

# Фізико-технічні проблеми видобування енергоносіїв

УДК 622.279.5

DOI: 10.31471/1993-9868-2018-2(30)-7-16

## ЗАСТОСУВАННЯ АЗОТУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ГАЗОВИЛУЧЕННЯ З ВИСНАЖЕНИХ ГАЗОВИХ ПОКЛАДІВ

*Р.М. Кондрат, Л.І. Хайдарова\**

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 242195,  
e-mail: rengr@nung.edu.ua, lilya.matiishun@gmail.com

*Проаналізовано результати досліджень із витіснення залишкового природного газу з виснажених газових покладів різними неуглеводневими газами. Обґрунтовано застосування з цією метою азоту. Узагальнено результати досліджень і промисловий досвід з отримання азоту із повітря та очищення від азоту продукції видобувних газових свердловин стосовно до нагнітання азоту у виснаженій газовий поклад з метою підвищення газовилучення.*

Ключові слова: поклад, свердловина, газ, азот, витіснення, нагнітання, отримання і відділення азоту.

*Проанализированы результаты исследований по вытеснению остаточного природного газа из истощенных газовых залежей различными неуглеводородными газами. Обосновано применение с этой целью азота. Обобщены результаты исследований и промышленный опыт по получению азота из воздуха и очистки от азота продукции добывающих газовых скважин применительно к нагнетанию азота в истощенную газовую залежь с целью повышения газоотдачи.*

Ключевые слова: залежь, скважина, газ, азот, вытеснение, нагнетание, получение и отделение азота.

*The research results on residual natural gas displacement from depleted gas deposits by various non-hydrocarbon gases are analyzed. The use of nitrogen for this purpose is proved. The research results and industrial experience in obtaining nitrogen from air and purifying nitrogen from the products of gas production wells in case of nitrogen injection into depleted gas deposits to increase gas recovery are summarized.*

Key words: deposit, well, gas, nitrogen, displacement, injection, production and separation of nitrogen.

**Постановка проблеми.** Сучасний стан нафтогазової галузі України характеризується дефіцитом газу власного видобутку і значним виснаженням основних за запасами вуглеводнів газових і газоконденсатних родовищ. Нові родовища газу освоюються повільно і не можуть в найближчій перспективі значно вплинути на загальний видобуток газу і конденсату. Тому актуальною залишається проблема збільшення поточного видобутку і ступеня вилучення вуглеводнів з родовищ, які розробляються. До основних напрямків підвищення кінцевого коефіцієнта газовилучення газових родовищ в умовах газового режиму відносяться: мінімізація значень кінцевого пластового тиску у зоні дренавання видобувних свердловин; інтенсифікація видобутку газу із слабкодренованих і низь-

копроникних ділянок родовища з підвищеним пластовим тиском і витіснення залишкового природного газу з виснажених родовищ неуглеводневими газами і рідинами та їх поєднанням [1-5]. Обов'язковою умовою отримання високих значень кінцевого коефіцієнта газовилучення родовищ є забезпечення стабільної роботи видобувних свердловин з підвищеними дебітами газу шляхом покращення стану привибійної зони пласта і боротьби з ускладненнями у свердловинах і викидних лініях під час видобування газу. У цій статті розглядається питання застосування неуглеводневих газів (зокрема азоту) для витіснення залишкового природного газу з виснажених газових родовищ (покладів).

**Мета роботи.** Узагальнення результатів досліджень і промислових матеріалів стосовно отримання азоту з повітря і очищення від азоту продукції видобувних газових свердловин стосовно до нагнітання азоту у виснажений газовий поклад через нагнітальні свердловини з метою підвищення газовилучення.

**Основна частина.** Одним із можливих напрямків підвищення кінцевого газовилучення з виснажених газових покладів є витіснення з пористого середовища залишкового природного (вуглеводневого) газу неуглеводневими газами (діоксидом вуглецю, азотом, димовими газами, викидними газами, сумішами різних газів, в тому числі суміші повітря та неуглеводневих газів), водогазовими сумішами, нешкідливими побічними рідинними продуктами різних хімічних виробництв.

Можливість використання неуглеводневих газів у промисловості розглядалась ще у 10-20-х роках минулого століття [11]. Неуглеводневі гази і рідини знаходять все більше застосування в нафтогазовій галузі. Їх, зокрема, використовують у промислових масштабах для підтримання пластового тиску в нафтових родовищах або як замітник буферного газу на підземних газосховищах [25].

Результати відомих лабораторних і теоретичних досліджень свідчать про високу технологічну ефективність застосування неуглеводневих газів для підвищення газовилучення з виснажених газових покладів. Серед неуглеводневих газів найбільш дешевим і доступним для використання є повітря. Але повітря разом з природним газом утворює вибухонебезпечну суміш за певного вмісту газу у повітрі. Так, гранична концентрація метану у повітрі, яка відповідає займистості газоповітряної суміші за атмосферного тиску і температури 20 °С, змінюється від 6 до 13,3 % об [10]. Вказаний недолік повітря можна усунути шляхом додавання до нього неуглеводневих газів та інертних речовин (розчинників), наприклад, діоксиду вуглецю, азоту або антиокисників, які сприяють утворенню з газом вибухонебезпечних сумішей за будь-якого вмісту в них повітря (газу) [4]. Щоб запобігти спалахуванню повітря з метаном за стандартних умов, до його складу уводять понад 36 % об. азоту або 23 % об. діоксиду вуглецю. Для пропану суміш є незаймистою за об'ємної частки азоту 29 % об. або об'ємної частки діоксиду вуглецю 38 %. При цьому із збільшенням температури зменшується кількість інертної присадки, яка необхідна для повного запобігання вибуху. Антиокислювальними властивостями володіють, наприклад, речовини на основі амінів і фенолів (ароматичні аміни, алкіфеноли, параінофеноли, діаміни та ін.). Залежно від типу антиокисника необхідний вміст його в газоповітряній суміші для запобігання вибуху змінюється від 0,002 до 0,1 % мас. чи об. [10].

Як інертні розчинники можна також використовувати димові гази теплових електростанцій, газопереробних заводів або викидні гази двигунів внутрішнього згорання і газотурбін-

них двигунів – приводів нагнітачів компресорних станцій [4]. Утилізація їх буде сприяти вирішенню проблеми охорони навколишнього середовища від забруднення. В окремих випадках може виявитися доцільним будівництво спеціальних установок (заводів) для отримання азоту з повітря або виробництва діоксиду вуглецю. При застосуванні вибухонебезпечних газоповітряних сумішей з неуглеводневими газами об'єми останніх, а, відповідно, і потужності установок (заводів) з їх отримання будуть значно меншими, ніж при використанні окремо азоту, діоксиду вуглецю чи димових газів.

Вперше димові гази були застосовані на родовищі Блок-31 (штат Техас, округ Крейн, США) в 1966 р. Це родовище є одним із перших великомасштабних об'єктів з цілеспрямованим застосуванням вуглеводневих, димових газів і азоту для підвищення коефіцієнта вуглеводневилучення [11]. Для виробництва димових газів у 1966 р. був побудований спеціальний завод, де димові гази отримували в результаті спалювання сухого вуглеводневого газу.

Найкращими газовитіснювальними властивостями серед неуглеводневих газів володіє діоксид вуглецю (CO<sub>2</sub>). Густина діоксиду вуглецю у 6 разів вища, ніж густина природного газу у пластових умовах. В'язкість CO<sub>2</sub> також більша, ніж в'язкість метану. Діоксид вуглецю характеризується високою розчинністю у нафті, газовому конденсаті і пластовій воді [12]. Висока розчинність CO<sub>2</sub> у пластовій воді може забезпечити стабільне витіснення природного газу діоксидом вуглецю [13]. Велика увага приділяється CO<sub>2</sub> як газу для нагнітання в нафтові поклади [14].

Згідно з результатами теоретичних досліджень процесу витіснення залишкового природного газу діоксидом вуглецю з виснажених покладів коефіцієнт газовилучення буде тим більший, чим за нижчого поточного пластового тиску розпочато нагнітання у родовище діоксиду вуглецю. При цьому інтервал перфорації видобувних свердловин рекомендується розміщувати у зоні пласта з меншою проникністю, оскільки це затримує прорив діоксиду вуглецю в експлуатаційні свердловини (до 50 %) [15, 16].

У роботах [17-19] наведено результати математичного моделювання процесу розробки газового родовища з нагнітанням у пласт діоксиду вуглецю. Вони свідчать, що найвищий коефіцієнт газовилучення можна отримати у випадку розробки родовища на виснаження до економічно-рентабельної межі з подальшим нагнітанням у пласт діоксиду вуглецю.

У роботах [15, 20-23] наведено результати лабораторних досліджень з витіснення природного газу (метану) діоксидом вуглецю, азотом і димовими газами з горизонтальних моделей однорідного пласта і двопластових моделей з різним розміщенням низькопроникного прошарку (верхнім або нижнім) за наявності непроникного стику між пластами або їх взаємодії безпосередньо чи через дротяну сітку між пластами. Результати лабораторних досліджень свідчать про високу технологічну ефективність

застосування неуглеводневих газів для вилучення залишкового газу з виснажених газових родовищ. Найбільший коефіцієнт газовилучення отримано в експериментах з витіснення метану з моделей пласта діоксидом вуглецю. В окремих дослідах коефіцієнт газовилучення при витісненні метану діоксидом вуглецю сягав значень 81-97,4 %. При застосуванні димових газів і азоту для витіснення з моделей пласта метану отримано дещо менші, але досить високі значення коефіцієнта газовилучення.

Основним недоліком використання діоксиду вуглецю є високий ступінь корозійного впливу на свердловинне обладнання. Використання діоксиду вуглецю потребувало би застосування інгібіторів корозії, оснащення існуючого обладнання засобами антикорозійного захисту, або його заміни на обладнання з корозійностійких матеріалів.

У роботі [24] наведено результати досліджень впливу нагнітання у газоконденсатний поклад викидних газів на коефіцієнт конденсатовилучення. Викидні гази поєднують у собі переваги азоту і діоксиду вуглецю. У роботі розглянуто 5 різних варіантів нагнітання у поклад викидних газів при повному і частковому розкритті продуктивних пластів. Перший варіант передбачає розробку покладу на виснаження протягом 50 років. У другому варіанті нагнітання викидних газів здійснюється з 10-го року розробки покладу протягом 20 років, після чого поклад розробляють ще 20 років на виснаження. У третьому варіанті нагнітання у пласт діоксиду вуглецю починають з 20-го року розробки протягом 20 років, а дорозробка покладу на виснаження здійснюється впродовж наступних 10 років. Варіанти 4 і 5 передбачають циклічне нагнітання у поклад викидних газів протягом 20 років, а час початку нагнітання і дорозробки відповідають 2 і 3 варіантам. Циклічне нагнітання проводять наступним чином: один рік відбувається нагнітання у подвійному об'ємі видобутку сухого газу видобувними свердловинами; на другий рік нагнітальна свердловина не працює. Час початку нагнітання і дорозробки відповідають 2 і 3 варіантам. Згідно з результатами досліджень найбільший коефіцієнт конденсатовилучення досягається при циклічному нагнітанні викидних газів з 10 року розробки покладу, коли пластовий тиск знижується від початкового значення 35 МПа до 10 МПа.

Раціональнішим є використання азоту як неуглеводневого газу для нагнітання у виснажені газові поклади. Азот легкодоступний. Його можна отримати з повітря за порівняно низьких економічних витратах за допомогою криогенних або мембранних установок [25]. Азот має низьку корозійну активність. Використання його не викликає корозії свердловинного обладнання і тому не вимагає застосування ні антикорозійного захисту, ні будь-яких особливих корозійностійких сталей і сплавів [26, 27].

Саме тому азот знайшов дуже широке і різноманітне застосування в різних сферах і галузях промисловості. У нафтогазовій галузі азот і установки для отримання його з повітря вико-

ристовують для систем підтримування пластового тиску, при бурінні свердловин, для захисту від пожеж і при пожежогасінні, при ремонті свердловин, для очищення трубопроводів.

Однак азот має і свої недоліки. Нагнітання його у газоконденсатний поклад призводить до зростання тиску початку конденсації вуглеводневої суміші, що може призвести до передчасного випадання конденсату з газу у пласт [28].

У роботах [6-9] наведено результати теоретичних досліджень процесу витіснення залишкового природного газу азотом з виснажених газових покладів, які свідчать про технологічну ефективність його застосування. За результатами виконаних досліджень встановлено оптимальні значення тиску початку нагнітання азоту у поклад, тривалості періоду його нагнітання і системи розміщення видобувних свердловин на площі газоносності, за яких досягаються найбільші коефіцієнти газовилучення. Нагнітання азоту у поклад за оптимальних умов дозволяє отримати вищі на 5-10 % коефіцієнти газовилучення порівняно з дорозробкою покладу на виснаження без застосування азоту.

Для широкого промислового використання азоту потрібно мати стабільні джерела його отримання. На сьогодні в основному використовуються два способи отримання азоту: відокремлення (вилучення) його з повітря та з димових газів. Димові гази містять 85 % азоту та 15 % діоксиду вуглецю. Їх отримують при спалюванні природного газу в паровому котлі [25]. Димові гази також утворюються при спалюванні рідкої і твердої вуглеводневої сировини, це продукти горіння палива органічного походження, що відходять з робочого простору опалювальних металургійних агрегатів. Димові гази утворюються у процесі термічної переробки відходів. Найбільш поширеним і економічно ефективним для промисловості є спосіб отримання азоту з повітря, яке містить 78,12 % азоту, 20,95 % кисню, 0,93 аргону. Крім того, у повітрі знаходиться від 0,5 до 2 % парів води.

З атмосферного повітря азот отримують трьома способами: мембранним, адсорбційним та криогенним. Мембранним та адсорбційним способами отримують газоподібний азот, а криогенним способом – рідкий азот [31]. Криогенне розділення повітря для отримання азоту відбувається за температури 89-90 К [29, 30].

Перші заводи з отримання азоту із повітря споруджено в США у 1907 р. З того часу виробництво азоту безперервно зростає [30].

У промислово розвинених країнах мембранні азотні установки практично повністю витіснили альтернативні способи отримання технічного азоту у випадках, коли не потрібні великі його обсяги і висока чистота.

Мембранна технологія набуло поширення в 70-х роках минулого століття. Тоді мембранний метод став справжнім проривом в області відокремлення азоту від інших складових атмосферного повітря. До сьогоднішнього дня ця технологія поділу повітря активно вдосконалюється і є найневибагливішою до зовнішніх умов і надійною.

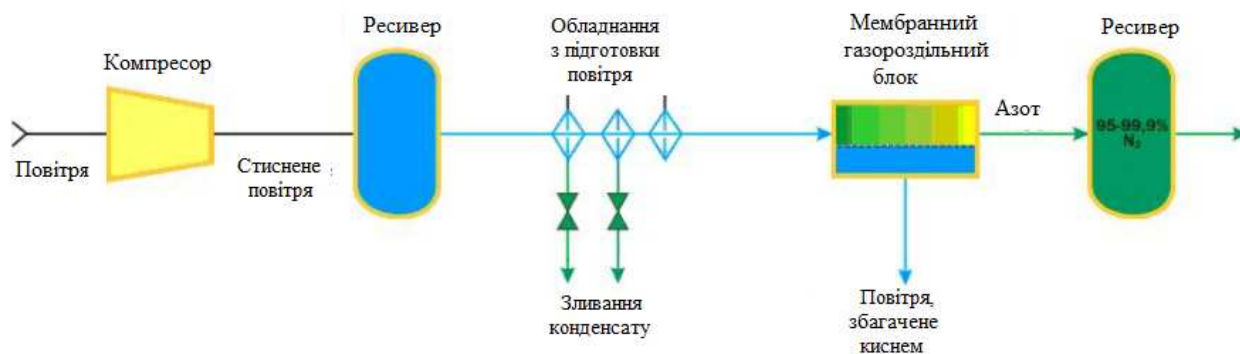


Рисунок 1 – Схема отримання азоту з повітря на основі мембранних газороздільних блоків

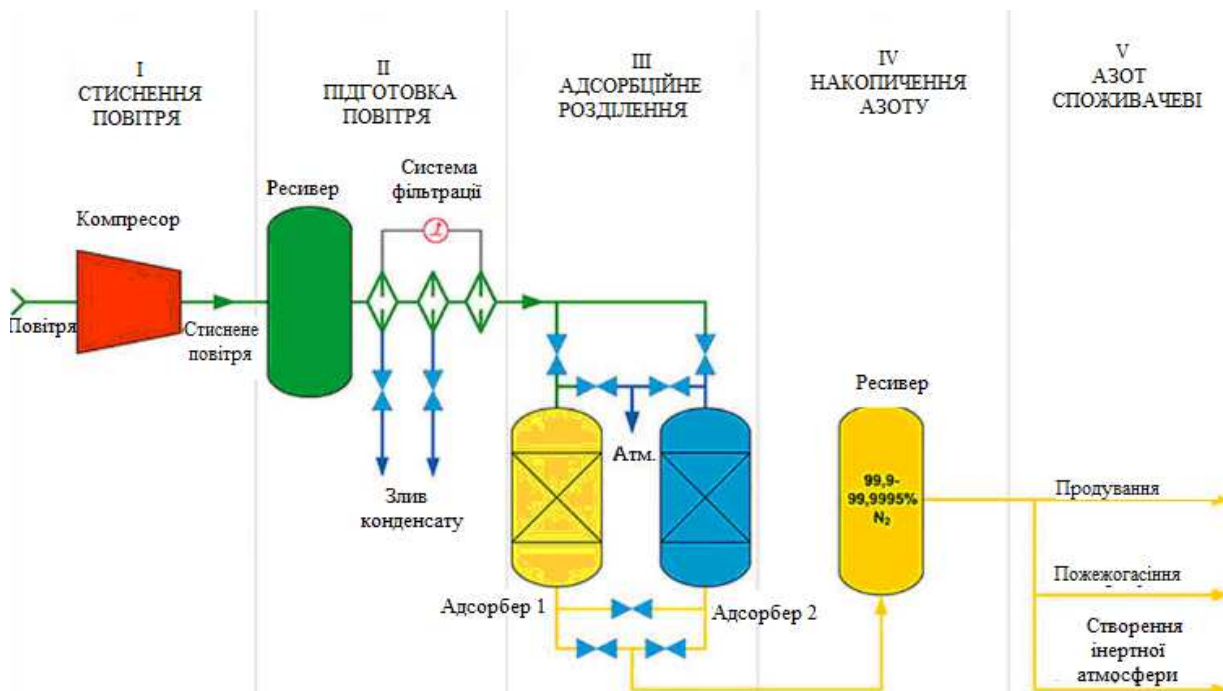


Рисунок 2 – Схема отримання азоту з повітря адсорбційним способом

Мембранний спосіб отримання азоту реалізують за допомогою азотної станції (рис. 1). Атмосферне повітря, попередньо стиснене, осушене і очищене від механічних частинок подається на вхід в мембранний блок. Далі повітря рівномірно розподіляється по порожнистих волокнах, закріплених у корпусі блоку. Повітря всередині кожної з поліволоконних мембран розшаровується через різницю парціальних тисків на зовнішній і внутрішній поверхнях мембрани. Високопроникні гази, проходячи крізь міжмембранний простір, формують два потоки: повітря, збагачене азотом, і повітря, збагачене киснем. Збагачене азотом повітря (азот) подається споживачу, а повітря, збагачене киснем, скидається в атмосферу. Чистота отриманого мембранним способом азоту коливається від 95 % до 99,5 %.

Іншим способом отримання азоту є адсорбційний, який здійснюється так само за допомогою азотної станції, зображеної на рисунку 2. Технологічний процес отримання азоту з повітря подібний до мембранного способу. Стиснене атмосферне повітря проходить крізь молекулярне сито (адсорбент), яке поглинає всі складові

газу, крім азоту. Чистота отриманого адсорбційним способом азоту вища порівняно з мембранним способом і становить 99,9999 %. Адсорбційний метод забезпечує низьку собівартість отримання азоту з повітря. Проте такі установки мають низьку обмежену продуктивність і потребують значної кількості адсорбентів.

Вибір азотної станції мембранного або адсорбційного типу залежить від вимог до чистоти азоту тій чи іншій області застосування [31].

На Котелевському родовищі Полтавської області у 2012-2013 рр. побудовано азотну станцію ААН-40/25 VI з блоком виробництва азоту адсорбційного типу з тиском нагнітання азоту у продуктивний пласт 25 МПа з продуктивністю 50 тис.м<sup>3</sup>/доб виробництва концерну УКПРОСМЕТАЛ. Цей комплекс устаткування забезпечує одержання з атмосферного повітря газоподібного азоту концентрацією не менше 99 %. Станція працює в автоматичному режимі та виготовлена в блочно-модульному виконанні і складається з окремих модулів: модуль компресора низького тиску; модуль підготовки стисненого повітря; модуль розділення повітря;

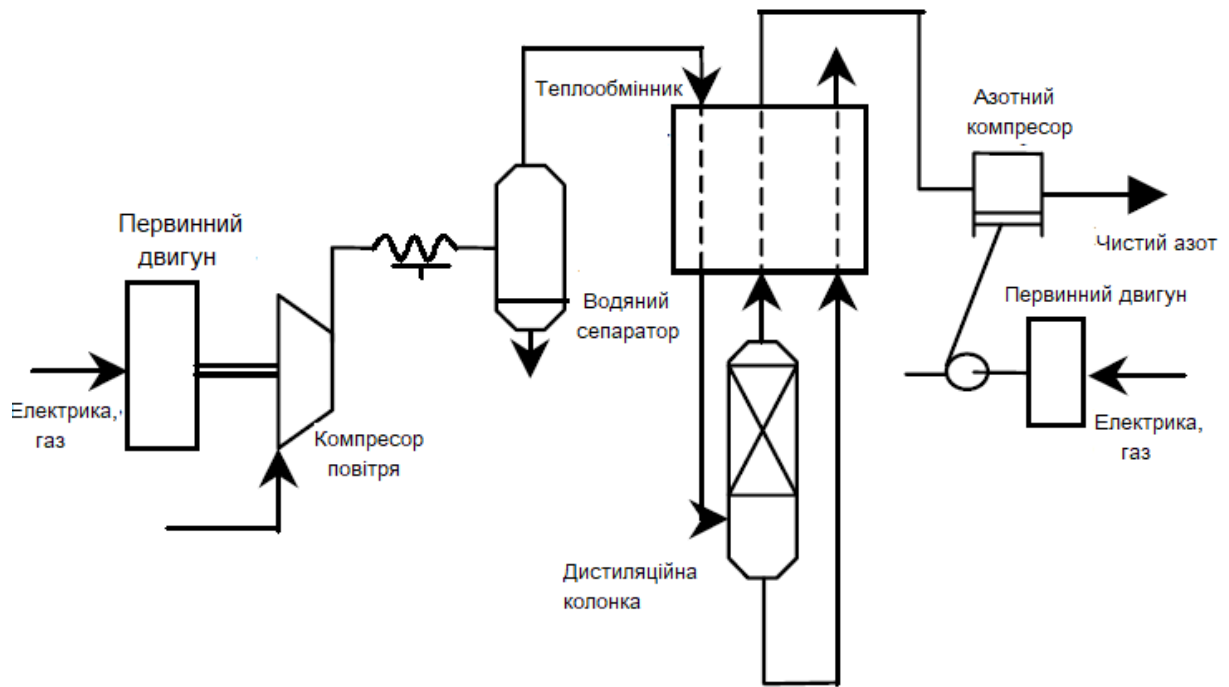


Рисунок 3 – Схема отримання азоту з повітря кріогенним способом

модуль компресора високого тиску; модуль охолодження теплоносія; ресивери (азоту і повітря) [44].

Великого поширення отримав метод короткоциклової адсорбції, який передбачає виділення з повітря (газу) водню, кисню, метану, етилену та інших компонентів [33]. Процес отримання азоту з повітря методом короткоциклової адсорбції має високі показники ефективності. При реалізації методу повітря потрапляє в один з двох по чергово працюючих адсорберів, де підтримується певний тиск і певна температура. При цьому адсорбент поглинає кисень (стадія поглинання), тобто відбувається уловлювання адсорбентом кисню з отриманням продуктового азоту. На стадії регенерування поглинутий компонент виділяється з адсорбенту. Такі процеси характеризуються повторюваними короткими циклами. Чистота азоту при цьому способі поділу повітря досягає 99,9995 % об.

Процес короткоциклової адсорбції ґрунтується на властивості адсорбенту поглинати (вбирати) певні речовини. Найбільшого поширення набули так звані PSA-установки (короткоциклової ненагрівальної адсорбції). Спосіб передбачає первинне стиснення атмосферного повітря [29].

Фірмою Mahler AGS запропоновано установку Nitroswing для отримання азоту з повітря за технологією короткоциклової адсорбції із змінним тиском. Вона ґрунтується на поділі атмосферного повітря за температури навколишнього середовища за допомогою вуглецевого молекулярного сита ВМС (речовини, що поглинають молекули кисню і пропускають молекули азоту).

Третім способом отримання азоту з повітря є кріогенний. Він базується на виникненні різ-

ниці температур скраплення кисню та азоту в умовах значного охолодження повітря. Атмосферне повітря попередньо стискають, очищують від частинок пилу, охолоджують. Зазвичай на цьому етапі використовують спеціальні компресори без компресорного мастила (наприклад, серія WSF). Прикладом таких компресорів є серія WSF марки «OF Kompressoren». Далі стиснене повітря подається в так званий детандер, де відбувається його розширення. При цьому температура повітря значно зменшується і воно переходить в рідку фазу. При незначному нагріванні повітря відбувається випаровування азоту. Такий спосіб виділення азоту з повітря має свої переваги і недоліки. Основними перевагами цього способу отримання азоту з повітря є одночасне отримання декількох газів (кисень + азот) та висока продуктивність установки. До недоліків цієї технології можна віднести складність і високу габаритність установок та їх велику енергоємність [29]. Кріогенний спосіб отримання азоту (рис. 3) був застосований на покладі ГС-4 родовища Гандхар (Індія) [34].

Основним процесом генерування азоту є охолодження повітря до температури зрідження з подальшою перегонкою його окремих компонентів. Для відокремлення азоту повітря спочатку стискають, а потім очищують, щоб видалити такі забруднюючі речовини, як водяна пара і діоксид вуглецю. Повітря охолоджують, частково конденсуючи до рідини, а потім подають до дистильційної колони, де через різні температури кипіння його компонентів повітря розділяють на кисень, аргон і азот.

Великі установки повітряної сепарації вже понад 100 років використовують перевірену технологію на основі кріогенного розділення

Таблиця 1 – Основні переваги та недоліки різних способів отримання азоту з повітря

| Переваги і недоліки | Спосіб отримання азоту   |  |   |
|---------------------|--|--|---|
|                     | Мембранний   | Адсорбційний   | Кріогенний  |
| Переваги            | У газорозділювальних блоках повністю відсутні рухомі частини, що забезпечує надійність установок.<br>Мембрани дуже стійкі до вібрацій і ударів, функціонують у широкому діапазоні температур – від мінус 40 °С до плюс 60 °С.<br>При дотриманні умов експлуатації ресурс мембранного блоку складає від 130 000 до 180 000 годин (15-20 років безперервної роботи). | Можливість отримання азоту високої чистоти – до 99,9999 %<br>Відсутні рухомі частини | Можливість отримання надчистого азоту (у наближенні до 100 %)<br>Можливість отримання інших компонентів повітря<br>Можливість отримання компонентів повітря в рідкому стані |
| Недоліки            | Обмежена продуктивність вибраної установки<br>Максимальна концентрація азоту – 99,5 %  | Необхідність періодичної заміни адсорбенту   | Висока вартість обладнання<br>Значні витрати на виробництво<br>Великі габарити обладнання<br>Тривалий пусковий період   |

[26]. Цей процес забезпечує дуже високу чистоту отриманого азоту. Кріогенне розділення повітря є найбільш економічним способом отримання азоту з повітря у великих об'ємах. Найбільший у світі завод з нагнітання азоту у продуктивний пласт (який був збудований за 2 роки) перебуває в експлуатації з 2000 р. в Кантарелле (Мексика). Він постачає гігантську кількість азоту трубопроводом до морських родовищ в Кантарелле та Ку-Малооб-Заап. Азот, який отримують шляхом кріогенного розділення повітря, також успішно використовують на нафтових північноафриканських родовищах [35].

Авторами роботи [36] розроблено стратегію розробки родовища Kinteroni-Sagari шляхом нагнітання азоту з метою підвищення коефіцієнта вуглеводневилучення. Ця система до розробки родовища реалізується шляхом переведення частини видобувних свердловин у нагнітальні та уведення в експлуатацію нових технологічних установок для отримання азоту з повітря та відділення азоту від видобутого природного газу. Азот, що нагнітається у пласт, поступово рухається до видобувних свердловин.

Основні переваги та недоліки різних способів отримання азоту з повітря наведено у таблиці 1.

Сучасні азотні станції використовуються в багатьох галузях промисловості. Залежно від об'ємів і чистоти необхідного газу, а також масштабів виробництва азоту, застосовується обладнання різного типу. Ефективність і функціональна доцільність азотних газороздільних станцій в кожному конкретному випадку зумовлені властивостями газу. Компанія «ГРАСИС»

понад 17 років випускає модельний ряд газороздільних установок на основі мембранної і адсорбційної технологій. Найкращими вважаються азотні установки мембранного типу, які є найбільш надійними інноваційними та мають довговічне устаткування [33]. Постійними замовниками азотних установок і азотних станцій компанії «ГРАСИС» є найбільші російські і зарубіжні компанії – Газпром, Роснефть, Лукойл, РИТЭК, Татнефть, Eni, Enel, Total, Shell, Exxon Mobil, Petrofac, НОВАТЭК, Сургутнефтегаз, Славнефть, Газпром Нефть, Pepsi, Mars і багато інших [46].

Підприємство «Челябинский компрессорный завод» пропонує високотехнологічне обладнання з вироблення і отримання високоякісного азоту чистотою до 99,999%, що задовольняє вимогам підприємства будь-якого профілю. Компанія має власну мережу центрів продажу та обслуговування техніки як на території РФ, так і в Казахстані, Киргизії, Україні, Білорусії, Таджикистані, Азербайджані та Монголії.

Американська компанія Innovative Gas Systems (IGS) пропонує широку номенклатуру професійних азотних станцій, що працюють за унікальною мембранною технологією власної розробки. Технологія, на основі якої працює азотна установка GENERON®, дозволяє отримати більший об'єм кінцевого продукту без додаткового збільшення часу виробництва і енергоспоживання [37].

Ще однією провідною компанією на ринку країн СНД є компанія «Провіта», фахівці якої успішно займаються дослідженнями і розробками в цій галузі з 1980 року. За цей час був накопичений багатий досвід у створенні промислових генераторів кисню та азоту адсорб-

ційного типу, а також установок на їх основі [38].

Застосування неуглеводневих газів для підвищення вуглеводневилучення з виснажених газових родовищ рано чи пізно призводить до поступового прориву їх у видобувні свердловини. Значний вміст неуглеводневих газів у свердловинній продукції погіршує якість товарного газу і невідповідності його галузевим стандартам на постачання газу споживачам. Згідно з [47] вміст азоту у природному газі, що подається у газотранспортну систему, не повинен перевищувати 5 % об. Обмеження вмісту азоту у товарному газі пояснюється тим, що за наявності азоту зменшуються калорійність газу і число Воббе. Параметрами товарного газу є: калорійність – близько 7600 ккал/м<sup>3</sup> (за даними НАК «Нафтогаз України» – 8000-8250 ккал/м<sup>3</sup>, а за даними ПАТ «Укртрансгаз» – 8200 ккал/м<sup>3</sup>) та число Воббе – у межах 9850-13000 ккал/м<sup>3</sup>. За більшого вмісту азоту видобутий газ потрібно очищати до товарних кондицій.

Проблема вилучення з газу азоту виникає також на природно загазованих азотом родовищах. Так, вміст азоту у газі родовища Панхандл-Хьюгтон (США) становить 10 % об., а по деяких інших родовищах досягає 30-35 % об. [39, 40]. Транспортування азотовмісного газу на великі відстані вимагає значних витрат. Тому природний газ доцільно очищати від азоту не на місці споживання, а безпосередньо на місці видобування.

Для розділення природного газу і азоту або газів горіння використовують криогенну технологію [30]. Установка для відокремлення азоту складається із таких основних вузлів: очищення газу від домішок, отримання скрапленого природного газу і сепарації азоту від метану. В останніх двох вузлах послідовно використовуються процеси охолодження, скраплення і фракціонування суміші за криогенних температур.

Азот можна ефективно відділяти з газу шляхом охолодження, скраплення і фракціонування за низьких температур. Таким методом можна отримати природний газ із вмістом метану 99 % [25].

Азот можна очищати за низьких температур у циклі скраплення в дистиляційних колонах, де відбувається відділення азоту від метану і його відведення в газовій фазі. Економічна ефективність цього процесу може бути істотно підвищена, якщо одночасно з очищенням від азоту проводити вилучення з нього гелію (якщо він є в газі). На низькому температурному рівні (228 К) також ефективно очищати природний газ і від діоксиду вуглецю шляхом адсорбції на активованому вугіллі марки СКТ [41].

Проблема очищення видобутого газу від неуглеводневих газів виникла, зокрема, на родовищі Блок-31 (штат Техас, округ Крейн, США). На цьому родовищі інтенсивне нагнітання димових газів у пласт призвело до того, що протягом 10 років експлуатації приблизно третя частина родовища була охоплена впливом димових газів [11], а вміст димових газів у продукції видобувних свердловин складав до

30-40 % об. Тому було прийнято рішення про будівництво нового заводу для вилучення азоту із видобувного газу з подальшим зворотним нагнітанням азоту у пласт. Було збудовано напівзаводську установку і проведено інженерні вишукування стосовно процесу скраплення азоту, але у промислових умовах цей процес не був застосований.

На великих підприємствах, як правило, зменшення кількості азоту у природному газі відбувається в установках видалення азоту. Принцип роботи таких установок ґрунтується на сепарації азоту з основного потоку газу завдяки різниці температур кипіння метану (мінус 161,6 °С) і азоту (мінус 195,69 °С). Для охолодження середовищ до наднизьких температур застосовуються алюмінієві паяні пластинчасто-ребристі теплообмінники. Теплообмінники також застосовують як конденсатори або випарники в об'язці ректифікаційних колон [42].

Два великі заводи з переробки природного газу споруджуються в Російській Федерації і в Австралії. Компанія Linde Engineering постачає блоки видалення азоту (NRU) для обох об'єктів. Хоча обидва блоки вилучення азоту працюють на перевіреному принципі криогенної ректифікації при відділенні азоту з метану в суміші природного газу, в них реалізовано досить різні підходи. Завдання фірми Linde полягало у проектуванні блоку видалення азоту, який би знижував частку азоту до одного або двох відсотків. Для російського проекту компанія Linde застосовує процес з одноразовою ректифікацією, а для австралійського блоку обрано процес з подвійною ректифікацією.

В установках переробки природного газу, де рідкий азот необхідний для спеціальних процесів у ході подальшої обробки газу, сепарування в колоні одноразової ректифікації часто є найкращим рішенням. Але в тих випадках, коли азот потрібно тільки вилучити з газу і випустити в атмосферу, процес ректифікації з двома колонами може виявитися більш ефективним [43].

Розробивши власну технологію, компанія Air Liquide Engineering & Construction пропонує гнучкі рішення, що відповідають широкому спектру потреб, включаючи можливість роботи з природним газом будь-якого складу. В установці з видалення азоту частково конденсується природний газ, який містить азот. Потім метан і азот відокремлюються в системі, що складається як мінімум з однієї і як максимум з трьох дистиляційних колон (залежно від складу сировини і тиску). Сценарій технологічного процесу завжди вибирається, виходячи з конкретних параметрів проекту, таких як зміна складу сировини в часі і технічні умови на продукцію. Також Air Liquide Engineering & Construction пропонує спектр рішень для установок з видалення азоту. Сировиною для цього технологічного процесу можуть бути природний газ, попутні гази нафтових родовищ або газ з нетрадиційних джерел. Можлива переробка майже будь-якої суміші азоту з метаном

(5-90 %). Ця пріоритетна технологія забезпечує високу ефективність та адаптованість і дозволяє отримувати газ на продаж, що відповідає вимогам трубопровідного транспортування газу. Крім того, зводяться до мінімуму викиди парникових газів у атмосферу, а вміст азоту у природному газі менший 1% об. [44].

Авторами роботи [45] запропоновано спосіб видалення азоту з природного газу, який включає: 1) абсорбцію вуглеводневого компонента природного газу прямогонною нафтою, яка містить фракції з  $C_5-C_{12}$  -  $C_8-C_{18}$  парафінових вуглеводнів в установці для здійснення абсорбції. Абсорбцію здійснюють в колоні з насадкою за кімнатної температури; 2) десорбцію вуглеводневого компонента з прямогонної нафти у відпарній колоні за температури на її дні в інтервалі від 150 до 200 °C; 3) рециркуляцію на стадію (1) прямогонної нафти, регенованої при десорбції; 4) подавання десорбованого вуглеводневого компонента в розподільну мережу. При цьому природний газ попередньо обробляють для видалення діоксиду вуглецю (за його наявності) шляхом пропускання газу крізь мембрани.

Узагальнення результатів досліджень і промислових матеріалів з отримання азоту з повітря і очищення від азоту природного газу свідчать про те, що найкращим способом отримання азоту з повітря є мембранний, оскільки він не залежить від зовнішніх умов і надійний. Основним способом очищення природного газу від азоту, який промислово апробований, є криогенний спосіб.

### **Висновки**

До перспективних методів підвищення газовилучення з виснажених газових покладів відноситься витіснення залишкового природного газу неуглеводневими газами (діоксидом вуглецю, димовими газами, азотом та іншими), серед яких найбільш дешевим, доступним і простим в отриманні є азот. Серед способів отримання азоту з повітря (мембранний, адсорбційний, криогенний) високоефективним і надійним у промисловій практиці є мембранний спосіб, який дозволяє отримати азот досить високої чистоти (99.5 %). У процесі нагнітання азоту у виснажений газовий поклад азот буде поступово прориватися у видобувні свердловини, що призведе до погіршення якості товарного газу і вимагатиме очищення його від азоту. Серед методів відокремлення азоту з природного газу на найбільшу увагу заслуговує криогенний метод, суть якого полягає в охолодженні і скрапленні природного газу і подальшому його фракціонуванні шляхом сепарації азоту від метану.

Одночасне використання на газовому промислі мембранної установки для отримання азоту з повітря і криогенної установки для очищення природного газу від азоту вимагатиме різнотипового обладнання і значних витрат на їх будівництво та обслуговування. Тому слід продовжити дослідження з метою створення

універсальних, малогабаритних і компактних установок, які би дозволили ефективно отримувати азот з повітря, а після появи азоту у свердловинній продукції – відділяти азот з природного газу шляхом заміни окремих блоків чи встановлення додаткових.

Можливим варіантом є використання криогенної технології як для отримання азоту з повітря, так і для очищення продукції видобувних газових свердловин від азоту.

### **Література**

1 Закиров С.Н. Теория и проектирование разработки газовых и газоконденсатных месторождений : учебн. пос. для вузов / С.Н. Закиров. – М.: Недра, 1980. – 334 с.

2 Закиров С.Н. Разработка газовых, газоконденсатных и нефтегазоконденсатных месторождений : навч. посіб. / С.Н. Закиров. – М. : Струна, 1998. – 628 с.

3 Совершенствование технологи разработки месторождений нефти и газа / Под ред. С.Н. Закирова. – М.: Грааль, 2000. – 643 с.

4 Кондрат Р.М. Газоконденсатоотдача пластов / Р.М.Кондрат. – М.: Недра, 1992. – 255 с.

5 Довідник з нафтогазової справи / За заг. ред. докторів технічних наук В.С. Бойка, Р.М. Кондрата, Р.С. Яремійчука. - К. : Львів, 1996. – 620 с.

6 Кондрат Р.М. Дослідження впливу тиску початку нагнітання азоту у виснажене газове родовище на характеристики процесу вилучення залишкового природного газу / Р.М. Кондрат, Л.І. Хайдарова // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2016. – №2(59). – С.51-57.

7 Кондрат Р.М. Enhanced gas recovery from depleted gas fields with residual natural gas displacement by nitrogen / Р.М. Кондрат, Л.І. Хайдарова // Науковий вісник НГУ. – 2017. – № 5. – С. 23-28.

8 Кондрат Р.М. Вплив розміщення видобувних свердловин на коефіцієнт газовилучення при периферійному нагнітанні азоту у виснажений газовий поклад кругової форми / Р.М. Кондрат, Л.І. Хайдарова // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2017. – №4(65). - С.34-39.

9 Кондрат Р.М. Дослідження процесу витіснення залишкового природного газу азотом із виснаженого газового родовища за різної тривалості періоду нагнітання азоту в пласт / Р.М. Кондрат, Л.І. Хайдарова // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2016. – №1(58). – С.60-67.

10 Кондрат Р.М. Повышение конденсатоотдачи продуктивных пластов с применением заводнения // Обз. инф.: Сер. Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений. – 1982. - Вып. 7.- С.57.

11 Итоги науки и техники. Разработка нефтяных и газовых месторождений. – 1990. – Том 22. – С. 156.



- 12 SPE 11848. Nitrogen injection Applications Emerge in the Rockies. J.P. Clancy, R.E. Gilchrist. 22-25 May, Salt Lake City, Utah. 1983.
- 13 SPE 94129. CO<sub>2</sub> Injection for Enhanced Gas Recovery and Geo-Storage: Reservoir Simulation and Economics. Ahemd Al-Hasami, Shaoran Ren, Bahman Tohidi. SPE Europec / EAGE Annual Conference, 13-16 June, Madrid, Spain. 2005.
- 14 SPE 177778. Gas Injection as an Enhanced Recovery Technique for Gas Condensates. A comparison of three Injection Gases. A. Kumar, M.E. Gohary, K.S Pedersen, J. Azeem. Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference, 9-12 November, Abu Dhabi, UAE. 2015.
- 15 SPE 169578. CO<sub>2</sub> Injection for Enhanced Gas Recovery / Sumeer Kalra, Xingru Wu // SPE Western North American and Rocky Mountain Joint Meeting, 17-18 April, Denver, Colorado. 2014.
- 16 SPE 130151. Enhanced Gas Recovery - Challenges shown at the example of three Gas Fields / Torsten Clemens. Severin Secklehner, Konstantinos Mantatzis, Bas Jacobs.
- 17 Sinisha A. Jikich, Duane H. Smith, W. Neal Sams, Grant S. Bromhal. Enhanced Gas Recovery (EGR) with Carbon Dioxide Sequestration: A Simulation Study of Effects of Injection Strategy and Operational Parameters // SPE 84813, 6-10 September, Pittsburgh, Pennsylvania, 2003.
- 18 Simulation Study of Enhanced Gas Recovery Process Using a Compositional and a Black Oil Simulator // SPE 144951, 19-21, July, Kuala Lumpur, Malaysia, 2011.
- 19 Chawarwan Khan, Robert Amin & Gary Madden. Economic Modelling of CO<sub>2</sub> Injection for Enhanced Gas Recovery and Storage: A Reservoir Simulation Study of Operational Parameters // Energy and Environment Research; Vol. 2, No. 2; 2012.
- 20 Enhanced Gas Recovery: Factors Affecting Gas-Gas Displacement Efficiency / S.S.K. Sim, A.T. Turta, A.K. Singhal, B.F. Hawkins // 9th Canadian International Petroleum Conference (the 59 th Annual Technical Meeting of the Petroleum Society), June 17-19, 2008, in Calgary, Alberta, PETSOC-09-08-49-P.
- 21 SPE 113468. Enhanced Gas Recovery and CO<sub>2</sub> Sequestration by Injection of Exhaust Gases From Combustion of Bitumen / Steve S.K. Sim, Alberta Research Council; Patrick Brunelle, Quadris Canada Fuel Systems Inc.; Alex T. Turta and Ashok K. Singhal, Alberta Research Council.
- 22 Basic Investigations on Enhanced Gas Recovery by Gas-Gas Displacement A.T. Turta, S.S.K. Sim, A.K. Singhal, B.F. Hawkins Alberta Research Council. Paper 2007-124.
- 23 Enhanced Gas Recovery: Effect of Reservoir Heterogeneity on Gas-Gas Displacement S.S.K. Sim, A.T. Turta, A.K. Singhal, B.F. Hawkins. Alberta Research Council. Paper 2009-023.
- 24 Еске Г.А. Исследование влияния закачки выхлопных газов на коэффициент извлечения конденсата / Г.А. Еске, А.И. Волик // Нефтегазовое дело. – 2015. – Т.13. – №2. – С. 94-99.
- 25 П.П. Ермаков, Н.А. Еремин. Нагнетание азота в пористые среды для увеличения нефтеотдачи // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. – 1996. – №11. – С.45-50.
- 26 SPE-171239-RU. Обзор "забытой технологии" с высоким потенциалом – крупнейший в мире азотный проект на базе IOR на гигантском месторождении Кантарел в Мексике Маркус С.П. Гузманн, SPE, The Linde Group.
- 27 Игнатъев Н.А. Опыт и перспективы закачки азота в нефтегазовой промышленности / Н.А. Игнатъев, И.А. Синцов // Фундаментальные исследования. – 2015. – №11 (часть 4) – С. 678-682.
- 28 SPE 30795. Recovery of gas-condensate by nitrogen injection compared with methane injection. P.J. Sanger, J. Hagoort. SPE Journal March 1998.
- 29 <http://orensau.ru/povyshenie-kvalifikaczii/sposoby-polucheniya-azota>
- 30 Итоги науки и техники. // Разработка нефтяных и газовых месторождений. – 1985. – Т. 16. – 188 с.
- 31 <http://azotnava.ru/proizvodstvo-azota/sposobi-polucheniya-azota>
- 32 Г.В. Кирик. Розроблення компресорного обладнання для технологій видобування вуглеводнів з використанням азоту / Г.В. Кирик, П.С. Жарков, Г.А. Бондаренко та ін. // Журнал інженерних наук. – 2016. – № 2. – Том 3. – С. 24-33.
- 33 <http://www.grasys.ru/products/gas/poluchenie-nitrogen/>
- 34 SPE 68169. Nitrogen Injection for Simultaneous Exploitation of Gas Cap. Sanhita Tiwari, SPE, and M. Suresh Kumar, SPE, Oil and Natural Gas Corporation Limited. Bahrain, 17–20 March 2001.
- 35 SPE-175730-MS. Nitrogen Injection as IOR/EOR Solution For North African Oil Fields. Ulrich Heucke, Linde AG. Egypt, 14–16 September 2015.
- 36 SPE-191652-18RPTC-RU. Осуществимость закачки азота в многопластовую залежь, содержащую сухой газоконденсат. Рамиро Сanchусажа. 15-17 октября, 2018, Москва, Россия.
- 37 <http://igs-generon.ru/gas-separation-purification-and-recovery.htm>
- 38 <http://www.provita.ru/docs/aboutus.html>
- 39 <http://www.neftemagnat.ru/enc/31>.
- 40 Д.Л. Катц, Д. Корнелл, Р. Кобаяши, Ф. Х. Поеттманн [и др]. Руководство по добыче, транспорту и переработке природного и переработке природного газа / Перевод с английского, под общей редакцией кандидатов техн. наук Ю. П. Коротаева и Г.В. Пономарева. – М.: Недра, 1965. – 677 с.
- 41 <http://tesiaes.ru/?p=8019,1>
- 42 <https://cryogenics-energy.fivesgroup.com/ru/oblasti-primeneniya/pererabotka-prirodnogo-gaza/ustanovki-udaleniya-azota.html>

43 [http://www.linde-engineering.ru/ru/process\\_plants/lng-and-natural-gas-processing-plants/nitrogen\\_rejection/optimium-separation-of-nitrogen.html](http://www.linde-engineering.ru/ru/process_plants/lng-and-natural-gas-processing-plants/nitrogen_rejection/optimium-separation-of-nitrogen.html)

44 <https://www.engineering-airliquide.com/ru/ustanovka-po-udalenyu-azota>

45 Пат. КЗ А 10554. Способ удаления азота из природного газа / Чиккарелли Либерато, Эни С.п.А., Пастухова О. В. ; заявл. 15.02.00 ; опуб. 15.08.01.

46 <https://energybase.ru/uploads/docs/JF5JJcA6LarmzMHqyB9kndI5nExHoxfx.pdf>

47 Постанова «Про затвердження Змін до деяких постанов НКРЕКП щодо впровадження добового балансування на ринку природного газу та процедури розробки, подання і затвердження Плану розвитку газотранспортної системи на наступні 10 років» (від 27.12.2017 р. № 1437).

*Стаття надійшла до редакційної колегії*  
14.11.18

*Рекомендована до друку*  
професором **Тарком Я.Б.**

*(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)*

*д-ром техн. наук **Акульшиним О.О.***

*(ПАТ «Український нафтогазовий інститут»,  
м. Київ)*