

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ДРІНЬ НАТАЛІЯ ЯРОСЛАВІВНА

УДК 622.691.48

ДИСЕРТАЦІЯ

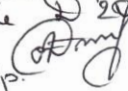
**ОЦІНКА ВТРАТ ГАЗУ ПРИ ТРУБОПРОВІДНОМУ ТРАНСПОРТІ І
ФОРМУВАННЯ АРЕАЛУ ЗАГАЗОВАНOSTІ ДОВКІЛЛЯ**

05.15.13 – трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 Н.Я.Дрінь

Всі примірники дисертації
ідектовані за звіткою
Всесий секретар спеціалізованої
всесий ради 20.05.20
13.07.2020 р.  Дінець А.П.

Науковий керівник

Груз Володимир Ярославич

доктор технічних наук, професор



Івано-Франківськ – 2020

АНОТАЦІЯ

Н.Я. Дрінь. Оцінка втрат газу при трубопровідному транспорті і формування ареалу загазованості довкілля. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища (185 – Нафтогазова інженерія та технології). – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, МОН України, Івано-Франківськ, 2020.

Розглядається вплив температурного режиму складних газотранспортних систем великої протяжності на витрати енергоресурсів для транспортування газу. Дослідження проведені на основі розроблених математичних моделей стаціонарного руху газу в газотранспортних системах з врахуванням компримування потоку на КС та наступного його охолодження. Показано, що оптимальна ступінь охолодження газу на КС визначається витратами потужності на транспортування газу магістральними газопроводами та на охолодження газового потоку. В результаті виконаних розрахунків дано рекомендації з вибору характеристик режимів роботи складних газотранспортних систем з врахуванням охолодження газу на КС після компримування.

Побудовано двомірну математичну модель нестационарної фільтрації газу в пористому середовищі (грунті), викликану появою точкового витoku з газопроводу, який імітується за допомогою функції Дірака. Математична модель базується на рівнянні фільтрації Дарсі і рівнянні нерозривності потоку. Розроблено алгоритм реалізації математичної моделі і одержано числові розв'язки для різних умов. Проведено аналіз одержаних розв'язків, на основі яких встановлено закономірності процесу фільтрації газу в ґрунті.

Зокрема, дана оцінка тривалості процесу до досягнення газом поверхні ґрунту і величини ареалу загазованості ґрунту при цьому.

Наведено результати статистичного аналізу втрат газу в мережах середнього і низького тисків УЕГГ «Косівгаз» за період експлуатації 2008-2011р.р. Інтенсивність відмов, середня тривалість відновлення, питомі втрати газу під час аварії та середні затрати на ліквідацію останньої розглядалися для різних умов прокладання трубопроводу його діаметра, робочого тиску та терміну експлуатації.

Встановлено, що для газопроводів усіх категорій характерним є різке зниження інтенсивності відмов впродовж двох років після капітального ремонту із заміною дефектних ділянок труб, відтак інтенсивність умов зростає. При цьому діаметр газопроводу і терміну експлуатації практичного впливу на інтенсивність відмов не мають. Втрати газу під час аварій зростають з підвищенням робочого тиску в мережі.

За результатами дослідження нестационарних процесів коливання тиску в газопроводі, викликаних зміною обсягів споживання газу запропоновано новий метод оцінки кількості газу в газопроводі.

Наведено результати досліджень процесу витікання газу з ємності під тиском через отвір в тонкій стінці. Аналіз рівнянь енергії газового потоку в процесі витікання газу дозволяє отримати при певних припущеннях формулу для масової витрати газу через отвір в тонкій стінці.

Однак, досвід показує, що прийняті припущення суттєво спотворюють реальну картину фізичного процесу, що в кінцевому рахунку призводить до похибки в отриманому результаті. В зв'язку з цим проведено ряд аналітичних і експериментальних досліджень з оцінки адекватності теоретичних положень з прийнятими обмеженнями реальним результатом, отриманим через проведені експерименти. Наслідком проведених досліджень є поправка, яку запропоновано внести в теоретичну залежність для масової витрати газу, що витікає через малий отвір з ємності. Показано залежність отриманої поправки від тиску і температури газу в ємності.

Корозійні процеси призводять до утворення свищів в трубопроводі. Витоки газу формують в ґрунті ареал загазованості, який характеризується

геометричними розмірами та тривалістю. При цьому в газопроводах низького та середнього тисків внаслідок незначної витрати і малих перепадів тисків витіки можуть існувати тривалий період часу до моменту їх виявлення. Це викликає суттєві втрати газу з одного боку і створює небезпеку в обслуговуванні газопроводу.

Тому з практичної точки зору важливо прогнозувати тривалість процесу фільтрації газу до появи його на поверхні ґрунту і радіус ареалу загазованості території, а також характер і величину витрати газу в атмосферу.

Лінійна частина магістральних газопроводів більш як на 90% знаходиться в підземному середовищі, тобто оточена ґрунтом. Саме та частина лінійних ділянок є найбільш сприятливим об'єктом для протікання корозійних процесів, викликаних пошкодженням ізоляційного покриття і дією агресивного середовища, що створює умови появи корозійних пошкоджень, які супроводжуються витіками газу з газопроводу.

Витік газу на підземній частині ділянки газопроводу надзвичайно небезпечний, оскільки окрім втрат цінного енергоносія призводить до утворення зони загазованості ґрунту і повітряного басейну, що викликає вибухонебезпечну ситуацію.

Очевидно, що фізичні властивості, зокрема фільтраційний опір, ґрунту як корисного середовища повинні мати вплив на інтенсивність витікання газу з газопроводу і формування ареалу загазованості. Тому існує взаємозв'язок між процесом витікання газу з газопроводу через аварійний отвір і його фільтрацією в навколишньому ґрунті.

Розглядається процес нестационарної фільтрації газу в ґрунті, викликаний появою аварійного витіку з газопроводу. Запропоновано розрахувати першу і другу стадію нестационарної фільтрації в процесі формування ареалу загазованості. Отримано на основі математичних моделей розрахункові залежності для прогнозування формування поля розподілу тисків в пористому середовищі для кожної з фаз нестационарної фільтрації.

Встановлено характер зміни величини масової витрати витоку в часі впродовж процесу нестационарної фільтрації, показано, як впливають властивості ґрунту (зокрема його проникність) на тривалість нестационарного процесу і величину витрати витоку. На основі співставлення аналітичних результатів з реальними внесено поправки до відомої формули Сен-Венана-Вентцеля з метою її адаптації.

Значні терміни експлуатації газопроводів викликають старіння металу внаслідок корозійних процесів та аварій, що теж призводить до появи витоків з трубопроводів. Така ситуація є неприпустимою з економічної та екологічної точок зору, оскільки витік газу може призвести до загазованості значної території, а в деяких випадках – до утворення газоповітряної суміші й вибуху, в результаті якого виникають суттєві економічні збитки та небезпека для людського життя. Проведено статистичний аналіз аварійних ситуацій на трубопроводах, який дозволяє оцінити ступінь впливу різноманітних факторів на ймовірність виникнення витоків і їх розміри.

Встановлено, що при корозійних пошкодженнях трубопроводів найбільш ймовірні малі витіки, а при аваріях, зумовлених впливом зовнішніх сил, найвірогідніші великі витіки. Загальновідомо, що поява витоку газу з газопроводу викликає нестационарний процес, за характером протікання якого можна оцінити величину витоку. Якщо газопровід перед появою витоку працював у нестационарному режимі, то поява витоку внесе збурення в протікання нестационарного процесу. Для виявлення витоку, на основі детермінованого підходу, моделюється потік перекачування в місці витоку і його тривалість стосовно конкретних розмірів витоку.

Існуючі детерміновані математичні моделі для виявлення витоків потребують інформації про величину витрати витоку та геометричні розміри аварійного отвору, яка на момент часу виникнення витоку відсутня. Тому розроблено модель, яка дозволяє прогнозувати обсяги витоку продукту в цілому по всіх видах відмов, а також по окремих причинах відмов на основі статистичних

даних. Це дає можливість вибрати найефективніші рішення для діагностики та запобігання витоків у магістральних трубопроводах.

Побудувавши двовимірну нестационарну математичну модель фільтрації газу в пористому середовищі при появі точкового аварійного витoku газу з газопроводу, встановлено закономірності процесу витікання газу з газопроводу в умовах протидії тиском, створеним за рахунок фільтраційного опору пористого середовища. Проведено та отримали результати дослідження фільтраційних характеристик ґрунтів і їх залежностей від зовнішніх і внутрішніх факторів. Серед незалежних факторів, які мають вплив на величину коефіцієнта проникності ґрунту, були вибрані внутрішній тиск ґрунту, його вологість, щільність сухого ґрунту і діаметр гранул.

Експериментальним шляхом встановлено залежність проникності вологого ґрунту з певним внутрішнім тиском від часу витримки під навантаженням. Отримано відповідні емпіричні залежності.

Результати проведених досліджень дозволили встановити загальні закономірності формування ареалу загазованості довкілля аварійними витокami з газопроводів, які покладено в основу принципів удосконалення методів оцінки втрат газу внаслідок появи аварійних витоків з газопроводів.

Ключові слова: газотранспортна система, аварійні витoki газу, втрати газу при транспорті, фільтрація, ареал загазованості.

ANNOTATION

N. Ya. Drin. The Assessment of Gas Loss in Pipeline Transportation and the Formation of Gas Pollution Area of the Environment. – Qualified Scientific Work on the Rights of the Manuscript.

The dissertation on reception of a scientific degree of the Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.15.13 – Pipeline Transportation, Oil and Gas Storage Facilities (185 – Oil and Gas Engineering and Technologies). – Ivano-Frankivsk

National Technical University of Oil and Gas, Ministry of Education and Science of Ukraine, Ivano-Frankivsk, 2020.

The influence of temperature complex gas systems large extent on the energy consumption for transportation of gas. Research conducted over the developed mathematical models of stationary motion of gas in gas transmission systems taking into account the compression flow of the CS and its subsequent cooling. It is shown that the optimal degree of cooling gas at CS determined by the cost of power to gas transmission pipelines and cooling gas flow. As a result of the calculations are given advice on choosing the characteristics of complex modes of gas transmission systems taking into account the cooling gas at CS after compression.

The article deals with the two-dimensional mathematical model of non-stationary gas filtration in porous environment (ground) caused by the gas pipeline pinhole leakage which is simulated by Dirac function. The mathematical model is based on Darcy's equation and flow continuity equation. The algorithm of the mathematical model implementation is developed. The computational solutions for different conditions are obtained. The author analyses the achieved solutions, which show common factors of the underground gas filtration process. The duration of the process of gas reaching the ground surface and the concurrent area of the underground gas contamination are described.

Statistic analysis of gas losses in medium and low pressure pipe systems of Kosivhaz UEHH during the operation period 2008-2011 is provided in the article. Failure rate, mean reconstruction time, specific gas losses in case of emergency and average costs for its elimination are considered with regard to conditions of pipeline laying, its diameter, operational pressure and time of maintenance.

It was ascertained that abrupt decrease in failure rate during two weeks time after total overhaul with replacement of faulty pipe zones and following increase in failure rate are typical for all categories of gas pipelines. Gas pipeline diameter and time of its maintenance do not affect failure rate. Gas losses in case of emergency increase with the growth of operational pressure in the system.

Exploring the transient processes in pipeline pressure fluctuations caused by changes in gas consumption, the new method estimates the amount of gas in the pipeline.

The results of researches of the process of gas leakage from the tank under pressure through the hole in the thin wall are given. Analysis of the equations of energy of the gas flow in the process of gas leakage allows us to obtain, under certain assumptions, the formula for the mass flow of gas through the hole in the thin wall.

However, experience shows that the accepted assumptions significantly distort the real picture of the physical process, which ultimately leads to an error in the result. In this regard, a number of analytical and experimental studies have been conducted to assess the adequacy of theoretical positions with the accepted limitations of the actual result obtained through the experiments. The result of the research is an amendment, which is proposed to make a theoretical dependence for the mass flow of gas flowing through a small hole in the tank. The dependence of the obtained correction on the pressure and temperature of the gas in the tank is shown

Corrosion processes lead to formation of cracks in the pipelines. The leaks form gas-polluted areas in the ground that are characterized by geometric dimensions and duration. At the same time, the leaks may exist in the low and middle pressure pipelines due to low flow rate and little pressure drop for a long time before they are discovered. This causes significant gas leaks on one hand and creates a danger for the pipeline maintenance on the other hand.

That's why, from a practical standpoint it is important to forecast the gas filtration process duration prior to its emergence on the ground surface, radius of the gas-polluted area, and also the nature and the amount of the gas released into the atmosphere.

The linear part of the main gas pipelines is more than 90% in the underground environment, ie surrounded by soil. This part of the linear sections is the most favorable object for corrosion processes caused by damage to the insulating coating and the action of aggressive environments, which creates the conditions for corrosion damage, which are accompanied by gas leaks from the pipeline.

Gas leakage in the underground part of the gas pipeline section is extremely dangerous, because in addition to the loss of valuable energy leads to the formation of a zone of gas contamination of the soil and air basin, which causes an explosive situation.

It is obvious that the physical properties, in particular the filtration resistance, of the soil as a useful medium should have an impact on the intensity of gas leakage from the pipeline and the formation of the area of gassiness. Therefore, there is a relationship between the process of gas leakage from the pipeline through the emergency hole and its filtration in the surrounding soil.

The article deals with the process of non-stationary gas filtration in the soil caused by emergence of pipeline emergency leak. It is suggested to calculate the first and second stages of non-stationary filtration in the process of gas pollution area formation. Calculation dependencies to forecast the pressure distribution field formation in a porous medium for each phase of non-stationary filtration were obtained on the basis of the mathematical models. The nature of the leak mass-flow rate change during the process of non-stationary filtration is determined and the way the soil properties (including its permeability) influence the duration of the non-stationary process and leak flow rate is shown. Some corrections for the well-known Saint-Venant-Wenzel formula with the limit of its adaptation were made on the basis of comparison of analytical results with the real ones.

Long-term operation of the gas pipelines causes the metal aging because of the corrosion processes and accidents, which results in gas leak of pipelines. It is improvident from both economic and ecological points of view, as the gas leak can cause the gas hazard of great territory and in some cases formation of the gas-air mixture and exposure, as the result of which there happen to be sufficient economic losses and danger for human lives. In the paper statistic analysis of accidents at the pipelines has been carried out, which will make possible to estimate the level of influence of different factors on the probability of arising the leaks and their sizes.

It was revealed, that under the pipelines corrosion damage the insufficient leaks are the most possible, and in accidents caused by the influence of the external forces sufficient leaks are the most probable. The appearance of the gas leak from the gas-pipe

is generally known to be caused by the non-stationary process according to the nature of which the leak amount can be estimated. If the gas-pipe before the appearance of leak has been operating in the non-stationary regime, the appearance of leak will result in disturbing in the non-stationary process. To reveal the leak the pumping over flow is modeled in the place of leak basing on the determination approach as well as its duration relatively the sizes of the leak.

The available determination mathematic models for revealing the leaks need information on the amount of losses of the leak and geometric sizes of the accident hole, which is not available in the moment of accident. That is why the model, which makes possible to predict the amount of leak in whole in all types of failures and some reasons of failures basing on the statistic data have been developed in the paper. It makes possible to choose the most efficient solutions for the diagnostics and preventing the leaks in the main pipelines.

This PhD thesis deals with the construction of a two-dimensional unsteady mathematical model of gas filtration in a porous medium under conditions of a pinhole emergency gas pipeline leak. It establishes the regularities of gas pipeline leaks under pressure made by the flow resistance coefficient of the porous medium.

It conducts and provides with the research results on soil filtration properties and their dependency on external and internal factors. The independent factors affecting permeability of soils include internal soil pressure, its humidity, dry soil density and granule diameter.

This PhD thesis determines by an experimental method the dependency of wet soil permeability with a definite internal pressure on the holding time at load. The relevant empirical dependences have been obtained.

The survey findings have allowed establish general regularities for the formation of gas pollution area of the environment with emergency gas pipeline leaks pipeline leaks, underlying the principles for improving the assessment methods of gas loss due to emergency gas pipeline leaks.

Key words: gas transportation system, emergency gas pipeline leaks, gas loss in transportation, filtration, gas pollution area.

Список публікацій здобувача

1. Грудз Я.В., Дрінь Н.Я., Шологон В.Д., Стасюк Р.Б., Мартинюк Р.Т. Дослідження впливу температурного режиму газопроводів на енергоефективність транспорту газу. *Нафтогазова енергетика*. 2011. № 2. С. 43-47. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок – розглядала вплив температурного режиму складних газотранспортних систем великої протяжності на витрати енергоресурсів для транспортування газу. Проводила дослідження стаціонарного руху газу в газотранспортних системах з врахуванням компримування потоку на КС та наступного його охолодження. Приймала участь у підготовці статті).

2. Грудз В.Я., Грудз Я.В., Фейчук В.В., Дрінь Н.Я., Стасюк Р.Б. Математичне моделювання фільтрації газу в ґрунті внаслідок виникнення малих витоків в газопроводі. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2011. №3(40). С. 66-69. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок - приймала участь у побудові двовимірної математичної моделі нестационарної фільтрації газу в пористому середовищі (ґрунті), викликаній появою точкового витоку з газопроводу, який імітується за допомогою функції Дірака. Приймала участь у підготовці статті).

3 . Грудз Я. В., Дрінь Н.Я., Фейчук В.В. Статистична оцінка втрат газу в розподільних мережах. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2012. № 2(43). С. 106-112. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок - встановила, що для газопроводів усіх категорій характерним є різке зниження інтенсивності відмов впродовж двох років після капітального ремонту із заміною дефектних ділянок труб. Приймала участь у підготовці статті).

4. Дрінь Н. Я., Стасюк Р.Б. Оцінка матеріального балансу газопроводу в умовах нестационарного газоспоживання. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2012. № 2. С. 105-106. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок - проводила дослідження нестационарних процесів коливання тиску в газопроводі, викликаних зміною обсягів споживання газу. Запропонувала новий метод оцінки кількості газу в газопроводі. Приймала участь у підготовці статті).

5. Grudz V.Ya., Grudz Ya.V., Drin N.Ya., Stasiuk R. B. The research of gas leak from the pipeline . *Journal of hydrocarbon power engineering*. 2014. Vol. 1. № 2. P. 103-107. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок - виконувала дослідження процесу витікання газу з ємності під тиском через отвір в тонкій стінці. Аналізуючи рівняння енергії газового потоку в процесі витікання газу отримала, при певних припущеннях, формулу для масової витрати газу через отвір в тонкій стінці. Приймала участь у підготовці статті).

6. Грудз В.Я., Грудз Я.В., Дрін Н.Я., Стасюк Р.Б. Дослідження процесу фільтрації газу в ґрунті у разі появи витоків із газопроводу. *Нафтогазова енергетика*. 2014. №1(21). С. 70-74. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок - займалась дослідженням корозійних процесів, що призводять до утворення свищів в трубопроводі, прогнозуванням тривалості процесу фільтрації газу до появи його на поверхні ґрунту. Досліджувала формування радіусу ареалу загазованості території, а також характеру і величини витрати газу в атмосферу. Приймала участь у підготовці статті).

7. Грудз В.Я., Грудз Я.В., Дрін Н.Я., Дем'янчук Я.М. Вплив фільтраційного опору ґрунту на інтенсивність аварійних витоків із газопроводу. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2015. №2(55). С. 68-73. **(наукове фахове видання України)**. ((Особистий внесок - встановила характер зміни величини масової витрати витоку в часі впродовж процесу нестационарної фільтрації, показала, як впливають властивості ґрунту (зокрема його проникність) на тривалість нестационарного процесу і величину витрати витоку. Приймала участь у підготовці статті).

8. Грудз В.Я., Запужляк В.Б., Грудз В.Я.(молодший), Побережний Л.Я., Дрін Н.Я., Стасюк Р.Б. Прогнозування потенційних ризиків виникнення витоків на газопроводах. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. 2019. №4. С. 78-81. **(індексується в Index Copernicus International)**. (Особистий внесок – встановила, що при корозійних пошкодженнях трубопроводів найбільш ймовірні малі витoki, а при аваріях, зумовлених впливом зовнішніх сил, найвірогідніші великі витoki. Якщо газопровід перед появою витоку, працював у

нестационарному режимі, то поява витoku внесе збурення в протікання нестационарного процесу. Приймала участь у підготовці статті).

9. Дринь Н.Я. Оценивание величины потерь газа и площади загрязнения при повреждении магистрального газопровода. *Надежность безопасность магистрального трубопроводного транспорта. Материалы 7 международной научно-технической конференции, г. Новопоцк, 22-25 Ноября 2011 г.* Новопоцк, 2011. С. 20-22. Фахове видання.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	16
ВСТУП	18
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ВТРАТ ПРИРОДНОГО ГАЗУ В МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДАХ	23
1.1 Газотранспортна система України	23
1.2 Втрати газу при транспортуванні і їх класифікація	26
1.3 Види контролю герметичності газопроводів	32
1.4 Теоретичні засади витікання газів під тиском	43
1.5 Аналіз досліджень витікання газу з газопроводу і його фільтрації в ґрунті	55
1.6 Формування задач досліджень	63
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИТІКАННЯ ГАЗУ З ПІДЗЕМНИХ ГАЗОПРОВОДІВ ПІД ТИСКОМ	64
2.1 Мета і завдання дослідження	65
2.2 Методика проведення досліджень	68
2.3 Оцінка впливу зовнішнього опору на витрату витоку результатами визначення витрати газу при витіканні	83
Висновки до розділу 2.....	86
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЛЬТРАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТІВ	87
3.1 Мета і завдання дослідження	87
3.2 Дослідний стенд і вимірювальна техніка	89
3.3 Методика проведення досліджень	93
Висновки до розділу 3	108
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМУВАННЯ АРЕАЛУ ЗАГАЗОВАНОСТІ ДОВКІЛЛЯ З УРАХУВАННЯМ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГРУНТІВ	110

4.1 Збір і обробка інформації для прогнозування процесу формування ареалу загазованості ґрунту	110
4.2 Алгоритм і програма розрахунків процесу формування ареалу загазованості ґрунту	113
4.3 Загальні закономірності процесу формування ареалу загазованості ґрунту	118
4.4 Удосконалення методики оцінки втрат газу при транспортуванні	123
Висновки до розділу 4	128
ВИСНОВКИ	130
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	132
ДОДАТОК А СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ	142
ДОДАТОК Б КОМПЛЕКСНА ГАЛУЗЕВА МЕТОДИКА	145

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

α	коефіцієнт Морроу
α_1	коефіцієнт лінійного розширення металу труб
δ	коефіцієнт зникання пружної хвилі
a	швидкість звуку в газі
$(\partial p / \partial v)_s$	величина, зворотна адіабатній стисливості речовини
U	внутрішня енергія
v	питомий об'єм
$U_{\text{теор}}$	геометричний об'єм ділянки
V	геометричний об'єм ємності
R	газова стала;
T	абсолютна температура
z	коефіцієнт стисливості
F	площа перерізу отвору витікання
k	показник адіабати процесу
P_0, P_a	тиски в середині ємності та назовні
ρ_0	густина газу при умовах всередині ємності
$P(x, t)$	тиск в трубопроводі
ρ	густина газу
w	лінійна швидкість
d	діаметр газопроводу
λ	коефіцієнт гідравлічного опору
c	швидкість звуку в газі
μ	коефіцієнт витрати отвору
d	діаметр отвору в мм
R	газова стала в Дж/кгК

T	абсолютна температура в ресивері в К
P	тиск газу в бар
n	число дослідів
X_{cp}, X_i	середньоарифметичне і біжуче значення вимірюваної величини
$t_{\alpha;n}$	коефіцієнт Стюдента
μ	коефіцієнт витрати отвору
T	абсолютна температура в ресивері в К
ω	швидкість фільтрації
k	коефіцієнт проникності пористого середовища
η	динамічна в'язкість рухомого неперервного середовища
F	площа перетину фільтрації
h	глибина закладення газопроводу в ґрунті
$\sigma(x - x_g)$	одинична функція Хевісайда
$erfc(z)$	інтеграл імовірності
k	проникливість ґрунту
$\delta(x - x_q)$	функція Дірака
Q_{cp}	величина середньодобового газоспоживання
A	амплітудну значення газоспоживання
φ	зміщення екстремального значення добового газоспоживання
Q_{max}, Q_{cp}	відповідно максимальна і середньодобова величини газоспоживання
$2a$	коефіцієнт лінеаризації
P_j^k	тиск у передостанньому вузлі агрегату
МН	магістральний нафтопровід
НД	нормативна документація
ОК	об'єкт контролю
ПАЕ	первинний перетворювач сигналів АЕ
ПК	персональний комп'ютер

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Газотранспортна система України є однією з найпотужніших у світі за обсягом транспортування та збору газу. Ця система є буфером між газовидобувними регіонами Росії, Центральної Азії, а також Сходу і Півдня України та споживачами нашої держави і промислово розвиненої Європи. Тобто ГТС інтегрована в загальноєвропейську газову мережу. Її пропускна спроможність на вході складає 290 млрд м³, на виході – 180 млрд. м³ газу на рік (до країн Європи – 142 млрд. м³). За терміном експлуатації структура магістральних газопроводів наступна: до 10-ти років - 8%; від 11 до 15-ти років - 7%; від 16 до 20 років - 10%; від 21 до 30 років - 29%; понад 30 років - 46%. За діаметрами газопроводи поділяються: 1420 мм - 14%; 1220 мм – 10%; 1020 мм - 11%; 720-820 мм - 13%; 530 і менше - 52%.

Висока частка газу в енергетичному балансі держави вимагає створення ірраціональної експлуатації розгалуженої газової мережі як для магістрального транспорту газу (в тому числі і транзитного), так і розподільчих газопроводів. Великі обсяги перекачування газового пального по газопроводах різних категорій призводять до значних втрат енергоносіїв, що знижує економічну ефективність використання газу та призводить до зростання ціни на газове паливо. Крім того, втрати газу, пов'язані з виникненням аварійних витоків з газопроводів, мають суттєвий негативний вплив на екологію довкілля.

Наслідком структури газових мереж є підвищення фізичних та комерційних втрат газу. Адже кожна одиниця обладнання чи арматури є потенційним об'єктом газових втрат, пов'язаних з витокami в атмосферу, кожен елемент газоспоживання є потенційним об'єктом збільшення комерційних втрат.

Значні терміни експлуатації газопроводів викликають старіння металу внаслідок корозійних процесів, що обумовлює появу малих витоків з трубопроводів. Особливо це актуальне для газових мереж низького та середнього тиску, для яких виявлення витoku газу може тривати значний період часу експлуатації. Така ситуація є неприпустимою як з економічної, так і з екологічної

точки зору, оскільки малий витік газу важко зауважити, внаслідок чого загазованість може обіймати значну територію, а деяких випадках призвести до утворення газоповітряної суміші і вибуху, в результаті якого виникають суттєві економічні збитки та небезпека для людського життя.

З сказаного очевидно, що діагностика малих витоків з газових мереж відноситься до першочергових завдань експлуатації газового господарства.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, роботами. Робота носить науково-прикладний характер і входить в комплекс тематичних планів НАК «Нафтогаз України», спрямованих на підвищення надійності експлуатації газотранспортних мереж і окреслених Національною програмою «Концепція розвитку, модернізації і переоснащення газотранспортної системи України на 2016 – 2030 рр.».

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є удосконалення контролю за втратами газу в процесі експлуатації магістральних газопроводів на основі встановлення закономірностей процесів витікання газу і його фільтрації в ґрунті.

Для досягнення поставленої мети було визначено такі *основні завдання*:

- аналітичні дослідження характеру фільтрації газу в пористому середовищі при появі аварійних витоків з газопроводу;
- оцінка впливу зовнішнього тиску на витрату аварійного витоку газу з магістрального газопроводу;
- дослідження фільтраційних характеристик ґрунтів і їх залежностей від зовнішніх і внутрішніх факторів;
- встановлення закономірностей формування ареалу загазованості довкілля аварійними витокami з газопроводів.

Об'єкт дослідження – аварійні виток газу з газопроводів та процеси, що їх супроводжують.

Предмет дослідження – нестационарні газодинамічні процеси в газопроводах, викликані появою малих витоків, та закономірності фільтрації газу в ґрунті.

Методи дослідження. Аналітичні методи побудови і реалізації математичних моделей нестационарних процесів в газопроводах при виникненні витоків газу, методи дослідження фільтрації газу в пористому середовищі, оцінки точності запропонованого методу формування ареалу загазованості, дослідження впливу зовнішніх і внутрішніх факторів на процес витікання газу з газопроводу.

Удосконалення аналітичних методів визначення витрати витоку газу при квазістационарних та нестационарних режимах, та дослідження його фільтрації в ґрунті при формуванні ареалу загазованості.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що вперше:

– побудовано двовимірну нестационарну математичну модель фільтрації газу в пористому середовищі при появі точкового аварійного витоку газу з газопроводу;

– встановлено закономірності процесу витікання газу з газопроводу в умовах протидії тиском, створеним за рахунок фільтраційного опору пористого середовища;

– виконано дослідження фільтраційних характеристик ґрунтів і їх залежностей від зовнішніх і внутрішніх факторів;

– отримано закономірності формування ареалу загазованості довкілля аварійними витокami з газопроводів.

Практичне значення одержаних результатів. Внесення коректив в аналітичні методи розрахунку витрати витоку з газопроводу, формування ареалу загазованості та діагностування витоків за характером нестационарного процесу. Результати досліджень лежать в основі розділу комплексної галузевої методики «Методи прогнозування режимів газотранспортної системи в умовах неповного завантаження і підрахунку запасів газу в трубах», яку прийнято до впровадження.

Особистий внесок здобувача.

Безпосередньо автором здійснено:

– дослідження впливу температурного режиму газопроводів на енергоефективність транспорту газу [33];

- математичне моделювання фільтрації газу в ґрунті внаслідок виникнення малих витоків в газопроводі [35];
- статистичну оцінку втрат газу в розподільних мережах [34];
- оцінку матеріального балансу газопроводу в умовах нестационарного газоспоживання [37];
- дослідження процесу витікання газу з газопроводу [91];
- дослідження процесу фільтрації газу в ґрунті при появі витоків з газопроводу [36];
- дослідження впливу фільтраційного опору ґрунту на інтенсивність аварійних витоків з газопроводу [38];
- прогнозування потенційних ризиків виникнення витоків на газопроводах [39];
- оцінювання величин втрат газу і площ забруднення при пошкодженні магістрального газопроводу [41].

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи викладено та обговорено на наукових конференціях різного рівня: 7 Міжнародній науково-технічній конференції «Надежность и безопасность трубопроводного транспорта» (Новополоцк, 2011 р.), Всеукраїнській науково-практичній конференції «Шляхи підвищення ефективності експлуатації трубопроводного транспорту нафти і газу та підготовка кадрів галузі» (м. Івано-Франківськ, 2-3 вересня 2012 року), Науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (Івано-Франківськ, 2011-2013), нараді фахівців НАК «Нафтогаз України» з питань науково-технічного співробітництва в галузі транспортування газу» (Яремче, 2012 р.).

Результати дисертаційної роботи в повному обсязі доповідались на науковому семінарі кафедри газонафтопроводів та газонафтосховищ і міжкафедральному науковому семінарі Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу в 2020 році.

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 9 друкованих праць, з яких 1 – у міжнародному науковому журналі, що індексуються у наукометричній базі даних Index Copernicus International, 7 – у наукових фахових виданнях, 1 – тези доповідей на міжнародній конференції.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота викладена на 146 сторінках машинописного тексту, складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 2 додатків. Робота ілюстрована 5 таблицями та 27 рисунками. Список використаних джерел містить 120 найменування, з них 89 кирилицею та 31 латиницею.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ВТРАТ ПРИРОДНОГО ГАЗУ В МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДАХ

1.1 Газотранспортна система України

Газотранспортна система України є однією з найпотужніших у світі за обсягом транспортування та збору газу. Ця система є буфером між газовидобувними регіонами Росії, Центральної Азії, а також Сходу і Півдня України та споживачами нашої держави і промислово розвиненої Європи. Тобто ГТС інтегрована в загальноєвропейську газову мережу. Її пропускна спроможність на вході складає 290 млрд м³, на виході – 180 млрд. м³ газу на рік (до країн Європи – 142 млрд. м³).

На сьогодні газотранспортна система ДК "Укртрансгаз" Національної акціонерної компанії "Нафтогаз України" включає 38,6 тис.км газопроводів різного призначення та продуктивності, 72 компресорні станції (КС), 1449 газорозподільних станцій (ГРС), 12 підземних сховищ газу (ПСГ) та об'єкти інфраструктури, які забезпечують функціонування системи.

На вході ГТС України здатна прийняти до 288 млрд.куб.м природного газу на рік, а на виході передати 178 млрд.м³, у т.ч. 142,5 млрд.м³ до країн Західної та Центральної Європи.

Основна функція ГТС – надійне забезпечення газом внутрішніх споживачів України та безперербійне постачання транзитного природного газу через нашу територію європейським споживачам газу.

Енергетична політика європейських країн спрямована на диверсифікацію джерел постачання природного газу, що в поєднанні зі зростанням потреб газу в країнах Західної, Центральної та Східної Європи потребує збільшення потреб його постачання. За прогнозами очікують збільшення споживання газу в Західній Європі до 2025 р. на 27%, відповідно споживання газу складе 550-575 млрд. м³ і 580-600 млрд. м³. Це зумовлює збільшення потоків газу з Росії та Середньої Азії.

За терміном експлуатації структура МГ така: до 10-ти років - 8%; від 11 до 15-ти років - 7%; від 16 до 20 років - 10%; від 21 до 30 років - 29%; понад 30 років - 46%. За діаметрами газопроводи поділяються: 1420 мм - 14%; 1220 мм - 10%; 1020 мм - 11%; 720-820 мм - 13%; 530 і менше - 52%.

Транзитні експортні поставки російського газу здійснюються в основному газопроводами «Союз», Уренгой – Помари – Ужгород, «Прогрес», Елецк – Курськ – Кременчук – Кривий Ріг, Ананьїв – Тираспіль – Ізмаїл, Долина – Ужгород – Держкордон та Київською системою газопроводів через газовимірювальні станції Ужгород, Берегово, Дроздовичі, Орловка та Теково.

Структура споживання природного газу в Україні наступна: населення та компобут - 37,5%, електроенергетика - 17,4 %, технологічні проблеми газового комплексу - 10,4%, металургія - 12,8 %, хімія - 11,3%, інші промислові споживачі - 10,6 %.

ГТС України (рисунок 1.1) є складним промисловим комплексом, газопроводи якої мають технологічні перемички та з'єднані з ПСГ. Це дає можливість працювати в єдиному технологічному режимі та забезпечувати високий рівень надійності й маневреності в процесі цільового постачання газу, а також постачання газу в екстремальних ситуаціях.



Рисунок 1.1 – Газотранспортна система України

Розвинена інфраструктура трубопровідного транспорту України та газової промисловості, зокрема, дають можливість ефективно інтегруватися в єдину Європейську систему постачання енергоносіїв. За таких умов зростають вимоги до надійності газопровідних систем. Але проблема її забезпечення та безаварійної роботи об'єктів ГТС України щороку набуває все більшого значення, оскільки відбувається процес старіння основних фондів. На сьогодні перед ГТС України гостро стоїть задача забезпечення стійкого розвитку в умовах значного зносу основних виробничих фондів (рисунок 1.2) й обмежених інвестиційних можливостей щодо реконструкції та технічного переозброєння.

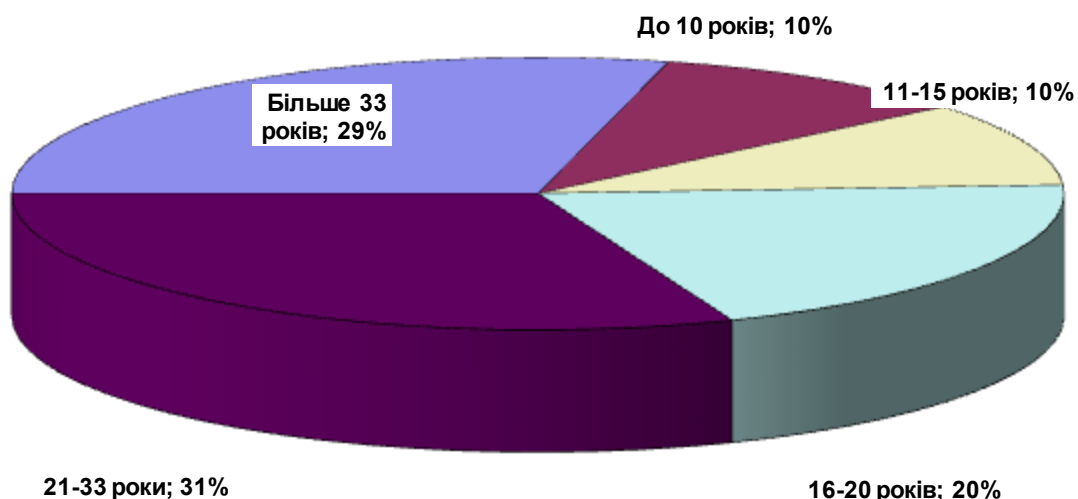


Рисунок 1.2 – Діаграма термінів роботи магістральних трубопроводів

Газотранспортна система України складна, має ряд особливостей, які впливають на підходи до створення систем управління режимами роботи.

По-перше, це значні її розміри. Переважна більшість трубопроводів побудована давно, стан їх ізоляції та міцність погіршилися. Наслідком цього є необхідність впровадження телемеханічного контролю за лінійною частиною МГ, тобто, це контролювати технологічні параметри та параметрів, що характеризують безпеку експлуатації.

По-друге, основне технічне обладнання МГ – газоперекачувальні агрегати – характеризуються значною різноманітністю та тривалими термінами експлуатації.

По-третє, газотранспортна система України здійснює транзит у Західну Європу і розподіл споживачам на території держави дуже дорогого імпортного газу.

Важливими, першочерговими завданнями в галузі підвищення надійності безпечної експлуатації магістральних газопроводів є:

- розроблення й удосконалених нових енерго та матеріалоощадних методів ремонту;

- розроблення ефективної системи попередження аварійних ситуацій при експлуатації магістральних трубопроводів;

- вивчення характеру напружено-деформованого стану трубопроводу при ремонтах на протяжних ділянках.

1.2 Втрати газу при транспортуванні і їх класифікація

Проведені обстеження підземних газопроводів показали, що термін їх експлуатації головним чином залежить від корозійної стійкості основного металу та зварного з'єднання труб, а також характеру руйнування поверхні металу в місцях із порушеним ізоляційним покриттям.

На рисунку 1.3 показано зруйновану частину електрозварної прямошовної труби зі сталі 10 підземного газопроводу з наскрізними ураженнями (кавернами), при товщині стінки труби 5 мм, та характерними пітами глибиною 1 мм і більше, розташованими вздовж зварного шва. Каверни переважно утворюються на нижній частині газопроводу. Ця різниця в багатьох випадках така велика, що для збільшення ресурсу конструкції доцільно було б повернути трубу на 180 градусів після експлуатації протягом деякого часу. Піт на зовнішній поверхні нижньої частини виникає внаслідок постійного контакту з ґрунтом; між верхньою частиною труби та ґрунтом, у результаті осідання газопроводу, утворюється повітряний прошарок.

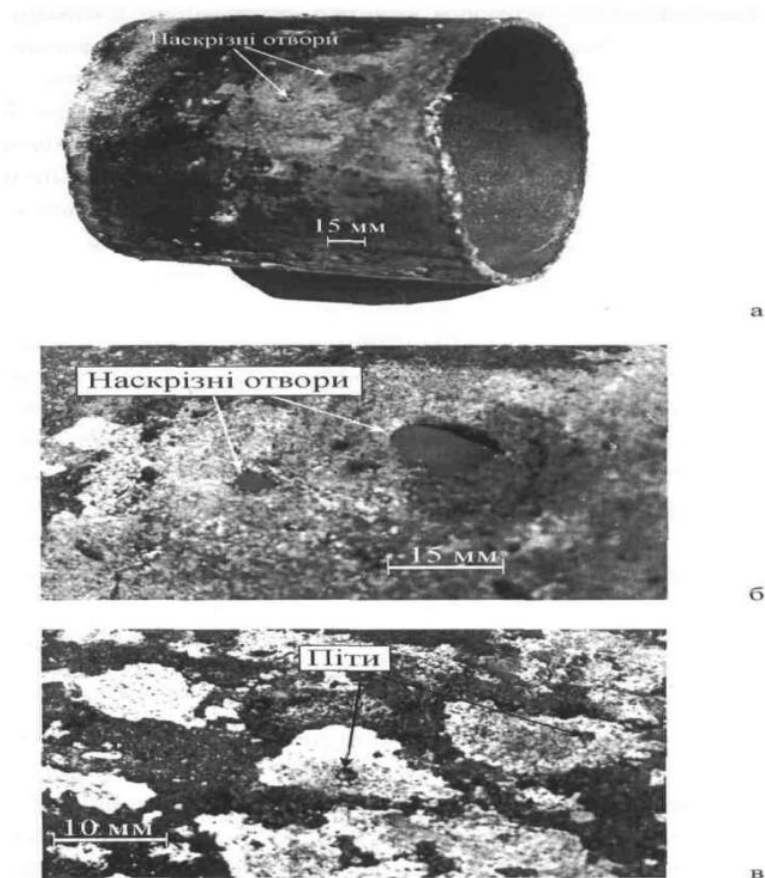
Попереднє вивчення умов експлуатації підземних газопроводів дозволило зробити висновок про необхідність комплексних досліджень деформуючої

системи „труба — ґрунтовий масив” сучасними методами механіки підземних споруд і механіки корозійного руйнування з метою попередження розгерметизації газопроводів.

Урахування корозійної активності ґрунту, яку прийнято оцінювати часом до появи на новому газопроводі першої каверни, складом і фізико-механічними властивостями ґрунтів та їх динамікою, значно ускладнює розрахункову схему, оскільки з'являється багато додаткових, змінних у часі параметрів, які визначаються експериментально. Перелік лише істотних факторів, що визначають корозійну активність ґрунтів (якими є структура та гранулометричний склад, вологість, склад ґрунтового електроліту, загальна кислотність або лужність ґрунту, концентрація водневих йонів, повітропроникність, окисно-відновний потенціал, електричний опір ґрунтів) указує на складність математичного моделювання деформівної системи „труба — ґрунтовий масив” та, відповідно, прогнозування довговічності підземного газопроводу.

Вважається, що поведінка сталі газопроводу в ґрунтах у багатьох відношеннях аналогічна її поведінці при повному зануренні в розчини з відповідним рН. При цьому переважає електрохімічний механізм корозії з утворенням мікрогальванічних елементів. Проте на підземному газопроводі, за рахунок неоднорідності металу труби та гетерогенності ґрунту як за фізичними властивостями, так і за хімічним складом, а також різної аерації, виникають ділянки, на яких електродний потенціал помітно відрізняється, що зумовлює утворення макрогальванічних корозійних елементів. Можна констатувати, що особливістю підземної корозії металу газопроводу є прояв її у вигляді пітів та каверн (наскрізних отворів). Тому головну небезпеку становить не корозійна втрата металу, а місцева корозія, яка є основною причиною аварій на газопроводах. У 2007 р. втрати газу, пов'язані з витокami з газопроводів, становили в цілому по Україні 270,4 млн. м³, із яких 85,2 млн. м³ — унаслідок неякісно виконаних зварювальних робіт, 21,6 млн. м³ — унаслідок корозії. Приблизно такий самий рівень втрат спостерігався і в 2008 та 2009 роках. Після проведення реорганізації структури нафтогазового комплексу та створення НАК „Нафтогаз України” почали вживати рішучіших заходів щодо

їх скорочення. Так, у 2010 р. вони становили вже 198,4 млн. м³, у 2011 р. — 188,4 млн. м³.



а – загальний вигляд; б – конфігурація наскрізних уражень;
в – розташування пітів уздовж зварного шва

Рисунок 1.3 – Зруйнована частина підземного газопроводу

Так, частка втрат газу у Львівській та Івано-Франківській областях сьогодні становить приблизно одну третину загальних втрат газу в Україні. Показовим у цьому відношенні є той факт, що у Львівській області, де значна кількість газопроводів, термін експлуатації яких перевищує 25 років, втрати газу за 10 місяців 2015 р. порівняно з аналогічним періодом минулого року зменшились майже на 35%, чому, не в останню чергу, сприяла заміна у 2015 р. 20,5 км аварійно небезпечних ділянок газопроводів. 20,2 км таких ділянок замінено також в Івано-Франківській області; подібні роботи проводились також у Дніпропетровській, Закарпатській, Чернівецькій, Миколаївській, Одеській,

Луганській та Херсонській областях. Капітально відремонтовано 104,3 км газопроводів у Дніпропетровській області, 48 км — у Запорізькій, 13,2 км — у Хмельницькій. Всього в Україні у 2015 р. спеціалістами газових господарств було обстежено на предмет виявлення можливих витікань газу 35,7 тис. км підземних газопроводів.

Динаміку споживання природного газу в Україні промисловістю і населенням окремо протягом 2004-2018 років наведено на рисунку 1.4.

Упродовж перших років незалежності обсяги споживання природного газу в Україні внаслідок загального згортання промислового виробництва, закриття нерентабельних підприємств і ряду інших чинників неухильно скорочувалось. Так, якщо у 2004 році було спожито 118,1 млрд. м³ газу, то у 2014 році — 70,4 млрд. м³ або майже на 40% менше. В подальшому внаслідок якісних змін і поживлення національної економіки споживання газу зростало й у 2018 році загалом по Україні склало 76,4 млрд. м³.

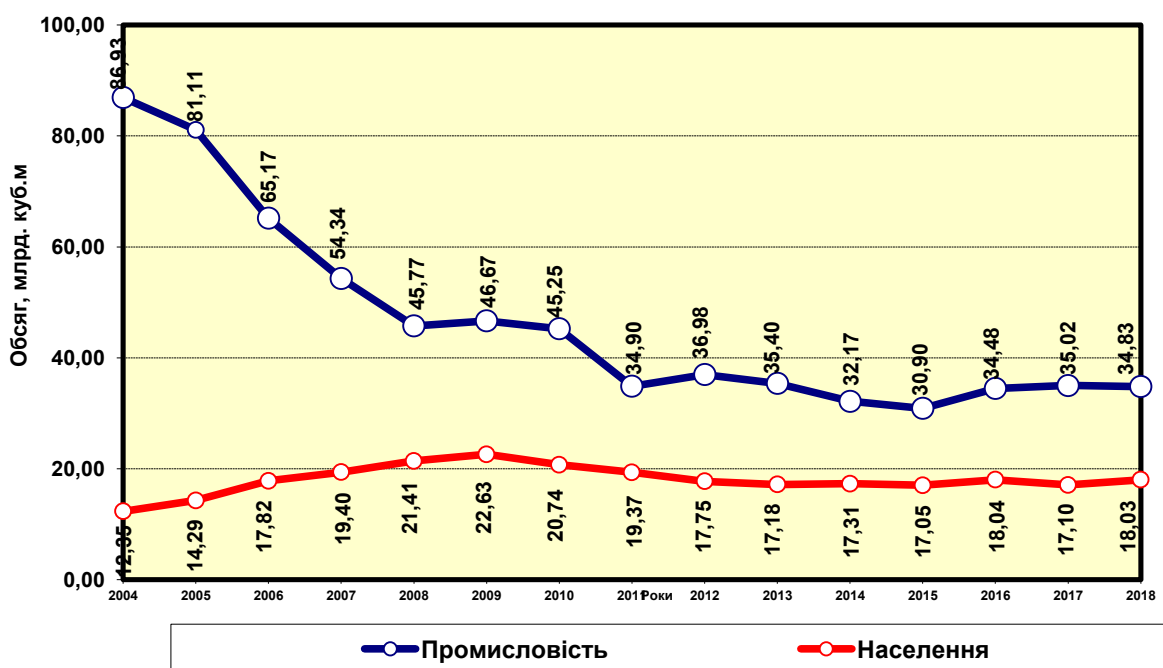


Рисунок 1.4 – Використання природного газу споживачами України впродовж 2004-2018 рр.

Як видно з графіка, впродовж 2004-2015 років промисловість скорочувала використання газу з 86,9 млрд. м³ до 30,9 млрд. м³. Надалі внаслідок розвитку

малого підприємництва та поживлення ринкової кон'юнктури споживання газу почало зростати та досягло у 2018 році рівня 34,83 млрд. м³.

Процеси постачання природного газу, на жаль, супроводжуються його втратами (рисунок 1.5) [34].

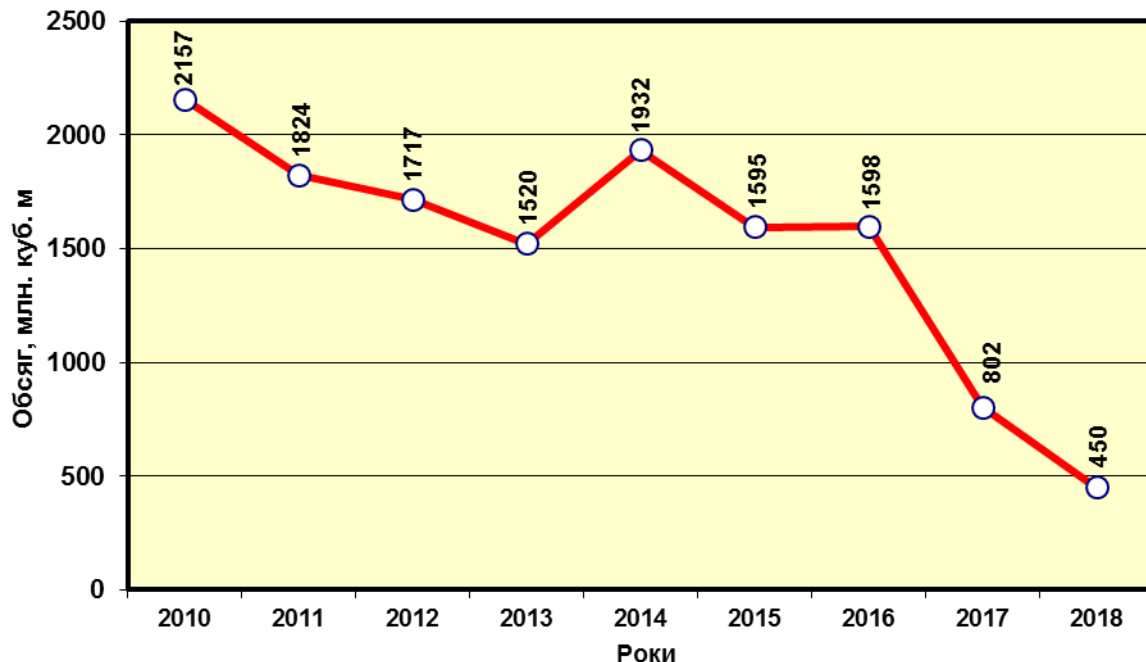


Рисунок 1.5 – Комерційні втрати природного газу в газорозподільних мережах упродовж 2010-2018 рр.

Втрати газу зумовлені цілою низкою чинників, основними з яких є:

- недоліки засобів вимірювання витрати газу та методів, які реалізують ці засоби;
- похибки приладів обліку газу та приладів визначення фізико-хімічних параметрів газу;
- використання побутових газових плит для опалення та гарячого водопостачання внаслідок порушень у роботі систем централізованого тепlopостачання та гарячого водопостачання;
- пошкодження й аварії на газопроводах за умов, коли витоки газу не обліковані;
- вимірювання побутовими лічильниками витрат у разі неприведення об'єму газу до стандартних умов;

- недоліки в інших аспектах організації обліку витрат газу;
- незадовільна робота централізованого тепло- та водопостачання;
- фізична зношеність обладнання, що використовує газ.

НАК “Нафтогаз України” завжди приділяла велику увагу зменшенню понаднормових втрат природного газу під час його транспортування газорозподільними мережами та споживання.

Перша з них має суб'єктивний характер і залежить, певної мірою, від організації робіт із обслуговування систем газопостачання газопостачальними підприємствами, роботою абонентських служб тощо.

Друга частина втрат газу не залежить від діяльності газових господарств і має об'єктивний характер.

Головними складовими цієї частини понаднормативних втрат є:

1) незадовільна робота підприємств теплоенергетики, що забезпечують централізоване опалення житла та гаряче водопостачання;

2) невідповідність норм споживання газу для населення його фактичному споживанню (через зазначений фактор газові господарства постійно несуть значні втрати);

3) втрати газу внаслідок втручання в роботу приладів обліку газу та самовільного підключення споживачів до системи газопостачання;

4) використання лічильників газу роторного типу. Їх встановлено більше 950 тис. штук (або практично кожен п'ятий лічильник). Після 2-3 років роботи такі лічильники мають велику від'ємну похибку вимірювання об'єму спожитого газу. За розрахунками втрати газу з цієї причини становлять близько 100 млн. м³ на рік.

Фізичні втрати пов'язані з тим, що мережа газопроводів досить часто прокладена на ділянках із агресивними чи вологими ґрунтами, в місцях з підвищеним ризиком електрохімічної корозії тощо, унаслідок чого матеріал труб зазнає посиленого руйнування. Крім того, частина газопроводів, особливо у західних регіонах України, вже давно перевищила свій експлуатаційний термін.

Так, наприклад, у 2008 році втрати газу, пов'язані з витоками з газопроводів, оцінювались на рівні 250 млн. м³. У зв'язку з цим НАК “Нафтогаз України” почали вживатись більш рішучі заходи щодо заміни (рисунок 1.6) та капітального ремонту (рисунок 1.7) аварійно небезпечних ділянок газопроводів.

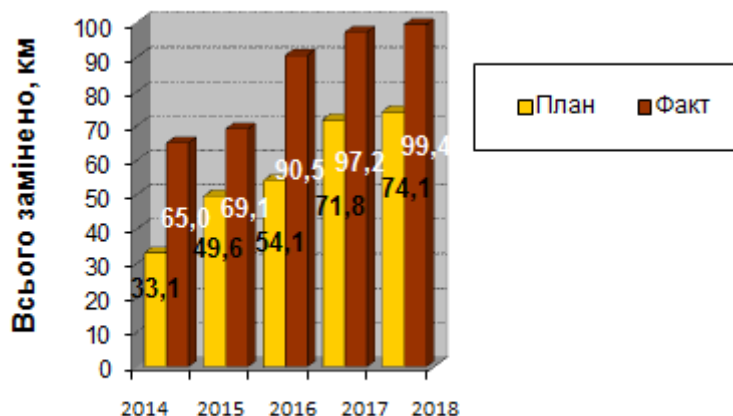


Рисунок 1.6 – Ілюстрація заміни аварійно-небезпечних ділянок газопроводів

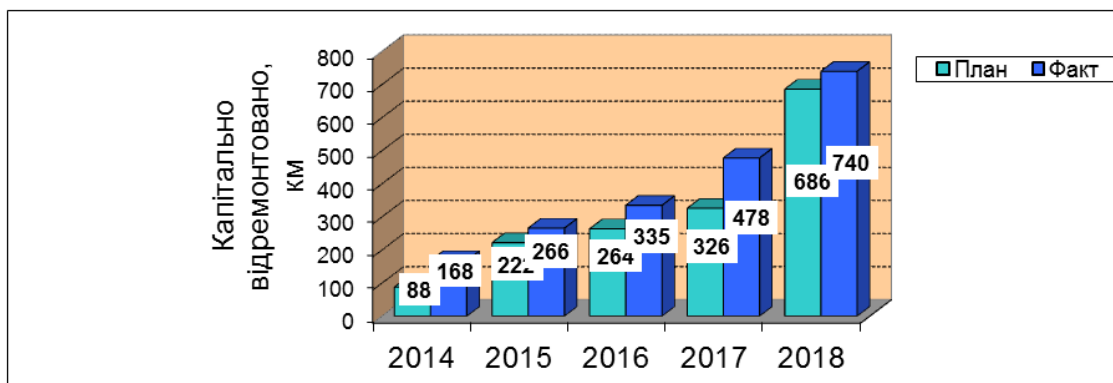


Рисунок 1.7 – Ілюстрація обсягів капітальних ремонтів ділянок газорозподільних газопроводів

1.3 Види контролю герметичності газопроводів

Відомо, що в процесі експлуатації магістральних газопроводів виникають порушення герметичності, котрі проявляються у вигляді витікань газу різної

інтенсивності, створюють загрозу забруднення навколишнього середовища та є потенційно небезпечними для виникнення відказів системи.

На поверхні ґрунту такі витікання проявляються як температурні аномалії на природному температурному фоні та аномалії концентрацій вуглеводнів у приповерхневому шарі Землі й атмосфери. На відміну від аномалій іншого походження, у зоні витікання вони практично не залежать від просторових координат і часу.

Викладені особливості стали підґрунтям для розвитку методів дистанційного (з літальних апаратів) виявлення ділянок порушення герметичності МТ. Дослідження провадилися у трьох напрямках: вимірювання радіаційних температур (Д. А. Абернаті, США, 1991; Д. Пітер, США, 1984; К. Я. Казаков, Є. Н. Зеленов, Росія, 1993); вимірювання концентрацій метану в приповерхневому шарі повітря (П. Г. Філіппов, Росія, 1994; Г. Цвік, США, 1985); комплексне вивчення поля концентрацій і температур (В. В. Бабаєв, В. І. Холодов, Україна, 1991, 1994).

Незважаючи на певні успіхи в створенні методики та техніки вимірювань, пропоновані методи мали деякі невизначеності. Так, наприклад, у працях багатьох авторів були відсутні відомості про те, які мінімальні за інтенсивністю витікання газу можна виявити пропонованим способом і чим це підтверджується. У випадку дослідження теплового поля поверхні Землі не вказувалося, як виокремлюється корисний сигнал із різноманітності перешкод, що нерідко перевищують його за амплітудою. Враховуючи, що наявність аномалій температур чи концентрацій метану не є прямим свідченням місцезнаходження витікання газу, у зазначених працях не передбачено будь-яких методичних прийомів для ідентифікації витікань і визначення їх точного місця розташування. Те ж саме можна сказати й про координатну прив'язку аномальних ділянок магістральних газопроводів.

П. Г. Філіпповим розроблено вертолітний лазерно-тепловізійний комплекс для контролю лінійної частини магістральних газо- і продуктопроводів, принцип дії якого базується на спільному використанні двох методів дистанційної діагностики: пасивного - тепловізійного та активного - лазерного методу

диференціального поглинання з відбиттям випромінювання від підстильної земної поверхні. Авторами зроблено наголос на розробці сканувального лазерного газоаналізатора, в якому використовується імпульсно-періодичний режим роботи, від чого потужність лазерного випромінювання зросла у- 10^5 разів. Це дало можливість збільшити оптимальну висоту польоту вертольота для різних підстилаючих поверхонь (сніг, зораний ґрунт, водна поверхня) від 150 до 1000 м.

У працях В. В. Бабаєва і В. І. Холодова детально вивчено процес формування поля температур і концентрацій метану над діючим газопроводом за наявності та відсутності витікання газу та розроблено технологію дистанційного виявлення витікань газу на лінійній частині магістральних газопроводів.

Для розв'язання поставленої задачі було використано методи фізичного та математичного моделювання. На спеціально створеному полігоні досліджувався характер розподілу температур і концентрацій вуглеводнів у зоні витікання газу з дебітами 70, 150, 200, 225, 300, 350, 385, 500, 2000 і 4000 м³/добу з різних ділянок поверхні труби діючого газопроводу діаметром 1020 мм й у різні пори року. Вимірювання температур здійснено на рівні 1,5; 0,5; 0,2; 0,05 м і на поверхні Землі.

У результаті було встановлено час, за який порушення теплового поля досягає поверхні Землі для різних за інтенсивністю витікань газу. Так, для витікання з дебітом 70 м³/добу це становить 5 діб, а з дебітом 4000 м³/добу – 16 год. Встановлено також геометричні розміри температурної аномалії, її амплітуду та співвідношення з фоновими ділянками.

Газометричні вимірювання показали, що при витіканнях близько 70 м³/добу вміст метану у ґрунтовому газі досягає 70% об'єму, при 350 м³/добу – 79 %, при 500 м³/добу – 83 - 87 % об'єму. У той же час за межами дії витікання вміст метану не перевищував $3,2 \times 10^4$ % об'єму.

При моделюванні витікань газу здійснювалися заміри температури ґрунту на різних рівнях (1,5; 0,5; 0,2; 0,05 м) на дослідному полігоні по спеціально встановлених профілях і на фоновому майданчику, панорамна зйомка

температурного поля й газометрична зйомка у ґрунті та приповерхневому шарі атмосфери.

При переході від одного об'єму витікання до іншого проводилося вистоювання, під час якого температура ґрунту відновлювалася до температури непорушеної ділянки (контрольної), розташованої на відстані 15 м від місця витікання.

На глибинах 1,5; 0,5 і 0,2 м від поверхні ґрунту заміри температури виконувалися термоелектронними давачами, розробленими в УкрНДІгазі, а на глибині 0,05 м – ртутними термометрами ТЛ-4.

На початку експерименту вимірювання температури під час моделювання витікання газу здійснювали 6 разів на добу (кожні 4 години), а у режимі відстою – двічі на добу (о 9 та 19-й год.). При наступних випусканнях газу температуру ґрунту вимірювали тричі на добу: до сходу сонця, усередині дня й після заходу сонця.

Перше випускання газу (витрата $70 \text{ м}^3/\text{добу}$) із нижньої поверхні труби показало, що внаслідок витікання газу теплова хвиля досягає поверхні ґрунту на п'яту добу. Зміна температури на глибині 0,2 м через 6 діб із початку витікання газу становило над місцем витікання $4,4^\circ\text{C}$; на відстані 0,2 м – $4,2^\circ\text{C}$, 1 м – $2,6^\circ\text{C}$, 2,5 м – $0,5^\circ\text{C}$. Дебіт другого та третього випускань газу дорівнював також $70 \text{ м}^3/\text{добу}$, але витікання газу моделювалися з бічної та верхньої частини поверхні газопроводу, а четверте витікання об'ємом $200 \text{ м}^3/\text{добу}$ моделювалося з верхньої частини поверхні труби.

За розрахунками зниження температури при дроселюванні за температури газу в газопроводі $22\text{-}24^\circ\text{C}$ та тиску $4,4\text{-}4,8 \text{ МПа}$ мало б становити $18,7^\circ\text{C}$, але практично воно має менше значення, що пов'язане з втратою тепла на прогрівання шару ґрунту, який лежить над газопроводом.

Поряд із фізичним здійснено математичне моделювання температурного поля магістральних газопроводів, що передбачало два етапи.

1. Розрахунок двовимірного стаціонарного температурного поля в ґрунті навколо газопроводу без витікання газу (результатом цього розрахунку є

початкове температурне поле в ґрунті для обчислення одновимірного нестационарного поля, а також температурна аномалія на поверхні ґрунту над магістральним газопроводом).

2. Розрахунок нестационарного температурного поля в ґрунті та навколо магістральних газопроводів із витіканням газу.

Для згаданих задач було побудовано математичні моделі, розроблено алгоритми та складено програми їх чисельного розв'язання.

Для задач дистанційного моніторингу магістральних газопроводів шляхом тепловізійної зйомки викликає цікавість визначення температурних аномалій на поверхні ґрунту при відсутності витікання газу. Характер температури на цій поверхні залежить від багатьох чинників, пов'язаних із фізичними параметрами ґрунту, трубопроводу й атмосфери.

Розв'язання задачі визначення температурного поля можливе лише за умови впровадження ряду спрощень. Ґрунт вважається квазіоднорідним середовищем із ефективними фізичними параметрами. У такому наближенні для стаціонарної задачі ґрунт характеризується єдиним параметром – ефективним коефіцієнтом теплопровідності. Для не дуже вологих ґрунтів даний коефіцієнт можна вважати незалежним від температури ґрунту, тобто задача лінеаризується (при цьому, однак, він може залежати від просторових координат унаслідок неоднорідності ґрунту та глибини або наявності снігового покриву чи рослинності, котрі враховуються введенням додаткового шару зі своїм ефективним коефіцієнтом теплопровідності).

Температурне поле ґрунту в реальних природних умовах формується під дією атмосферних процесів і сонячної радіації. На поверхні ґрунту виконуються умови теплового балансу з урахуванням поглинання, відбиття та розсіювання сонячної радіації, турбулентного теплообміну між ґрунтом і повітрям, втрат тепла на випаровування та геотермальних потоків. На не дуже вологих ґрунтах головну роль грають турбулентний теплообмін і сонячна радіація. Враховуючи ці ефекти, рівняння теплового балансу моделюється граничними умовами 3-го роду з ефективним коефіцієнтом теплообміну (сумою конвекційного та радіаційного

коефіцієнтів) і з еквівалентною температурою повітря, в якій ураховується дія сонячної радіації.

Згідно з проведеним оцінюванням, час встановлення температурної аномалії на поверхні ґрунту над трубопроводом, заглибленим на 1 м, становить 3-10 діб. Тому для визначення амплітуди температурної аномалії слід виконувати розрахунки з коефіцієнтами, усередненими за період 3-10 діб до моменту спостереження з урахуванням погодних умов і стану атмосфери.

При моделюванні тривимірного температурного поля навколо магістральних газопроводів із витіканням газу, крім згаданих уже параметрів, потрібні щільність і коефіцієнт питомої теплоємності ґрунту. Для не дуже вологих ґрунтів за відсутності фазових перетворень ці параметри можна вважати постійними.

У задачі визначення температурної аномалії на поверхні ґрунту над магістральним газопроводом із витіканням газу необхідно сукупно порахувати нестационарне температурне поле за наявності нелінійного об'ємного джерела тепла та теплообмін між ґрунтом і газом, що витікає. Ця задача не може бути лінеаризована й має розв'язуватися у повній постановці.

Трубопровід розглядається як циліндричне джерело тепла у напівобмеженому просторі (ґрунті) з відомими теплофізичними властивостями. На межі "труба - ґрунт" задано граничну умову 1-го роду, на поверхні ґрунту - граничну умову 3-го роду, що моделює радіаційний баланс і конвективний теплообмін із повітрям.

Двовимірне стаціонарне температурне поле у ґрунті навколо трубопроводу за відсутності витікання газу визначається шляхом інтегрування рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0 \quad (1.1)$$

із відповідними граничними умовами.

Інтегрування диференціального рівняння виконується скінченнорізницеvim методом у розрахунковій області, яка являє собою прямокутник із вирізом у вигляді півкруга. Знизу розрахункова область обмежується глибиною нейтрального шару, збоку границя розрахункової області вибирається за межами зони дії трубопроводу. В розрахунковій області впроваджується прямокутна нерегулярна різницева сітка, яка ущільнюється в напрямку магістральних газопроводів, при цьому в області навколо трубопроводу крок різницевої сітки вибирається постійним і мінімальним за двома координатами. Півкруг, котрий моделює границю "труба - ґрунт", апроксимується кусково-ламанною лінією, яка проходить через вузли різницевої сітки.

Чисельні розрахунки двовимірного стаціонарного температурного поля виконувалися з використанням ітераційного методу верхньої релаксації.

Температурна аномалія в ґрунті навколо магістральних газопроводів без витікання газу визначається такими параметрами: ефективним коефіцієнтом теплопровідності ґрунту; ефективним коефіцієнтом теплообміну на поверхні (сумою конвекційного та радіаційного коефіцієнтів); еквівалентною температурою повітря з урахуванням дії сонячної радіації; температурами газу в магістральних газопроводах і ґрунту за межами зони впливу трубопроводу на глибині його залягання.

У задачі розрахунку нестаціонарного температурного поля витікання газу з магістрального газопроводу моделюється пористим каналом прямокутного поперечного перерізу, яким тече газ у вертикальному напрямку від місця витікання на трубопроводі до поверхні ґрунту. Така ідеалізація реального процесу дифузії (фільтрації) газу в ґрунті за наявності гравітаційного поля є правдоподібною для витікань із малими втратами газу.

Одновимірне протікання газу каналом постійного поперечного перерізу, заповненого пористим тілом, розглядається у квазістаціонарному наближенні як ізобарне з заданим витіканням газу: при цьому рівняння руху газу вилучається з повної системи рівнянь. Рівняння енергії для двофазного середовища розкладається на два рівняння - для кожної фази відповідно.

У рівнянні енергії для твердої фази (пористого ґрунту) з'являється ефективне об'ємне джерело, яке моделює теплообмін із газом:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \alpha \psi (T_g - T) = 0 \quad (1.2)$$

де величини без індексу належать ґрунту та визначаються з урахуванням пористості як ефективні, T - температура газу, α - коефіцієнт теплообміну між ґрунтом і газом, ψ - питома площа теплообміну. Рівняння енергії для газової фази має вигляд:

$$G C_p \frac{dT_g}{dY} = \alpha \psi S_k (T_g - T) \quad (1.3)$$

де G - втрата газу через витікання, C_p - питома теплоємність газу, S_k - площа поперечного перерізу каналу витікання.

Система рівнянь розв'язується скінченнорізницевим методом. Розрахункова область являє собою паралелепіпед із циліндричним вирізом, який моделює трубопровід. Різницева сітка в площині, перпендикулярній напрямку магістрального газопроводу, вибирається як складова різницевої сітки попередньої задачі, розв'язання якої у вузлах сітки використовується як початкове температурне поле. У напрямку осі вздовж трубопроводу різницева сітка будується аналогічно до сітки у напрямку осі x . Граничні умови по осі y подібні до граничних умов по осі x – використовується умова симетрії при $x=0$ на віддалених від витікання межах розрахункової області використовуються граничні умови 1-го роду.

Диференціальні рівняння (1.1-1.3) на нерегулярній тривимірній різницевій сітці апроксимуються явною скінченнорізницевою схемою першого порядку наближення по просторових змінних і часу.

У процесі математичного моделювання стаціонарного температурного поля проведено варіанти розрахунків для магістрального газопроводу діаметром 1000 мм, заглибленого на 1500 мм (від осі трубопроводу). Температурне поле визначається двома параметрами – ефективним коефіцієнтом теплопровідності та коефіцієнтом тепловіддачі ґрунту. Типові значення коефіцієнта теплопровідності перебувають у межах 0,5 – 4 Вт/мК, а значення коефіцієнта тепловіддачі – від 10 до 50 Вт/мК.

На рисунку 1.8 наведено результати розрахунків температурної аномалії на поверхні ґрунту над магістральним газопроводом за різниці температур газу та ґрунту 10°C для різних значень коефіцієнтів. Амплітуди температурної аномалії проявляють сильну (майже протилежну) залежність від ефективного коефіцієнта тепловіддачі. Як видно, найкращими умовами для виявлення температурних аномалій є ті, для яких коефіцієнт тепловіддачі має найменше значення (хмарна безвітряна погода).

У задачі моделювання тривимірного нестационарного температурного поля в ґрунті навколо трубопроводу з витіканням газу виникають 6 незалежних параметрів, котрі характеризують ґрунт, витікання й умови теплообміну між газом під час витікання та ґрунтом.

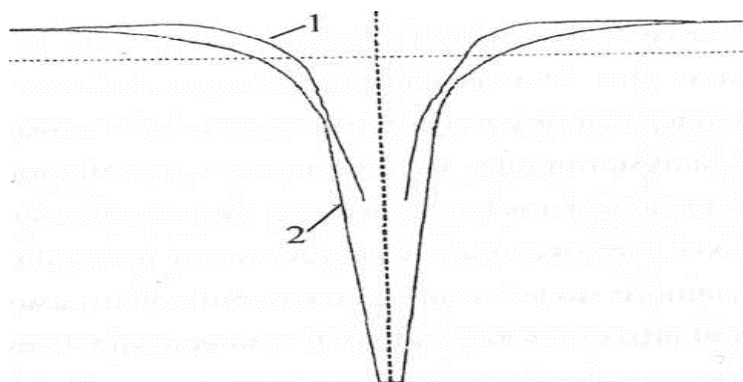


Рисунок 1.8 – Температурна аномалія на поверхні ґрунту над витокком у напрямку вздовж газопроводу

У роботах [91, 41] досліджено залежність розв'язання від параметрів, що являють найбільший інтерес при фіксованих значеннях інших параметрів. Розрахунки виконано для умов, які відповідають течії газу на полігоні з модельованим витіканням улітку 1992 р. Температура газу в газопроводі 25°C , у місці витікання 5°C , температура поверхні ґрунту 15°C . На рисунку 1.9 показано розподіл температури на поверхні ґрунту над витіканням у напрямку, перпендикулярному трубопроводу, для моментів часу 6 та 72 год. після початку витікання. Температурна аномалія на поверхні ґрунту має форму слабовитянутого еліпса з круглим холодним ядром у центрі, розмір аномалії – від 1 до 2 м.

Процес формування температурної аномалії над витіканням складається з двох етапів. На першому з них, що триває дві доби, формується циліндричний канал витікання з розподілом температури вздовж каналу, який у подальшому майже не змінюється. На другому етапі в результаті дифузії тепла в ґрунті навколо каналу відбувається вирівнювання розмірів температурної аномалії з розмиванням перехідної області. При досягненні аномалією розміру, коли встановлюється баланс між теплом, що надійшло в зону аномалії, та теплом, яке передалося холодному газу, що витікає формування аномалії припиняється.

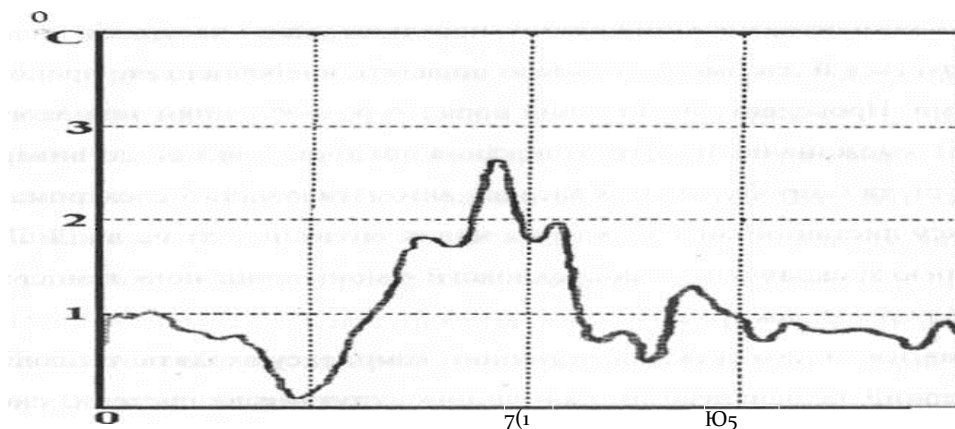


Рисунок 1.9 – Графік розподілу радіаційної температури над місцем витікання газу (350 м.куб/добу)

Тривалість другого етапу – від 3 до 5 діб. Амплітудні значення температурної аномалії відносно фонові температури поверхні ґрунту вдалині від трубопроводу досягають $-4,5^{\circ}\text{C}$.

Для натурального моделювання витікань газу на полігоні, обладнаному на магістральному газопроводі Шебелинка - Дніпропетровськ - Кривий Ріг - Ізмаїл (Україна), із різних місць поверхні трубопроводу діаметром 1020 мм у будь-яку пору року створювалися штучні витікання газу з дебітами від 70 до 4000 м³/добу. Після витримування протягом кількох діб для встановлення стаціонарного розподілу температури виконувалися вимірювання температурного поля в ґрунті за допомогою термоелектричних давачів, заглиблених від 0,2 до 1,5 м, а на поверхні ґрунту – ртутними термометрами. Крім того, провадилася інфрачервона зйомка та визначалася радіаційна температура поверхні ґрунту як з землі, так і шляхом аерозйомки. Аерозйомка здійснювалася з літака АН-2 на висоті від 100 до 300 м.

У процесі математичного моделювання тривимірного нестационарного температурного поля встановлені значення амплітуди температурної аномалії відносно фону, які узгоджуються з результатами натурального моделювання. За даними математичного моделювання можна оцінювати амплітуду температурної аномалії у зоні витікання та розподілу температур у непорушених умовах. Важливим температуроформуєчим чинником є рельєф. Експерименти на ділянках з різною просторовою орієнтацією схилів показали, що варіації температур у складному рельєфі можуть досягати десятків градусів і значно перевищувати за амплітудою температурні збурення, створювані витіканням газу.

На підставі аналізу зазначених чинників визначено оптимальні умови виконання робіт, обґрунтовано вибір сезону, погодних умов і часу доби, коли їх вплив мінімізується та дає змогу впевнено виявляти витікання газу пропонованими методами. Проведені дослідження поряд із розробленням технології виконання робіт уможливають формулювання технічних вимог до вимірювальної апаратури та розробку на цих засадах автоматизованого спектрометричного комплексу дистанційного виявлення малих витікань газу на лінійній частині магістральних газопроводів. Однією зі складових даної технології є моніторинг поля температур і концентрацій газу вздовж трас магістральних газопроводів.

Іншим цікавим напрямком дистанційного обстеження газопроводів є застосування методу радіометрії, заснованому на вимірюванні у районі трубопроводу позірної температури. В. Є. Кудряшовим, В. І. Холодовим, В. В. Бабаєвим виконано аналіз НВЧ – випромінювання неоднорідно зволжених ґрунтів, одержано оцінки якості виявлення температурних аномалій і змодельовано кілька варіантів технічної реалізації комплексу. В результаті теоретичних досліджень розроблено та створено макет автоматичного варіанту комплексу, до складу якого входить сканувальна антенна система, два кореляційні радіометри з робочою частотою 400 МГц та 900 МГц, блок цифрового оброблення та сполучення з ПЕОМ, автономне джерело живлення, контрольно-вимірювальна апаратура. Для керування комплексом, встановлення та документування параметрів, обробки інформації, її перегляду та зберігання розроблено програмне забезпечення.

1.4 Теоретичні засади витікання газів під тиском

Прогнозування витрати газу при його витіканні з технологічних трубопроводів та ємностей під тиском, а також розрахунки втрат газу через корозійні пошкодження газопроводів газових мереж зазвичай здійснюються на основі відомої формули Сен-Венана-Вентцеля, теоретично отриманої на основі відомого в газодинаміці рівняння – рівняння енергії. Всі галузеві нормативні документи, пов'язані з втратами газу, побудовані на основі власне цієї залежності.

Останнім часом в зв'язку з подорожчанням енергоносіїв почали появлятися публікації з результатами досліджень, які свідчать про те, що формула Сен-Венана-Вентцеля дає суттєво завищені результати у визначенні масової витрати витікання газу. Це вносить похибки в плани виконання аварійно-відновлювальних робіт, пов'язаних з втручанням газу, і завищує величину допустимих втрат при експлуатації газових мереж.

Вказана картина вимагає проведення наукових досліджень для коректування методів прогнозування витрати витоків при стравлюванні газу та величини допустимих втрат при експлуатації.

Метою проведених досліджень [39] є удосконалення методів прогнозування витрати витоків газу з технологічних об'єктів, встановлення причин розбіжностей у визначенні витрати газу аналітичними та витратомірними методами та внесення корективів в розрахункові залежності для адаптації прогнозних та фактичних даних.

Слід зауважити, що проведення вказаних досліджень не виключає аналітичних методів, але повинно базуватися на обов'язковій їх перевірці практикою.

Очевидно, що категорично відкинути теоретичні дослідження попередників і відмовитися відомої формули Сен-Венана-Вентцеля недоцільно, оскільки на цій основі отримано ряд важливих результатів (зокрема, твердження про існування критичного і до критичного режимів витікання газу) і вона є загальноновизнаною. Тому доцільно внести поправки до відомої класичної залежності для адаптації її до реальних умов і корективи до існуючих методик визначення витрати газу при витіканні.

Вихідним рівнянням для визначення витрати рідини при її витіканні через отвір є рівняння Бернуллі, яке представляє вираз закону збереження енергії

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \quad (1.4)$$

Суміщаючи перерізи з нерухомим рівнем рідини в посудині і з отвором для витікання, одержимо для швидкості витікання і витрати витікання вирази

$$v = \sqrt{2gH}; Q = F\sqrt{2gH}$$

де F – площа перерізу отвору витікання.

Аналіз фізичної картини процесу витікання рідини показав, що має місце стиснення струмини при витіканні до певної площі f , і відношення площ $f/F = \varepsilon$ називають ступенем стиснення струмини. Гідравлічний опір отвору як місцевого опору враховують коефіцієнтом швидкості $\varphi = 1/\sqrt{1+\varepsilon}$.

Тоді добуток

$$\mu = \varphi \rho \quad (1.5)$$

називають коефіцієнтом витрати отвору і використовують для адаптації розрахункових результатів до фактичних.

Класичними принципами в сфері дослідження процесу витікання газу під тиском слід вважати дослідження Чарного І.А. [81,82] в яких запропоновано аналітичну основу математичного моделювання процесу, яка базується на рівнянні енергії. До видатних досліджень слід також віднести праці Лойцяньського Л. Г.[50], Щербакова С. Г.[83, 84], Яковлева Е.И. [85, 86, 87], Абрамовича Г.Н. [4]. У вказаних працях наведено результати досліджень термогазодинаміки процесу витікання, дано аналіз факторів, що мають вплив на протікання процесу, визначено границі критичного та докритичного витікання, запропоновано розрахункові формули та методики. Однак, реальний вплив параметрів процесу на витрату газу виявляється складнішим в порівнянні з прогнозованим теоретично. Тому фактична витрата витікання газу суттєво відрізняється від розрахункової, що спотворює прогнозовані розрахунки.

Як відомо з [81, 82], в основу розрахунку процесу витікання газу з ємності під тиском покладено рівняння енергії газового потоку, яке називають узагальненим рівнянням Бернулл, і яке, в даному випадку, можна звести до вигляду

$$i_1 - i_2 = \frac{w_1^2 - w_2^2}{2}, \quad (1.6)$$

де i_1, i_2 - ентальпія газу в ємності і в потоці через отвір діаметром d відповідно; w_1, w_2 – лінійні швидкості газу в ємності і отворі.

Для отримання розрахункової залежності витрати газу при витіканні від параметрів процесу беруть до уваги такі припущення:

– процес витікання газу вважається стаціонарним і адіабатичним, тобто таким, що протікає без теплообміну з довкіллям;

– лінійна швидкість газу в ємності в порівнянні з швидкістю витікання газу є несуттєвою, і нею нехтують;

– діаметр отвору в тонкій стінці вважається суттєво більшим від товщини стінки, внаслідок чого нехтують втратами енергії при витіканні;

– газ вважається ідеальним, внаслідок чого нехтують явищем нестисливості.

В результаті нескладних математичних перетворень з [81, 82] отримано залежність, що зв'язує масову витрату з параметрами процесу витікання, яка отримала назву формули Сен-Венана-Вентцеля

$$m = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2k}{k-1} P_0 \rho_0 \left[\left(\frac{P_a}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} - \left(\frac{P_a}{P_0} \right)^{\frac{2}{k}} \right]}, \quad (1.7)$$

де k - показник адіабати процесу; P_0, P_a - тиски в середині ємності та назовні; ρ_0 - густина газу при умовах всередині ємності.

Виходячи з аналогій, при витіканні рідин і газів, в (1.7) доцільно було б ввести коефіцієнт витрати отвору для адаптації результатів розрахунку з фактичними даними і тоді записувати (1.7) у вигляді

$$m = \mu \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2k}{k-1} P_0 \rho_0 \left[\left(\frac{P_a}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} - \left(\frac{P_a}{P_0} \right)^{\frac{2}{k}} \right]}. \quad (1.8)$$

Для встановлення фізичної суті коефіцієнта витрати отвору μ і оцінки його залежності від параметрів процесу витікання необхідний аналіз суттєвості припущень для отримання формули Сен-Венана-Вентцеля.

На основі проведених серій експериментів, які відрізнялись значеннями температури газу в ресивері, були побудовані графічні залежності температури газу в ємності і на поверхні стінки за час випорожнення акумулятора газу. Характер зміни температури в газовому середовищі, а також зміни температури стінки подані на рисунку 1.10.

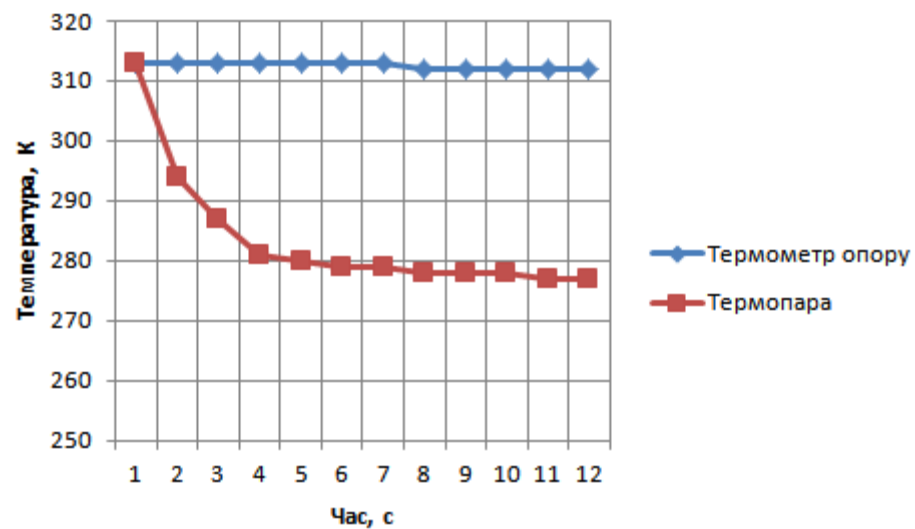


Рисунок 1.10 – Зміна температури газу в процесі витікання

Проаналізувавши дані, можна дійти висновку, що не дивлячись на практично сталу температуру газу в ресивері температура стінки суттєво змінюється протягом навіть короткого часу випорожнення. Тому припущення про адіабатний характер процесу не є адекватним, що, очевидно, відображається на результатах прогнозування.

Для оцінки наступного припущення про те, що швидкість газу в ємності практично рівна нулю, створено математичну модель процесу витікання.

Математична модель створена для лінійної ділянки трубопроводу довжиною $L=12\text{км}$, на початку якої здійснюється відбір газу з сталою масовою витратою $m=50\text{кг/с}$. Метою дослідження було встановлення характеру розподілу

швидкостей газу в трубопроводі. В основу математичної моделі покладено рівняння руху і нерозривності у вигляді

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\lambda \rho w^2}{2d} &= 0, \\ -\frac{\partial P}{\partial t} &= c^2 \frac{\partial(\rho w)}{\partial x}, \end{aligned} \quad (1.9)$$

де $P(x,t)$ - тиск в трубопроводі; ρ - густина газу; w - лінійна швидкість; d - діаметр газопроводу; λ - коефіцієнт гідравлічного опору; c - швидкість звуку в газі.

Реалізація приведеної системи рівнянь здійснювалась при наступних початкових і граничних умовах

$$\begin{aligned} P(x,0) &= P_0, \\ \left. \frac{\partial P^2}{\partial x} \right|_{x=0} &= -\mu m^2, \\ \left. \frac{\partial P^2}{\partial x} \right|_{x=L} &= 0. \end{aligned} \quad (1.10)$$

Система рівнянь (1.10) шляхом диференціювання по часу може бути зведена до рівняння типу теплопровідності відносно масової швидкості газу

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2(\rho w)}{\partial x^2}. \quad (1.11)$$

Краєву задачу для цього рівняння вибираємо з наступних міркувань: в початковий момент часу ($t=0$) в газопроводі спостерігається рівновага, тому $\rho w(x,0)=0$. З деякого моменту часу ($t>0$) на лівому кінці починається відбір газу з сталою масовою витратою $m = const$, внаслідок чого $\rho w(0,t) = \frac{m}{F}$ (де F - площа перерізу газопроводу) і правий кінець газопроводу залишається ізольованим, тому $\rho w(L,t)=0$.

Тоді кінцевий вигляд розв'язку

$$\varphi(x, t) = \frac{2m}{F\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1 - (-1)^n}{n} + (-1)^n \right] \sin \frac{\pi n x}{L} e^{-\frac{\pi^2 n^2 \alpha t}{L^2}}.$$

Для масової швидкості отримаємо

$$\rho w(x, t) = \frac{m}{F} \left\{ \left(1 - \frac{x}{L} \right) + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1 - (-1)^n}{n} + (-1)^n \right] \sin \frac{\pi n x}{L} e^{-\frac{\pi^2 n^2 \alpha t}{L^2}} \right\}. \quad (1.14)$$

Розподіл тиску в газопроводі знайдемо з першого рівняння системи (1.10) у вигляді

$$- \int_{P_0}^P \frac{\partial P}{\partial x} dx = 2a \int_0^x \rho w(x, t) dx,$$

де $2a = \frac{\lambda \bar{w}}{2d}$ - коефіцієнт лінеаризації.

В кінцевому вигляді розподіл тиску в газопроводі як функція лінійної координати і часу виразиться залежністю

$$P^2(x, t) = P_0 - \frac{\lambda \bar{w} m}{2df} \left\{ x \left(1 - \frac{x}{2L} \right) + \frac{2L}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 + (n-1)(-1)^n}{n} \left(1 - \cos \frac{\pi n x}{L} \right) e^{-\frac{\pi^2 n^2 \alpha t}{L^2}} \right\}. \quad (1.15)$$

Тоді для лінійної швидкості газу на основі рівняння нерозривності отримаємо

$$w(x, t) = \frac{2m}{\pi f \rho(x, t)} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1 - (-1)^n}{n} + (-1)^n \right] \sin \frac{\pi n x}{L} e^{-\frac{\pi^2 n^2 \alpha t}{L^2}}. \quad (1.16)$$

$$\text{де } \rho(x,t) = \frac{P(x,t)}{zRT}.$$

На основі останньої залежності побудовано характер зміни лінійної швидкості газу в ресивері на різних відстанях від джерела витікання.

Аналіз результатів, приведених у вигляді графіків на рисунку 1.11, свідчить, що за умов критичного витікання газу через отвір діаметром 50 мм з трубопроводу діаметром 500 мм лінійна швидкість газу в трубопроводі в умовах нестационарного процесу змінюється по довжині і в часі в межах до 29 м/с. Якщо критичну швидкість витікання газу вважати рівною швидкості звуку в повітрі $c = \sqrt{kRT}$, яка при температурі 313 К складає 355 м/с, то співвідношення лінійних швидкостей газу складе понад 8 %. Це значить, що нехтування величиною швидкості газу в трубопроводі обумовлює певну похибку в результаті розрахунку масової витрати витікання газу.

Два наступних припущення, при яких отримано залежність (1.9), можуть бути підтвержені або спростовані тільки дослідним шляхом. В зв'язку з чим проводились серії дослідів на експериментальному стенді.

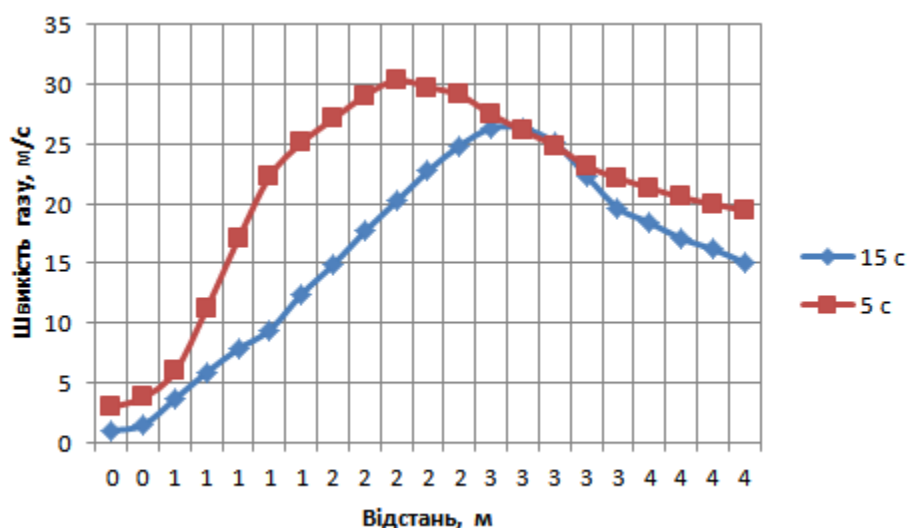


Рисунок 1.11 – Зміна лінійної швидкості газу в трубопроводі в процесі витікання

В процесі стравлювання повітря з ємності через отвори з однаковою

площею перерізу і різною формою (круг, квадрат, щілина) фіксувався в часі процес падіння тиску в ресивері (рисунок 1.12).

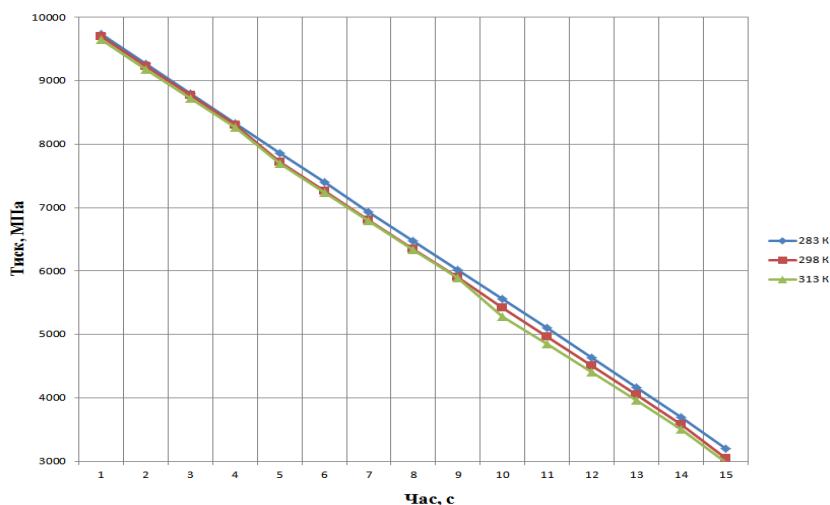


Рисунок 1.12 – Зміна тиску в ресивері в процесі витікання газу

Як свідчать результати дослідів, зміна форми отвору, через який відбувається витікання, в умовах критичного процесу суттєвого значення не має.

За результатами досліджень, виконаних і опрацьованих за наведеною методикою, побудовано графічні залежності коефіцієнта витрати отвору від тиску в ресивері і температури (при сталих параметрах середовища), які подано на рисунку 1.13.

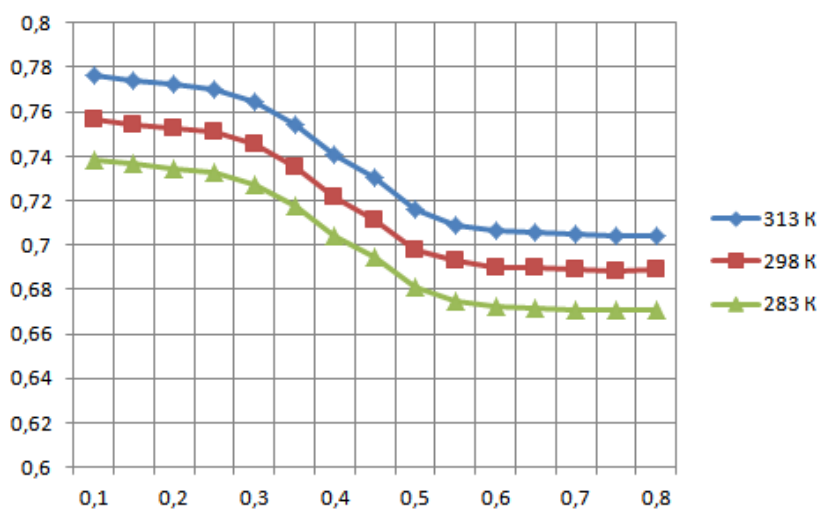


Рисунок 1.13 – Зміна коефіцієнта витрати витікання в залежності від тиску і температури

Аналізуючи графіки, що показані на рисунку 1.13 можна зробити такі висновки.

Припущення, покладені в основу отримання залежності масової витрати при витіканні газу з ємності через отвір в тонкій стінці, мають суттєвий вплив на результати моделювання процесу, оскільки реальна масова витрата значно відрізняється від розрахункової. При зміні абсолютного тиску в ресивері від 1,0 МПа до 0,54 МПа (кінець зони критичного витікання) коефіцієнт витрати змінюється від 0,776 до 0,709 при температурі в ресивері 288 К. Збільшення температури газу в ресивері приводить до більш суттєвого відхилення фактичної витрати від теоретичної. Тоді при температурі в ресивері 283 К і тиску 1,0 МПа коефіцієнт витрати складає 0,776, а при збільшенні температури до 298 К знижується до 0,756 і при подальшому зростанні температури до 313 К – зменшується до 0,738. При тиску 0,54 МПа за температури 283 К коефіцієнт витрати складає 0,709, а при зростанні температури до 298 К зменшується до 0,696 і в подальшому при зростанні температури до 313 К знижується до 0,678.

Для встановлення функціональної емпіричної залежності коефіцієнта витрати отвору від параметрів процесу витікання проводились серії дослідів на описаному вище дослідному стенді і здійснювалась їх обробка.

У серіях проведених експериментів оцінювався вплив тиску і температури в ресивері, фізичних властивостей газу і діаметру отвору в заданих межах на величину коефіцієнта витрати отвору в умовах критичного та до критичного режимів витікання.

Серед незалежних факторів, які мають вплив на величину коефіцієнта витрати отвору, були вибрані такі:

- абсолютний тиск газу в ресивері, P_0 ;
- абсолютна температура газу в ресивері, T_0 ;
- газова стала робочого тіла, R ;
- діаметр отвору, d .

В результаті проведення експериментів і обробки отриманої інформації побудовано залежності для визначення коефіцієнту витікання газу.

Усереднений коефіцієнт знаходився методом найменших квадратів, у результаті отримано емпіричну залежність, що має вигляд

$$\mu = 0.285 \cdot d^{0.45} R^{0.033} T^{0.034} \exp(-0,0015P^2),$$

де μ - коефіцієнт витрати отвору; d – діаметр отвору в мм.; R - газова стала в Дж/кгК.; T – абсолютна температура в ресивері в К; P - тиск газу в бар.

Одержана залежність добре корегує з аналітичними виразами, одержаними на основі реалізації математичної моделі, що підтверджує достовірність проведених досліджень.

Слід зазначити, що створена математична модель отримана і справедлива тільки для умов критичного режиму витікання газу.

Докритичний режим витікання газу з ємності під тиском характеризується швидкостями в перерізі отвору, які менші за швидкість звуку в газі при умовах витікання. В таких умовах формула Сен-Венана-Вентцеля дає прогностні результати, більш наближені до фактичних, проте також дещо завищені. В зв'язку з цим проведені розрахунки з визначення коефіцієнта витрати отвору для умов докритичного режиму витікання за результатами дослідів дозволили отримати формулу:

$$\mu = 0.582 \cdot (R T)^{0.025} P^{-0.11}, \quad (1.19)$$

де μ - коефіцієнт витрати отвору; R - газова стала в Дж/кгК.; T – абсолютна температура в ресивері в К; P - тиск газу в ресивері, бар.

Суттєво різні результати, отримані для області докритичного та критичного режиму витікання газу мають своє фізичне трактування.

Формула Сен-Венана-Вентцеля отримана на основі класичного рівняння енергії, яке є виразом загального закону природи – закону збереження енергії -

строго виведена для умов докритичного режиму витікання газу. В цих умовах вона має несуттєві розбіжності з практикою.

Припущення Сен-Венана про те, що тиск у вихідному перерізі сопла не може падати нижче критичного і, відповідно, поширення збурення у вигляді зменшення тиску довкілля не може перетнути бар'єр звукової швидкості, оскільки поширюється з швидкістю $c-w$, є правомірним і підтверджується практикою. Однак, при критичному режимі витікання струмина газу в навколишньому середовищі (за соплом) зазнає різкого розширення. Виходячи з рівняння нерозривності, можна стверджувати, що швидкість газу в напрямку потоку різко падає і, відповідно до закону Бернуллі, викликає зростання тиску середовища, тобто сприяє зростанню гідравлічного опору середовища. З іншого боку розширення перерізу струмини газу спричиняє зменшення його густини, що призводить до зниження масової витрати газу. Методика, побудована на основі теорії Сен-Венана, для критичного режиму витікання не враховує цього ефекту, що призводить до завищених результатів визначення масової витрати.

Таким чином, однією з причин неадекватності математичної моделі слід вважати неврахування зростання газодинамічного опору середовища руху газової струмини з великою лінійною швидкістю та зменшення густини газу в струмині внаслідок її розширення.

Крім того, слід зауважити, що модель Сен-Венана-Вентцеля отримана для ідеального газу, що спрощує рівняння газового стану. Залежність густини газу від тиску і температури дає завищений результат, оскільки не враховується над стисливість реального газу (коефіцієнт стисливості $z < 1$). В умовах докритичного режиму витікання газу внаслідок невисоких надлишкових тисків стан реального газу мало відхиляється від стану реального газу і коефіцієнт стисливості можна вважати $z = 1$.

Зауважимо також, що припущення про відсутність теплообміну з довкіллям та нульовим значенням швидкості газу в ресивері (на деякій відстані від отвору) також вносять похибку в результат визначення витрати газу.

Отримані на основі порівняння результатів теоретичних і фактичних досліджень поправки до формули Сен-Венана-Вентцеля дозволяють адаптувати модель до реальності в умовах докритичного та критичного режимів витікання газу.

1.5 Аналіз досліджень витікання газу з газопроводу і його фільтрації в ґрунті

В основу математичних моделей покладено рівняння нестационарної плоскої фільтрації рідини в пористому середовищі, в якій джерело витоків розглядається як точкове джерело і моделюється за допомогою функції Дірака. Лінійна фільтрація неперервного середовища в ґрунті описується законом Дарсі, згідно з яким швидкість фільтрації з урахуванням джерела

$$\omega = -\frac{k}{\eta} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{q}{F} \delta(x - x_g). \quad (1.20)$$

Рівняння нерозривності лінійної фільтрації з урахуванням зв'язку між тиском і густиною у формі $c^2 = dP/d\rho$ має вигляд

$$-\frac{\partial P}{\partial t} = c^2 \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial x}. \quad (1.21)$$

Диференціюючи (1.20) за часом і (1.21) за лінійною координатою та переходячи до плоскої задачі, отримаємо математичну модель у вигляді

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{kc^2\rho}{\eta} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) - \frac{kc^2\rho}{\eta} \frac{q}{F} \delta(x - x_g) \delta(y - y_g), \quad (1.22)$$

де: ω - швидкість фільтрації як функція часу t і просторових декартових координат x, y ; x_g, y_g - координати точкового джерела інтенсивністю q ; $\delta(x - x_g), \delta(y - y_g)$ - функції Дірака; F - площа перетину фільтрації.

Загальний процес формування ареалу загазованості може бути розділений на дві нестационарні фази. Перша фаза починається з моменту виникнення витoku і закінчується досягненням газом поверхні ґрунту. Для першої фази швидкість фільтрації на поверхні ґрунту за весь період рівна нулю. Друга фаза нестационарної фільтрації починається з моменту досягнення газом поверхні ґрунту і закінчується (при умові сталості інтенсивності джерела) переходом до стаціонарного процесу витікання газу через ґрунт в атмосферу.

При створенні математичної моделі формування ареалу забруднення ґрунту газу, що витікає з газопроводу, прийнято такі наступні припущення:

- інтенсивність витікання газу в ґрунті постійна в часі;
- фільтрація рідини в ґрунті лінійна і підпорядковується закону Дарсі;
- фільтрація ґрунтових вод у середовищі відсутня.

В основу математичної моделі покладено рівняння нестационарної плоскої фільтрації рідини в пористо джерело і моделюється за допомогою функції Дірака (1.22).

При виборі початкових і граничних умов вважалось, що в початковий момент часу фільтрація газу в ґрунті відсутня, поверхня ґрунту газу му середовищі, в якій джерело витоків розглядається як точкове непрониклива, а на безмежному віддаленні від джерела швидкість фільтрації дорівнює нулю, тобто

$$\omega(x, y, 0) = 0; \omega(0, h, t) = 0; \omega(\infty, h, t) = 0 \quad (1.23)$$

де h - глибина закладення газопроводу в ґрунті.

Поставлена задача розв'язувалась із застосуванням інтегральних перетворень, в результаті одержано розв'язок поставленої задачі у вигляді

$$\begin{aligned}
\omega(x, y, t) = & \frac{q}{2\pi F} \int_0^{\infty} \frac{\sin \lambda y_g \sin \lambda y}{\lambda} \times \\
& \times \left\{ \left[\sigma(x - x_g) - 1 \right] \left[e^{-\lambda(x_g - x)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x_g - x}{2\sqrt{\lambda t}} - \lambda\sqrt{\lambda t} \right) - \right. \right. \\
& \left. \left. - e^{-\lambda(x_g - x)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x_g - x}{2\sqrt{\lambda t}} + \lambda\sqrt{\lambda t} \right) \right] - \right. \\
& \left. - \sigma(x - x_g) \left[e^{-\lambda(x - x_g)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - x_g}{2\sqrt{\lambda t}} - \lambda\sqrt{\lambda t} \right) - \right. \right. \\
& \left. \left. - e^{-\lambda(x - x_g)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - x_g}{2\sqrt{\lambda t}} + \lambda\sqrt{\lambda t} \right) \right] \right\} d\lambda, \tag{1.24}
\end{aligned}$$

де $\sigma(x - x_g)$ – одинична функція Хевісайда,

$$\sigma = \begin{cases} 1, & \text{якщо } x > x_g \\ 0, & \text{якщо } x \leq x_g \end{cases},$$

$\operatorname{erfc}(z)$ – інтеграл імовірності,

$$\operatorname{erfc}(z) = \int_0^{\infty} e^{-z^2} dz.$$

Рівняння (1.24) дозволяє отримати в кожній точці площини з координатами (x_i, y_i) значення швидкості фільтрації w_i в певний момент часу, обумовлене дією одного точкового джерела інтенсивністю q .

Реалізація (1.24) із застосуванням числових методів дозволила отримати характер розподілу швидкостей фільтрації газу в ґрунті при появі витоку газу з газопроводу різної інтенсивності. Слід зауважити, що математичне моделювання

у формулі (1.24) справдилося для проміжку часу, коли витік газу не досягне поверхні ґрунту .

Для встановлення закономірностей формування поля швидкостей фільтрації газу в ґрунті проведено обчислювальний експеримент на основі створеної моделі. В умовах експерименту вважалося, що на глибині 1 м знаходиться точковий малий витік газу інтенсивністю $20\text{ мм}^3/\text{с}$ через корозійний отвір в стінці труби круглої форми діаметром 2 мм. При цьому лінійна швидкість витіку газу через отвір складає $6,37\text{ мм/с}$ (382 мм/хв). Проникність середовища (ґрунту в непорушеному стані) прийнято рівною 0,5 дарсі. Вздовж осі трубопроводу (засипка траншеї) проникність вважається в 1,5 рази більшою.

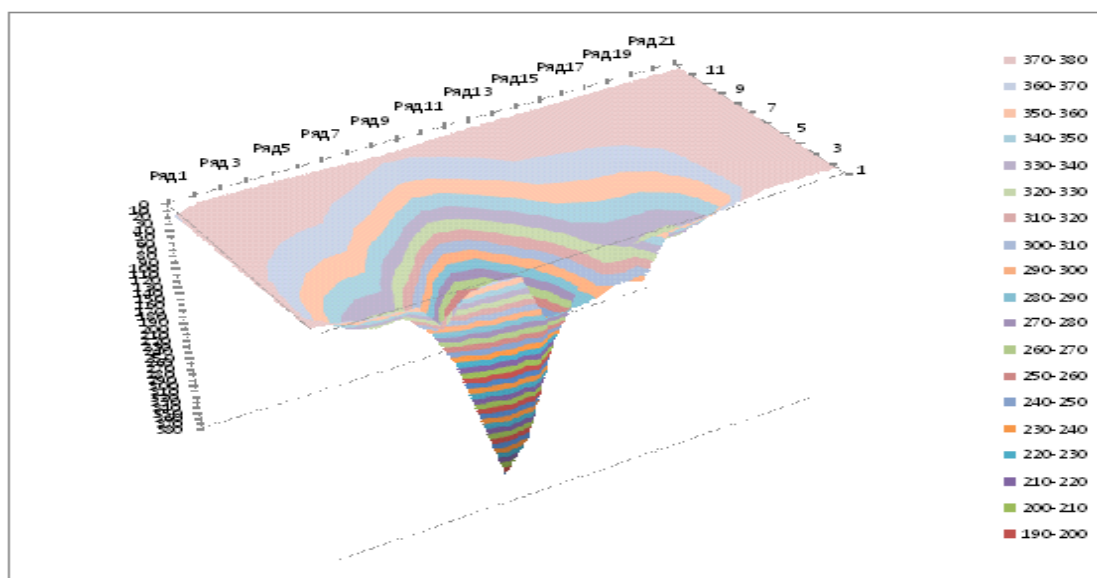


Рисунок 1.14 – Результати математичного моделювання поля швидкостей фільтрації при появі витіку з газопроводу

Ареал загазованості ґрунту витіками газу з газопроводу на глибинах, близьких до трубопроводу, займає поверхню, співрозмірну з розмірами траншеї. З наближенням до поверхні трубопроводу форма ареалу загазованості наближається до еліпса, велика вісь якого спрямована вздовж осі трубопроводу, а площа складає близько 40 м^2 .

Запропонована математична модель дозволяє підвищити ефективність діагностування малих витоків з газопроводів і оцінити розміри ареалів загазованості при цьому.

Для другої фази нестационарного процесу формування ареалу забруднень витокami з газопроводу важливо оцінити характер закінчення формування ареалу загазованості ґрунту і величину витoku газу в атмосферу.

Розглядається плоска задача фільтрації газу в пористому середовищі при виникненні точкового джерела, яким являється витік газу з газопроводу.

Припустимо, що до початку дії джерела ($t = 0$) система знаходиться в спокої і тиск повітря у всіх точках площини внаслідок незначної глибини залягання був атмосферним

$$P(x, y, 0) = P_a.$$

Нехай в процесі дії джерела на поверхні ґрунту і на значній віддалі від джерела тиск залишається атмосферним, тобто при $t > 0$ маємо

$$P(x, 0, t) = P_a, \quad P(\omega, y, t) = P_a.$$

Тоді поставлена задача такого вигляду знайти розв'язок рівняння

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) - \alpha q \xi \delta(x - x_0) \delta(y - y_0),$$

при наступних початкових і граничних умовах

$$w(x, 0, t) = 0; \quad w(x, y, 0) = 0,$$

$$t = 0 \rightarrow P(x, 0, t) = P_a, P(x, y, t) = P_a,$$

$$t > 0 \rightarrow P(x, U_0, t) = P_a, P(\infty, Y, t) = P_a.$$

Розв'язок поставленої задачі розподілу тиску в паровому середовищі має вигляд

$$\begin{aligned}
 P(x, y, t) = & P_a + \frac{q}{2\pi} \int_0^\infty \frac{\sin \lambda y_0 \sin \lambda y}{\lambda} \times \\
 & \times \left\{ [\sigma(x - x_0) - 1] \left[e^{-\lambda(x_0 - x)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x_0 - x}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t} \right) - \right. \right. \\
 & \left. \left. - e^{-\lambda(x_0 - x)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x_0 - x}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t} \right) \right] - \sigma(x - x_0) \times \right. \\
 & \times \left[e^{-\lambda(x - x_0)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - x_0}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t} \right) - \right. \\
 & \left. \left. - e^{-\lambda(x - x_0)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - x_0}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t} \right) \right] \right\} d\lambda.
 \end{aligned} \tag{1.25}$$

Рівність (1.25) дозволяє отримати в кожній точці площини з координатами (x_i, y_i) значення тиску в певний момент часу, обумовлене дією точкового джерела інтенсивністю q .

Для знаходження швидкості фільтрації газу в ґрунті як функції просторових координат і часу скористаємось плоским рівнянням Дарсі

$$w(x, y, t) = \frac{k}{2} \left(\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial y} \right). \tag{1.26}$$

В [35] наведено результати реалізації математичної моделі формування ареалу загазованості ґрунту витокami газу з газопроводу, створеної фази

нестационарного процесу фільтрації, впродовж якої витік газу досягає поверхні ґрунту. Аналіз результатів розрахунків свідчить, що площа поверхні загазованості (на поверхні ґрунту) складає близько 40 м^2 , а тривалість першої фази перевищує 10 хв . При цьому різне зростання ареалу загазованості спостерігається близько поверхні ґрунту (на останніх 10% глибини площа загазованості зростає на 32,2%). Показано також, що на характер формування ареалу забруднень мало впливає величина витрати витоку газу (для газопроводів низького і середнього тиску) і залежності параметрів ареалу загазованості від величини витоку є нелінійними.

Створена математична модель фільтрації газу в пористому середовищі (ґрунті) є більш справедливою для першої фази нестационарної фільтрації (досягнення поверхні ґрунту), другої фази нестационарної фільтрації (нестационарне витікання газу в атмосферу) і стаціонарного витікання газу через ґрунт в атмосферу. Слід зауважити, що не дивлячись на різний підхід до побудови математичних моделей, результати реалізації моделі [35] співпадають з аналогічними результатами нашої моделі, одержаними для ідентичних умов першої фази нестационарної фільтрації. На основі результатів досліджень, поданих в [35], з урахуванням реалізації запропонованої математичної моделі побудовано графіки, які обмежують границі ареалу загазованості для першої і другої фаз процесу нестационарної фільтрації газу. Вказані графіки для напрямку вздовж і поперек трубопроводу наведені на рисунку 1.15.

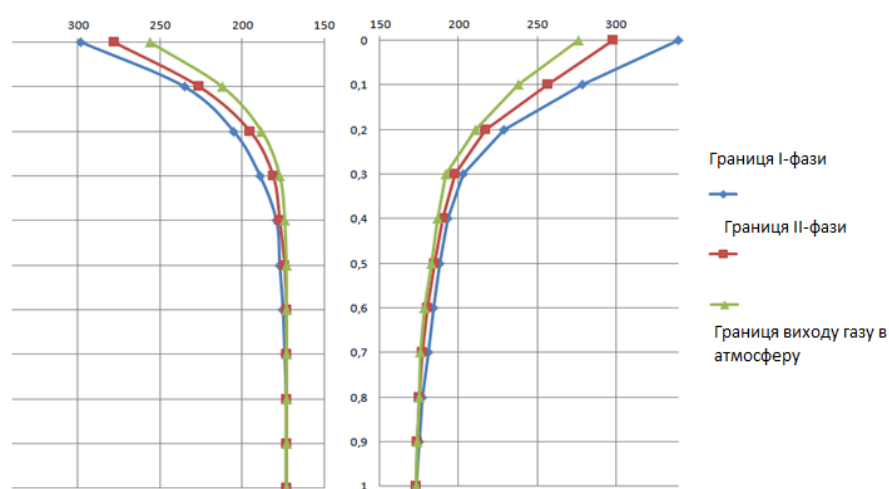


Рисунок 1.15 – Друга фаза нестационарної фільтрації газу

Аналіз результатів свідчить, що найбільший об'єм ареал загазованості ґрунту займає на кінець першої фази нестационарної фільтрації газу в ґрунті.

Це пояснюється наявністю певного фільтраційного опору ґрунту в період досягнення газом поверхні ґрунту. З наближенням до поверхні величина фільтраційного опору зменшується, що призводить до зростання поверхні ареалу загазованості.

Після досягнення газом поверхні ґрунту фільтраційний опір різко зменшується, що призводить до зростання швидкості переходу газу з ґрунту в атмосферу. Внаслідок цього площа поверхні загазованості повинна зменшитися, а відповідно до принципу нерозривності, швидкості виходу газу в атмосферу – зрости. Побудована нами математична модель підтверджує це положення. Таким чином, в період першої, другої нестационарної фази площа поверхні загазованості повинна зменшуватися, а швидкість виходу газу в атмосферу – зростати.

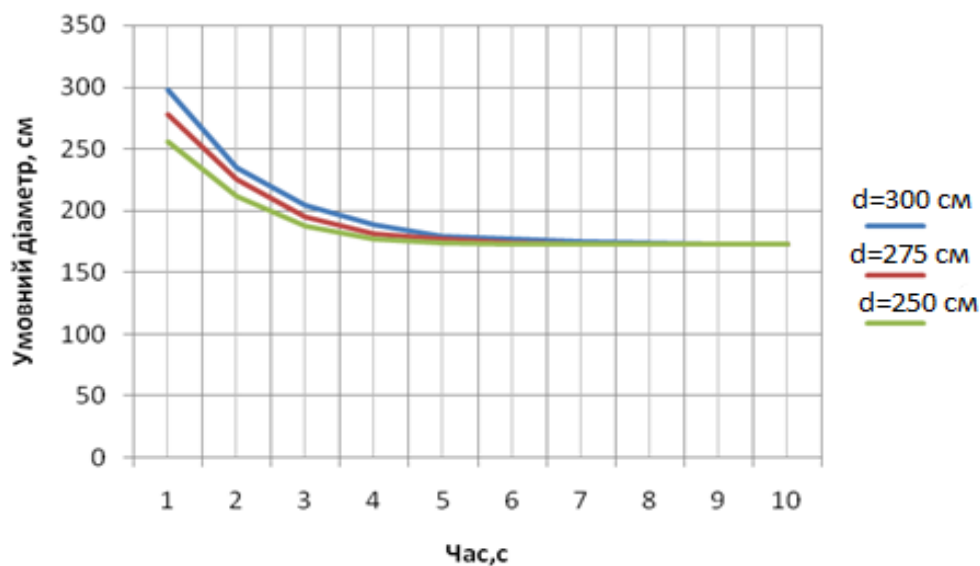


Рисунок 1.16 – Зменшення розмірів ареалу загазованості в процесі другої фази нестационарної фільтрації

Такий нестационарний процес триватиме до встановлення енергетичної рівноваги, яка забезпечить стаціонарний процес витікання газу з газопроводу, його фільтрацію через шар ґрунту і витікання з поверхні ґрунту в атмосферу. Очевидно, що при цьому масова витрата витоку газу з газопроводу повинна бути

рівна масовій витраті виходу газу з поверхні ґрунту в атмосферу внаслідок стаціонарності процесу. Це встановлює взаємозв'язок між величиною витoku газу з газопроводу і величиною його виходу з поверхні ґрунту в атмосферу. Такий підхід дає можливість оцінити втрати газу через корозійні пошкодження трубопроводів при транспортуванні та розподіленні з одного боку і вести діагностичні спостереження і контроль за пошкодженнями газопроводів.

1.6 Формування задач досліджень

Аналіз літературних джерел з питань діагностування аварійних витоків з газонафтопроводів дозволив сформулювати мету і задачі майбутніх досліджень.

Метою дисертаційної роботи є удосконалення контролю за втратами газу в процесі експлуатації магістральних газопроводів на основі встановлення закономірностей процесів витікання газу і його фільтрації в ґрунті.

Вказана мета досягається через реалізацію таких задач досліджень:

- аналітичні дослідження характеру фільтрації газу в пористому середовищі при появі аварійних витоків з газопроводу;
- оцінка впливу зовнішнього тиску на витрату аварійного витoku газу з магістрального газопроводу;
- дослідження фільтраційних характеристик ґрунтів і їх залежностей від зовнішніх і внутрішніх факторів;
- встановлення закономірностей формування ареалу загазованості довкілля аварійними витоками з газопроводів.

Основні положення цього розділу викладені у публікаціях [34, 35, 101, 39, 41].

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИТІКАННЯ ГАЗУ З ПІДЗЕМНИХ ГАЗОПРОВІДІВ ПІД ТИСКОМ

Лінійна частина магістральних газопроводів більш як на 90% знаходиться в підземному середовищі, тобто оточена ґрунтом. Саме та частина лінійних ділянок є найбільш сприятливим об'єктом для протікання корозійних процесів, викликаних пошкодженням ізоляційного покриття і дією агресивного середовища, що створює умови появи корозійних пошкоджень, які супроводжуються витоками газу з газопроводу.

Витік газу на підземній частині ділянки газопроводу надзвичайно небезпечний, оскільки окрім втрат цінного енергоносія призводить до утворення зони загазованості ґрунту і повітряного басейну, що викликає вибухонебезпечну ситуацію.

Очевидно, що фізичні властивості, зокрема фільтраційний опір, ґрунту як корисного середовища повинні мати вплив на інтенсивність витікання газу з газопроводу і формування ареалу загазованості. Тому існує взаємозв'язок між процесом витікання газу з газопроводу через аварійний отвір і його фільтрацією в навколишньому ґрунті.

Розглядається процес нестационарної фільтрації газу в ґрунті, викликаний появою аварійного витоку з газопроводу. Запропоновано розрахувати першу і другу стадію нестационарної фільтрації в процесі формування ареалу загазованості. Отримано на основі математичних моделей розрахункові залежності для прогнозування формування поля розподілу тисків в пористому середовищі для кожної з фаз нестационарної фільтрації. Встановлено характер зміни величини масової витрати витоку в часі впродовж процесу нестационарної фільтрації, показано, як впливають властивості ґрунту (зокрема його проникність) на тривалість нестационарного процесу і величину витрати витоку. На основі співставлення аналітичних результатів з реальними внесено поправки до відомої формули Сен-Венана-Вентцеля з межею її адаптації.

2.1 Мета і завдання дослідження

Процес витікання газу з ємності, де він знаходиться під надлишковим тиском, через отвір досліджувався роботами ряду вчених, серед яких слід відмітити в першу чергу Чарного І.А. [81,82] в яких запропоновано аналітичну основу математичного моделювання процесу, яка базується на рівнянні енергії. До видатних досліджень слід також віднести праці Лойцяньського Л. Г.[50], Щербакова С. Г.[83, 84], Яковлева Е.И. [85, 86, 87], Абрамовича Г.Н. [4]. У працях наведено результати досліджень термогазодинаміки процесу витікання, дано аналіз факторів, що мають вплив на протікання процесу, визначено границі критичного та докритичного витікання, запропоновано розрахункові формули та методики. Однак, реальний вплив параметрів процесу на витрату газу виявляється складнішим в порівнянні з прогнозованим теоретично. Тому фактична витрата витікання газу суттєво відрізняється від розрахункової, що спотворює прогнозовані розрахунки.

В результаті аналітичних досліджень, в основу яких покладено рівняння енергії газового потоку отримано залежність, що зв'язує масову витрату з параметрами процесу витікання, яка відома під назвою формули Сен-Венана-Вентцеля

$$G = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2k}{k-1} P_0 \rho_0 \left[\left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} - \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{\frac{2}{k}} \right]}, \quad (2.1)$$

де k - показник адіабати процесу; P_0, P_1 - тиски в середині ємності та назвні; ρ_0 - густина газу при умовах всередині ємності, d - діаметр отвору.

Запропонована формула є класичною залежністю, яку використовують для визначення інтенсивності витікання газу.

Аналіз характеру залежності витрати m від відношення тиску газу на виході з сопла до тиску перед соплом $p_1/p_0 = \psi$, що дається рівнянням (2.1), показує, що ця залежність має вигляд параболи (рисунок 2.1).

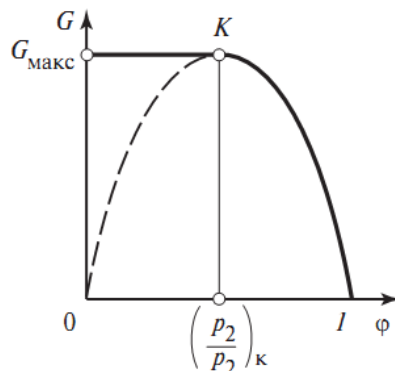


Рисунок 2.1 – Залежність масової витрати витікання від перепаду тисків.

Очевидно, що $G = 0$ при $\psi = 1$. При подальшому зменшенні ψ значення G починає зростати, досягаючи максимуму при деякому ψ . При подальшому зменшенні ψ значення G відповідно до рівняння (2.1) зменшується, перетворюючись на нуль при $\psi = 0$. Порівняння описаної залежності $G = f(\psi)$ з експериментальними даними по витіканню газів з сопел виявило цікаву картину. У інтервалі значень ψ від одиниці до значення, що відповідає максимальній витраті, результати розрахунку по рівнянню (2.1) добре співпадають з експериментальними даними. Що ж до області значень ψ між значенням, що відповідає максимальній витраті, і нулем, то був виявлений дивовижний результат - зменшення тиску середовища за отвором ніяк не впливало на витрату газу; витрата G залишалася постійною для усього цього інтервалу змін ψ . Для того, щоб пояснити цю розбіжність теорії з експериментом А Сен-Венаном була висунена гіпотеза про те, що при розширенні газу, неможливо отримати тиск газу нижче деякого критичного значення витікання p^* , газу, що відповідає максимальній витраті. Отже, при скільки завгодно низьких тисках середовища за отвором, менших p^* , тиск газу у вихідному перерізі залишається постійним і

рівним p^* . Тому зроблене раніше твердження про те, що швидкість газу на виході з сопла w росте зі зменшенням ψ , потребує істотного уточнення: це зростання має місце лише до тих пір, поки p_1 не зменшиться до p^* . Подальше зниження тиску за отвором не призводить до зростання w . Таким чином, процес витікання газу через отвір ділиться на дві фази: докритичне і критичне витікання.

Відомі також результати досліджень [35], якими доведено на основі проведених експериментів, що формула Сен-Венана-Вентцеля дає результати в порівнянні з фактичними даними з відхиленням в більшу сторону, і це відхилення характерне як для докритичного, так і для критичного витікання.

Отримано поправки, для адаптації залежності (2.1) до реальних умов, що є функціями параметрів процесу витікання і фізичних властивостей газу.

Однак, дослідження проведені для умов витікання газу в атмосферу, тобто за умови $P_1 = P_a$ (P_a - атмосферний тиск), тому для умов підземного газопроводу вони не придатні, оскільки не враховують фільтраційного опору ґрунту.

Обробка результатів експериментальних досліджень методами теорії раціонального планування експерименту [91] дозволено отримати емпіричні залежності для адаптивних поправок до формули Сен-Венана-Вентцеля:

-для критичного витікання газу

$$\mu = 0.285 \cdot d^{0.45} R^{0.033} T^{0.034} \exp(-0,0015P^2) \quad (2.2)$$

- для докритичного витікання газу

$$\mu = 0.582 \cdot (R T)^{0.025} P^{-0.11} \quad (2.3)$$

де μ - коефіцієнт витрати отвору; d – діаметр отвору в мм; R - газова стала в Дж/кгК; T – абсолютна температура в ресивері в К; P - тиск газу в бар.

Таким чином залежність (2.1) адаптується до реальних умов витікання газу в атмосферу. Для підземних газопроводів необхідно врахувати гідравлічний опір ґрунту на основі дослідження процесів фільтрації газу.

В ряді досліджень [38, 39] розглядається процес фільтрації газу в ґрунті внаслідок появи аварійного витіку з газопроводу.

2.2 Методика проведення досліджень

Загальний процес формування ареалу загазованості пропонується розділити на дві нестационарні фази. Перша фаза починається з моменту виникнення витіку і закінчується досягненням газом поверхні ґрунту. Для першої фази швидкість фільтрації на поверхні ґрунту за весь період рівна нулю. Друга фаза нестационарної фільтрації починається з моменту досягнення газом поверхні ґрунту і закінчується (при умові сталості інтенсивності джерела) переходом до стаціонарного процесу витікання газу через ґрунт в атмосферу.

На основі створених математичних моделей побудовано поле швидкостей фільтрації газу в процесі формування ареалу загазованості для першої і другої фаз нестационарної фільтрації. При цьому вважається, що масова витрата газу через корозійний отвір вважається сталою в часі.

Вибір методу розрахунку неусталених режимів фільтрації газу в пористому середовищі залежить від багатьох факторів: геометрії задачі, стаціонарності чи не стаціонарності течії, точності розрахунку, числа необхідних вузлових значень тощо. При оцінюванні того чи іншого методу необхідно враховувати його складність, гнучкість, пристосовуваність. Тому не можна виділити один якийсь конкретний метод як оптимальний для всіх випадків.

Привертають увагу сучасні методи розв'язання задач [35,41,75], які описуються диференційними рівняннями у часткових похідних. Найбільш поширений метод сіток внаслідок своєї універсальності і наявності добре розроблених теорій. Для його використання в області визначення шуканих функцій вводять сітку; всі похідні, які входять у рівняння та крайові умови,

замінюються різницеvими значеннями у вузлах сітки. Розв'язок отриманих при цьому алгебраїчних рівнянь дає наближені значення функції у вузлах сітки. Кінцево-різницеvі вирази можна одержати також, використавши апроксимуючу аналітичну функцію з вільними параметрами, яка будується зі значеннями у вузлах сітки, а потім аналітично диференціюється. При цьому вид апроксимуючої функції повинен визначатися аналітичним розв'язком або на основі експериментальних даних.

Найчастіше як апроксимуючі функції використовують поліноми, при цьому в ряді практичних задач не вище другого порядку.

Для явних схем невідомі значення шуканої функції можна виразити через відомі. Для неявних схем на кожному шарі одержуємо систему Лінійних рівнянь відносно невідомих значень функції. Найчастіше матриця цієї лінійної системи тридіагональна і розв'язок можна знайти алгебраїчною перегонкою.

Основною перевагою явних систем є простота розв'язку апроксимуючих рівнянь. Явні схеми економічні, оскільки для переходу до нового шару потрібно виконати арифметичні дії у кількості, пропорційній до першого ступеня числа невідомих. У цьому розумінні явна схема не поліпшується. Суттєвим недоліком явних схем є:

- динамічна нестійкість, пов'язана з обмеженням на величину кроку за часом;
- статична нестійкість, зумовлена для рівняння теплообміну за величиною температуропровідності.

У [17,32] розглянуто числові розв'язки задачі нестационарної теплопровідності кінцево-різницеvими методами. При цьому використані: явна кінцево-різницева апроксимація з введенням додаткових вузлів на відстані 0,5 кроку від границі (сітка Шмідта); неявна кінцево-різницева апроксимація за шеститочковою схемою (схема Кранка-Ніколсона); неявна кінцево-різницева апроксимація за чотириточковою схемою.

Аналіз розв'язків із використанням вказаних видів сіток показав, що явні різницеvі схеми для розв'язку крайових задач більш ефективні, ніж неявні,

оскільки, по-перше, дають змогу збільшувати часовий крок (особливо у випадку Кранка-Ніколсона), по-друге, використовувати нерівномірну розбивку області, за допомогою якої можна точніше апроксимувати границі області та точніше враховувати граничні умови. Для розв'язання двомірних задач теплопровідності розглянуто методи розщеплення, коли складну задачу математичної фізики можна звести до послідовного розв'язання більш простих задач. Зокрема, рекомендують два наближених методи: локально-одномірний (ЛОМ) та метод змінних напрямків (МЗН), тією чи іншою мірою строго розроблені поки що тільки для розв'язку двомірних задач.

Аналізуючи чутливість розв'язків, рекомендувати для тих розрахунків, які не вимагають високої точності, схему ЛОМ, а при розрахунках з високим ступенем точності використовувати схему МЗН, яка дає розв'язки, близькі до істинних, особливо при досягненні усталеного стану.

Метод змінних напрямків за останні роки широко застосовується в задачах гідродинаміки та теплообміну. Це пояснюється тим, що МЗН простий і єдиний для кожного рівняння початкової системи, він застосовується для розв'язання як стаціонарних, так і нестаціонарних задач. Різницева схема що використовується, об'єднує (стосовно кожного окремо взятого рівняння системи) переваги явної та неявної схем, тобто є економічною і, безумовно, стійкою. Метод не має обмежень, пов'язаних із типом апроксимації конвективних членів, що особливо важливо у зв'язку з відсутністю аналізу схемної в'язкості для двомірного випадку.

Досліджуючи роботи різних авторів [43,44], бачимо, що більшість неявних схем, безумовно стійких при застосуванні до диференційних рівнянь з постійними коефіцієнтами, не може бути такою ж і при застосуванні до системи рівнянь, які описують течію стискуваної рідини. Тепер нелінійні задачі течії рідини більш успішно розв'язуються за допомогою явних схем [43,44], хоча в майбутньому неявні схеми розрахунку течій нестискуваного середовища можуть набути важливого значення. У зв'язку з цим постає питання про застосування в задачах транспортування нафти інших методів, таких як: метод «прямих», метод характеристик, метод контрольного об'єму, інтегральний метод та ін.

Метод «прямих» є одним із багатокрокових за часом методів з явною схемою по просторових змінних. У цьому методі сітка вводиться тільки для частини змінних, які розглядаються як дискретні, а одна змінна, переважно час, залишається безперервною. При цьому рівняння у часткових похідних апроксимується диференційно-різницевиими аналогами, які становлять систему значного числа звичайних диференційних рівнянь [35].

Метод «прямих» дає змогу ефективно розв'язувати різноманітні задачі, які виникають при моделюванні динамічних властивостей трубопровідних систем. Недоліком цього методу є те, що при розрахунку ділянки в магістральних газопроводах довжиною в декілька сотень кілометрів доводиться розв'язувати систему диференційних рівнянь великої розмірності. Крім того, у процесі зведення початкових рівнянь до звичайних диференційних опираються на неперервність початкових функцій та їх похідних по всій області інтегрування. Тому метод прямих не слід використовувати при ступінчастих збуреннях.

Метод характеристик — метод, суть якого зводиться до відшукування таких напрямків, де часткове диференційне рівняння може бути спрощене до звичайного диференційного рівняння. Цей метод незручний при розрахунках складних схем, що описуються нелінійними диференційними рівняннями. Крім того, різкі зміни параметрів системи (наприклад, перепад тиску в магістральному нафтопроводі) призводять до неможливості розв'язання методом характеристик [43].

Методи контрольного об'єму та інтегральний близькі до кінцево-різницевого методу, зокрема вони можуть призвести до однакових різницевих виразів похідних.

Інтегральний метод добре проявляє себе при непрямокутних межах. Крім того, перевага цього методу полягає у консервативності його схем, тобто він забезпечує виконання певних інтегральних законів збереження, справедливих для початкових диференційних рівнянь. Відзначимо, що за допомогою кінцево-різницевого методу можна також одержати консервативні схеми, але консервативність не обов'язково підвищує точність схем. Наприклад, для

диференційних рівнянь зі змінними коефіцієнтами неконсервативний метод може призвести до більш точних результатів, ніж консервативний.

Метод контрольного об'єму ґрунтується на мікроскопічних фізичних законах, а не на використанні математичного апарата неперервних функцій. Особливо важливим це виявляється у тих випадках, коли диференційні рівняння не мають всюди неперервних розв'язків, які можна було б у кожній точці подати у вигляді рядів Тейлора. Однак у розглядуваній задачі не існує розв'язків із розривами, тому використання методу контрольного об'єму не дає помітних переваг порівняно, наприклад, із кінцево-різницеvim методом.

Одним з найсучасніших методів розв'язку систем диференційних рівнянь є метод кінцевих елементів (МКЕ) і його подальша розробка – метод суперелементів (МСЕ). Як і в методі кінцевих різниць, при використанні МКЕ для розв'язку крайової задачі, яка описується диференційними рівняннями, пошук невідомої функції U замінюють знаходженням її значень у кінцевому числі так званих вузлових точок. На цих вузлових точках будується сітка дискретизації області визначення функції як сукупність кінцевого числа підобластей, що не перетинаються, і пов'язаних між собою тільки у вузлових точках.

У кожній такій підобласті шукана функція локально апроксимується неперервними функціями, які однозначно визначають її значення у будь-якій точці підобласті через вузлові параметри, а також задовольняють критерії сходження послідовності наближених розв'язків до точного при зменшенні розмірів підобласті. При цьому локальна апроксимація на підобластях дає змогу розглядати останні незалежно один від одного. Такі підобласті з побудовою апроксимації шуканої функції через її вузлові параметри називають кінцевими елементами [43].

Модифікацією методу суперелементів можна вважати агрегативно-імітаційний метод (AIM), суть якого полягає в тому, що об'єкт розбивається на окремі області (агрегати), в середині яких діють певні закономірності руху рідини, а на границях між сусідніми агрегатами виконуються певні умови, які накладаються на шукані функції. Стани агрегатів можна подати у вигляді

$$Z_v = (v, Z_v),$$

де $v(\tau)$ – номер інтервалу часу довжини h

$$Z_v = (Z_{v1}, Z_{v2}, \dots, Z_{v3N_i+4}),$$

де $Z_{v1} = \tau$ – час, що залишився до закінчення інтервалу;

$Z_{v2} = P_i$ – тиск в i -тому вузлі сітки;

$Z_{v3} = M_i$ – масова витрата в i -тому вузлі сітки.

Крім того, для спряження агрегатів необхідно знати тиск на початку наступного агрегату і довжину його розбиття по осях. Назвемо такий агрегат $J+1$. Тоді для J -го агрегату Z_{v3N_i+4} – тиск у другому вузлі $J+1$ агрегату.

АІМ дозволяє моделювати гідродинамічні процеси у середовищах зі складною структурою при наявності джерел чи стоків. Однак, для реалізації математичної моделі метод вимагає задання граничних умов, що не завжди є доступною інформацією. Крім того, вказані методи не дозволяють отримати рішення задачі в аналітичній формі, що утруднює аналіз і узагальнення результатів.

В зв'язку зі сказаним прийнято рішення побудувати математичну модель з використанням спеціальних функцій.

Математична модель плоскої нестационарної фільтрації газу в ґрунті побудована на основі рівняння лінійної фільтрації у формі Дарсі та рівняння нерозривності (2.1). Для одномірного руху газу маємо:

$$w = \frac{k}{\eta} \frac{\partial P}{\partial x},$$

$$-\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial(\rho w)}{\partial x} \quad (2.4)$$

Переходом від одномірної моделі до плоскої після нескладних перетворень отримаємо для швидкості фільтрації рівняння плоскої задачі, отримаємо математичну модель у вигляді

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{kc^2 \rho}{\eta} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) - \frac{kc^2 \rho}{\eta} \frac{q}{F} \delta(x - x_g) \delta(y - y_g), \quad (2.5)$$

де ω – швидкість фільтрації як функція часу t і просторових декартових координат x, y ; x_g, y_g – координати точкового джерела інтенсивністю q ; $\delta(x - x_g), \delta(y - y_g)$ – функції Дірака; F – площа перетину фільтрації.

Позначимо

$$\alpha = \frac{kc^2 \rho}{\eta},$$

де c – швидкість розповсюдження звуку в середовищі; ρ – густина газу.

Тоді на основі (2.5) отримаємо диференційне рівняння плоскої фільтрації газу в пористому середовищі у вигляді

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) - \alpha \frac{q}{F} \delta(x - x_g) \delta(y - y_g). \quad (2.6)$$

Аналогічно для розподілу тисків в пористому середовищі математична модель має вигляд

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial P}{\partial t} - q \frac{c^2}{\alpha} \delta(y-H) \delta(x-l) - q \xi \sigma (y-H) \delta(x-l), \quad (2.7)$$

де H – глибина розміщення витоку від поверхні; l – віддаль до джерела по горизонталі від початку координат, ν – кінематична в'язкість газу.

Для першої фази нестационарної фільтрації визначилась швидкість фільтрації як функція плоских координат і газу.

При виборі початкових і граничних умов вважалось, що в початковий момент часу фільтрація газу в ґрунті відсутня, поверхня ґрунту газу непрониклива, а на безмежному віддаленні від джерела швидкість фільтрації дорівнює нулю, тобто

$$\omega(x, y, 0) = 0; \omega(0, h, t) = 0; \omega(\infty, h, t) = 0, \quad (2.8)$$

де h – глибина закладення газопроводу в ґрунті.

Поставлена задача розв'язувалась із застосуванням інтегральних перетворень.

Для розв'язку задачі (2.7) при умовах (2.8) використовуємо синус-перетворення Фур'є по змінній y і перетворення Лапласа по часу t .

$$W = \int_0^{\infty} \bar{W}(x, \lambda, t) \sin \lambda y dy, \quad (2.9)$$

$$\bar{W} = \int_0^{\infty} W(x, \lambda, t) e^{-st} dt. \quad (2.10)$$

Застосовуємо перетворення (2.10) до задачі (2.7) і отримуємо

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} - \lambda^2 W \right) - \alpha \frac{qa}{F} \sin \lambda y_0 \delta(x - x_0), \quad (2.11)$$

$$W(x, \lambda, 0) = 0 \quad (2.12)$$

До задачі (2.11), (2.12) застосовуємо перетворення Лапласа (2.10)

$$S\bar{W} = \varepsilon \left(\frac{d^2 \bar{W}}{dx^2} - \lambda^2 \bar{W} \right) - \varepsilon \frac{qa}{SF} \sin \lambda y_0 \delta(x - x_0)$$

$$\text{або } \frac{d^2 \bar{W}}{dx^2} - \left(\frac{S + \varepsilon \lambda^2}{\varepsilon} \right) \bar{W} = \frac{qa}{FS} \sin \lambda y_0 \delta(x - x_0). \quad (2.13)$$

Неоднорідне рівняння (2.13) розв'язуємо методом варіації довільних змінних. Розв'язок однорідного рівняння, що відповідає рівнянню (2.13), має вигляд

$$\bar{W} = C_1 e^{\sqrt{\frac{S + \varepsilon \lambda^2}{\varepsilon}} x} + C_2 e^{-\sqrt{\frac{S + \varepsilon \lambda^2}{\varepsilon}} x}. \quad (2.14)$$

Позначимо $\alpha = \sqrt{\frac{S + \varepsilon \lambda^2}{\varepsilon}}$.

Величини C_1 і C_2 , що відповідають розв'язку неоднорідного рівняння (2.14), знаходимо із такої системи рівнянь

$$C_1' e^{\alpha x} + C_2' e^{-\alpha x} = 0,$$

$$C_1' e^{\alpha x} - C_2' e^{-\alpha x} = \frac{g}{FS} \sin \lambda y_0 \delta(x - x_0). \quad (2.15)$$

Із рівнянь (2.15) отримуємо

$$C_1' = \frac{g e^{-\alpha x}}{2FS\alpha} \sin \lambda y_0 \delta(x - x_0),$$

$$C_1' = \frac{g}{2FS\alpha} \sin \lambda y_0 \int_0^x e^{-\alpha x} \delta(x - x_0) + B_1.$$

З останнього рівняння маємо

$$C_1 = \frac{g \sin \lambda y_0}{2FS\alpha} e^{-\alpha x_0} \sigma(x - x_0) + B_1. \quad (2.16)$$

В (2.16) $\sigma(x - x_0)$ є функцією Хевісайда.

Якщо верхнє рівняння (2.15) помножити на α і від нижнього рівняння (2.15) відняти верхнє, то одержимо

$$C_2' = -\frac{q \sin \lambda y_0}{2FS\alpha} e^{\alpha x} \delta(x - x_0),$$

тому

$$C_2 = -\frac{q \sin \lambda y_0}{2FS\alpha} \int_0^x e^{\alpha x} \delta(x - x_0) + B_2,$$

або

$$C_2 = -\frac{q \sin \lambda y_0}{2FS\alpha} e^{\alpha x_0} \sigma(x - x_0) e^{\alpha x} + B_2. \quad (2.17)$$

Підставляємо (2.16) і (2.17) в (2.14) і отримуємо розв'язок диференціального рівняння (2.12)

$$\begin{aligned} \bar{W} = & \frac{q \sin \lambda y_0}{2FS\alpha} e^{\alpha(x-x_0)} \sigma(x - x_0) + B_1 e^{\alpha x} - \\ & - \frac{q \sin \lambda y_0}{2FS\alpha} e^{-\alpha(x-x_0)} \sigma(x - x_0) + B_2 e^{-\alpha x}. \end{aligned} \quad (2.18)$$

Оскільки з фізичної суті задачі $\lim_{x \rightarrow \infty} w = 0$ і $\lim_{x \rightarrow -\infty} w = 0$, то і справедливі рівності $\lim_{x \rightarrow \infty} \bar{W} = 0$, $\lim_{x \rightarrow -\infty} \bar{W} = 0$.

Враховуючи це отримаємо

$$\begin{aligned} B_1 &= -\frac{q \sin \lambda y_0}{2FS\alpha} e^{-\alpha x_0}, \\ B_2 &= 0. \end{aligned} \quad (2.19)$$

Підставляємо (2.19) в (2.18)

$$\bar{W} = \frac{q \sin \lambda y_0}{2FS\alpha} [\sigma(x-x_0) - 1] e^{\alpha(x-x_0)} - \frac{q \sin \lambda y_0}{2FS\alpha} [\sigma(x-x_0)] e^{-\alpha(x-x_0)}. \quad (2.20)$$

Підставимо (2.20) в дифрівняння (2.12), переконаємося, що (2.19) задовольняє цьому рівнянню.

Знаходимо перетворення Лапласа від (2.20). Перепишемо (2.20) у вигляді

$$\bar{W} = \frac{q \sin \lambda y_0}{2F} [\sigma(x-x_0) - 1] \frac{e^{\frac{\sqrt{S+\alpha\lambda^2}(x-x_0)}{\sqrt{\alpha}} \cdot \sqrt{\alpha}}}{S\sqrt{S+\alpha\lambda^2}} - \frac{q \sin \lambda y_0}{2F} [\sigma(x-x_0)] \frac{e^{-\frac{\sqrt{S+\alpha\lambda^2}(x-x_0)}{\sqrt{\alpha}} \cdot \sqrt{\alpha}}}{S\sqrt{S+\alpha\lambda^2}}.$$

Користуючись таблицями перетворення Лапласа, маємо

$$\begin{aligned} & \frac{e^{\frac{(x_0-x)\sqrt{S+\alpha\lambda^2}}{\sqrt{\alpha}}}}{S\sqrt{S+\alpha\lambda^2}} \rightarrow \\ & \rightarrow \frac{1}{2\sqrt{\alpha\lambda^2}} \left[e^{-\lambda(x_0-x)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x_0-x}{2\sqrt{\alpha\lambda}} - \lambda\sqrt{\alpha\lambda} \right) - e^{\lambda(x_0-x)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x_0-x}{2\sqrt{\alpha\lambda}} + \lambda\sqrt{\alpha\lambda} \right) \right]; \\ & \frac{e^{-\frac{(x_0-x)\sqrt{S+\alpha\lambda^2}}{\sqrt{\alpha}}}}{S\sqrt{S+\alpha\lambda^2}} \rightarrow \end{aligned}$$

$$\rightarrow \frac{1}{2\lambda\sqrt{\alpha t}} \left[e^{-\lambda(x-x_0)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x-x_0}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t} \right) - e^{\lambda(x-x_0)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x-x_0}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t} \right) \right]. \quad (2.21)$$

Таким чином, перетворення Лапласа функції (2.20) буде мати вигляд

$$\begin{aligned} W &= \frac{q\sqrt{\alpha} \cdot \sin \lambda y_0}{2F} [\sigma(x-x_0)-1] \cdot \frac{1}{2\lambda\sqrt{\alpha}} \times \\ &\times \left[e^{-\lambda(x_0-x)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x_0-x}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t} \right) - e^{\lambda(x_0-x)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x_0-x}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t} \right) \right] - \\ &- \frac{q\sqrt{\alpha} \cdot \sin \lambda y_0}{2F} \sigma(x-x_0) \cdot \frac{1}{2\lambda\sqrt{\alpha}} \times \\ &\times \left[e^{-\lambda(x-x_0)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x-x_0}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t} \right) - e^{\lambda(x-x_0)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x-x_0}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t} \right) \right], \end{aligned}$$

або

$$\begin{aligned} W &= \frac{q \sin \lambda y_0}{4\lambda F} [\sigma(x-x_0)-1] \times \\ &\times \left[e^{-\lambda(x_0-x)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x_0-x}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t} \right) - e^{\lambda(x_0-x)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x_0-x}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t} \right) \right] - \\ &- \frac{q \sin \lambda y_0}{4\lambda F} \sigma(x-x_0) \times \\ &\times \left[e^{-\lambda(x-x_0)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x-x_0}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t} \right) - e^{\lambda(x-x_0)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x-x_0}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t} \right) \right]. \end{aligned} \quad (2.22)$$

Використовуючи обернене синус-перетворення Фур'є, одержимо розв'язок поставленої задачі у вигляді

$$\begin{aligned} \omega(x, y, t) &= \frac{q}{2\pi F} \int_0^{\infty} \frac{\sin \lambda y_g \sin \lambda y}{\lambda} \times \\ &\times \left\{ [\sigma(x-x_g)-1] \left[e^{-\lambda(x_g-x)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x_g-x}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t} \right) - \right. \right. \\ &\left. \left. \dots \right] \right\} \end{aligned} \quad (2.23)$$

$$\begin{aligned}
& - e^{-\lambda(x_g - x)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x_g - x}{2\sqrt{\lambda t}} + \lambda\sqrt{\lambda t} \right) \Big] - \\
& - \sigma(x - x_g) \left[e^{-\lambda(x - x_g)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - x_g}{2\sqrt{\lambda t}} - \lambda\sqrt{\lambda t} \right) - \right. \\
& \left. - e^{-\lambda(x - x_g)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - x_g}{2\sqrt{\lambda t}} + \lambda\sqrt{\lambda t} \right) \right] \Big] d\lambda,
\end{aligned}$$

де $\sigma(x - x_g)$ - одинична функція Хевісайда

$$\sigma = \begin{cases} 1, & \text{якщо } x > x_g \\ 0, & \text{якщо } x \leq x_g \end{cases}.$$

$\operatorname{erfc}(z)$ – доповнюючий інтеграл імовірності

$$\operatorname{erfc}(z) = 1 - \operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^{\infty} \exp(-z^2) dz.$$

Використавши перше рівняння системи (2.4) (рівняння Дарсі) на основі (2.23) отримаємо залежність для розподілу тиску в ґрунті від поверхні ($y = 0$), де тиск вважається атмосферним до витіку з трубопроводу ($y = H$)

$$P(x, y, t) = P_a + \frac{\eta}{k} \int_0^H w(x, y, t) dt.$$

Після інтегрування отримаємо значення тиску $P(0, H, t)$ в точці витікання газу в ґрунт як функцію часу.

Для другої фази нестационарного процесу формування ареалу забруднень витоками з газопроводу розглядається плоска задача фільтрації газу в пористому середовищі при виникненні точкового джерела, яким являється витік газу з газопроводу.

Припустимо, що до початку дії джерела ($t=0$) система знаходиться в спокої і тиск повітря у всіх точках площини внаслідок незначної глибини залягання був атмосферним

$$P(x, y, 0) = P_a.$$

Нехай в процесі дії джерела на поверхні ґрунту і на значній віддалі від джерела тиск залишається атмосферним, тобто при $t > 0$ маємо $P(x, 0, t) = P_a$, $P(\omega, y, t) = P_a$.

Тоді поставлена задача розв'язується при наступних початкових і граничних умовах

$$\begin{aligned} w(x, 0, t) = 0, \quad w(x, y, 0) = 0, \\ t = 0 \rightarrow P(x, 0, t) = P_a, \quad P(x, y, t) = P_a, \\ t > 0 \rightarrow P(x, U_0, t) = P_a, \quad P(\infty, Y, t) = P_a. \end{aligned}$$

Математична модель реалізується методом інтегральних перетворень.

Розв'язок поставленої задачі розподілу тиску в поровому середовищі має вигляд

$$\begin{aligned}
P(x, y, t) = & P_a + \frac{q}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin \lambda y_0 \sin \lambda y}{\lambda} \times \\
& \times \left\{ \left[\sigma(x - x_0) - 1 \right] \left[e^{-\lambda(x_0 - x)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x_0 - x}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t} \right) - \right. \right. \\
& \left. \left. - e^{\lambda(x_0 - x)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x_0 - x}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t} \right) \right] - \sigma(x - x_0) \right\} \\
& \times \left[e^{-\lambda(x - x_0)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - x_0}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t} \right) - \right. \\
& \left. \left. - e^{\lambda(x - x_0)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - x_0}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t} \right) \right] \right\} d\lambda. \tag{2.24}
\end{aligned}$$

Розв'язок (2.24) дозволяє знайти тиск в точці витоку $P(0,0,t)$ як функцію часу другої фази нестационарної фільтрації. При цьому вважається, що величина q витоку газу є постійною в часі.

Однак, аналіз показує, що навіть при сталому тиску всередині ємності і сталому діаметрі отвору масова витрата витоку газу не може бути сталою в часі за умов до критичного витікання, оскільки міняється зовнішній тиск P_1 .

Встановити характер зміни масової витрати витоку впродовж першої і другої фази нестационарної фільтрації газу в пористому середовищі не представляється можливим в аналітичній формі, оскільки тиск і витрата витоку взаємно пов'язані. Тому в даному випадку доцільно застосувати ітераційний метод, який полягає в періодичній зміні стаціонарних станів системи.

Принципова процедура розрахунку полягає в наступному. Вважаються відомими геометричні характеристики системи, фізичні властивості газу, а також тиск і температура в газопроводі, які вважаються сталими в часі. В початковому наближенні тиск середовища за отвором приймаємо рівним атмосферному P_a .

Діапазон часу нестационарного витікання газу розбивається на дискретні проміжки часу Δt , всередині яких процес можна вважати квазістаціонарним. На початку першого часового інтервалу витрата витоку визначається з залежності

(2.1) і вважається сталою. Це дає змогу використати для визначення швидкості фільтрації w і тисків в поровому середовищі (грунті) залежності (2.23) і (2.24). За знайденою за (2.23) швидкістю фільтрації w і проміжками часу Δt визначається висота проникнення газу в ґрунт

$$y_i = w \cdot \Delta t .$$

Якщо $y_i < H$ (глибина залягання трубопроводу) , то має місце перша фаза нестационарної визначається з залежності (2.23). В іншому випадку має місце друга фаза нестационарної фільтрації газу в ґрунті, і тиск визначається з (2.24). Знаючи тиск газу $P(0,0,t)$ в довкіллі уточнюємо величину витрати газу за формулою Сен-Венана - Вентцеля. Ітераційний процес триває до досягнення необхідної точності δq у визначенні витрати і закінчується після виконання умови

$$|G^{(s)} - G^{(s-1)}| < \delta q . \quad (2.25)$$

Після досягнення виконання умови (2.25) ітераційний процес переходить до наступного дискретного проміжку часу Δt . Вся процедура закінчується після досягнення стаціонарності процесу витікання, тобто до моменту часу, після якого тиск $P(0,0,\Delta t)$ і масова витрата витоку $G_i^{(s)}$ перестають залежати від часу. В результаті отримують залежності зміни масової витрати і тиску газу в пористому середовищі за аварійним отвором як функції часу протягом першої і другої фази нестационарної фільтрації.

2.3 Оцінка впливу зовнішнього опору на витрату витоку результатами визначення витрати газу при витіканні

На рисунку 2.2 приведено результати прогнозування характеру зміни масової витрати витоку і тиску газу в перерізі за отвором для процесу нестационарної фільтрації газу викликаного аварійним витоком з газопроводу для гіпотетичних умов. В умовах числового експерименту проникливість ґрунту було прийнято 0,08 дарсі і 0,04 дарсі.

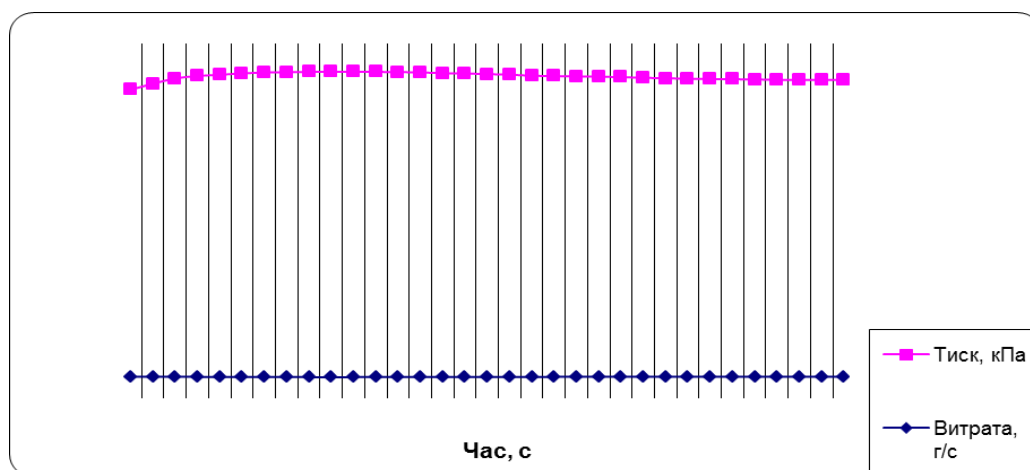


Рисунок 2.2 – Динаміка зміни тиску і витрати витоку газу в часі

Аналіз результатів дослідження показує, що загальна тривалість процесу нестационарної фільтрації газу в ґрунті при виникненні аварійного витоку з газопроводу лежить в межах 1500-1800 с і з збільшенням проникності ґрунту зменшується. Відповідно тривалість першої фази нестационарної фільтрації газу в ґрунті проникністю 0,04 дарсі складає близько 500 с, а при зменшенні проникності до 0,01 дарсі зростає до 650 с.

Масова витрата витоку в умовах до критичного режиму впродовж першої фази нестационарної фільтрації знижується за рахунок зростання тиску в пористому середовищі, викликаного фільтрацією газу. Як видно з графіків, зменшення проникності ґрунту в два рази призводить до зростання тиску на кінець першої фази нестационарної фільтрації на 5,7% у випадку проникності ґрунту 0,08 дарсі і на 5,9% у випадку проникності 0,04 дарсі. В подальшому тиск

стабілізується на кінець другої фази нестационарної фільтрації, що призводить до стабілізації витрати витоку.

Внаслідок зміни тиску в пористому середовищі витрати витоку впродовж першої фази нестационарної фільтрації зменшується і досягає мінімуму 0,906 від початкового значення при проникності ґрунту 0,08 дарсі і 0,068 – при проникності 0,04 дарсі.

В подальшому впродовж другої фази нестационарної фільтрації тиск газу в пористому середовищі знижується, що призводить до певного зростання витрати витоку в 1,08 рази порівняно з мінімальною при проникності ґрунту в 0,08 дарсі і в 1,09 рази при проникності ґрунту 0,04 дарсі.

Загалом витрата витоку на кінець процесу нестационарної фільтрації дещо менша за початкову величину в момент появи витоку і складає 98% у випадку проникності ґрунту 0,08 дарсі та 93 % у випадку проникності ґрунту 0,04 дарсі.

Таким чином, в результаті, проведених досліджень встановлено, що за рахунок припущень при отриманні формули Сен-Венана Вентцеля отримані результати суттєво вищі за реальні, для адекватності прогнозованих показників запропоновано використовувати поправки в залежності від характеру витікання, які є функціями параметрів процесу і фізичних властивостей газу і для яких запропоновано емпіричні формули.

При витіканні газу в пористе середовище (ґрунт) необхідно враховувати в розрахунках процесу фільтраційний опір ґрунту, який залежить від його проникності. Із зменшенням проникності ґрунту швидкості фільтрації газу спадають, а тиск в пористому середовищі (зокрема за джерелом витікання) зростає в часі.

Процес нестационарної фільтрації газу в ґрунті, викликаний появою аварійного витоку з газопроводу, характеризується тривалістю 1500-1800 с (25-30 хв), яка при зменшенні проникності ґрунту зростає, пропонується розбити на дві фази, перша з них починається з моменту появи витоку і триває до моменту досягнення газом поверхні землі і за тривалістю складає близько третини всього нестационарного процесу, а друга починається з моменту досягнення газом

поверхні землі і зменшується стаціонарним процесом витікання газу в атмосферу через ґрунт.

В період першої фази нестационарної фільтрації витрата витоку газу за умов до критичного витікання поступово зменшується і досягає мінімуму в кінцевий момент першої фази, а в подальшому починає зростати. Такий характер зміни витрати витоку пояснюється формуванням поля тисків в пористому середовищі. Запропоновані математичні моделі дозволяють прогнозувати процес формування ареалу загазованості і відповідно зміни витрати витоку газу впродовж протікання першої і другої фаз нестационарної фільтрації газу.

Висновки до розділу 2

1. На основі аналітичних досліджень характеру фільтрації газу в пористому середовищі при появі аварійних витоків з газопроводу побудовано математичну модель процесу у вигляді двовимірної нестационарної системи.

2. Реалізація створеної математичної моделі методом інтегральних перетворень дозволяє створити методику прогнозування і контролю процесу формування ареалу загазованості ґрунту аварійними витоками з газопроводу.

3. На базі результатів математичного моделювання процесу нестационарної фільтрації газу в ґрунті дана оцінка впливу зовнішнього тиску на витрату аварійного витоку газу з магістрального газопроводу в процесі експлуатації.

Основні наукові результати розділу опубліковані в працях [35, 38, 39, 41, 91].

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЛЬТРАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТІВ

Поява витіку газу на підземній частині ділянки газопроводу передбачає його подальшу фільтрацію в пористому середовищі (грунті) аж до виходу на поверхню, яка супроводжується постійним зростанням фільтраційного опору середовища. Тому зміна параметрів потоку газу в часі передбачає нестационарний процес, характеристики якого залежать від фільтраційних властивостей ґрунту, зокрема від його проникності.

Очевидно, що фізичні властивості, зокрема фільтраційний опір, ґрунту як пористого середовища повинні мати вплив на інтенсивність витікання газу з газопроводу і формування ареалу загазованості. Тому існує взаємозв'язок між процесом витікання газу з газопроводу через аварійний отвір і його фільтрацією в навколишньому ґрунті.

Поставлена задача дослідження процесу формування ареалу загазованості ґрунту витіками газу з газопроводу вимагає проведення досліджень фільтраційних характеристик (зокрема проникності) ґрунтів як навколишнього середовища трубопроводу з урахуванням зовнішніх впливів (вологості, фракційного складу, внутрішнього тиску).

Поставлені завдання розглядається різними авторами в процесі досліджень спорудження та ремонту трубопроводів [22, 33, 36, 38]. В поданих роботах встановлено проникність різних типів ґрунту в непорушеному стані в залежності від фракційного складу. Однак, залежності фільтраційного опору ґрунтів від вологості та тиску в літературі відсутні. Такі залежності мають суттєвий вплив на процес формування ареалу загазованості ґрунту.

3.1 Мета і завдання дослідження

Характер витікання газу з газопроводу і формування ареалу загазованості в ґрунті є нестационарним процесом, який пропонується розділити на дві фази,

перша з яких починається з моменту появи аварійного витoku і закінчується досягненням потоку газу поверхні землі; друга фаза починається слідом за першою і триває до процесу. В обидвох випадках параметри фільтрації газу в пористому середовищі і формування ареалу загазованості суттєво залежать від властивостей пористого середовища (грунту). Серед визначальних характеристик пористого середовища слід виділити проникність. Її величина і характер зміни в часі процесу формування ареалу загазованості мають вирішальне значення. Тому для побудови математичної моделі фільтрації газу в ґрунті і формування ареалу загазованості необхідно провести дослідження проникності ґрунтів і її залежності від зовнішніх впливів.

В роботах різних авторів [10, 17, 22, 27, 32] приведено результати досліджень фізичних властивостей ґрунтів, зокрема їх проникності і коефіцієнтів фільтраційного опору, визначено вказані параметри ґрунту для різних їх типів і природних умов. Однак, реальний вплив параметрів процесу на фільтрацію газу виявляється складнішим в порівнянні з прогнозованим теоретично. Тому фактична витрата витікання газу суттєво відрізняється від розрахункової, що спотворює прогнозовані розрахунки.

Відомі також результати досліджень [36, 38], якими доведено на основі проведених експериментів, що формування ареалу загазованості має локальний вплив на незначній площі і тривалість нестационарних фаз процесу є невеликою. Проте априорні показники свідчать про значно більшу тривалість процесів, що вимагає проведення додаткових досліджень і встановлення закономірностей впливу параметрів пористого середовища на характер формування ареалу загазованості з урахуванням зовнішніх впливів, до яких слід віднести, в першу чергу, вологість ґрунту і величину внутрішнього тиску.

Зауважимо, що, розглядаючи малі витoki з газопроводів, ми обмежуємо область зміни зовнішніх впливів і характеру фільтрації газу в ґрунті. На основі сказаного приймається припущення, що фільтрація газу в ґрунті є лінійною і підпорядкована закону Дарсі. Інше припущення базується на принципі незалежності рухів і полягає в суперпозиції результатів фільтрації різних

середовищ в ґрунті. Вважається також, що різні зовнішні впливи (вологість, внутрішній тиск) можуть змінюватися в часі і просторі.

Метою проведення досліджень є встановлення характеристик пористого середовища (ґрунту), що мають вплив на характер формування ареалу загазованості витоками газу з газопроводу і їх залежності від типів ґрунтів та зовнішніх впливів.

Вказана мета досягається шляхом реалізації наступних задач дослідження:

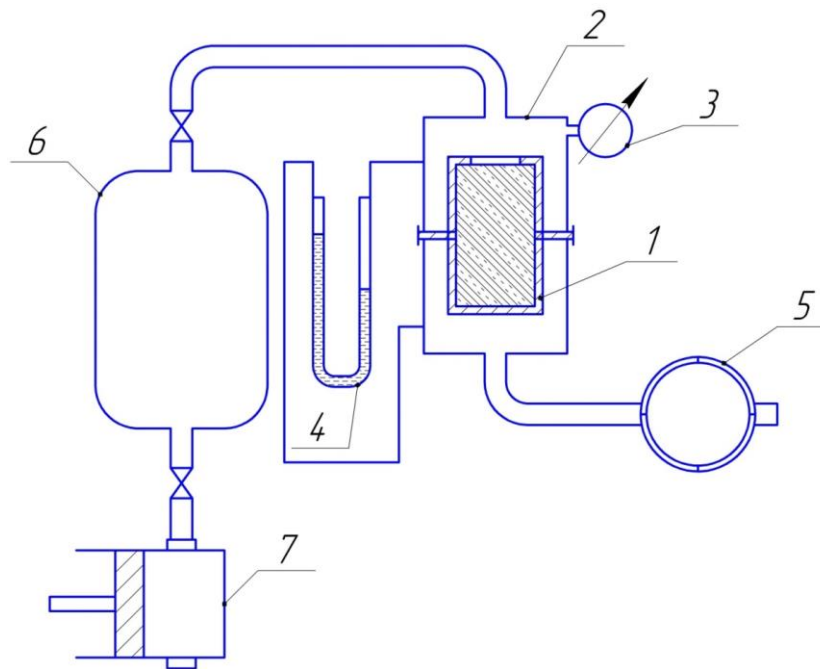
- дослідження проникності різних типів ґрунтів в залежності від їх щільності та фракційного складу;
- дослідження впливу на проникність ґрунтів внутрішнього тиску;
- дослідження впливу на проникність ґрунтів їх вологості.

Вказані закономірності встановлюються шляхом проведення серій експериментів на дослідному стенді в лабораторних умовах.

3.2 Дослідний стенд і вимірювальна техніка

Для проведення експериментальних досліджень фізичних характеристик ґрунту і встановлення їх залежності від зовнішніх факторів був створений експериментальний стенд, схема якого наведена на рисунку 3.1.

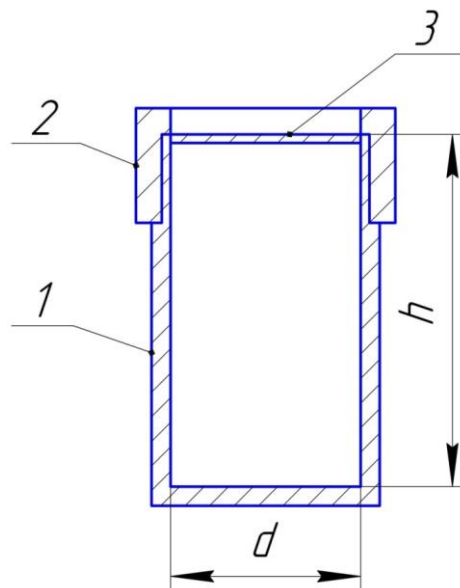
Контейнер перед проведенням дослідів заповнювався пробою ґрунту заданої вологості і внутрішнього тиску та розміщався в барокамері експериментального стенду. За допомогою компресора 7 в ресівері 6 встановлювався заданий тиск повітря, яке подавалося в барокамеру 2 і проходило через контейнер з пробойою ґрунту 1 та проходило через лічильник газу 5. Впродовж випробування контролювався робочий тиск в барокамері за допомогою манометра 3 та вимірювався перепад тиску U-подібним ртутним дифманометром 4. За допомогою лічильника 5 вимірювалась об'ємна кількість газу, що пройшла через контейнер за час, виміряний секундоміром.



1 – контейнер; 2 – барокамера; 3 – манометр; 4 – дифманометр; 5 – газовий лічильник; 6 – ресивер; 7 – компресор.

Рисунок 3.1 – Схема вимірювального стану

Основним елементом дослідного стану являється контейнер з пробєю досліджуваного ґрунту, принципова схема якого зображена на рисунку 3.2.



1 – корпус; 2 – накладна гайка; 3 – сітка.

Рисунок 3.2 – Контейнер

Технічна характеристика вимірювальних приладів подана в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Характеристика вимірювальної техніки

№	Назва	Характеристика	Клас точності	Межі вимірювання
1	Манометр ОБМ1 – 100	Манометр стрілковий	1	$P_{\min} = 0.05 \div 0.1 \text{ атм}$ $P_{\max} = 4 \text{ атм}$
2	Лічильник газу G 4	Вимірне розхід газу в м^3 $V = 1.2 \text{ дм}^3$ $P_{\max} = 25 \text{ кПа}$	1	$Q_{\min} = 0.04 \text{ м}^3 / \text{год}$ $Q_{\max} = 6 \text{ м}^3 / \text{год}$
3	Дифманометр КХАП ГОСТ 9933-61	Дифманометр – U – подібна скляна трубка	1	Від 0 до 320 мм водяного стовпа

Вологість ґрунту створювалась і вимірювалась масовим методом. Перед проведенням досліду проба ґрунту даного виду висушувалась до повного видалення вологи і вимірювався її об'єм V_{Γ} за допомогою мірного циліндра і маса M_{Γ} за допомогою аналітичної ваги. Тоді густина сухого ґрунту становила

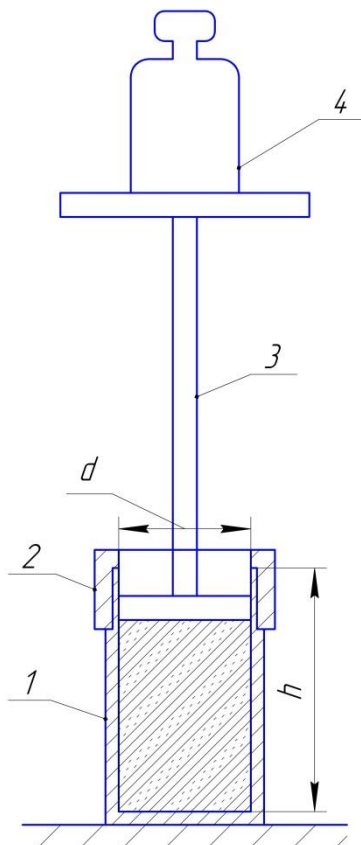
$$\rho = \frac{M_{\Gamma}}{V_{\Gamma}}.$$

В подальшому до проби ґрунту давалась маса дистильованої води M_B , і суміш перемішувалась. Вологість проби ґрунту визначалась співвідношенням

$$\varphi = \frac{M_B}{M_{\Gamma} + M_B}.$$

Напруження в ґрунті під дією зовнішніх сил будемо називати внутрішнім тиском, який визначається відношенням сили, що діє на пробу ґрунту, до

відповідної площі. Перед проведенням кожного досліду із відповідної серії величина внутрішнього тиску визначалася на стенді за схемою, наведеною на рисунку 3.3.



1 – контейнер; 2 – накидна гайка; 3 – шток з поршнем; 4 – вантаж

Рисунок 3.3 – Схема вимірювання тиску в ґрунті

На корпус контейнера нагвинчується накидна гайка, внутрішній діаметр якої рівний внутрішньому діаметру корпусу контейнера. Система заповнюється досліджуваною пробою ґрунту, на яку згори опускається поршень, з'єднаний через шток з вантажем масою m . Тоді внутрішній тиск у пористому середовищі розраховується за співвідношенням

$$\sigma = \frac{4mg}{\pi D^2}.$$

Після встановлення рівноваги накидна гайка замінюється гайкою з сіткою, і контейнер встановлюється в барокамеру для визначення проникності проби ґрунту.

Після встановлення контейнера з пробою ґрунту в барокамеру формується стаціонарний потік повітря з ресивера, впродовж якого вимірюється манометричний тиск в барокамері P_0 , перепад тиску по дифманометру ΔP і витрата повітря, як відношення об'єму (за лічильником) V до часу (за секундоміром) t .

Швидкість фільтрації в пористому середовищі

$$w = \frac{P_c}{P_0} \frac{4Q}{\pi D^2}.$$

Величина коефіцієнта фільтрації визначається з закону Дарсі

$$k = \frac{w\eta}{\Delta P/L},$$

де η - динамічна в'язкість повітря; L = висота контейнера.

В результаті проведених дослідів визначено величину проникності різних ґрунтів при різних умовах.

3.3 Методика проведення досліджень

Кінцевою метою проведених досліджень є встановлення закономірностей формування ареалу загазованості і його геометричних розмірів у пористому середовищі аварійними витокami газу з газопроводу. Тому експериментальні дослідження проникності пористого середовища (ґрунту) проводились для одного з типів ґрунтів, а саме для піщаних ґрунтів.

Для кожного дослідження в контейнері готувалася окрема проба ґрунту визначеного гранулометричного складу і густини, а також заданої вологості і внутрішнього тиску.

Слід зауважити, що експериментальним шляхом встановлено залежність проникності вологого ґрунту з певним внутрішнім тиском від часу витримки під навантаженням, яку приведено на рисунку 3.4.

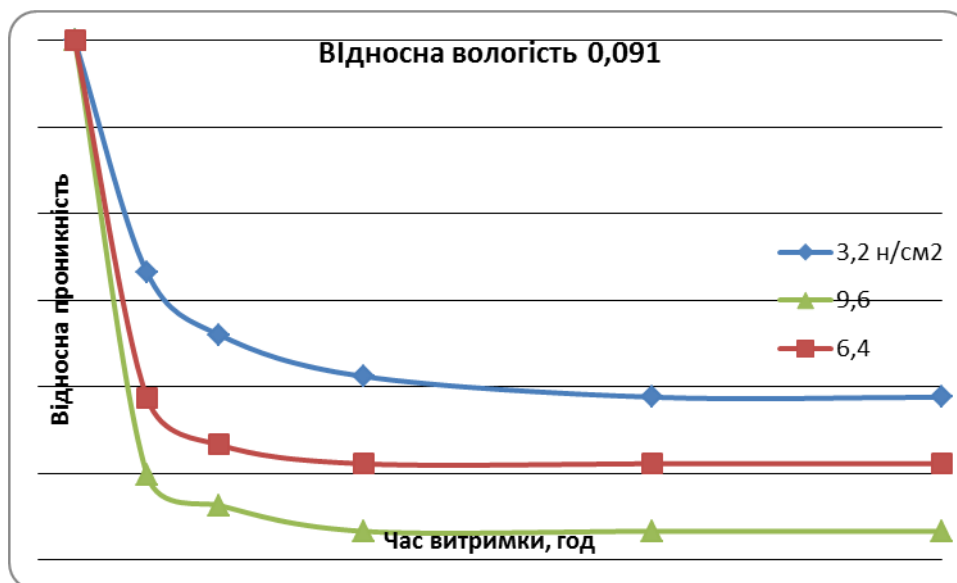


Рисунок 3.4 – Залежність проникності ґрунту від часу витримки під навантаженням

Виходячи з приведених результатів експериментів було прийнято рішення – при проведенні всіх дослідів витримувати пробу під навантаженням впродовж 24 години.

Для встановлення функціональної емпіричної залежності коефіцієнта проникності ґрунту від параметрів процесу фільтрації проводились серії дослідів на описаному вище дослідному стенді і здійснювалась їх обробка.

У серіях проведених експериментів оцінювався вплив гранулометричного складу піску h , його щільності (густини) ρ , вологості φ та внутрішнього тиску σ на величину коефіцієнта проникності ґрунту в умовах лінійного закону фільтрації.

Для забезпечення лінійного закону фільтрації повітря у пробі ґрунту, яка містилась в контейнері, обмежувалась витрата повітря Q через барокамеру. Критичне число Рейнольдса

$$\text{Re}_{кр} = \frac{w_{кр} d_0 \rho}{m \eta}, \quad (3.1)$$

де $w_{кр}$ - критична швидкість повітря при переході до нелінійного закону фільтрації; d_0 - гранулометрична характеристика (діаметр твердої фракції); η - динамічна в'язкість повітря; m - пористість взірця ґрунту.

Для визначення пористості сухого ґрунту даного гранулометричного складу його об'єм $V_{г}$ поміщався в герметичний контейнер, після чого туди закачувалося повітря до досягнення тиску P_1 . Після цього повітря з контейнера стравлювалося через лічильник в атмосферу до встановлення в контейнері тиску P_2 . При цьому покази лічильника склали $\Delta V_{г}$. Тоді коефіцієнт пористості взірця ґрунту визначався як відношення об'єму пустот W_g до загального об'єму взірця, який відомий W

$$m = W_g / W,$$

де

$$W_g = \Delta V_{г} \frac{P_a}{P_1 - P_2},$$

де P_a - атмосферний тиск.

З іншого боку, критичне значення числа Рейнольдса можна розрахувати за формулою

$$\text{Re}_{кр} = 1,38 * 10^{-6} d_0 \sqrt[3]{\frac{g\eta}{\rho J^2} \sqrt[4]{1 + 2 * 10^{15} J^2}}, \quad (3.2)$$

$$J = \rho g d_0 / P_{кр},$$

де $P_{кр}$ – критичний тиск.

З (3.1) і (3.2) знаходилось значення критичної швидкості повітря в контейнері з пробою ґрунту $w_{кр}$ і далі об'ємна витрата повітря через лічильник з умови дотримання лінійної фільтрації

$$Q \leq w_{кр} \pi D^2 / 4.$$

Серед незалежних факторів, які мають вплив на величину коефіцієнта проникності ґрунту, були вибрані наступні:

- внутрішній тиск ґрунту, σ ;
- вологість ґрунту, φ ;
- щільність сухого ґрунту ρ ;
- діаметр гранул d_0 .

Кожен із незалежних параметрів міг приймати в даній серії дослідів 5 конкретних значень. В якості функції-відгуку вибрано коефіцієнт проникності ґрунту k .

Таким чином, функціональні залежності функції-відгуку від незалежних параметрів будувались по п'яти рівнях з метою отримання формули вигляду

$$k = F(\sigma, d_0, \varphi, \rho).$$

Умови проведення серій дослідів наведено в таблиці 3.2.

Обробка результатів досліджень проводилась за методикою, яка базується на розробці І. І. Протодьяконова і М. О. Тедера. В основу її покладено поняття про комбінаційний квадрат (рисунок 3.5), заповнення якого є результатами

експериментів і дозволяє скоротити число дослідів (при п'яти рівнях реалізації кожної залежності) з 625 до 25.

		Po1					Po2					Po3					Po4					Po5					
		Ro1					Ro2					Ro3					Ro4					Ro5					
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	
To1	d1	1	■																								
		2																									■
		3																									
		4																									
		5																									
To2	d2	1																									
		2																									
		3																									
		4																									
		5																									
To3	d3	1																									
		2																									
		3																									
		4																									
		5																									
To4	d4	1																									
		2																									
		3																									
		4																									
		5																									
To5	d5	1																									
		2																									
		3																									
		4																									
		5																									

Рисунок 3.5 – Комбінаційний квадрат

На основі комбінаційного квадрату складаються матриці, подані в таблицях 3.3 і 3.4 відповідно.

Таблиця 3.2 – Умови проведення експерименту

№ п/п	ПАРАМЕТРИ				Функція- відгук, k, δ
	σ , Н/см ²	φ	ρ , г/см ³	d_0 , мм	
1	0	0	2,8	2	0,745
2	2,4	0,048	2,7	2	0,689
3	4,8	0,091	2,6	2	0,466
4	7,2	0,13	2,5	2	0,212
5	9,6	0,17	2,4	2	0,055
6	0	0,048	2,4	1,5	0,621
7	2,4	0,091	2,8	1,5	0,431
8	4,8	0,13	2,7	1,5	0,217
9	7,2	0,17	2,6	1,5	0,064
10	9,6	0	2,5	1,5	0,615
11	0	0,091	2,5	1	0,453
12	2,4	0,13	2,4	1	0,227
13	4,8	0,17	2,8	1	0,073
14	7,2	0	2,7	1	0,446
15	9,6	0,048	2,6	1	0,374
16	0	0,13	2,6	0,5	0,061
17	2,4	0,17	2,5	0,5	0,079
18	4,8	0	2,4	0,5	0,272
19	7,2	0,048	2,8	0,5	0,225
20	9,6	0,091	2,7	0,5	0,131
21	0	0,17	2,7	0,2	0,133
22	2,4	0	2,6	0,2	0,136
23	4,8	0,048	2,5	0,2	0,119
24	7,2	0,091	2,4	0,2	0,075
25	9,6	0,13	2,8	0,2	0,029

Таблиця 3.3 – Обробка результатів дослідів за параметрами σ , φ

σ , н/см ²							
φ	0	2,4	4,8	7,2	9,9	$\sum f_i$	$F_1(\varphi)$
0	0,745	0,136	0,272	0,446	0,615	2,217	0,443
0,048	0,621	0,689	0,119	0,225	0,374	2,028	0,406
0,091	0,453	0,431	0,466	0,075	0,131	1,556	0,311
0,13	0,061	0,227	0,217	0,212	0,029	0,746	0,149
0,17	0,133	0,079	0,073	0,064	0,055	0,404	0,081
$\sum f_i$	2,013	1,562	1,147	1,022	1,204	-	-
$F_2(\sigma)$	0,403	0,312	0,229	0,204	0,241	-	-

Таблиця 3.4 – Обробка результатів дослідів за параметрами R і d

ρ , г/см ³							
d ,мм	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	$\sum f_i$	$F_3(d)$
2	0,745	0,689	0,466	0,212	0,055	2,167	0,433
1,5	0,431	0,217	0,064	0,615	0,621	1,948	0,389
1	0,073	0,446	0,374	0,433	0,227	1,553	0,311
0,5	0,225	0,131	0,061	0,079	0,272	0,768	0,154
0,2	0,029	0,133	0,136	0,119	0,075	0,492	0,098
$\sum f_i$	1,503	1,616	1,101	1,458	1,250	-	-
$F_4(\rho)$	0,301	0,323	0,220	0,292	0,250	-	-

Числові значення функції-відгуку усереднювались у горизонтальних рядках і вертикальних стовбцях і за результатами усереднення побудовано графіки, які оброблялися за методом найменших квадратів. У результаті кожна з залежностей була апроксимована відповідною формулою. Для залежності коефіцієнта проникності від внутрішнього тиску та вологості ґрунту і на основі аналізу вигляду графіків (рисунок 3.6) вибрана формула

$$k = \alpha_0 \exp(-\beta \sigma^n \phi^m).$$

Решта залежності апроксимувалися степеневими залежностями

$$k = \alpha_1 \rho^{n_1},$$

$$k = \alpha_2 d^{n_2}.$$

Загальна математична модель для багатofакторної функції знаходилась як добуток

$$F(x_1, x_2, x_3, x_4) = \alpha f(x_1, x_2) \cdot f(x_3) \cdot f(x_4).$$

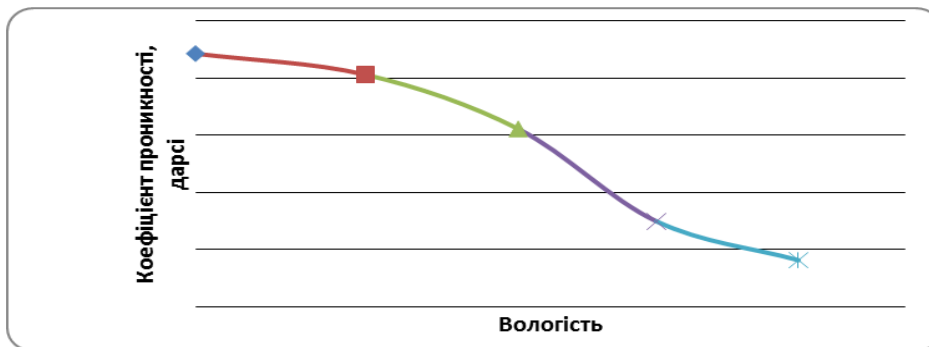
Усереднений коефіцієнт α знаходився методом найменших квадратів за даними таблиці 3.2. У результаті отримано емпіричну залежність, що має вигляд

$$k = 0.55 \cdot d_0^{0.75} \rho^{-0.21} \exp(-31,5 \varphi^{2.1} \sigma^{0.55}), \quad (3.3)$$

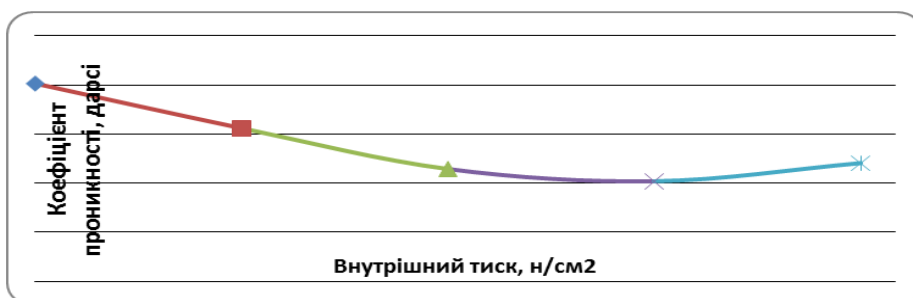
де α – коефіцієнт проникності, дарсі; d – діаметр гранул, мм; φ – вологість ґрунту; σ – внутрішній тиск, н/см².

Одержана залежність добре корелює з аналітичними виразами, одержаними на основі реалізації математичної моделі, що підтверджує достовірність проведених досліджень.

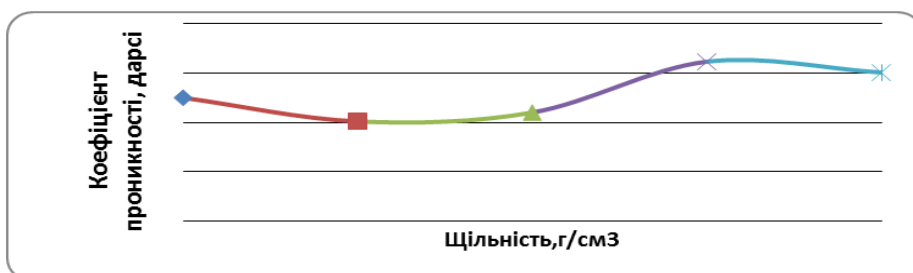
а)



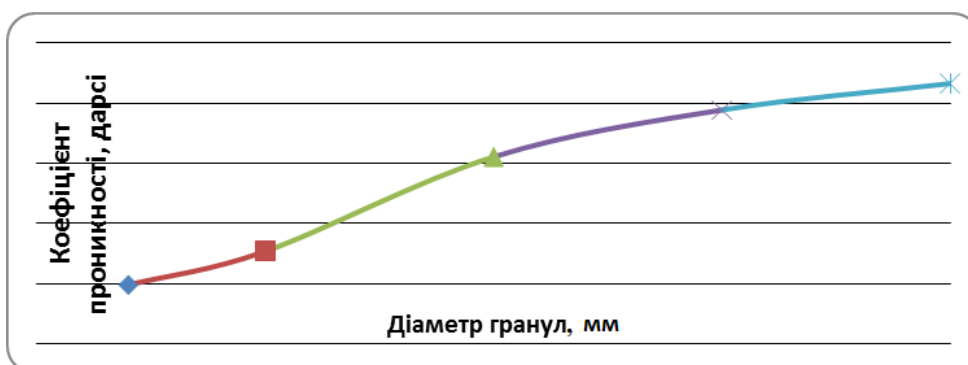
б)



в)



г)



а) – залежність коефіцієнта проникності середовища від вологості; б) – залежність коефіцієнта проникності середовища від внутрішнього тиску; в) – залежність коефіцієнта проникності середовища від щільності середовища; г) – залежність коефіцієнта проникності середовища від діаметру гранул

Рисунок 3.6 – Графічні залежності до побудови багатofакторної моделі

Оцінка точності розрахунків проводилася на основі даних, приведених у таблиці 3.2. Для цього визначалася середньоквадратична похибка за формулою

$$\sigma = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{cp} - X_i)^2},$$

де n – число дослідів; X_{cp}, X_i – середньоарифметичне і біжуче значення вимірюваної величини.

Ширина гарантійного інтервалу

$$\Delta X = \frac{\sigma t_{\alpha;n}}{n-1},$$

де $t_{\alpha;n}$ - коефіцієнт Стюдента.

Тоді гарантійний інтервал складе $(X_{cp} - \Delta X \leq X \leq X_{cp} + \Delta X)$. Результати розрахунків для різних показників у (3.3) подано в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Значення гарантійних інтервалів

Показник	Гарантійний інтервал
α	(0,545;0,555)
n_1	(0,44;0,46)
n_2	(0,031;0,035)
n_3	(0,031;0,035)
σ	(0,0012;0,0017)

Слід відзначити, що створена математична модель справедлива тільки для умов лінійної фільтрації газу в ґрунті.

Загальний процес формування ареалу загазованості пропонується поділити на дві нестационарні фази. Перша фаза починається з моменту виникнення витoku і закінчується досягненням газом поверхні ґрунту. Для першої фази швидкість фільтрації на поверхні ґрунту за весь період рівна нулю. Друга фаза

нестационарної фільтрації починається з моменту досягнення газом поверхні ґрунту і закінчується (за умови сталості інтенсивності джерела) переходом до стаціонарного процесу витікання газу через ґрунт в атмосферу.

На основі створених математичних моделей побудовано поле швидкостей фільтрації газу в процесі формування ареалу загазованості для першої і другої фаз нестационарної фільтрації. При цьому вважається, що масова витрата газу крізь корозійний отвір вважається сталою в часі.

Математична модель плоскої нестационарної фільтрації газу в ґрунті побудована на основі рівняння лінійної фільтрації у формі Дарсі та рівняння нерозривності (1.9). Для одномірного руху газу маємо:

$$w = \frac{k}{\eta} \frac{\partial P}{\partial x}, \quad (3.4)$$

$$-\frac{\Delta P}{\partial t} = \frac{\partial(\rho w)}{\partial x}.$$

Переходом від одномірної моделі до плоскої після нескладних перетворень отримаємо для швидкості фільтрації рівняння плоскої задачі, отримаємо математичну модель у вигляді

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{kc^2 \rho}{\eta} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) - \frac{kc^2 \rho}{\eta} \frac{q}{F} \delta(x - x_g) \delta(y - y_g), \quad (3.5)$$

де ω – швидкість фільтрації як функція часу t і просторових декартових координат x, y ; x_g, y_g – координати точкового джерела інтенсивністю q ; $\delta(x - x_g), \delta(y - y_g)$ – функції Дірака; F – площа перерізу фільтрації.

Позначимо

$$\alpha = \frac{kc^2 \rho}{\eta},$$

де c – швидкість розповсюдження звуку в середовищі; ρ - густина газу.

Тоді на основі (3.5) отримаємо диференційне рівняння плоскої фільтрації газу в пористому середовищі у вигляді

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) - \alpha \frac{q}{F} \delta(x - x_g) \delta(y - y_g). \quad (3.6)$$

Аналогічно для розподілу тисків у пористому середовищі математична модель має вигляд

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial P}{\partial t} - q \frac{c^2}{\alpha} \delta(y - H) \delta(x - l) - q \xi \sigma (y - H) \delta(x - l), \quad (3.7)$$

де H – глибина розміщення витoku від поверхні; l - віддаль до джерела по горизонталі від початку координат, ν - кінематична в'язкість газу.

Для першої фази нестационарної фільтрації визначилась швидкість фільтрації як функція плоских координат і газу.

При виборі початкових і граничних умов вважалося, що в початковий момент часу фільтрація газу в ґрунті відсутня, поверхня ґрунту газу непрониклива, а на безмежному віддаленні від джерела швидкість фільтрації дорівнює нулю, тобто

$$\omega(x, y, 0) = 0; \omega(0, h, t) = 0; \omega(\infty, h, t) = 0,$$

де h - глибина закладення газопроводу в ґрунті.

Поставлена задача розв'язувалась із застосуванням інтегральних перетворень.

Використовуючи обернене синус-перетворення Фур'є, одержимо розв'язок поставленої задачі у вигляді

$$\begin{aligned}
\omega(x, y, t) = & \frac{q}{2\pi F} \int_0^{\infty} \frac{\sin \lambda y_g \sin \lambda y}{\lambda} \times \\
& \times \left\{ \left[\sigma(x - x_g) - 1 \right] \left[e^{-\lambda(x_g - x)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x_g - x}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t} \right) - \right. \right. \\
& - e^{-\lambda(x_g - x)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x_g - x}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t} \right) \left. \right] - \\
& - \sigma(x - x_g) \left[e^{-\lambda(x - x_g)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - x_g}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t} \right) - \right. \\
& \left. \left. - e^{-\lambda(x - x_g)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - x_g}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t} \right) \right] \right\} d\lambda, \tag{3.8}
\end{aligned}$$

де $\sigma(x - x_g)$ - одинична функція Хевісайда

$$\sigma = \begin{cases} 1, & \text{якщо } x > x_g \\ 0, & \text{якщо } x \leq x_g \end{cases}.$$

Використавши перше рівняння системи (3.4) (рівняння Дарсі) на основі (3.8) отримаємо залежність для розподілу тиску в ґрунті від поверхні ($y = 0$), де тиск вважається атмосферним до витоку з трубопроводу ($y = H$)

$$P(x, y, t) = P_a + \frac{\eta}{k} \int_0^H w(x, y, t) dt. \tag{3.9}$$

Після інтегрування отримаємо значення тиску $P(0, H, t)$ в точці витікання газу в ґрунт як функцію часу.

Для другої фази нестационарного процесу формування ареалу забруднень витоками з газопроводу розглядається плоска задача фільтрації газу в пористому середовищі при виникненні точкового джерела, яким є витік газу з газопроводу.

Припустимо, що до початку дії джерела ($t = 0$) система знаходиться в спокої, і тиск повітря у всіх точках площини внаслідок незначної глибини залягання був прирівняним до атмосферного

$$P(x, y, 0) = P_a.$$

Нехай в процесі дії джерела на поверхні ґрунту і на значній віддалі від джерела тиск залишається атмосферним, тобто при $t > 0$ маємо $P(x, 0, t) = P_a$, $P(\omega, y, t) = P_a$.

Тоді поставлена задача розв'язується при таких початкових і граничних умовах

$$\begin{aligned} w(x, 0, t) &= 0, \quad w(x, y, 0) = 0, \\ t = 0 &\rightarrow P(x, 0, t) = P_a, \quad P(x, y, t) = P_a, \\ t > 0 &\rightarrow P(x, U_0, t) = P_a, \quad P(\infty, Y, t) = P_a. \end{aligned}$$

Математична модель реалізується методом інтегральних перетворень.

Аналіз залежності (3.1) показує, що навіть при сталому тиску всередині ємності і сталому діаметрі отвору масова витрата витоку газу не може бути сталою в час за умов докритичного витікання, оскільки змінюється зовнішній тиск P_1 .

Розв'язок поставленої задачі розподілу тиску в поровому середовищі має вигляд

$$\begin{aligned}
P(x, y, t) = & P_a + \frac{q}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin \lambda y_0 \sin \lambda y}{\lambda} \times \\
& \times \left\{ \left[\sigma(x - x_0) - 1 \right] \left[e^{-\lambda(x_0 - x)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x_0 - x}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t} \right) - \right. \right. \\
& \left. \left. - e^{\lambda(x_0 - x)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x_0 - x}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t} \right) \right] - \sigma(x - x_0) \times \right. \\
& \times \left[e^{-\lambda(x - x_0)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - x_0}{2\sqrt{\alpha t}} - \lambda\sqrt{\alpha t} \right) - \right. \\
& \left. \left. - e^{\lambda(x - x_0)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - x_0}{2\sqrt{\alpha t}} + \lambda\sqrt{\alpha t} \right) \right] \right\} d\lambda.
\end{aligned} \tag{3.10}$$

Розв'язок залежності (3.10) дозволяє знайти тиск в точці витоку $P(0,0,t)$ як функцію часу другої фази нестационарної фільтрації. При цьому вважається, що величина q витоку газу є постійною в часі.

Встановити характер зміни масової витрати витоку впродовж першої і другої фаз нестационарної фільтрації газу в пористому середовищі в аналітичній формі неможливо, оскільки тиск і витрата витоку взаємно пов'язані. Тому в даному випадку доцільно застосувати ітераційний метод, який полягає в періодичній зміні стаціонарних станів системи.

Алгоритм розрахунку полягає в наступному. Вважаються відомими геометричні характеристики системи, фізичні властивості газу, а також тиск і температура в газопроводі, які вважаються сталими в часі. В початковому наближенні тиск середовища за отвором приймаємо рівним атмосферному P_a .

Діапазон часу нестационарного витікання газу розбивається на дискретні проміжки часу Δt , всередині яких процес можна вважати квазістаціонарним. На початку першого часового інтервалу витрата витоку визначається з залежності (3.1) і вважається сталою. Це дає змогу використати для визначення швидкості фільтрації w і тисків в поровому середовищі (грунті) залежності (3.8), (3.9) і

(3.10). За знайденою за (3.9) швидкістю фільтрації w і проміжками часу Δt визначається висота проникнення газу в ґрунт

$$y_i = w \cdot \Delta t.$$

Якщо $y_i < H$ (глибина залягання трубопроводу), то має місце перша фаза нестационарної визначається з залежності (3.9). В іншому випадку має місце друга фаза нестационарної фільтрації газу в ґрунті, і тиск визначається за (3.10). Знаючи тиск газу $P(0,0,t)$ в довкіллі уточнюємо величину витрати газу за (3.1). Ітераційний процес триває до досягнення необхідної точності δq у визначенні витрати і закінчується після виконання умови

$$|G^{(s)} - G^{(s-1)}| < \delta q. \quad (3.11)$$

Після досягнення виконання умови (3.11) ітераційний процес переходить до наступного дискретного проміжку часу Δt . Вся процедура закінчується після досягнення стаціонарності процесу витікання, тобто до моменту часу, після якого тиск $P(0,0,\Delta t)$ і масова витрата витоку $G_i^{(s)}$ перестають залежати від часу. В результаті отримують залежності зміни масової витрати і тиску газу в пористому середовищі за аварійним отвором як функції часу протягом першої і другої фаз нестационарної фільтрації.

Висновки до розділу 3

1. Для оцінки впливу фізичних характеристик ґрунту і встановлення залежності коефіцієнта проникності ґрунту від зовнішніх факторів проводились серії експериментальних досліджень.

2. Експериментальним шляхом встановлено залежність проникності вологого ґрунту з певним внутрішнім тиском від часу витримки зразка під навантаженням. Отримано відповідні емпіричні залежності.

3. Виконані експериментальні дослідження фільтраційних характеристик ґрунтів дозволили встановити їх залежностей від зовнішніх і внутрішніх факторів.

Основні наукові результати розділу опубліковані в працях [33,36, 38].

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМУВАННЯ АРЕАЛУ ЗАГАЗОВАНOSTІ ДОВКІЛЛЯ З УРАХУВАННЯМ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГРУНТІВ

Поява витoku газу на підземній частині ділянки газопроводу передбачає його подальшу фільтрацію в пористому середовищі (грунті) аж до виходу на поверхню, яка супроводжується постійним зростанням фільтраційного опору середовища. Тому зміна параметрів потоку газу в часі передбачає нестационарний процес, характеристики якого залежать від фільтраційних властивостей ґрунту, зокрема від його проникності.

Очевидно, що фізичні властивості, зокрема фільтраційний опір ґрунту як пористого середовища повинні чинити вплив на інтенсивність витікання газу з газопроводу і формування ареалу загазованості. Тому існує взаємозв'язок між процесом витікання газу з газопроводу крізь аварійний отвір і його фільтрацією в навколишньому ґрунті.

Поставлена задача дослідження процесу формування ареалу загазованості ґрунту витокami газу з газопроводу вимагає проведення досліджень фільтраційних характеристик (зокрема проникності) ґрунтів як навколишнього середовища трубопроводу з урахуванням зовнішніх впливів (вологості, фракційного складу, внутрішнього тиску). Поставлені завдання розглядається різними авторами в процесі досліджень спорудження та ремонту трубопроводів [22, 33, 36, 38]. В поданих роботах встановлено залежність проникності різних типів ґрунту в непорушеному стані від фракційного складу. Однак, залежності фільтраційного опору ґрунтів від вологості та тиску в літературі відсутні.

4.1 Збір і обробка інформації для прогнозування процесу формування ареалу загазованості ґрунту

Отримані аналітичні залежності швидкості фільтрації газу в пористому середовищі і характеру зміни тиску при цьому для умов нестационарного процесу

формування ареалу загазованості дозволяють побудувати процес зміни його характеристик у просторі і часі впродовж першої фази нестационарної фільтрації, тобто для проміжку часу, за який газ досягне поверхні ґрунту, в залежності від величини аварійного витoku і властивостей пористого середовища. Задача полягає в тому, щоб установити загальні закономірності процесу формування ареалу загазованості з врахуванням властивостей ґрунту. Поставлена задача вимагає вибору і підготовки інформації про тип ґрунтів у даному регіоні, їх фракційний склад, внутрішній тиск та вологість на момент появи витoku. Збір та первинна обробка такої інформації, як правило, є трудомісткою процедурою, і в процесі оперативного прогнозування може бути отримана лише з певними припущеннями. Одним з таких припущень є однорідність ґрунту в зоні появи аварійного витoku і формування ареалу загазованості. Крім того, вважається, що витік є малим, величина його витрати є сталою хоча б на початку процесу. Як свідчать результати досліджень [36, 38], величина аварійного витoku в момент його появи є несуттєвою, та з імовірністю 90% може бути прийнята на основі статистичних даних на рівні $0,2 - 0,5 \text{ см}^3/\text{год}$. Приймаючи величину початкової витрати аварійного витoku, допускається похибка в обчисленні лінійних характеристик ареалу загазованості в розмірі не більше 10%.

В [38] показано, що внутрішній тиск в однорідних масивах ґрунту підпорядкований законам гідростатичного тиску, тобто його величина змінюється з глибиною за лінійним законом, і на поверхні рівна нулю.

Вологість ґрунтів є багатопараметричною функцією і залежить від глибини залягання шару ґрунту, пори року, наявності трав'яного покриву, рельєфу місцевості, кількості опадів на даний момент часу та ін.. В [38] вказується, що наявність рослинного покриву на поверхні ґрунту забезпечує підвищену вологість в області кореневих закінчень до глибини 20 см на величину до 25% відносно довкілля.

Вказана інформація дозволяє побудувати карти проникності ґрунтів від місця появи аварійного витoku до поверхні за результатами досліджень, наведених в розділі 3.

Під час проведення досліджень загальних закономірностей формування ареалу загазованості аналітичними методами розглядалося довкілля гіпотетичного газопроводу як однорідне гомогенне пористе середовище з коефіцієнтом пористості $m=0,2$ при щільності ґрунту $\rho=2,55$ г/см³ з фракціями гранул діаметром 1 мм. Газопровід діаметром 1420x18 мм був розміщений на глибині 1,4 м до верхньої твірної труби, на якій в момент часу $t=0$ появився аварійний витік газу через щілину прямокутної форми розмірами $b \times h = 1 \times 5$ мм з масовою витратою газу $q=0,2$ г/хв. Приймаючи точку аварійного витоку газу за початку плоскої декартової системи координат, зауважимо, що лінійні координати в площині змінювались в межах

$$0 \leq x \leq \infty;$$

$$0 \leq y \leq H.$$

В початку координатної системи в початковий момент часу абсолютний тиск був рівний барометричному

$$P(0,0,0) = P_a.$$

В процесі фільтрації газу внутрішній тиск в ґрунті змінювався зі зміною висоти за лінійним законом

$$\sigma(x, y, t) = \sigma(x, t) - \rho g y.$$

В масиві пористого середовища ґрунт вважався сухим, за винятком поверхневої смуги товщиною 0,2 м, вологість якої становила 0,25.

Коефіцієнт проникності в кожній точці площини визначався за формулою

$$k = 0.55 \cdot d_0^{0.75} \rho^{-0.21} \exp(-31,5 \varphi^{2.1} \sigma^{0.55}).$$

Проведені розрахунки дозволили визначити поле проникностей масиву ґрунту, яке у формі базового файлу даних було використане для прогнозування нестационарного процесу формування ареалу загазованості.

4.2 Алгоритм і програма розрахунків процесу формування ареалу загазованості ґрунту

Процес витікання газу з газопроводу в ґрунт і формування ареалу загазованості запропоновано поділити на дві нестационарні фази фільтрації, перша з яких починається в момент виникнення аварійного витоку газу і закінчується досягненням ним поверхні землі, після чого настає друга фаза нестационарної фільтрації, яка закінчується встановленням стаціонарного режиму витікання газу через шар ґрунту в атмосферу.

Для прогнозування характеру формування ареалу загазованості використовуються аналітичні математичні моделі швидкості фільтрації і тиску в пористому середовищі як функції просторових координат і часу. Для їх реалізації використано ітераційний метод, оскільки розрахунки за лінійними алгоритмами не дозволяють досягнути заданої мети.

Процес формування ареалу загазованості в часі подається у вигляді дискретних послідовних проміжків Δt , впродовж яких процес можна вважати квазістационарним. Відомими вважаються властивості ґрунту і їх зміна в просторі. Абсолютний тиск на поверхні трубопроводу (в зоні утворення аварійного витоку) в початковий момент часу

$$P(0,0,0) = P_a + \rho_r gH, \quad (4.1)$$

де P_a – барометричний тиск; ρ_r – густина (щільність) ґрунту; H – глибина закладення газопроводу.

Площина фільтрації xOy розбивається на дискретні проміжки впродовж осей координат відповідно Δx та Δy , в результаті отримується прямокутна плоска

сітка у вузлах якої задані властивості ґрунту: діаметр гранул d_0 , щільність ґрунту ρ_r , внутрішній тиск σ як функція глибини, вологість φ . За вказаними даними у кожному з вузлів сітки розраховується коефіцієнт проникності пористого середовища

$$k = 0.55 \cdot d_0^{0.75} \rho^{-0.21} \exp(-31,5\varphi^{2.1}\sigma^{0.55}), \quad (4.2)$$

де k – коефіцієнт проникності, дарсі; d – діаметр гранул, мм.; φ – вологість ґрунту; σ – внутрішній тиск, н/см².

Розраховується параметр п'єзопровідності

$$\alpha = \frac{kc^2\rho}{\eta}, \quad (4.3)$$

де c – швидкість розповсюдження звуку в середовищі; η – динамічна в'язкість газу; ρ – густина газу

$$\rho = \frac{P(0,0,0)}{RT}, \quad (4.4)$$

де T – абсолютна температура ґрунту.

Визначається коефіцієнт витрати отвору аварійного витоків:
для умов критичного витікання газу

$$\mu = 0.285 \cdot d^{0.45} R^{0.033} T^{0.034} \exp(-0,0015P^2),$$

для умов докритичного витікання газу

$$\mu = 0.582 \cdot (RT)^{0.025} p^{-0.11},$$

де μ – коефіцієнт витрати отвору; d – діаметр отвору, мм; R – газова стала, Дж/кгК; T – абсолютна температура в ресивері, К; P – тиск газу, бар.

Визначається масова витрата аварійного витоку газу в початковому наближенні ($s=0$; s – номер ітерації) на основі формули Сен-Венана-Вентцеля

$$G^{(s=0)} = \mu \omega \sqrt{\frac{2k}{k-1} P_0 \rho_0 \left[\left(\frac{P(0,0,0)}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} - \left(\frac{P(0,0,0)}{P_0} \right)^{\frac{2}{k}} \right]}, \quad (4.5)$$

де k – показник адіабати процесу; P_0 – тиск в газопроводі; ρ_0 – густина газу при умовах в газопроводі, ω – площа перерізу отвору

$$\omega = b * h.$$

Для встановлення характеру формування ареалу забруднення ґрунту витоками газу з трубопроводу необхідно встановити закономірність зміни швидкості фільтрації в часі [36,41]. З цією метою використано принцип суперпозиції рухів, згідно з яким вектор швидкості фільтрації продукту в ґрунті подають у вигляді геометричної суми його проєкцій на координатні осі

$$\bar{w} = \bar{w}_x + \bar{w}_y. \quad (4.6)$$

Величини проєкцій вектора швидкості фільтрації на кінець проміжку часу Δt визначаються на основі закону Дарсі з використанням залежностей

$$\begin{aligned}
w_x(x, y, t) = & -\frac{k}{\eta} \frac{\partial P(x, y, t)}{\partial x} = \frac{q}{2\pi F} \int_0^{\infty} \frac{2}{\sqrt{\pi \lambda t}} \sin \lambda y_0 \sin \lambda y \{ [\sigma(x - x_0) - 1] [e^{-\lambda(x_0 - x)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x_0 - x}{2\sqrt{\lambda t}} - \lambda\sqrt{\lambda t}\right) + \\
& + \exp[-\lambda(x_0 - x) - \left(\frac{x_0 - x}{2\sqrt{\lambda t}} - \lambda\sqrt{\lambda t}\right)^2] + e^{\lambda(x_0 - x)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x_0 - x}{2\sqrt{\lambda t}} + \lambda\sqrt{\lambda t}\right) - \\
& - \exp[\lambda(x_0 - x) - \left(\frac{x - x_0}{2\sqrt{\lambda t}} + \lambda\sqrt{\lambda t}\right)^2] - \sigma(x - x_0) [e^{-\lambda(x - x_0)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x - x_0}{2\sqrt{\lambda t}} - \lambda\sqrt{\lambda t}\right) + \\
& + \exp[-\lambda(x - x_0) - \left(\frac{x - x_0}{2\sqrt{\lambda t}} - \lambda\sqrt{\lambda t}\right)^2] + e^{\lambda(x - x_0)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x - x_0}{2\sqrt{\lambda t}} + \lambda\sqrt{\lambda t}\right) - \\
& - \exp[\lambda(x - x_0) - \left(\frac{x - x_0}{2\sqrt{\lambda t}} + \lambda\sqrt{\lambda t}\right)^2]] \} d\lambda.
\end{aligned} \tag{4.7}$$

$$\begin{aligned}
w_y(x, y, t) = & -\frac{k}{\eta} \frac{\partial P(x, y, t)}{\partial y} = \frac{q}{2\pi F} \int_0^{\infty} \sin \lambda y_0 \cos \lambda y \{ [\sigma(x - x_0) - 1] [e^{-\lambda(x_0 - x)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x_0 - x}{2\sqrt{\lambda t}} - \lambda\sqrt{\lambda t}\right) - \\
& - e^{\lambda(x_0 - x)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x_0 - x}{2\sqrt{\lambda t}} + \lambda\sqrt{\lambda t}\right)] - \sigma(x - x_0) [e^{-\lambda(x - x_0)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x - x_0}{2\sqrt{\lambda t}} - \lambda\sqrt{\lambda t}\right) - \\
& - e^{\lambda(x - x_0)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x - x_0}{2\sqrt{\lambda t}} + \lambda\sqrt{\lambda t}\right)] \} d\lambda;
\end{aligned} \tag{4.8}$$

Розраховується тиск в точці виникнення аварійного витoku на кінець проміжку часу Δt

$$\begin{aligned}
P(0, 0, \Delta t) = & P_a + \frac{q}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin \lambda y_0 \sin \lambda \Delta y}{\lambda} \times \\
& \times \left\{ [\sigma(x - x_0) - 1] \left[e^{-\lambda(x_0 - \Delta x)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x_0 - \Delta x}{2\sqrt{\lambda \Delta t}} - \lambda\sqrt{\lambda \Delta t}\right) - \right. \right. \\
& \left. \left. - e^{\lambda(x_0 - \Delta x)} \operatorname{erfc}\left(\frac{x_0 - \Delta x}{2\sqrt{\lambda \Delta t}} + \lambda\sqrt{\lambda \Delta t}\right) \right] - \sigma(x - x_0) \times \right. \\
& \left. \times \left[e^{-\lambda(\Delta x - x_0)} \operatorname{erfc}\left(\frac{\Delta x - x_0}{2\sqrt{\lambda \Delta t}} - \lambda\sqrt{\lambda \Delta t}\right) - e^{\lambda(\Delta x - x_0)} \operatorname{erfc}\left(\frac{\Delta x - x_0}{2\sqrt{\lambda \Delta t}} + \lambda\sqrt{\lambda \Delta t}\right) \right] \right\} d\lambda.
\end{aligned} \tag{4.9}$$

За формулою Сен-Венана – Вентцеля уточнюється величина масової витрати аварійного витoku

$$G^{(s=1)} = \mu\omega \sqrt{\frac{2k}{k-1} P_0 \rho_0 \left[\left(\frac{P(0,0,\Delta t)}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} - \left(\frac{P(0,0,\Delta t)}{P_0} \right)^{\frac{2}{k}} \right]}. \quad (4.10)$$

За знайденою швидкістю фільтрації w і проміжками часу Δt визначається висота проникнення газу в ґрунт

$$y_i = w \cdot \Delta t. \quad (4.11)$$

Якщо $y_i < H$, то має місце перша фаза нестационарної фільтрації. В іншому випадку має місце друга фаза нестационарної фільтрації газу в ґрунті, і тиск визначається з (4.9). Знаючи тиск газу $P(0,0,\Delta t)$ в довкіллі уточнюємо величину витрати газу. Ітераційний процес триває до досягнення необхідної точності δq у визначенні витрати і закінчується після виконання умови

$$|G^{(s)} - G^{(s-1)}| < \delta q. \quad (4.12)$$

Друга фаза нестационарної фільтрації газу в ґрунті закінчується після досягнення стабільності в результатах прогнозування в часі, тобто якщо

$$|P(0,H,n\Delta t) - P(0,H,(n-1)\Delta t)| < \delta P, \quad (4.13)$$

(δP - точність прогнозу), то час $\tau = n\Delta t$ є тривалістю нестационарної фільтрації газу в ґрунті.

Розглянемо загальні закономірності процесу формування ареалу загазованості ґрунту під час аварійних витоків з газопроводу.

4.3 Загальні закономірності процесу формування ареалу загазованості ґрунту

Складність математичного моделювання процесу формування ареалу загазованості докільня аварійними витокami з газопроводу полягає в тому, що модель містить багато факторів, які різним чином впливають на характер фільтрації газу в пористому середовищі і мають тенденцію до зміни як в просторі, так і в часі. Тому підготовка вихідної інформації для реалізації математичної моделі є тривалим і клопітким процесом, який вимагає проведення спеціальних вишукувань в природних умовах траси, що вимагає значних затрат часу. В зв'язку із сказаним діагностика аварійних витоків з газопроводу на стадії їх появи через аналіз процесу формування ареалу загазованості є не завжди можливою і адекватною. Тому задачі оперативного слідкування за станом газопроводу на основі аналізу фільтрації газу в ґрунті не можуть бути використані з метою діагностики аварійних витоків газу з газопроводу в зв'язку з тривалістю їх реалізації.

Однак, поява аварійних витоків, які на початковій стадії формування характеризуються мізерною витратою газу, може призвести до катастрофічних екологічних та економічних наслідків. Тому математичне моделювання процесу формування ареалу загазованості ґрунту аварійними витокami з газопроводу повинно бути використане з метою встановлення загальних закономірностей процесу для оцінки загальної тривалості формування ареалу загазованості, його геометричних характеристик і динаміки їх зміни в часі. Таким чином, реалізація математичної моделі повинна дозволити оцінити тривалість фільтрації газу в ґрунті до його появи на поверхні ґрунту, обсяг газу, що насичує пористе середовище, загальну територію загазованості і т. д.

Для досягнення вказаної мети проводились розрахунки, пов'язані з фільтрацією газу в ґрунті внаслідок появи аварійного витoku газу для гіпотетичного середовища, представленого піщаним ґрунтом заданого гранулометричного складу за умови однорідності об'єму за наявності рослинного

покриву поверхні за наведеним алгоритмом. Метою проведених розрахунків було встановлення загальних характеристик процесу формування ареалу загазованості на основі аналізу побудованих графічних залежностей.

Одержане рівняння у формі (4.9) дозволяє прогнозувати зміну тиску в пористому середовищі в часі за рахунок зростання фільтраційного опору, викликаного витіканням газу з трубопроводу. При $x = 0$ і $y = 0$ рівняння (4.9) дає можливість визначити величину тиску, який протидіє витіканню. Однак, в аналітичній формі описати процес витікання газу з трубопроводу неможливо, оскільки в (4.9) вважається, що величина витрати витоку газу з трубопроводу є сталою. При зміні тиску зовнішнього опору витрата витоку також буде змінюватися в часі, що не враховано в (4.9). Тому для розв'язання задачі пропонується використати ітераційний метод, який передбачає розбиття часу витікання на дискретні проміжки Δt , впродовж кожного з яких витрату витоку можна вважати сталою. Для першого часового інтервалу тиск протидії витіканню слід вважати рівним гідростатичному тиску ґрунту на глибині залягання трубопроводу. Тоді масова витрата витоку може бути знайдена з формули Сен-Венана – Вентцеля. За (4.9) прогнозується величина тиску зовнішнього опору витіканню $P(0,0,\Delta t)$ на кінець проміжку Δt , і визначається нова витрата витоку за формулою Сен-Венана - Вентцеля. Таким чином, плавна крива зміни величини витрати витоку в часі замінюється ступінчатою залежністю, яка при виборі достатньо малого інтервалу ітерацій Δt адекватно відобразатиме реальний характер витікання.

На рисунку 4.1 представлено залежності зміни тиску фільтраційного опору середовища (тиску протидії витіканню) і зміни витрати витоку в часі, що побудовані для різних характеристик ґрунтів.

Аналіз отриманих графічних залежностей показує, що зростання тиску протидії витіканню за рахунок фільтраційного опору ґрунту визначається проникністю пористого середовища і фізичними властивостями газу. При сталому

тиску в газопроводі і незмінній площі перетину витікання зростання тиску фільтраційного опору призводить до зменшення витрати витоку.

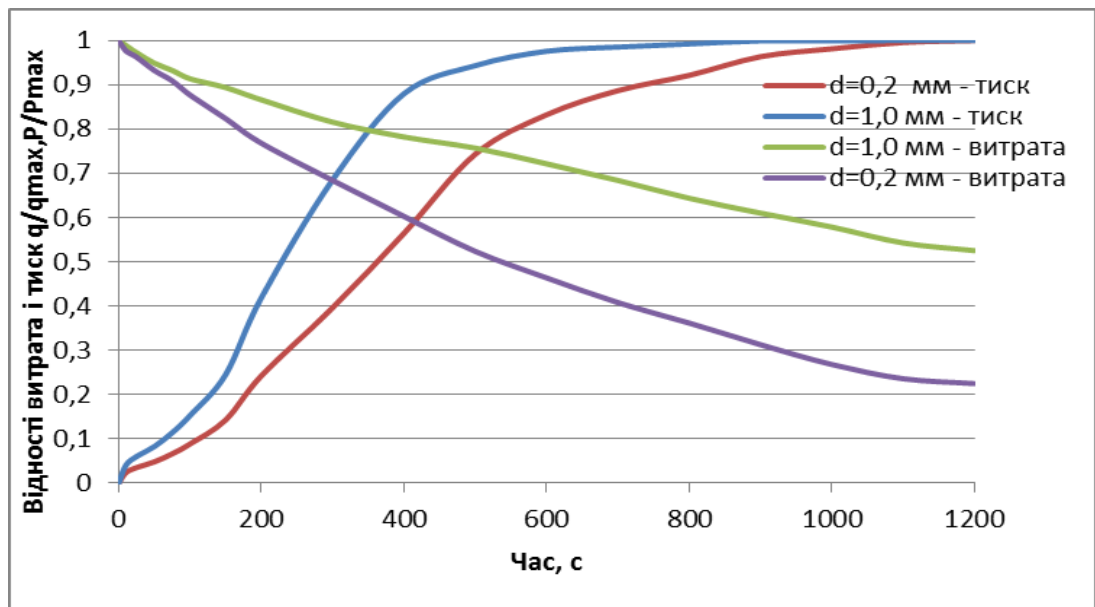


Рисунок 4.1 – Залежність тиску і витрати витоку від часу для різних ґрунтів

Тривалість процесу нестационарної фільтрації газу в ґрунті залежить від проникності пористого середовища і може коливатися в значному часовому діапазоні. Збільшення проникності ґрунту призводить до зростання процесу нестационарної фільтрації. Так, для ґрунтів типу пісків з діаметром гранул 1,0 мм час нестационарної фільтрації складає близько 800 с, а для ґрунтів типу пісків з діаметром гранул 0,2 мм він становить 1100 с.

Величини швидкостей фільтрації газу в кожному з вузлів сітки визначалися як геометрична сума складових проекцій

$$w = \sqrt{w_x^2 + w_y^2}, \quad (4.14)$$

За результатами розрахунків будувалося поле швидкостей на кінець кожного з проміжків часу, яке визначає характер формування ареалу

загазованості ґрунту аварійними витокami з газопроводу. Результати дослідження у вигляді графіків наведені на рисунку 4.2, а.

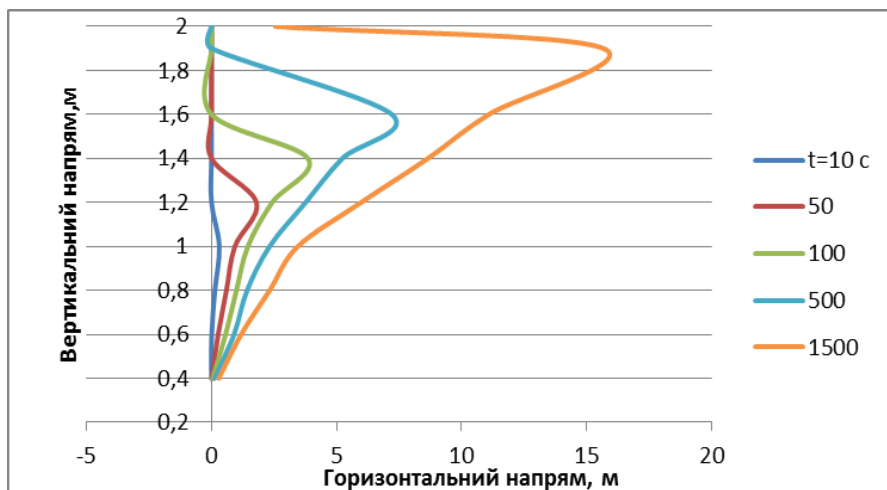
Аналізуючи графіки бачимо, що характер формування ареалу загазованості ґрунту з урахуванням фільтраційного опору пористого середовища суттєво відрізняється від результатів, отриманих в [36] без урахування підвищення тиску внаслідок фільтраційного опору ґрунту, графічні характеристики якого подані на рисунку 4.2, б. Як вказується в [36], найбільший об'єм ареал загазованості ґрунту займає на кінець першої фази нестационарної фільтрації газу в ґрунті. Це автори пояснюють наявністю певного фільтраційного опору ґрунту в період першої фази (досягнення газом поверхні ґрунту), з наближенням до поверхні величина якого зменшується, що призводить до зростання поверхні ареалу загазованості. Після досягнення газом поверхні ґрунту фільтраційний опір різко зменшується, що призводить до зростання швидкості переходу газу з ґрунту в атмосферу. Внаслідок цього площа поверхні загазованості повинна зменшитися, а відповідно до принципу нерозривності, швидкості виходу газу в атмосферу – зрости.

Врахування підвищення тиску на виході аварійного витoku газу в пористе середовище внаслідок фільтраційного опору ґрунту суттєво змінює фізичну картину процесу. Впродовж першої фази нестационарної фільтрації газу він за рахунок архімедової сили і внаслідок збільшення коефіцієнту проникності ґрунту за рахунок зниження внутрішнього тиску по висоті піднімається до поверхні, витискуючи з пористого середовища повітря, яке, в свою чергу, створює додатковий опір фільтрації газу.

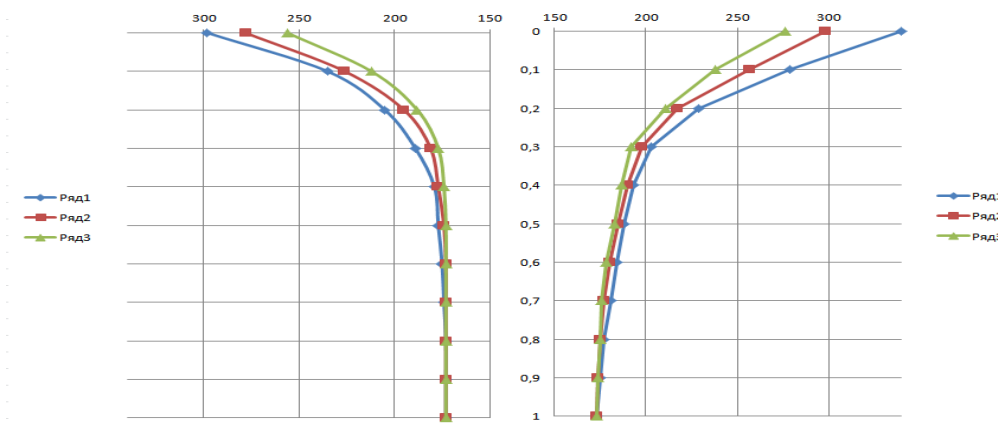
Внаслідок зростання опору у вертикальному напрямку газ отримує можливість розширення в горизонтальній площині, що призводить до збільшення радіуса ареалу загазованості в горизонтальному напрямку. Після досягнення поверхні землі збільшення радіального розповсюдження газу практично припиняється в зв'язку з зниженням опору у вертикальному напрямку.

Врахування підвищення тиску внаслідок фільтраційного опору суттєво змінює параметри формування ареалу загазованості.

а)



б)



в)

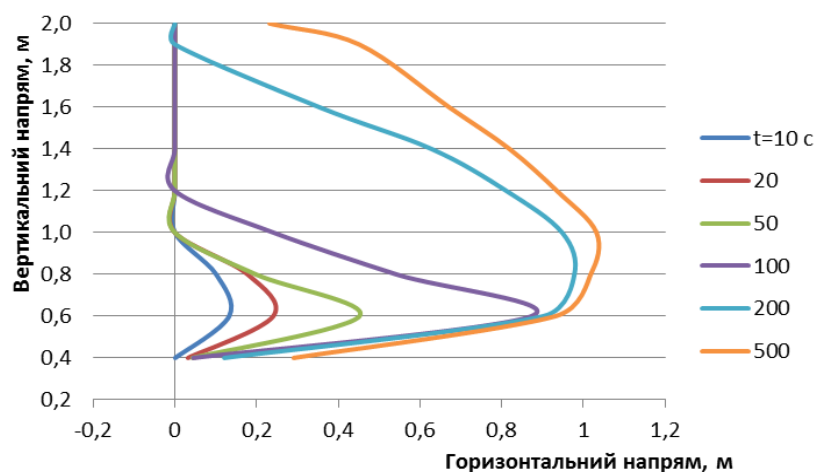


Рисунок 4.2 Характер формування ареалу загазованості ґрунту

а) – за результатами наведених досліджень; б) – за результатами досліджень [36]

в) – за результатами досліджень [38]

Так, тривалість першої фази нестационарної фільтрації складає близько 1500 с (25 хв.), в той час як за даними досліджень [36] він не перевищує 250 с (близько 5 хв). Загальна площа ареалу загазованості характеризується максимальним радіусом близько 17 м, в той час як без врахування фільтраційного опру він не перевищує 4 м і протягом другої фази фільтрації має тенденцію до зменшення.

На рисунку 4.2, в приведені графічні залежності, що характеризують формування ареалу забруднення ґрунту витокami нафти з нафтопроводу, побудовані за результатами досліджень [38]. Цікавим є те, що характер формування ареалу принципово відповідає аналогічним процесам формування ареалу загазованості ґрунту витокami газу з газопроводу. Відмінність полягає в тому, що для фільтрації нафти під дією гравітаційних сил основний масив ареалу забруднення розміщується на глибині, близькій до джерела витoku, в той час, як для ареалу загазованості під дією архімедової сили ареал піднімається ближче до поверхні землі.

4.4 Удосконалення методики оцінки втрат газу при транспортуванні

На основі результатів проведених досліджень процесу витікання газу з газопроводу через аварійні витoki під тиском і формування ареалу загазованості при цьому внесено ряд змін до методики оцінки втрат газу при транспортуванні.

Річний обсяг втрат газу, пов'язаний з негерметичність фланцевих і різьбових з'єднань, визначається за формулою

$$V_{\text{негерм.}} = \frac{G_{\text{год}}}{\rho} \quad (4.15)$$

де ρ – щільність газу абсолютна, кг/м³ (приймається за паспортом якості газу);

$G_{\text{год}}$ – питома кількість викидів газу, кг/рік, розраховують за формулою

$$G_{\text{зод}} = 0.31298 \cdot \gamma \cdot P_{\text{ізб}} \cdot m \cdot V_n \cdot \sqrt{\frac{M}{T_r}}, \quad (4.16)$$

де γ – коефіцієнт запасу, який приймається з таблиць за значеннями тиску; $P_{\text{ізб}}$ – надлишковий тиск газу в системі, Па; V_n – геометричний об'єм, м³; M – масова витрата, кг/с; T_r – коефіцієнт негерметичності, величина відносного падіння тиску за одиницю часу, m – розраховується за формулою

$$m = m_1 \cdot k; \quad (4.17)$$

$$m_1 = \frac{1}{\tau} \cdot \left(1 - \frac{P_k \cdot T_n}{P_n \cdot T_k} \right), \quad (4.18)$$

де τ – час випробування на герметичність; P_n, P_k – тиск газу на початку випробувань і в кінці, Па; T_n, T_k – температура газу на початку випробувань і в кінці, К. Значення слід вибрати з таблиці за даними часу експлуатації газопроводу.

Для розрахунку обсягу скидання газу через ПСК спочатку необхідно визначитися з режимом витікання газу – критичний або некритичний. Якщо швидкість витікання газу (W) більше швидкості звуку (W), то режим витікання газу є критичним, якщо $W < W$, то режим витікання газу некритичний. Розрахунок швидкості звуку в природному газі проводиться за формулою (4.19)

$$W_{\text{звук}} = 18,591 \cdot \left(\frac{T_r \cdot k \cdot Z}{\rho} \right)^{0.5}, \quad (4.19)$$

де T – температура газу, К; Z – коефіцієнт стисливості газу (формула 4); ρ – абсолютна щільність газу, кг / м³; k – показник ізоентропи (адіабати)

$$k = 1.556 \cdot (1 + 0.074 \cdot x_n) - 3.9 \cdot 10^{-4} \cdot T_r \cdot (1 - 0.68 \cdot x_n) - 0.208 \cdot \rho + \left(\frac{P_a}{T_r} \right)^{1.43} \cdot \left[384 \cdot (1 - x_n) \cdot \left(\frac{P_a}{T_r} \right)^{0.8} + 26.4 \cdot x_n \right], \quad (4.20)$$

де P_a - абсолютний тиск газу, МПа; T - температура газу, К; ρ - абсолютна щільність газу, кг/м³; x_n - молярна складова азоту (приймається за паспортом якості газу, $x_n=0,012$).

Розрахунок витрати витікання газу проводиться за формулою проводиться за формулою Сен-Венана – Вентцеля, яку пропонується використати у вигляді:

$$G = \mu \omega \sqrt{\frac{2k}{k-1} P_0 \rho_0 \left[\left(\frac{P_C}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} - \left(\frac{P_C}{P_0} \right)^{\frac{2}{k}} \right]},$$

де ω - площа поперечного перерізу витоку; P_0 - тиск газу в газопроводі, Па; P_C - абсолютний тиск газу за отвором, Па; μ - коефіцієнт витрати отвору витікання; k - показник ізоентропа (адіабати), розрахунок за формулою (4.20). ρ_0 - щільність газу фактична, кг/м³

$$\rho_0 = \frac{P_0}{ZRT_0},$$

де P_0 - абсолютний тиск газу, МПа; T_0 - температура газу, К; Z - коефіцієнт стисливості газу.

Якщо режим витікання газу критичний, то

$$\mu = 0.285 \cdot d^{0.45} R^{0.033} T^{0.034} \exp(-0,0015P^2).$$

Для докритичного режиму витікання

$$\mu = 0.582 \cdot (RT)^{0.025} \cdot P^{-0.11},$$

де d – діаметр отвору, мм; R - газова стала, Дж/кгК; T – абсолютна температура в ресивері, К; P - тиск газу, бар.

Якщо витікання газу здійснюється в пористе середовище (грунт), то необхідно визначити характеристики ґрунту – проникність та п'єзопровідність.

$$k = 0.55 \cdot d_0^{0.75} \rho^{-0.21} \exp(-31,5\varphi^{2.1} \sigma^{0.55})$$

$$\varkappa = \frac{kc^2\rho}{\eta},$$

де k - коефіцієнт проникності, дарсі; d – діаметр гранул в мм.; φ - вологість ґрунту; σ - внутрішній тиск, н/см², η - динамічна в'язкість газу, Па*с.

В початковому наближенні тиск газу за отвором приймається рівним гідростатичному

$$P_c = P_a + \rho_g g H.$$

За формулою Сен-Венана - Вентцеля розраховується початкове наближення витрати витоку.

Розраховується тиск в точці виникнення аварійного витоку на кінець проміжку часу Δt

$$\begin{aligned} P(0,0,\Delta t) = & P_a + \frac{q}{2\pi} \int_0^\infty \frac{\sin \lambda y_0 \sin \lambda \Delta y}{\lambda} \times \\ & \times \left\{ \left[\sigma(x-x_0) - 1 \right] \left[e^{-\lambda(x_0-\Delta x)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x_0-\Delta x}{2\sqrt{\varkappa\Delta t}} - \lambda\sqrt{\varkappa\Delta t} \right) - \right. \right. \\ & \left. \left. - e^{\lambda(x_0-\Delta x)} \operatorname{erfc} \left(\frac{x_0-\Delta x}{2\sqrt{\varkappa\Delta t}} + \lambda\sqrt{\varkappa\Delta t} \right) \right] - \sigma(x-x_0) \times \right. \\ & \left. \times \left[e^{-\lambda(\Delta x-x_0)} \operatorname{erfc} \left(\Delta \frac{x-x_0}{2\sqrt{\varkappa\Delta t}} - \lambda\sqrt{\varkappa\Delta t} \right) - e^{\lambda(\Delta x-x_0)} \operatorname{erfc} \left(\frac{\Delta x-x_0}{2\sqrt{\varkappa\Delta t}} + \lambda\sqrt{\varkappa\Delta t} \right) \right] \right\} d\lambda. \end{aligned}$$

За формулою Сен-Венана – Вентцеля уточнюється величина масової витрати аварійного витоку на кінець проміжку часу Δt . Змінюючи значення часу, можна визначити обсяг витоку.

Для оцінки адекватності моделі проведено порівняння прогнозних результатів розрахунку втрат газу, пов'язаних з аварійними витоками, з газопроводів середнього тиску діаметром 108 мм УЕГГ «Косівгаз» за 2012 рік, впродовж якого проводився комплексний науково-виробничий експеримент з оцінки надійності газопостачання.

В основу проведених досліджень закладено інформацію про експлуатацію системи розподільних газопроводів середнього тиску УЕГГ «Косівгаз» за 2012 р. В якості вихідних даних для розрахунку показників надійності мереж низького і середнього тисків було вибрано для кожного з місяців вказаного періоду:

- кількість аварійних ситуацій, які призводили до появи витоків газу з газопроводу через корозійні дефекти N ;
- тривалість ліквідації аварійних пошкоджень від моменту виявлення витоку до досягнення працездатного стану L ;
- загальні втрати газу з врахуванням витоку і випорожнення трубопроводу при відновлювальних роботах та введення ділянки в експлуатацію Q ;
- загальні затрати на виявлення і ліквідацію аварійних ситуацій Z .

Для вказаних умов проведено прогнозні розрахунки втрат газу при аварійних витоках за існуючою методикою [32] і галузевою методикою з внесеними корективами. Результати прогнозу порівнювались з фактичними даними і розраховувалась похибка прогнозу для кожної з методик.

Результати розрахунків у вигляді графіків приведено на рисунку 4.3.

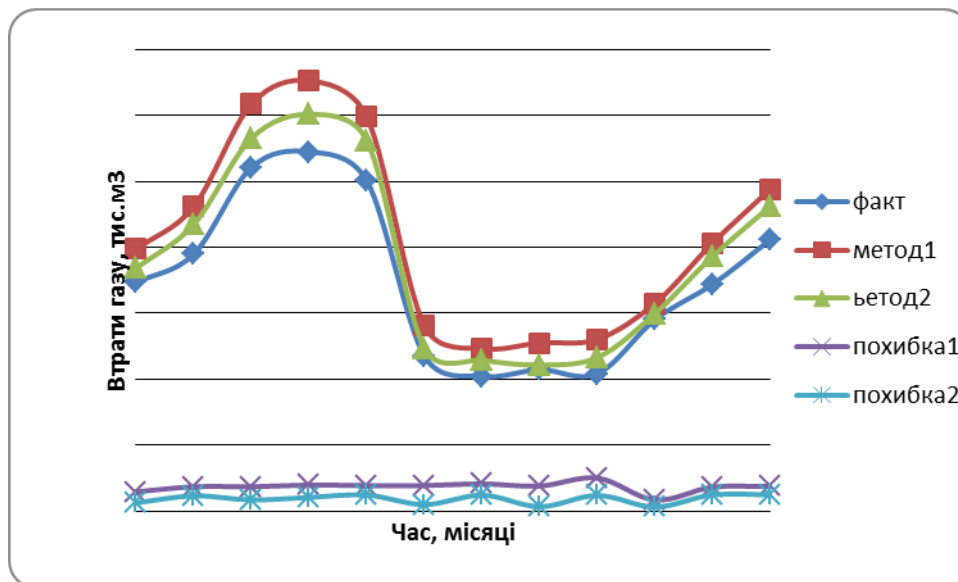


Рисунок 4.3 – Порівняння прогнозних і фактичних результатів по втратах газу

Аналіз отриманих результатів показує, що методики прогнозних розрахунків втрат газу з газопроводів середнього тиску дають завищені результати в порівнянні з фактичними даними, причому середньорічна похибка для методики [32] складає 18,2%, а для галузевої методики – 9,5%. Підвищення точності удосконаленої методики досягається за рахунок врахування фільтраційного опору пористого середовища при русі витoku газу з газопроводу, отримане на основі проведених досліджень, що дозволяє рекомендувати удосконалену методику для практичних прогнозів.

Висновки до розділу 4

1. Розроблено методику, ітераційний алгоритм і програму розрахунку формування ареалу загазованості довкілля аварійним витокom газу з газопроводу з урахуванням залежності проникності ґрунту від зовнішніх і внутрішніх факторів та зміни фільтраційного опору середовища.

2. Результати проведених досліджень дозволили встановити загальні закономірності формування ареалу загазованості довкілля аварійними витокami з

газопроводів, які покладено в основу принципів удосконалення методів оцінки втрат газу внаслідок появи аварійних витоків з газопроводів.

3. На основі результатів проведених досліджень внесено корективи до методики оцінки втрат газу при транспортуванні магістральними газопроводами і формуванні ареалу загазованості довкілля.

Основні наукові результати розділу опубліковані в працях [36, 38, 41].

ВИСНОВКИ

На основі результатів проведених досліджень вирішено важливу науково-технічну задачу дослідження процесу формування ареалу загазованості ґрунту аварійними витокami з газопроводу.

1. На основі аналітичних досліджень характеру фільтрації газу в пористому середовищі при появі аварійних витоків з газопроводу побудовано математичну модель процесу у вигляді двовимірної нестационарної системи, реалізація якої методом інтегральних перетворень дозволила створити методику прогнозування і контролю процесу формування ареалу загазованості ґрунту аварійними витокami з газопроводу.

2. На базі результатів математичного моделювання процесу нестационарної фільтрації газу в ґрунті дана оцінка впливу зовнішнього тиску на витрату аварійного витоку газу з магістрального газопроводу в процесі експлуатації. Встановлено, що величина витоку залежить від фільтраційного опору середовища, зокрема від типу ґрунту, зокрема від його проникності. Отримані реальні результати суттєво нижчі за величину прогнозованих показників, в зв'язку з чим запропоновано використовувати поправки в залежності від характеру витікання, які є функціями параметрів процесу і фізичних властивостей газу і для яких запропоновано емпіричні формули.

3. Експериментальним шляхом встановлено залежність проникності вологого ґрунту з певним внутрішнім тиском від часу витримки під навантаженням. Виконані експериментальні дослідження фільтраційних характеристик ґрунтів дозволили встановити їх залежність від зовнішніх і внутрішніх факторів: внутрішнього тиску ґрунту, його вологості, щільності та гранулометричного складу. Отримано відповідні емпіричні залежності.

4. Результати проведених досліджень дозволили встановити загальні закономірності формування ареалу загазованості довкілля аварійними витокami з газопроводів, співставлення яких з відомими вказують на суттєві розбіжності. Встановлені закономірності покладено в основу розробленої комплексної

галузевої методики «Методи прогнозування режимів газотранспортної системи в умовах неповного завантаження і підрахунку запасів газу в трубах», прийнятої до використання на об'єктах АТ «Укртрансгаз»

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Араманович И., Левин В.И. Уравнения математической физики. М.:Наука. 1964. 286 с.
2. Альтшуль А.А. Гидравлические сопротивления. М.:Недра. 1970. 238с.
3. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. М.: Физматгиз. 1959. 427с.
4. Абрамович Н. Прикладная газовая динамика. М.:Наука, 1969. 544 с.
5. Араманович И., Левин В.И. Уравнения математической физики. М.:Наука. 1964. 286 с.
6. Асатурян А.М., Галиуллин З.Т., Черников В.И. О неустановившихся движениях газа в трубопроводах. *Изв. вузов. Нефть и газ*. Баку. 1961. Т10. С.73-79.
7. Бахвалов И.С. Численные методы. М.:Наука. 1973. 631 с.
8. Белаконь Н. И. Термодинамика. М. Л.:Госэнергоиздат. 1954. 416 с.
9. Биргер И.А. Техническая диагностика. М.:Машиностроение. 1978. 139с.
10. Бобровский С.А., Щербаков С.Г., Гусейнзаде М.А. Движение газа в газопроводе с путевым отбором. М.: Наука. 1972. 193 с.
11. Бакаев В.В. Технологии и оборудование компании "Розен" для диагностики объектов нефтегазовой отрасли. *Материалы 3 науч.-техн. конф. "Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта"*. Минск. 2000. С.120-123.
12. Булгаков Б.В. Колебания. М.: Гостехиздат. 1954. 399 с.
13. Варгафтик Н.П. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.:Наука. 1972. 720 с.
14. Вольский Э.Л., Константинова И.М. Режимы работы магистрального газопровода. М.:Недра. 1970. 168 с.
15. Галиуллин З.Т., Ходанович И. Е., Девичев В. В. Вопросы физического моделирования нестационарных течений газа в магистральных газопроводах с учетом влияния инерционных сил и зон гидравлического сопротивления. Повышение надежности газоснабжения. *Труды ВНИИГАЗ*. 1976. С.7-16.

16. Галиуллин З.Т., Ходанович И. Е., Девичев В. В. Оценка влияния инерционных сил при нестационарном течении газа в магистральных газопроводах. *Труды ВНИИГАЗ. Магистральные газопроводы*. Москва. 1975. С.71-79.
17. Гарляускас А.И. Математическое моделирование оперативного и перспективного планирования систем транспорта газа. М.:Недра. 1975. 160 с.
18. Гусейнов Ч.С. Влияние конденсата на производительность газопровода. *Трубопроводный транспорт нефти и газа. Труды МИНХ и ГП им.И.М.Губкина*. 1963. №45. С.83-88.
19. Гусейнов И.А., Елшин В.Ю. Расслоеное движение жидкости и газа в трубопроводах. *Изв.Сиб.АН СССР*. 1969. №2. 221с.
20. Гончарук М.І., Середюк М. Д., Шелуденко В. І. Довідник з газопостачання населених пунктів України. Івано-Франківськ: «Сімик». 2006. 1313с.
21. Гончарук М.І. Корозія та розгерметизація газопроводів. *Нафтова і газова промисловість*. 2003. № 2. С. 56-57.
22. Гончарук М.І. Аналіз причин втрат природного газу. *Нафтова і газова промисловість*. 2003. № 1. С. 51-53.
23. Гончарук М.І., Крижанівський Є. І., Побережний Л. Я. Корозійно-механічна поведінка металу газопроводу. *Науковий вісник Національного технічного університету нафти і газу*. 2003. № 1(5). С. 54-59.
24. Гончарук М.І. Щодо ситуації на ринку природного газу України. *Нафтова і газова промисловість (Спец. Випуск)*. 2003. С. 16-20.
25. Гончарук М.І., Репалюк В. І., Казанцева Н. Л. Стан та перспективи виробництва і реалізації скрапленого газу в УкраїніМ. *Нафтова і газова промисловість*. 2003. № 3. С. 54-56.
26. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. М.:Высшая школа. 1973. 254 с.
27. Грудз В.Я., Тымкив Д. Ф., Яковлев Е. И. Обслуживание газотранспортных систем. К.: УМКВО. 1991. 159 с.
28. Грудз В.Я., Тимків Д.Ф., Михалків В.Б. Обслуговування і ремонт газопроводів. Івано-Франківськ. Лілея-НВ. 2009. 711 с.

29. Грудз В.Я., Мыхалкив В. Б., Тымкив Д. Ф. Методика діагностики состояния магистрального газопровода. К.:Час. 1990. 141с.
30. Грудз В.Я., Грудз Я.В. Оптимальне планування режимів роботи газотранспортних систем в умовах багатокритеріальності. *Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ*. 1995. №32. С.12-15.
31. Грудз В.Я., Грудз Я.В., Фейчук В.Д. Математичні моделі для діагностування гідравлічного стану газових мереж. *Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ*. 1998. №35. С.218-221.
32. Грудз В.Я., Грудз Я.В., Фейчук В.Д. Діагностування малих витоків з трубопроводу. *Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ*. 1999. №36. С.42-44.
33. Грудз Я.В., Дрінь Н.Я., Шологон В.Д., Стасюк Р.Б, Мартинюк Р.Т. Дослідження впливу температурного режиму газопроводів на енергоефективність транспорту газу. *Нафтогазова енергетика*. 2011. № 2. С. 43-47.
34. Грудз Я. В., Дрінь Н.Я., Фейчук В.В. Статистична оцінка втрат газу в розподільних мережах. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2012. № 2(43). С. 106-112.
35. Грудз В.Я., Грудз Я.В., Фейчук В.В., Дрінь Н.Я., Стасюк Р.Б. Математичне моделювання фільтрації газу в ґрунті внаслідок виникнення малих витоків в газопроводі. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2011. №3(40). С. 66-69.
36. Грудз В.Я., Грудз Я.В., Дрінь Н.Я., Стасюк Р.Б. Дослідження процесу фільтрації газу в ґрунті у разі появи витоків із газопроводу. *Нафтогазова енергетика*. 2014. №1(21). – С. 70-74.
37. Дрінь Н. Я., Стасюк Р.Б. Оцінка матеріального балансу газопроводу в умовах нестационарного газоспоживання. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2012. № 2. С. 105-106.
38. Грудз В.Я., Грудз Я.В, Дрінь Н.Я., Дем'янчук Я.М. Вплив фільтраційного опору ґрунту на інтенсивність аварійних витоків із газопроводу. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2015. №2(55). С. 68-73.

39. Грудз В.Я., Запыхляк В.Б, Грудз В.Я.(младший), Побережний Л.Я., Дринь Н.Я., Стасюк Р.Б. Прогнозування потенційних ризиків виникнення витоків на газопроводах. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. 2019. №4. С. 78-81.
40. Грудз В.Я. Разработка методов диагностики газотранспортных систем на нестационарных режимах и повышения эффективности их обслуживания. *Диссертация на соиск. уч. степ. докт. техн. наук*. Ивано-Франковск. 1995. 357 с.
41. Дринь Н.Я. Оценивание величины потерь газа и площади загрязнения при повреждении магистрального газопровода. *Надежность безопасность магистрального трубопроводного транспорта. Материалы 7 международной научно-технической конференции, г. Новополоцк, 22-25 Ноября 2011 г.* Новополоцк, 2011. - С. 20-22.
42. Жидкова М.А. Переходные процессы в магистральных газопроводах. *К.:Наукова думка*.1979. 255 с.
43. Жидкова М.А. Трубопроводный транспорт газа. *К.: Наукова думка*. 1973. 142 с.
44. Жидкова М.О. Моделивання технологічних процесів і підвищення ефективності трубопроводного транспорту газу. *Вісник АН УРСР: ТЗ*. К.: Наукова думка. 1985. С.37-44.
45. Жидкова М.А. О точности линеаризации уравнения движения газа. *Газовая промышленность*. №11. 1965. С. 20-26.
46. Загоруйченко В. А. Уравнение состояния и термодинамические свойства газовых смесей водорода, азота и метана. *Теплофизические свойства газов*. М.: Наука. 1970. С.95-97.
47. Загоруйченко В.А. Метод составления уравнений состояния многокомпонентных смесей. *Теплофизика высоких температур*. т.3. №3. 1965. С.244-249.
48. Капцов И.И., Гончаров В. Н., Гончар В. Н. Восстановительные работы на МГ: пути повышения эффективности. *Газовая промышленность*. №4. 1990. С.28-30.

49. Капцов И.И., Гончар В. Н. Определение количества жидкости в газопроводе. *Газовая промышленность*. №3. 1989. С.22-26.
50. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: *Техтеориздат*. 1950. 784 с.
51. Лурье М.В. Газодинамическое сопротивление при движении поршня в трубе. *Изв.вузов. Нефть и газ*. Баку. Т8. 1976. С.42-46
52. Лейбензон А.С. Собрание починений. т.3. *Нефтепромысловая механика*. М.: Изд-во АН СССР. 1956. 678 с.
53. Мазур И.И., Иванцов О. М. Безопасность трубопроводных систем. М.: ИЦ «ЕЛИМА». 2004. 1104с.
54. Майгуров Е.Н. Определение времени стационарного движения газа по трубопроводу. *Вопросы развития газовой промышленности УССР. Труды УкрНИИГАЗ*. вып.15. М.:Недра. 1966. С.28-32.
55. Майгуров Е.Н. Методика расчета параметров продувки трубопровода. *Газовая промышленность*. №11 1968. С.20-26.
56. Мирзанжанзаде А.Х., Гусейнзаде М. А. Решение задач нефтепромысловой механики. М.:Недра. 1969. 199 с.
57. Мозгалевский А. В., Гаспаров Д. В. Техническая диагностика. М.:Высшая школа. 1975. 234 с.
58. Мыхалкив В.Б. Разработка методов оперативного расчета режимов эксплуатации сложных систем газопроводов с пересеченным профилем трассы. *Диссертационная работа на соискание уч. степ.канд.техн.наук*. Москва. 1985. 152 с.
59. Мыхалкив В.Б., Грудз В.Я., Шибнев А. В. Определение количества отложений во внутренней полости действующих газопроводов. *Транспорт, хранение и использование газа в народном хозяйстве*. ВНИИЭГАЗПРОМ. вып.5. 1983. С.16-17.
60. Мыхалкив В.Б., Грудз В. Я., Шибанев А. В. Об оптимальной периодичности очистки полости газопровода. *Транспорт, хранение и использование газа в народном хозяйстве*. ВНИИЭГАЗПРОМ. вып.6. 1983. С.8-9.

61. Яковлев Е.И., Казак А.С., Грудз В.Я. и др. Методика расчета сложных газотранспортных систем с пересеченным профилем трассы. Київ. 1984. 103 с.
62. Яковлев Е.И., Иванов В.А., Грудз В.Я. и др. Методика диагностики состояния полости магистрального газопровода. Київ. 1987. 112 с.
63. Олейников В.А. Оптимальное управление технологическими процессами в нефтяной и газовой промышленности. Л.: Недра. 1982. 216 с.
64. Обморшев А.Н. Введение в теорию колебаний. М.: Наука. 1965. 275 с.
65. Огибалов П. М., Мирзанжанзаде А. Х. Нестационарное движение вязкопластичных сред. М.: Изд-во МГУ. 1970. 346 с.
66. Одишария Г.З., Скрыбин В. Г. Результаты обследования работы газопровода Серпухов-Ленинград. *Газовое дело*. №6. 1962. С.39-41.
67. Репников А.В. Колебания в оптимальных системах автоматического регулирования. М.: Машиностроение. 1968. 239 с.
68. Рауз Х. Механика жидкости. *Изд-во литературы по строительству*. Москва. 1967. 410 с.
69. Ретинский В.С. О методике исследования режимов работы сложных магистральных трубопроводных сетей на ЭВМ. *Тр. МИНХ и ГП им. Губкина*. 1979. вып.139. С. 85-100.
70. Яковлев Е.И., Казак О.С., Михалків В.Б. и др. Режимы газотранспортных систем. Львів: Світ. 1993. 170 с.
71. Середюк М.Д., Малик В. Я., Болонний В. Т. Проектування та експлуатація систем газопостачання населених пунктів: навч. посібник. Івано-Франківськ. Факел. 2003. 140 с.
72. Середюк М.Д., Пилипів Л. Д., Зарубіна Ю. І. Технологічні розрахунки газових мереж населених пунктів: навч. посібник. Івано-Франківськ. Факел. 2003. 152 с.
73. Тихонов А.Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М.: Наука. 1972. 735 с.
74. Бобровский С.А., Щербаков С.Г., Яковлеи Е.И. Трубопроводный транспорт газа. М.: Наука. 1976. 475 с.

75. Ковалко М.П., Грудз В.Я., Михалків В.Б. та ін. Трубопровідний транспорт газу. К.: АренаЕКО. 2002. 600с.
76. Грудз В.Я., Грудз Я.В., Костів В.В. та ін. Технічна діагностика трубопровідних систем. Івано-Франківськ: Лілея-НВ. 2012. 51
77. Фейчук В.В., Дорошенко Я. В., Грудз В.Я., Тимків Д.Ф., Михалків В.Б., Костів В.В. *Ремонт трубопроводів без зупинки перекачування. Обслуговування і ремонт газопроводів.* Івано-Франківськ: Лілея. 2009. 750 с.
78. Ходанович И.Е., Кривошеин Б. Л., Бикчентай Р. Н. Тепловые режимы магистральных газопроводов. М.:Недра. 1971. 216 с.
79. Ходанович Е. И. Аналитические основы проектирования и эксплуатации магистральных газопроводов. М.: Гостоптехиздат. 1961. 127 с.
80. Ходанович Е. И. Температурный режим газопровода с учетом термодинамической неидеальности газа. *Тр.ВНИИГАЗ.* №87. Москва. 1970. С.78-81.
81. Чарный И.А. Неустановившееся движение реальной жидкости в трубах. М.:Гостехиздат. 1951. 224 с.
82. Чарный И. А. Основы газовой динамики. М.:Гостоптехиздат. 1961. 200 с.
83. Щербаков С. Г. Проблемы трубопроводного транспорта нефти и газа. М.:Наука. 1982. 205 с.
84. Щербаков С.Г., Бобровский С. А. Определение аварийного состояния газопроводов. *ВНИИОЭНГ.* Москва. 1970. 34 с.
85. Яковлев Е. И. Анализ неустановившихся процессов в нитках магистрального газопровода статистическими методами. *Изв.вузов. Нефть и газ.* Баку. Т2. 1968. С. 72-76.
86. Яковлев Е.И.,Мыхалкив В.Б.,Грудз В.Я и др. Методика расчета сложных газотранспортных систем с пересеченным профилем трассы. Киев. Час. 1990. 320с.
87. Яковлев Е. И., Грудз В. Я., Тымкив Д. Ф. Методика оперативного диспетчерского управления режимами сложных газотранспортных систем. Київ. Час. 1990.

88. Ясин Э.М., Березин В. Л., Расщепкин К. Е. Надежность магистральных газопроводов. Москва. Недра. 1972. –183 с.
89. Яковлев Е. И. Газовые сети и газохранилища. М.: Недра. 1991. 543с.
90. Aerodynamic of Turbines and Compressors. *High Speed Aerodynamics and Yet Propulsion*. Volume X. Editor W.R.Hawtorne. London. Oxford University Press.1964. P. 616.
91. Grudz V.Ya., Grudz Ya.V., Drin N.Ya., Stasiuk R. B. The research of gas leak from the pipeline . *Journal of hydrocarbon power engineering*. 2014. Vol. 1. № 2. P. 103-107.
92. New concept single signature vibration monitoring through the lifetimes of an engine. *Aircraft Engeneering*. 1979. 51.3. P. 21-22.
93. Bush William L. Instrumentation pays off compressor regulator stations . *Pipeline Industry*. 1970. 32.N5. P. 55-56, 61.
94. Chisholm Roland. Techniques of vibration analysis applied to gas turbines . *Gas Turbine Int*. 1976. 17. N6. P.16-22.
95. De Mott L.B. TF 41-A-2. H7E inglight engine condition monitoring system (IECMS) . *AIAA Papers*. 1978. N1472. P.9.
96. Du Bois M.R. Inspection and maintenance of gas turbine nozzles, buckets and rotors. *Power Engeneering (USA)*. 1978. 82. N7. P.58-61.
97. Edmunds David B. Modular engine maintenance concept consideration for aircraft turbine engines. *Aircraft Engeneering*. 1978. 50. N1. P. 14-17.
98. Engine maintenance program triples time between overhauls. *Pipelines and Gas Journal*. 1976. 203. N6. P. 66,69,71.
99. Engeneering develops turbine diagnosis system. *Diasel and Gas Turbine Progress*. 1979. 45. N5. P.82.
100. Ford T.E. The changing balance of design requirements . *Aircraft Engeneering*. 1976. 48. N1. P.21-22,25.
101. Kruchenberg U.D. Design and testing of the American airlines prototype 747. AiDS system . *Journal of Aircraft*. 1972. v.9. N4. P.17-19.

102. Barranger J.P., Ford M.J. Laser-optical blade tip clearance measurement system. *Trans ASME. Engineering Power*.1983. 103. N2. P.457-460.
103. Maintenance information system for gas turbines. *Pipe Line Industry*. 1981. N6. P. 33-36.
104. Methodenzur fruhdiagnose von Schaden an Bewegungselementen Gantzen E. *TU*. 1981. 22. N7. P. 312-315.
105. Muchlow P.A. Wear particle monitoring . *Brit. J. Non-Destruct test*. 1980. 22.- N6. P.275-280.
106. Natrass Donald. Measuring gas turbine perforce parameters . *J. Diesel and Gas Turbine Progress*. 1976. 42. N7. P.16.
107. Parrish R. Care and repair of turbine engines. *Bus and commer Aviant*. 1978. 43.- N7. P.54-58.
108. Ottensmann G. Operational experience on engine health monitoring. *FGLR-Tachbuh* Bd 6. Koln. 1976. P. 59-75.
109. Paul A. Gas turbines maintenance practice. *Energy Dev*.1979. 3. N1. P. 25-28.
110. Scott J.N. Performance analysis boots efficiency of gas turbines . *The Oil and Gas J*. 1977. N18. P. 51-55.
111. Simms W.H. Boroscoping of gas turbine engines for condition monitoring . *Gas Turbine Int*. 1976. 17. N16. P. 32-33.
112. Survey of rotating machinery using vibration monitoring techniques. *Norw Shipp News*. 1977. N11c. P.25-26, 29.
113. Corrigan J.T. The inspection of heave duty industrial gas turbines using fibre-optical boroscope . *Turbomachineri Int*. 1981. 22. N8. P. 15-20.
114. Valory R. Effectiveness of the realtime ferrograph and other oil monitors as related to oil filtration. *U.S. Department Commer. Publ*. 1977. N494. P. 49-72.
115. Van de Water B. Ten years of on-condition turbine operation . *SAE-Austral*. 1980. 40. N6. P. 295-301.
116. Walker C.I. Parts tracking and engine history recording for on-condition maintenance . *AIAA Papers*. 1979. N1280. P.11.

117. Weinert N. Marine gas turbine diagnostic testing . *Navigational Engeneering J.* 1976. 88. N6. P. 51-61.
118. Wulf R.H. CE6 get engine performance deterioration . *AIAA Papers.* 1979. N1233.- P. 8.
119. Wurm L.W. Computer ueilds compressor options . *The Oil and Gas J.* 1978. 75. N32. P. 62,66.
120. War-Josepk P.,Blesh I.I. The Stability of Flexible Rotor Supported by Circumferentially Fed-Journal bearings. *Trans.ASME.* 1977. F99. N4.p.469-477.

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Грудз Я.В., Дрінь Н.Я., Шологон В.Д., Стасюк Р.Б., Мартинюк Р.Т. Дослідження впливу температурного режиму газопроводів на енергоефективність транспорту газу. *Нафтогазова енергетика*. 2011. № 2. С. 43-47. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок – розглядала вплив температурного режиму складних газотранспортних систем великої протяжності на витрати енергоресурсів для транспортування газу. Проводила дослідження стаціонарного руху газу в газотранспортних системах з врахуванням компримування потоку на КС та наступного його охолодження. Приймала участь у підготовці статті).

2. Грудз В.Я., Грудз Я.В., Фейчук В.В., Дрінь Н.Я., Стасюк Р.Б. Математичне моделювання фільтрації газу в ґрунті внаслідок виникнення малих витоків в газопроводі. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2011. №3(40). С. 66-69. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок - приймала участь у побудові двовимірної математичної моделі нестационарної фільтрації газу в пористому середовищі (ґрунті), викликаної появою точкового витоку з газопроводу, який імітується за допомогою функції Дірака. Приймала участь у підготовці статті).

3. Грудз Я. В., Дрінь Н.Я., Фейчук В.В. Статистична оцінка втрат газу в розподільних мережах. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2012. № 2(43). С. 106-112. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок - встановила, що для газопроводів усіх категорій характерним є різке зниження інтенсивності відмов впродовж двох років після капітального ремонту із заміною дефектних ділянок труб. Приймала участь у підготовці статті).

Продовж. дод. А

4. Дрінь Н. Я., Стасюк Р.Б. Оцінка матеріального балансу газопроводу в умовах нестаціонарного газоспоживання. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2012. №

2. С. 105-106. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок - проводила дослідження нестаціонарних процесів коливання тиску в газопроводі, викликаних зміною обсягів споживання газу. Запропонувала новий метод оцінки кількості газу в газопроводі. Приймала участь у підготовці статті).

5. Grudz V.Ya., Grudz Ya.V., Drin N.Ya., Stasiuk R. B. The research of gas leak from the pipeline. *Journal of hydrocarbon power engineering*. 2014. Vol. 1. № 2. P. 103-107. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок - виконувала дослідження процесу витікання газу з ємності під тиском через отвір в тонкій стінці. Аналізуючи рівняння енергії газового потоку в процесі витікання газу отримала, при певних припущеннях, формулу для масової витрати газу через отвір в тонкій стінці. Приймала участь у підготовці статті).

6. Грудз В.Я., Грудз Я.В., Дрінь Н.Я., Стасюк Р.Б. Дослідження процесу фільтрації газу в ґрунті у разі появи витоків із газопроводу. *Нафтогазова енергетика*. 2014. №1(21). С. 70-74. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок - займалась дослідженням корозійних процесів, що призводять до утворення свищів в трубопроводі, прогнозуванням тривалості процесу фільтрації газу до появи його на поверхні ґрунту. Досліджувала формування радіусу ареалу загазованості території, а також характеру і величини витрати газу в атмосферу. Приймала участь у підготовці статті).

Продовж. дод. А

7. Грудз В.Я., Грудз Я.В., Дрінь Н.Я., Дем'янчук Я.М. Вплив фільтраційного опору ґрунту на інтенсивність аварійних витоків із газопроводу. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2015. №2(55). С. 68-73. **(наукове фахове видання України)**. (Особистий внесок - встановила характер зміни величини масової витрати витoku в часі впродовж процесу нестационарної фільтрації, показала, як впливають властивості ґрунту (зокрема його проникність) на тривалість нестационарного процесу і величину витрати витoku. Приймала участь у підготовці статті).

8. Грудз В.Я., Запухляк В.Б., Грудз В.Я.(молодший), Побережний Л.Я., Дрінь Н.Я., Стасюк Р.Б. Прогнозування потенційних ризиків виникнення витоків на газопроводах. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. 2019. №4. С. 78-81. **(індексується в Index Copernicus International)**. (Особистий внесок – встановила, що при корозійних пошкодженнях трубопроводів найбільш ймовірні малі витoki, а при аваріях, зумовлених впливом зовнішніх сил, найвірогідніші великі витoki. Якщо газопровід перед появою витoku, працював у нестационарному режимі, то поява витoku внесе збурення в протікання нестационарного процесу. Приймала участь у підготовці статті).

Апробація результатів дисертації

Основні положення дисертаційної роботи викладено та обговорено на науково-практичних конференціях:

1. Дрінь Н.Я. Оценивание величины потерь газа и площади загрязнения при повреждении магистрального газопровода. *Надежность безопасность магистрального трубопроводного транспорта. Материалы 7 международной научно-технической конференции, г. Новополоцк, 22-25 Ноября 2011 г.* Новополоцк, 2011. С. 20-22. Фахове видання.

ДОДАТОК Б
КОМПЛЕКСНА ГАЛУЗЕВА МЕТОДИКА

НАЦІОНАЛЬНА АКЦІОНЕРНА КОМПАНІЯ
«НАФТОГАЗ УКРАЇНИ»
АТ УКРТРАНСГАЗ
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ

ПОГОДЖЕНО
Проректор з наукової роботи
ІФНТУНГ, д.т.н., проф.

І. Чудик
" 4 " 2020 р.



ЗАТВЕРДЖУЮ
Головний інженер
АТ Укртрансгаз к.т.н.

В. Рудко
2020 р.



КОМПЛЕКСНА ГАЛУЗЕВА МЕТОДИКА

МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ РЕЖИМІВ ГАЗОТРАНСПОРТНОЇ
СИСТЕМИ В УМОВАХ НЕПОВНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ
І ПІДРАХУНКУ ЗАПАСІВ ГАЗУ В ТРУБАХ

Івано-Франківськ – 2020

Продовж. дод. Б

МЕТОДИКУ РОЗРОБИЛИ

Від Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу:

Науковий керівник

доктор технічних наук, професор

Доктор технічних наук, професор

Доктор економічних наук, професор

Кандидат технічних наук, доцент

Кандидат технічних наук, доцент

Аспірант


Асистент

Від НАК «Нафтогаз України»:

Кандидат технічних наук

Диспетчер


Інженер



Грудз В.Я.



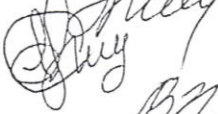
Грудз Я.В.



Гораль Л.Т.



Запухляк В.Б.



Мельниченко Ю.Г.



Грудз В.Я.



Дрін Н.Я.



Козак О.Ф.



Ягода П.А.



Кизимишин Я.В.