



П'ЯНИЛО

Ярослав Данилович —

доктор технічних наук,
директор Центру математичного
моделювання Інституту
прикладних проблем механіки
і математики ім. Я.С. Підстригача
НАН України

УДК 622.691.4:622.692.4

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТРАНСПОРТУ І ЗБЕРІГАННЯ ГАЗУ

За матеріалами наукової доповіді на засіданні
Президії НАН України 9 вересня 2015 року

Розглянуто результати досліджень з використання методів математичного моделювання для оптимізації та підвищення ефективності роботи систем транспортування й зберігання природного газу в Україні. Зазначені результати отримано науковцями Центру математичного моделювання Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України у співпраці з фахівцями Інституту транспорту газу ПАТ «Укртрансгаз».

Ключові слова: газотранспортна система, підземні газосховища, управління газопотоками.

Основними науковими напрямками діяльності Центру математичного моделювання Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України є дослідження і розробки в галузі сучасних проблем математичного моделювання; моделювання взаємопов'язаних процесів різної природи в структурно-неоднорідних тілах у класичних постановках і з використанням похідних та інтегралів дробового порядку; розроблення методів обчислювального експерименту й оптимізації стосовно проблем створення нових зразків техніки і технологій.

З-поміж основних результатів, отриманих науковцями Центру, можна відзначити побудову конкретних математичних моделей процесів транспортування і зберігання газу газотранспортною системою України, які здобули визнання фахівців ПАТ «Укртрансгаз».

Газотранспортна система (ГТС) України за своєю складністю і потужністю є другою, після російської, в Європі і третьою у світі за обсягами транзиту газу (рис. 1). Складність об'єкта характеризують такі цифри: довжина газопроводів становить 38,579 тис. км; кількість компресорних станцій — 72; компре-

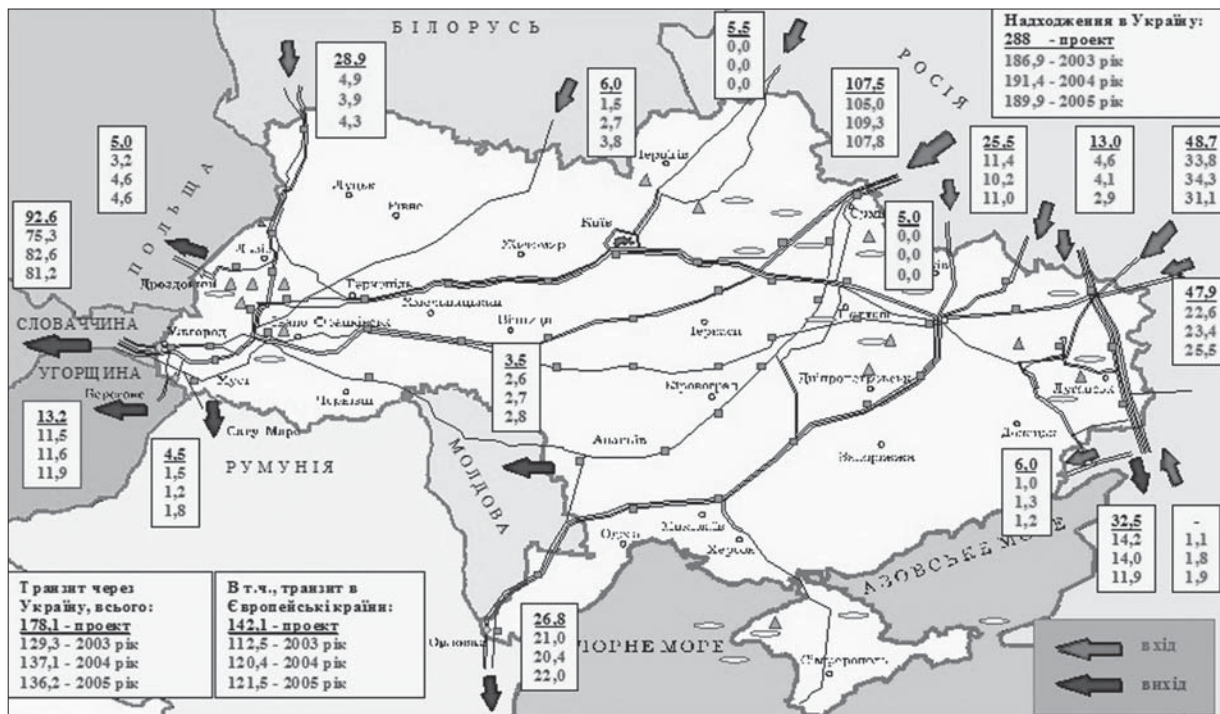


Рис. 1. Проектні й фактичні обсяги надходження газу в Україну та його подачі на експорт за 2003–2005 рр. (млрд м³)

сорних цехів — 110; газоперекачувальних агрегатів — 702; підземних сховищ газу — 12 загальною місткістю понад 30 млрд м³. При цьому, за умови сумарного надходження газу до системи в обсязі 210 млрд м³ на рік, виробничо-технологічні витрати газу на забезпечення роботи ГТС становлять близько 6,5 млрд м³ на рік, що відповідає 9% загального споживання природного газу українськими споживачами.

З наведених даних випливає, що важливою складовою підвищення загальної ефективності функціонування газотранспортної системи є рівень диспетчерського управління газовими потоками. З огляду на досвід закордонних газотранспортних компаній з впровадження та експлуатації системних програмних комплексів (Simone, Астра, Сампаг та ін.), можна зробити висновок, що їх використання у плануванні й оптимізації роботи газотранспортних систем дає можливість для значної економії енергоресурсів.

Потенціал енергозощадження в ГТС України, пов'язаний з розробленням і впровадженням інформаційних, моделюючих, оптимізуючих і керуючих систем, є досить значним.

Отже, підвищення ефективності транспортування газу в газотранспортних мережах — це важливе науково-прикладне завдання державного значення, виконання якого значною мірою ґрунтується на побудові математичних моделей, що описують фізичні процеси у трубопроводах, газоперекачувальних агрегатах та інших об'єктах ГТС. Актуальність цього завдання істотно підвищується у зв'язку з постійним зростанням цін на первинні енергосировини.

Газодинамічні процеси в ГТС відбуваються у значних просторових і часових вимірах. Тому підхід до їх моделювання полягає в побудові і обґрунтуванні комплексу взаємопов'язаних математичних моделей об'єктів трубопровідних мереж. При цьому виникають нелінійні

системи з розподіленими чи зосередженими параметрами, що залежать від багатьох чинників. Крім того, актуальною є побудова моделі всієї системи транспортування газу та розроблення ефективних, простих у реалізації і досить універсальних адаптивних швидкозбіжних методів розв'язання супутніх систем нелінійних рівнянь.

Фахівці Центру запропонували нові чисельно-аналітичні моделі, які описують роботу газотранспортної системи України [1, 2], в тому числі підземних сховищ, і дозволяють оперативно керувати процесами руху газу в ГТС, що забезпечує оптимізацію її роботи та мінімізацію енергетичних затрат на транспортування газу при дотриманні контрактних умов на обсяги постачання [3–5].

У Центрі здійснено нові постановки задач щодо підвищення ефективності використан-

ня наявного потенціалу підземних газосховищ за рахунок задіяння слабопроникних пластів, похилих і горизонтальних свердловин, проведення додаткової перфорації свердловин та розбурювання відкритих вибоїв свердловин (рис. 2). Розроблено математичні моделі процесу заміщення одного газу на інший у пластах підземних газосховищ з метою збільшення обсягів активного газу [6, 7]. Побудовано нові нестационарні моделі фільтрації газу та води в неоднорідних пористих структурах, розроблено оригінальне математичне забезпечення та комплекс програм для формування параметрів управління газоводяними потоками для запобігання заводу свердловин [5–7].

Отримані результати використано при розробленні програмного забезпечення для розрахунку параметрів усталених режимів роботи ГТС, яке впроваджено в ПАТ «Укртрансгаз».

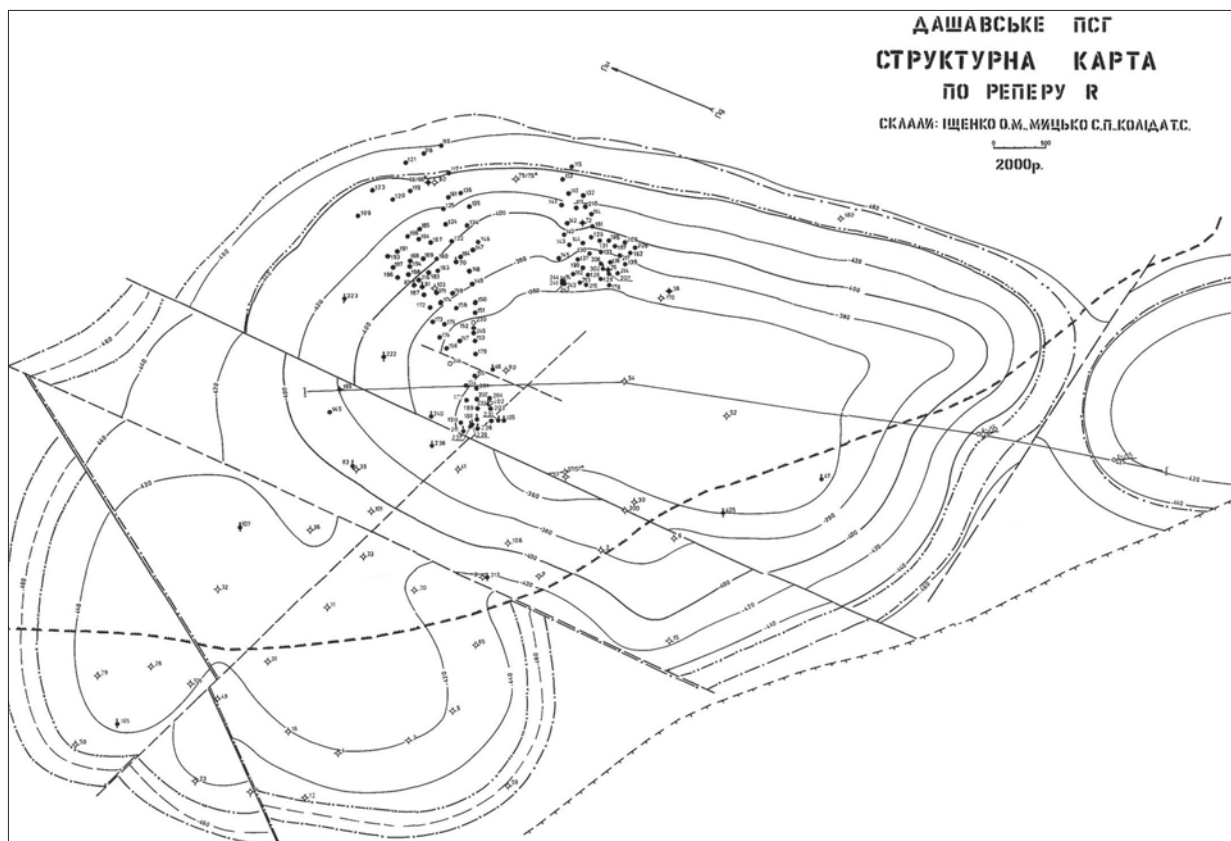


Рис. 2. Структурна карта Дашавського підземного сховища газу з розподілом на блоки активності

Зокрема, створене фахівцями Центру програмне забезпечення спеціалісти Об'єднаного диспетчерського управління Укртрансгазу використали для забезпечення реверсу природного газу з підземних сховищ Західної України під час так званої «газової кризи» 2009 р.

Основні диспетчерські завдання:

- *для газопроводів*: гідравлічний та температурний розрахунок магістрального газопроводу; ідентифікація фактичних коефіцієнтів гідравлічного опору та ефективності (у стаціонарному й нестационарному випадках на річних даних);

- *для компресорних станцій*: розрахунок оптимальних режимів роботи газоперекачувальних агрегатів, цехів, багатоцехових компресорних станцій з різнотипними агрегатами, а також паливно-енергетичних затрат на заданий режим їх роботи;

- *для газотранспортної системи*: оптимальне планування й прогнозування роботи системи за умов стаціонарного й нестационарного руху газу; розрахунок параметрів оптимального управління газопотоками в системі;

- *для підземних газосховищ*: термогідравлічний розрахунок системи пласт–магістраль; розв'язання основних прямих та обернених режимно-технологічних задач; розрахунок періодів безкомпресорного відбирання та нагнітання газу; визначення динаміки наявних перетоків газу та акумулювальної здатності газонесних пластів; розрахунок пікових режимних параметрів; оптимальне планування роботи на заданий період відбирання/нагнітання газу; розрахунок пропускної здатності технологічних об'єктів системи пласт–магістраль.

Основні завдання стосовно технологічних об'єктів підземних газосховищ:

- *шлейфово-колекторна система*: термогідравлічний розрахунок системи з урахуванням усіх можливих варіантів тисків та витрат; розрахунок еквівалентного гідравлічного опору системи;

- *групи технологічно поєднаних газосховищ*: розрахунок піковості для всіх газосховищ як функції від витрат газу, обсягів паливного газу й тиску в магістральному газопроводі в облас-

ті проектних і реальних режимів роботи; для планових обсягів зберігання газу пошук такого його розподілу між сховищами, який забезпечить сумарну максимальну піковість при відбиранні, а також максимальну середню піковість на заданому інтервалі часу відбирання; реалізація стратегії оптимального управління газосховищами для забезпечення зваженого критерію, що враховує піковість та затрати паливно-енергетичних ресурсів.

У математичних моделях роботи газотранспортної системи України до основних технологічних об'єктів належать трубопроводи, компресорні станції; пласти підземних газосховищ, вибійні зони свердловин, запірні арматури (крани, засувки тощо). При дослідженні нестационарного руху газу використовують системи взаємопов'язаних диференціальних рівнянь у частинних похідних. Сьогодні для побудови математичних моделей фізичних процесів дедалі частіше застосовують диференціальне та інтегральне числення дробових порядків [8, 9]. Зокрема, дробову похідну Капуто порядку α за часом визначають за формулою:

$$D_{a+}^{\alpha} f(t) = \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \int_a^t \frac{f'(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha}} d\tau.$$

Із застосуванням цього оператора нестационарний неізотермічний процес руху газу в трубопроводі описується такою системою інтегродиференціальних рівнянь:

$$D_{a+}^{\alpha}(\rho w) + \frac{\partial}{\partial x}(p + \rho w^2) = -\rho \left(\frac{\lambda w |w|}{2D} + g \frac{dh}{dx} \right),$$

$$D_{a+}^{\alpha} \rho + \frac{\partial}{\partial x}(\rho w) = 0,$$

$$D_{a+}^{\alpha}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x} \rho w \left(E + \frac{P}{\rho} \right) = \frac{4k(T_{ep} - T)}{D} - \rho w g \frac{dz}{dx},$$

а процес масопереносу в пористих середовищах — рівнянням з дробовою похідною за часом змінною:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{kh}{\mu \chi} \frac{\partial p'}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{kh}{\mu \chi} \frac{\partial p'}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{kh}{\mu \chi} \frac{\partial p'}{\partial z} \right) = \\ = 2mh \left(D_{a+}^{\alpha} \left(\frac{P}{\chi} \right) + 2q_{at} \right). \end{aligned}$$

Зауважимо, що при $\alpha = 1$ отримуємо класичні моделі масопереносу в трубопроводах і пористих середовищах.

За сферичного закону підтоку газу розподіл тиску у вибійній зоні свердловини задовольняє рівнянню:

$$-d\left(\frac{p}{p_0}\right)^2 = \frac{\mu}{\pi h k p_0} \frac{q_0}{F} dF + \beta \frac{\rho_0}{\pi p_0 d h} \frac{q_0^2}{F^2} dF,$$

$$\beta = \frac{12 \cdot 10^{-5} d^3}{m k^{3/2}}.$$

Основою для розрахунку втрати тиску Δp на запірній арматурі та місцевих опорах є рівняння збереження енергії та формула Вейсбаха:

$$\Delta p = \zeta \rho \frac{v^2}{2},$$

де ζ — коефіцієнт місцевого гідравлічного опору, v — швидкість газового потоку.

Математичні моделі масопереносу в об'єктах транспорту газу дозволяють вирішувати завдання стосовно управління та оптимізації поточкорозподілу газу в газотранспортних мережах. Однак при цьому виникає низка суто математичних труднощів, пов'язаних зі складністю технологічної схеми та її значними розмірами; обмеженістю кількості необхідних для адаптації й розрахунку вхідних даних; невисокою точністю числової вхідної інформації в дискретних точках; нелінійністю рівнянь, що описують процеси в системі; необхідністю уточнення параметрів рівнянь, що потребує розв'язання обернених задач; необхідністю поєднання фізичних і емпіричних моделей та їх узгодження в точках поєднання (рис. 3); проведенням розрахунків з рівновеликими числами.

Отже, на основі проведених досліджень фахівці Центру запропонували способи оброблення вхідної інформації щодо аналізу стану об'єктів та побудови крайових умов; побудову та аналіз моделей процесу стаціонарного й нестаціонарного руху газу в технологічних об'єктах; нові методи розв'язання задач математичної фізики та удосконалення вже наявних; математичну модель процесу транспор-

тування газу в ГТС України та її підсистемах; формулювання й розв'язання задач оптимального управління процесами транспортування та збереження газу в підземних газосховищах. Отримані результати дають змогу проводити системний аналіз структури затрат енергетичних ресурсів; досліджувати взаємовплив енергетичних, екологічних та економічних чинників; створювати моделі взаємодії об'єктів нафтогазового комплексу із зовнішнім середовищем; розробляти системи експертної багатопараметричної оцінки енергоощадних заходів за умови заданого рівня надійності системи; обчислювати фактичні та нормативні обсяги виробничо-технологічних витрат у процесі видобування, транспортування та зберігання газу в межах нафтогазопромислового об'єкта.

Проведені числові експерименти на побудованих програмних комплексах, по-перше, засвідчили адекватність побудованих моделей реальним процесам, а по-друге, дали можливість апробувати пропонувані підходи до розв'язання прикладних задач.

У процесі оптимізації за паливним газом методом зміни кількості газу, що рухається гілкою газопроводу «Союз», розраховані режими порівнювали із заміряними. У результаті було встановлено, що за паливним газом розрахований режим є на 14% економнішим, що досягається перерозподілом витрат газу між цехами компресорних станцій. Розрахунок потенціалу продуктивності окремих свердловин, пов'язаного з вибійною зоною, проведенням додаткової перфорації і розбурюванням вибійної зони свідчить про можливість підвищення дебіту свердловин у середньому в 2,5 рази. Сумарне збільшення продуктивності газосховищ зі свердловинами з відкритим вибоєм може досягати 25%.

Іншими шляхами підвищення потенціалу газотранспортної системи є перерозподіл обсягів наявного в системі акумульованого газу між окремими її частинами (5%); перерозподіл потоків між цехами багатощохвних компресорних станцій (6%); перерозподіл потоків газу між магістральними газопроводами (3–4%).

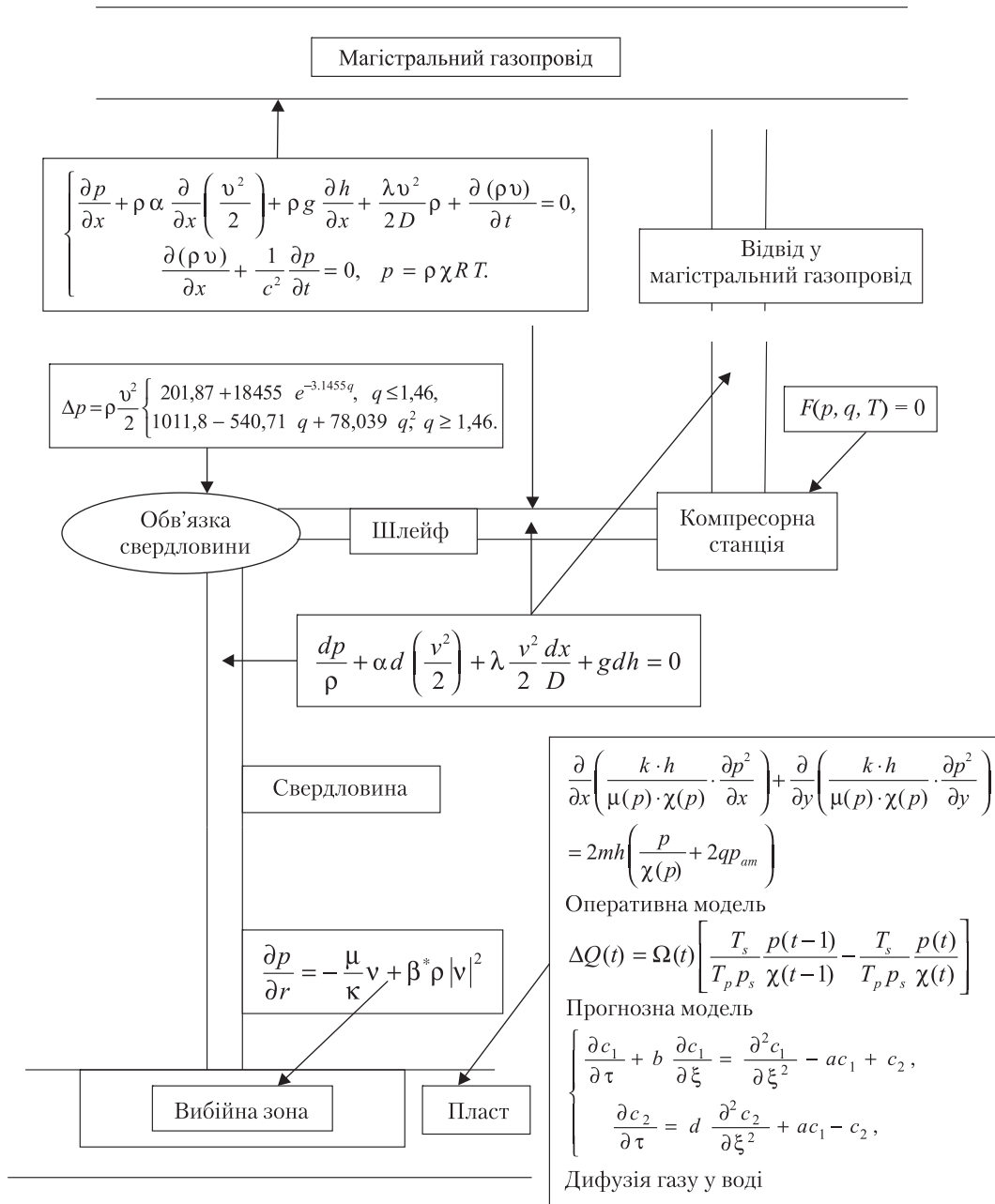


Рис. 3. Приклад гідравлічної ув'язки підсистеми «пласт підземного сховища газу — магістральний газопровід»

Вважаємо, що основними напрямками продовження перспективних досліджень за цією тематикою є розроблення програмних комплексів:

- для управління тепловим режимом транспортування газу;

- для управління спільною експлуатацією підземних сховищ зберігання газу і газотранспортної системи;

- для проведення розрахунків параметрів газорідного потоку в трубопроводах при

стаціонарних і нестаціонарних режимах роботи під тиском до 30 МПа;

- для оптимізації фінансових і матеріальних ресурсів з метою забезпечення ефективної експлуатації системи транспортування та зберігання газу на основі створеної економіко-технологічної моделі.

Нині вже проходить апробацію програмне забезпечення для відповідних розрахунків за неусталених режимів роботи ГТС. У цій розробці враховано термогидравлічний зв'язок між усіма технологічними об'єктами, що беруть участь у відбиранні та закачуванні газу; забезпечено автоматизацію процесу адаптації моделей об'єктів системи до фактичного стану; враховано нормативні вимоги щодо роботи газосховища; передбачено можливість порівняльного аналізу ефективності використання різного технологічного обладнання у процесі модернізації та реконструкції підземних газосховищ.

За результатами проведених досліджень співробітниками Центру опубліковано статті в провідних міжнародних і вітчизняних наукових журналах, видано 3 монографії, одержано 1 патент на винахід і 2 авторських свідоцтва, захищено 3 докторські та 4 кандидатські ди-

сертації. Крім того, отримані результати доповідалися на наукових конференціях, зокрема на міжнародній конференції «Пористі матеріали. Теорія і експеримент» (INTERPOR), одним зі співorganizаторів якої на постійній основі є Центр математичного моделювання Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України.

Слід зазначити, що дослідження та розробки здійснювалися у тісній співпраці з галузевими науковими установами, зокрема з Інститутом транспорту газу ПАТ «Укртрансгаз» (Харків). У рамках такого співробітництва активно відбувався обмін інформацією технологічного характеру та проводилася апробація отриманих результатів на реальних об'єктах.

Отже, з метою істотного зниження матеріальних затрат на реконструкцію та оптимізацію газотранспортної системи України, на нашу думку, подальшого розвитку потребують моделі нестаціонарних фізичних процесів у ГТС та її технологічних об'єктах, що дасть можливість для формування ефективних управлінських рішень щодо оптимального розподілу газових потоків за умови мінімізації використання енергії на технологічні потреби.

REFERENCES

1. Pyanylo Ya., Prytula M., Prytula N. Mathematical models of gas unsteady flow in objects of gas-transport systems. *Physico-Mathematical Modelling and Informational Technologies*. 2006. 4: 69. [in Ukrainian].
[П'янило Я.Д., Прутула М.Г., Прутула Н.М. Математичні моделі неусталеного руху газу в об'єктах газотранспортних систем. *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. 2006. Вип. 4. С. 69–77].
2. Pyanylo Ya.D., Prytula N.M., Pyanylo G.M. Modeling of gas-transport systems with account of variation of gas state parameters and relief of gas pipeline rout. *Physico-Mathematical Modelling and Informational Technologies*. 2008. 7: 145. [in Ukrainian].
[П'янило Я.Д., Прутула Н.М., П'янило Г.М. Моделювання газотранспортних мереж з урахуванням змінності параметрів стану газу та рельєфу траси трубопроводів. *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. 2008. Вип. 7. С. 145–153].
3. *Patent of Ukraine N 39628*. Kliuk B.O., Shymko R.Ya., Vecherik R.L., Khaetskyi Yu.B., Halii P.P., Hresko T.M., Prytula M.H., Pyanylo Ya.D., Prytula N.M. Method for determination of optimal operation of wells in combination with operation of other wells and, respectively, underground gas storage. 10.03.2009.
[*Патент України № 39628*. Клюк Б.О., Шимко Р.Я., Вечерік Р.Л., Хаєцький Ю.Б., Галій П.П., Гресько Т.М., Прутула М.Г., П'янило Я.Д., Прутула Н.М. Спосіб визначення оптимальної роботи свердловин у сукупності з роботою інших свердловин і, відповідно, підземного сховища газу. 10.03.2009].
4. Pyanylo Ya.D. *Projection iterative methods for solving of direct and inverse problems of transfer*. Lviv: Splain, 2011. [in Ukrainian].
[П'янило Я.Д. *Проекційно-ітераційні методи розв'язування прямих та обернених задач переносу*. Львів: Сплайн, 2011].

5. Pyanylo Ya.D., Gladun S.V. Optimization of energy costs for gas transportation in complex gas transmission systems. *Annals of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering*. 2015. **13**(3): 31.
6. Pyanylo Ya.D. Simulation of the substitution of gases in porous media. *Applied Problems of Mechanics and Mathematics (Prykladni problemy mekhaniky i matematyky)*. 2011. **9**: 181. [in Ukrainian].
[П'янило Я.Д. Моделювання процесу заміщення газів у пористих середовищах. *Прикладні проблеми механіки і математики*. 2011. Вип. 9. С. 181–189].
7. Prytula N.M., Pyanylo Ya.D., Prytula M.H. *Underground gas storing*. Lviv: RASTR-7, 2015. [in Ukrainian].
[П'янило Я.Д., П'янило Я.Д., П'янило М.Г. *Підземне зберігання газу (математичні моделі та методи)*. Львів: РАСТР-7, 2015].
8. Pyanylo Ya.D. The use of fractional derivatives for the analysis of unsteady gas flow in the pipeline in the presence of compressor stations and branches. *Physico-Mathematical Modelling and Informational Technologies*. 2012. **16**: 122. [in Ukrainian].
[П'янило Я. Використання дробових похідних для аналізу нестационарного руху газу в трубопроводах за наявності компресорних станцій та відводів. *Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології*. 2012. Вип. 16. С. 122–132].
9. Lopuh N.B., Pyanylo Ya.D. Numerical analysis of models with fractional derivatives for gas filtration in porous media. *J. Coupled Syst. Multiscale Dyn.* 2014. **2**(1): 15.

Я.Д. П'янило

Центр математического моделирования Института прикладных проблем механики и математики им. Я.С. Пидстригача НАН Украины (Львов)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТРАНСПОРТА И ХРАНЕНИЯ ГАЗА

По материалам научного доклада на заседании Президиума НАН Украины 9 сентября 2015 г.

Рассмотрены результаты исследований по использованию методов математического моделирования для оптимизации и повышения эффективности работы систем транспорта и хранения природного газа в Украине. Указанные результаты получены учеными Центра математического моделирования Института прикладных проблем механики и математики им. Я.С. Пидстригача НАН Украины в сотрудничестве со специалистами Института транспорта газа ПАО «Укртрансгаз».

Ключевые слова: газотранспортная система, подземные газохранилища, управление газопотоками.

Ya.D. Pyanylo

Center of Mathematical Modelling of Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics of the National Academy of Sciences of Ukraine (Lviv)

MATHEMATICAL MODELING OF THE GAS TRANSPORTATION AND STORAGE

According to the materials of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine September 9, 2015

The research results on the use of mathematical modeling to optimize and improve the efficiency of the transportation systems and storing of natural gas in Ukraine are discussed. These results are obtained by scientists of the Center of Mathematical Modelling of Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics in cooperation with specialists of the Institute of the Gas Transport of “Ukrtransgaz”.

Keywords: gas transportation system, underground gas storage, management of gas flows.