

## МАТЕМАТИЧНІ ЗАДАЧІ АНАЛІЗУ РЕЖИМІВ ГАЗОТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ

© Притула Н., 2015

**Розглянуто газотранспортну систему із складною технологічною схемою. Приведено перелік та аналіз проблем, вирішення яких сприятиме її ефективній експлуатації. Запропоновано підходи до вирішення окремих проблем. Методи рішення окремих проблем апробовані на реальних даних.**

**Ключові слова:** газотранспортна система, оптимізація, оптимальний режим, компресорна станція, підземне газосховище.

**In this paper I considered a transmission system with a piping diagram of complicated structure. I gave the list and analysis of problems that will contribute to its effective operation. And I also proposed approach to solving some problems. Methods for solving some problems have been tested on actual data.**

**Key words:** transmission system, optimization, optimal mode, compressor stations, underground gas storage facility.

### Вступ

Всі об'єкти, які беруть участь в транспортуванні та зберіганні газу, об'єднано в єдиний технологічний процес трубопроводами з різними довжинами і внутрішніми діаметрами, які прокладено на певній глибині в ґрунті чи проходять над поверхнею землі. Внутрішня поверхня трубопроводів є шершавою, а зовнішня поверхня труби теплопровідною (іде теплообмін із зовнішнім середовищем). Рельєф траси прокладання трубопроводів є змінним і на десятках кілометрів може змінюватися на сотні метрів. Робочий тиск у трубах доходить до 7.6 МПа.

Компресорні станції (КС) можуть складатися із декількох цехів. Доволі часто цехи відрізняються типом газоперекачувальних агрегатів (ГПА) як за потужністю (від 4.0 до 27.0 МВт), так і за типом приводу (електропривід, газотурбінна установка) для відцентрового нагнітача. На багатьох підземних газосховищах працюють компресори поршневого типу. Частина КС може працювати в два та в три ступені.

Для очищення газу, який надходить на ГПА, від твердих та рідких добавок використовують пиловловлювачі та фільтри-сепаратори. Для зменшення впливу на ізоляцію газопроводів та збільшення їх пропускної спроможності використовують охолодження природного газу. В газовій галузі використовують для цієї цілі на КС апарати повітряного охолодження (АПО), які охолоджують газ до температури 40 °С незалежно від пори року.

На ГТС є наявна велика кількість (тисячі) різнотипної запірної та регулюючої арматури. Частина із них оснащена приводами для їх відкриття та закриття. Робота запірної арматури може моделюватися зміною площі поперечного перетину трубопроводу в зоні їх встановлення. Існують регулятори тиску та витрати.

Для стабільного забезпечення газом, особливо в осінньо-зимовий період, слугують підземні сховища газу. Газ зберігається в пластах – колекторах, які являють собою неоднорідне пористе середовище. Глибина залягання пластів колекторів є в межах 350–2500 метрів. Структура порового середовища, об'єми зберігання газу та кількість свердловин через які нагнітають (відбирають) газ, для кожного газосховища є різними.

Значний об'єм газу в газосховищах України становить так званий буферний газ. За величиною та інтенсивністю впливу на режим відбору/закачування його умовно можна поділити на

активну, слабоактивну і пасивну частини. Слабоактивну та пасивну частини буферного газу також можна зробити активними шляхом його витіснення газом іншої природи в робочу область сховища. Як такі гази використовують інертні, вуглеводневі та димові гази.

**Основна проблема** – числове моделювання руху газу в системах із складною технологічною схемою із врахуванням динаміки зміни параметрів газу на входах та виходах системи, динаміки зміни станів кранів та зміни потужності газоперекачувальних агрегатів компресорних цехів та багато цехових компресорних станцій.

## 2. Базові математичні задачі

Розроблені математичні моделі газових потоків в технологічних об'єктах сьогодні дозволяють побудувати основні системні моделі як окремих підсистем, так і системи транспортування та зберігання газу загалом. Більшість розроблених моделей апробовано на реальних даних і за точністю є задовільними для використання в моделюючих системах. Основні математичні проблеми виникають під час розроблення методів та алгоритмів розв'язування режимних задач (моделювання газодинамічних процесів) з великою кількістю технологічних об'єктів та на значних інтервалах часу.

Кількість задач, які виникають під час аналізу режимів роботи газотранспортних систем, є значною. Серед них можна виділити основні, розв'язання яких забезпечує ефективне розв'язання багатьох інших, зокрема розрахунок:

- параметрів газу на ділянках газопроводів, прокладених по пересіченій місцевості;
- розподільчих газових мереж високого та низького тиску із заданими висотними відмітками його прокладання в умовах усталених потоків газу;
- розподільчих газових мереж високого тиску в умовах неусталених потоків газу;
- оптимальних режимів газотранспортних систем (багато цехових КС із різнотипними ГПА);
- оптимальних параметрів керування газопотоками в умовах неусталених газових потоків;
- фільтрації газу в неоднорідних порових середовищах;
- параметрів фільтрації в неоднорідних порових середовищах за умов витіснення природного інертним газом (сайклінг-процес).

## 2. Перелік основних задач для окремих технологічних об'єктів та систем із технологічних об'єктів

**Магістральні газопроводи:** гідравлічний та температурний розрахунок магістрального газопроводу; ідентифікація коефіцієнтів гідравлічного опору (у стаціонарному та нестаціонарному випадках); розрахунок коефіцієнта теплопередавання газ – зовнішнє середовище (в стаціонарному випадку на значних інтервалах часу); розрахунок місцезнаходження витоків газу (дослідити точність розрахунку); розрахунок часу та обсягу витoku газу через свічу.

**Компресорні станції:** розрахунок оптимальних режимів роботи ГПА, цеху, багатоцехових КС з різнотипними ГПА; термогідравлічний розрахунок КС на детальних граф-схемах; ідентифікація стану об'єктів ГПА і КС.

**Газотранспортна система:** розрахунок стаціонарних режимів роботи системи транспортування газу (розрахунок гідравлічний, температурний, із відомими параметрами багатокомпонентного газу); розрахунок нестаціонарних режимів роботи транспортування газу в ГТС; розрахунок – прогнозування калорійності газу на заданих відборах ГТС.

**Підземні газосховища (системні задачі):** термогідравлічний розрахунок системи пласт – магістраль; розв'язування основних прямих та обернених режимно-технологічних задач; розрахунок параметрів ідентифікації стану об'єктів; оптимальне планування роботи на заданий період відбирання – нагнітання газу; розрахунок пропускної спроможності технологічних об'єктів системи пласт-магістраль.

**Пласт газосховища:** розрахунок параметрів газу у всій його області фільтрації (для формування граничної умови); розрахунок ефективного порового об'єму пласту сховища; розрахунок неоднорідних коефіцієнтів пористості, проникності, газонасиченості пласту – колектора сховища; уточнення геометричних, геологічних та акумулюючих параметрів пластів – колекторів.

**Вибій свердловини:** розрахунок фільтраційних коефіцієнтів привибійних зон; розрахунок коефіцієнта розкриття вибою; розрахунок густини перфорації обвідної колони; розрахунок впливу параметрів розбурення (збільшення площі відкритої фільтрації) вибою свердловини на дебіт свердловини; проведення дослідження вибою свердловин газогідродинамічними методами при нестационарних режимах фільтрації.

**Свердловина:** розрахунок дебіту, гирлового і вибійного тисків (температури) газу; розрахунок впливу додаткової перфорації свердловин на її дебіт; розрахунок гідравлічного опору руху газу; розрахунок впливу параметрів відкритого вибою на дебіт свердловини.

**Обв'язка гирла свердловини:** побудова гідравлічного еквіваленту обв'язки гирла свердловини.

**Шлейфово-колекторна система (ШКС):** термогідравлічний розрахунок ШКС при всіх можливих варіантах задання тисків і витрати.

**Групи технологічно поєднаних газосховищ:** побудова функції піковості для всіх газосховищ як функції витрати газу, паливного газу та тиску в магістральному газопроводі в області проектних та реальних режимів роботи ПСГ; актуалізація інформаційного забезпечення для автоматизації процесу актуалізації функцій піковості газосховищ в процесі його роботи; планування об'ємів зберігання газу за критерієм – знайти такий його розподіл між сховищами, щоб забезпечити сумарну максимальну піковість при відбиранні, а також максимальну середню піковість на заданому інтервалі часу відбирання; планування об'ємів відбирання газу за критерієм – знайти такий його розподіл між сховищами, щоб підтримувати максимальну піковість газосховищ в процесі його відбирання; реалізація стратегії оптимального управління газосховищами для забезпечення зваженого критерію, який включає піковість та затрати паливно-енергетичних ресурсів; оперативне формування інформаційно-аналітичних матеріалів – документів для прийняття рішень з керування режимами ПСГ.

#### 4. Класи задач

Всі задачі умовно можна розбити на такі групи: моделювання, планування, оптимізація, ідентифікації та керування. В багатьох випадках якість розв'язання задач залежить від їх інформаційного забезпечення. Існує певний ступінь невизначеності режимної інформації. Вона переважно проявляється у відсутності замірів витрат, тисків і температур у багатьох вузлах газотранспортної системи. Проведений аналіз видів невизначеностей, характерних для процесу управління складними системами, якими є газотранспортні системи, показав: низьку точність і неповноту оперативної інформації (значна похибка вимірювань, ненадійна і малопродуктивна система передавання даних, асинхронність вимірювання і надходження, недоступність до частини інформації тощо); неточність моделей (допущення про однорідність певних підсистем, спрощення пов'язане з неврахуванням повною мірою рельєфу прокладання трубопроводів, введення нечітких моделей типу термогідравлічних еквівалентів, неврахування в повній мірі суттєвої нелінійності, часткове використання паспортних характеристик тощо).

**Математичне моделювання** транспорту газу по трубопровідних системах використовує моделі з ламінарними та турбулентним потоками, з стаціонарними та нестационарними моделями потоків газу. Переважно в магістральних газопроводах процес руху газу є турбулентним. В постановках задач планування режимів ГТС використовуються стаціонарні моделі газових потоків. Для таких моделей ГТС розробляються спеціальні методи, які забезпечують результат моделювання за максимально коротким часом.

**Задача планування режимів** для оперативного та перспективного планування ресурсів та підготовки до переключень (зміни топології ГТС та потужності КС) ставиться в оптимізаційній постановці. Основний критерій – мінімізація паливно-енергетичних ресурсів. Для оперативного

планування важливо врахувати певні параметри чинного режиму – об'єм акумульованого газу в системі та його підсистемах, топологічних особливостей, обов'язкове задіявання в режим певного технологічного обладнання і т.д.

**Ідентифікація параметрів моделей** залежить від багатьох існуючих невизначеностей. Зменшення впливу невизначеностей на точність ідентифікації вимагає проведення усереднень ідентифікаційних параметрів, використання заміряних даних на значних інтервалах часу.

**Оптимізація** як процес досягнення оптимального режиму в умовах стаціонарного потоко-розподілу полягає в знаходженні такої топології та завантаження КС за потужністю ГТС, щоб був задоволеним заданий критерій оптимальності системи. Складнішим є поняття оптимального управління газопотоками в нестационарному випадку. За умов нечіткого прогнозу на параметри надходження газу в систему задача побудови оптимальної стратегії зміни режимних параметрів на значних інтервалах часу не має однозначного розв'язку. Один із можливих варіантів розв'язування такої задачі є забезпечення технологічності режиму та формування таких параметрів керування, які б забезпечили контрольований темп руху режимних параметрів до деякого прогнозованого оптимального режиму. При зміні прогнозу розраховують новий оптимальний режим.

На рис. 1–3 наведено структура основних систем та проблем, які необхідно в межах цих систем ще вирішити.



Рис. 1. Система планування стаціонарних режимів роботи ГТС

**Проблеми:**

- формування оптимальних режимів включаючи вибір оптимальної топології, особливо за умов неповної завантаженості ГТС;
- формування оптимального температурного режиму транспортування газу – сформувати режим роботи апаратів повітряного охолодження, який мінімізує сумарні енергетичні затрати;
- оптимізація за автоматизованим вибором КС, які відрізняються типами ГПА ( ГПА з газотурбінними приводами та на електроприводі).

**Проблеми:**

- недостатнє метрологічне забезпечення;
  - недостатньо вивчені властивості замірних пристроїв за умов швидких змін із значною амплітудою параметрів газу на їх входах;
  - велика степінь невизначеності (вплив та взаємовплив місцевих опорів);
- ідентифікація параметрів моделей та стану технологічних об'єктів у реальних умовах метрологічного забезпечення.

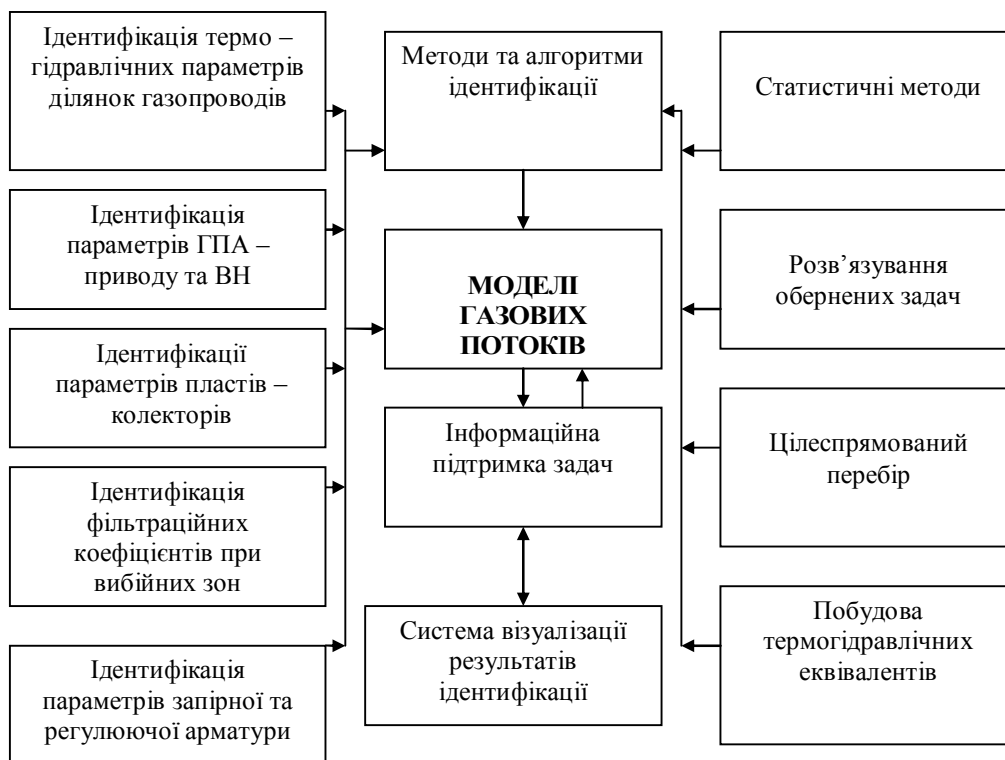


Рис. 2. Система ідентифікації параметрів моделей газових потоків

### Нестаціонарні задачі. Задачі оптимального керування газотранспортними системами

Розв'язати набір нестаціонарних задач транспортування та зберігання газу, газодинамічні процеси породжені динамічними граничними умовами на параметри газу, зміною параметрів стану запірної арматури, зміною потужності окремих ГПА і КС загалом.

Розв'язати нестаціонарні оптимізаційних задач за такими критеріями оптимізації:

- мінімум часу виведення ГТС на заданий режим роботи;
- мінімум сумарних затрат на підтримку режиму в заданих технологічних межах і з заданою надійністю на заданому часовому інтервалі;
- забезпечення виконання критеріїв оптимізації при заданій величині надійності функціонування системи;
- мінімум зміни станів активних елементів, максимізація перехідних часів.

#### Проблеми:

- розрахунок температурного режиму транспортування газу на значних інтервалах часу (тижні) – розв'язування тривимірного нестаціонарного температурного поля в умовах неповної визначеності вхідних даних;
- управління тепловим режимом транспортування газу, особливо в холодну пору року;
- врахування впливу та взаємовпливу великої кількості місцевих опорів на термо – гідрравлічний розрахунок КС на детальних технологічних схемах;
- розрахунок газових мереж з великою кількістю зворотних клапанів (односторонній пропуск потоку);
- стійкий розрахунок нестаціонарних режимів газових з великою кількістю (тисячі) об'єктів, з різними діаметрами (100 – 1400 мм), різними довжинами ділянок мережі (від 10 до 140 000 м), змінною топологією та змінною потужністю КС;
- розрахунок оптимальних режимних параметрів за умов слабкої прогнозованості вхідних даних;
- розроблення оптимальних стратегій керування газопотоками в ГТС за енергетичними та критеріями надійності;

- розроблення математичного забезпечення для управління сумісною експлуатацією ПСГ і ГТС;
- розроблення автоматизованої системи рейтингового відбору енергозберігаючих проектів.

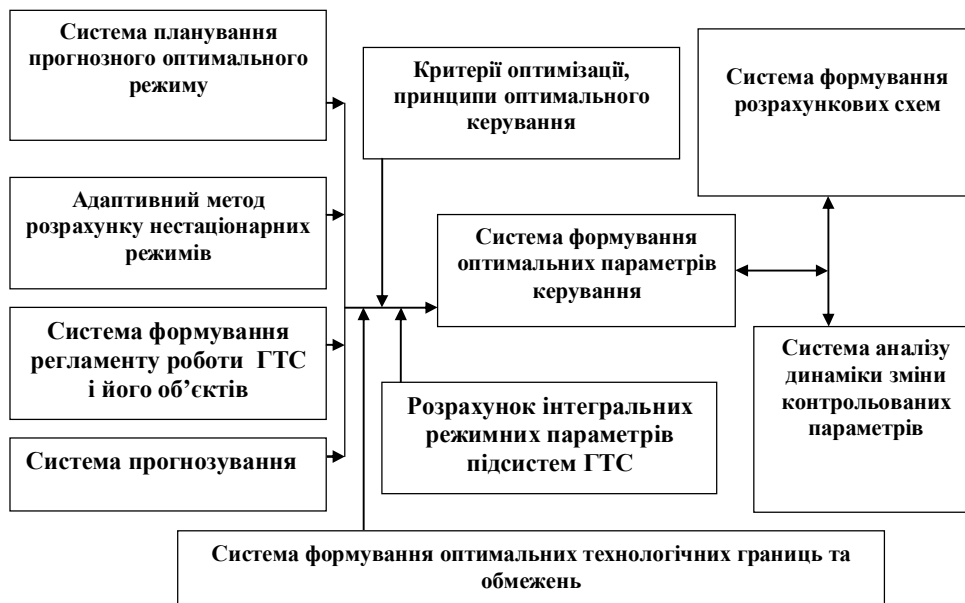


Рис. 3. Система формування параметрів керування

### Висновки

Розроблене програмне забезпечення на сьогодні ще не задовольняє основним вимогам до розробки моделюючих комплексів. І тому потрібно забезпечити максимально високий рівень автоматизації процесу розв'язування задач, та адаптивність алгоритмів і методів до зміни топології системи, динаміки газодинамічних процесів, параметрів технологічних об'єктів, які впливають на динаміку параметрів газо потоків, швидкості моделювання та прогнозування. Висока (з практичної точки зору), точність моделювання газодинамічних процесів залежить від багатьох факторів, зокрема від адекватності використовуваних моделей технологічних об'єктів, наукової обґрунтованості методів та алгоритмів розрахунку та оптимізації, високої степені оперативної актуалізації системи моделювання.

Існуюча нечіткість в процесі прийняття рішень в багаторівневих ієрархічних системах, обумовлена тим, що не існує ще чітких цілей і координуючих рішень на кожному рівні контролю і управління, і для кожного локального об'єкту не забезпечується процес координації управління.

1. Панкратов В. С. Автоматизированная система диспетчерского управления ГТС / В. С. Панкратов, А. С. Вербилло. – М.: Изд-во ООО "ИРЦ Газпром", 2002. – 98 с.
2. Сарданашвили С. А. Расчетные методы и алгоритмы / С. А. Сарданашвили. – М.: Изд-во "Нефть и газ", 2005. – 577 с.
3. Селезнев В. Е. Методы и технологии численного моделирования газопроводных систем / В. Е. Селезнев, В. В. Алешин, Г. С. Клишин. – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 448 с.
4. Бобровский С. А. Трубопроводный транспорт газа / С. А. Бобровский, С. Г. Щербаков, Е. И. Яковлев. – М.: Наука, 1976. – 475 с.
5. Притула Н. М. Задачи оптимізації потокорозподілу в газотранспортних системах / Н. М. Притула // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". "Комп'ютерні науки та інформаційні технології". – Львів, 2007. – № 604. – С. 220–227.
6. Сінчук Ю. Моделювання роботи кранів на магістральних газопроводах / Ю. Сінчук, Н. Притула, М. Притула // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". "Комп'ютерні науки та інформаційні технології". – Львів, – 2010. – № 663. – С. 216–222.
7. Сінчук Ю. Моделювання нестационарних режимів газових мереж / Ю. Сінчук, Н. Притула, М. Притула // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка". "Комп'ютерні науки та інформаційні технології". – Львів, – 2010. – № 663. – С. 128–132.
8. Притула М. Г. Розрахунок параметрів керування потоками газу в складних магістральних системах / Притула М. Г. // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. – 2010. – Вип. 12. – С. 134–143.