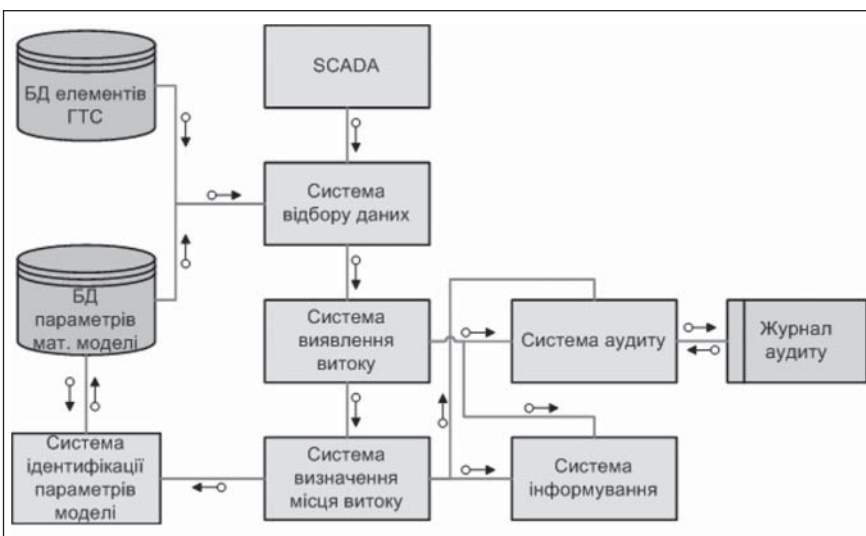


Рис. 5. Структура СВВ

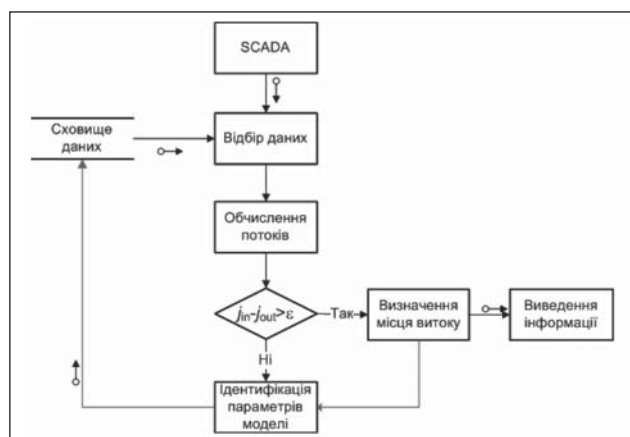


Рис. 6. Спрощений алгоритм роботи СВВ

витоків із магістральних газопроводів у стаціонарних режимах експлуатації.

СВВ варто розробляти як підсистему системи управління транспортуванням газу – невід’ємної

частини КСУ ГТС. СУТГ діє на третьому рівні управління (згідно з моделлю функціонально ієрархії PERA), її доцільно створювати як MES систему, використовуючи міжнародні стандарти. Це дасть змогу зберегти наявні системи автоматизації другого та четвертого рівнів управління.

Впровадження в ГТС України СВВ такого типу дасть змогу значно підвищити рівень екологічної безпеки, знизити ризики виникнення аварійних ситуацій, викликаних неконтрольованою розгерметизацією магістральних газопроводів, та можливі економічні втрати. До того ж, використання СВВ у трубопроводному транспорті відповідає сучасним міжнародним вимогам екологічної безпеки.

У подальших дослідженнях варто розглянути методи виявлення витоків у нестационарних режимах роботи газопроводів.

#### Список літератури:

1. API 1130 Computational Pipeline Monitoring for Liquid Pipelines. URL: <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/002/api.1130.2002.pdf> (дата звернення 25.01.2018).
2. Technische Regel für Rohrfernleitungen. URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Technische\\_Regel\\_für\\_Rohrfernleitungen](https://de.wikipedia.org/wiki/Technische_Regel_für_Rohrfernleitungen) (дата звернення 25.01.1918).
3. Вакалюк Я.І., Карпаш О.М. Вибір методу визначення місць витоків газу з підземних газопроводів. Методи та прилади контролю якості. 2013. № 1 (30). С. 55–63.
4. Яворський А.В., Карпаш О.М., Рибіцький І.В. Підходи до виявлення витоків газу з лінійної частини магістральних газопроводів у зонах геодинамічного ризику. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2011. № 1(38). С. 113–119.
5. Murvay P.-S., Silea I. A survey on gas leak detection and localization techniques. Journal of Loss Prevention in the Process Industry. 2012. 25. Pp. 966–973.
6. Geiger G. State-of-the-Art in Leak Detection and Localization. Transportation, Distribution and Sewer Networks – a Gateway to New Market Opportunities: proceedings of Pipeline Technology 2006 Conference, (Hannover, Germany, 25 April 2006). URL: [http://www.pipeline-conference.com/sites/default/files/papers/321\\_Geiger.pdf](http://www.pipeline-conference.com/sites/default/files/papers/321_Geiger.pdf). (дата звернення 25.01.1918).
7. Чекурін В., Химко О. Математичні моделі для ідентифікації витoku в довгому газопроводі. Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. 2017. Вип. 25. С. 157–169.
8. Чекурін В.Ф. Математична модель перехідних процесів перенесення маси й імпульсу в довгому газопроводі. Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. 2010. № 11. С. 210–219.
9. Амосов А.А., Дубинский Ю.А., Копченова Н.П. Вычислительные методы для инженеров: учеб. пособие. Москва: Высшая школа. 1994. 544 с.
10. Чекурін В.Ф., Притула М.Г., Химко О.М. Структура та функції інтегрованого програмно-технічного комплексу для автоматизації управління газотранспортною системою. Вісник НУ «Львівська політехніка». Серія «Автоматика, вимірювання та керування». 2013. № 774. С. 51–60.
11. Чекурін В., Притула М., Химко О. Моделювання архітектури та функціональності програмно-технічного комплексу для автоматизації управління магістральними газопроводами. Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. 2013. № 18. С. 209–218.
13. Чекурін В.Ф., Притула М.Г., Химко О.М. Методологія MES і комп’ютеризація управління ГТС. Вісник НУ «Львівська політехніка». Серія «Комп’ютерні системи та мережі». 2014. № 806. 275–283.
13. Притула М.Г., Химко О.М., Чекурін В.Ф. Методологія побудови комп’ютеризованих систем управління виробничими підприємствами з використанням MES. Нафтогазова галузь України. 2015. № 1. С. 31–36.
12. Пономарьов Ю.В., Притула М.Г., Химко О.М., Чекурін В.Ф. Автоматизація управління ГТС: стан та перспективи розвитку з використанням MES. Нафтогазова галузь України. 2015. № 5. С. 40–45.
14. Bernus P., Nemes L. A framework to define a generic enterprise reference architecture and methodology. Computer Integrated Manufacturing Systems. 1996. Vol. 9(3). Pp. 179–191.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ

## **И ИДЕНТИФИКАЦИИ УТЕЧЕК В МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ**

*Разработаны структура и алгоритм функционирования системы обнаружения утечек в магистральных газопроводах. Работа системы базируется на ранее предложенных авторами математических моделях и методах. В качестве входных данных для нее используются результаты мониторинга газодинамических параметров потоков в трубопроводе при стационарных режимах эксплуатации. Система рассматривается как составная часть компьютеризированной системы управления газотранспортными системами, созданной с использованием методологии MES. Результаты работы могут найти применение при создании таких систем.*

**Ключевые слова:** *программно-технические комплексы, автоматизация управления производством, обнаружение и идентификация утечек, алгоритмические методы, вычислительный мониторинг.*

## **MODELING OF THE SYSTEM FOR LEAK DETECTION AND IDENTIFICATION IN LONG DISTANCE PIPELINES**

*Structure and operation algorithm of a system for leaks detection and location in gas mains have been developed. Operation of the system is based on mathematical model and methods previously proposed by the authors. Results of monitoring of gas-dynamic parameters of flows in the pipeline at stationary mode of operation are used as the input data for the system. The system is considered as an essential part of a computerized system for management by gas transmission systems, built on MES principles. The obtained results can be utilized at development of such systems.*

**Key words:** *software-hardware solutions, manufacturing execution systems, leak detection and identification, algorithmic methods, computational monitoring.*