

ТЕХНОЛОГІЇ УЛОВЛЮВАННЯ ТЕХНОГЕННОГО ДІОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЙОГО УТИЛІЗАЦІЇ У ВИСНАЖЕНИХ НАФТОГАЗОВИХ РОДОВИЩАХ

С. В. Матківський

Акціонерне Товариство «Укргазвидобування»; 04053, м. Київ, вул. Кудрявська, 26/28, тел./факс (044) 2723115, e-mail: matkivskij@gmail.com

Проблема глобального потепління і зміни клімату вимагає глобальних зусиль для зниження негативно-го впливу на атмосферу. Уловлювання діоксиду вуглецю є ключовою стратегією в досягненні цілей щодо зниження забруднення навколишнього середовища. Зниження забруднення атмосфери можливо досягнути шляхом скорочення частки викопного палива в енергетичному балансі, впровадження технологій виробництва електроенергії з поновлюваних джерел та підвищення енергоефективності виробництв. Важливим кроком на шляху до декарбонізації є впровадження технологій уловлювання діоксиду вуглецю на великих промислових підприємствах. Ці технології передбачають уловлювання діоксиду вуглецю під час спалювання вугілля або газу та його транспортування до місця захоронення з наступним його зберіганням без контакту з атмосферою. Найбільш поширеними є технології уловлювання діоксиду вуглецю після спалювання, до спалювання та із спалюванням збагаченого киснем палива. Діоксид вуглецю, що виділяється з димових газів, може бути використаний в комерційних цілях як сировина для харчової та хімічної промисловості. Перспективним напрямом утилізації великих об'ємів діоксиду вуглецю є його нагнітання у виснажені нафтогазові родовища з метою підвищення їх вуглеводневилучення. Використовуючи основні інструменти гідродинамічного моделювання, проведено дослідження з підвищення вуглеводневилучення Гадяцького нафтогазоконденсатного родовища в умовах прояву водонапірного режиму. На основі результатів проведених досліджень встановлено, що у випадку впровадження технології нагнітання діоксиду вуглецю в поклад горизонту В-16 досягається підвищення кінцевого коефіцієнта вилучення газу на 2,95 %, а конденсату на – 1,24 % від залишкових запасів вуглеводнів. Результати проведених досліджень свідчать про значні перспективи використання діоксиду вуглецю в нафтогазовому секторі України в рамках всього процесу декарбонізації енергоємного виробництва.

Ключові слова: забруднення атмосфери, зміна клімату, технології, уловлювання діоксиду вуглецю, декарбонізація, модернізація виробництва, нафтогазові родовища, захоронення діоксиду вуглецю, підвищення вуглеводневилучення.

Проблема глобального потепления и изменения климата требует глобальных усилий для снижения негативного воздействия на атмосферу. Улавливание диоксида углерода является ключевой стратегией в достижении целей по снижению загрязнения окружающей среды. Снижения загрязнения атмосферы возможно достичь путем сокращения доли ископаемого топлива в энергетическом балансе при внедрении технологий производства электроэнергии из возобновляемых источников и повышения энергоэффективности производств. Важным шагом на пути к декарбонизации является внедрение технологий улавливания диоксида углерода на крупных промышленных предприятиях. Эти технологии предусматривают улавливание диоксида углерода при сжигании угля или газа и его транспортировку к месту захоронения с последующим его хранением без контакта с атмосферой. Наиболее распространены технологии улавливания диоксида углерода после сжигания, до сжигания и со сжиганием обогащенного кислородом топлива. Выделяющийся из дымовых газов диоксид углерода может быть использован в коммерческих целях в качестве сырья для пищевой и химической промышленности. Перспективным направлением утилизации больших объемов диоксида углерода является его нагнетание в истощенные нефтегазовые месторождения с целью повышения коэффициентов извлечения углеводородов. Используя основные инструменты гидродинамического моделирования, проведены исследования по повышению углеводородоотдачи Гадяцкого нефтегазоконденсатного месторождения в условиях проявления водонапорного режима. На основе результатов проведенных исследований установлено, что в случае внедрения технологии нагнетания диоксида углерода в залежь горизонта В-16 достигается повышение конечного коэффициента извлечения газа на 2,95%, а конденсата – на 1,24% от остаточных запасов углеводородов. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о значительных перспективах использования диоксида углерода в нефтегазовом секторе Украины в рамках всего процесса декарбонизации энергоемного производства.

Ключевые слова: загрязнение атмосферы, изменение климата, технологии, улавливания диоксида углерода, декарбонизация, модернизация производства, нефтегазовые месторождения, захоронения диоксида углерода, повышение извлечения углеводородов.

The problem of global warming and climate change requires global efforts to reduce the negative impact on the atmosphere. Capturing carbon dioxide is a key strategy in achieving pollution reduction targets. Reducing air pollution can be achieved by reducing the share of fossil fuels in the energy balance, introducing technologies for generating electricity from renewable sources and increasing the energy efficiency of production. An important step towards decarbonization is the introduction of carbon dioxide capture technologies in large industrial plants. These technologies involve capturing carbon dioxide during the combustion of coal or gas and transporting it to a disposal site with its subsequent storage without contact with the atmosphere. The most common technologies are post-combustion, pre-combustion, and combustion of oxygen-enriched fuels for carbon dioxide capture. Carbon dioxide emitted from flue gases can be used commercially, as a raw material for the food and chemical industries. A promising direction for the utilization of large volumes of carbon dioxide is its injection into depleted oil and gas fields in order to increase the recovery factors of hydrocarbons. Using the main tools of hydrodynamic modeling, studies were carried out to increase hydrocarbon recovery of the Hadyach oil and gas condensate field in the conditions of the manifestation of a water drive. Based on the results of the studies carried out, it was found that in the case of introducing the technology of injecting carbon dioxide into the reservoir of the V-16 horizon, an increase in the final gas recovery factor is achieved by 2.95%, and condensate - by 1.24% of the residual hydrocarbon reserves. The results of the studies carried out indicate significant prospects for the use of carbon dioxide in the oil and gas sector of Ukraine within the framework of the entire process of decarbonization of energy-intensive production.

Key words: air pollution, climate change, technologies, carbon dioxide capture, decarbonization, production modernization, oil and gas fields, waste disposal of carbon dioxide, increased hydrocarbon recovery.

Вступ

Техногенна діяльність людини негативно впливає на навколишнє середовище та призводить до загострення екологічних проблем, пов'язаних із станом атмосферного повітря. Результатом роботи енергоємних виробництв є димові гази, що містять тверді частинки, оксиди сірки, вуглецю, азоту, які негативно впливають на екологію. На сьогоднішній день дуже багато уваги приділяється проблемі видалення діоксиду вуглецю з димових газів, що утворюються в виробничих процесах різних галузей промисловості, включаючи енергетику, хімічну промисловість та металургію [1].

Високорозвинені індустріальні країни активно впроваджують новітні технології уловлювання та зберігання діоксиду вуглецю в енергетичному секторі. Розроблені технології передбачають виділення діоксиду вуглецю на промислових підприємствах та його транспортуванням до місця захоронення з наступним зберіганням без контактування з атмосферою протягом тривалого періоду часу. Впровадження такого роду технологій дозволить використовувати викопне паливо як основне джерело енергії з мінімальним навантаженням на навколишнє середовище.

Україна характеризується однією з найбільш енергоємних економік у Європі та достатньо високим показником викидів техногенного діоксиду вуглецю в атмосферу. На сьогоднішній день дані технології в нашій державі перебувають на початковій стадії свого розвитку. Практичне відставання України щодо використання передових технологій зумовлене необхідністю високих інвестиційних витрат на реалізацію такого роду проєктів, переважна

більшість яких припадає саме на утилізацію діоксиду вуглецю [2].

Кліматичні норми в глобальному масштабі стають все більш жорсткішими, тому в найближчій перспективі Україна стикнеться з необхідністю модернізації великих енергоємних підприємств, що працюють на викопному паливі, впровадження новітніх технологій уловлювання діоксиду вуглецю. Вищенаведене обумовлює потребу в проведенні додаткових досліджень з метою формування економічних механізмів реалізації інвестиційних проєктів по уловлюванню діоксиду вуглецю з наступним його захороненням.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Переважна більшість родовищ вуглеводнів України певною мірою виснажені та плавно вступають в завершальну стадію розробки. Стан сировинної бази таких родовищ значно погіршується в часі, а залишкові запаси вуглеводнів сконцентровані здебільшого у щільних колекторах, обводнених продуктивних покладах та знаходяться за межею рентабельності їх видобутку. Такі запаси вуглеводнів відносяться до категорії важковидобувних та розробляються з дуже низькими темпами [3-10].

На основі результатів промислового досвіду впровадження технологій підвищення вуглеводневилучення шляхом нагнітання діоксиду вуглецю встановлено, що для успішної реалізації даної технології необхідно передбачити надійне джерело його постачання. У випадку незабезпечення потрібних об'ємів агенту нагнітання протягом короткого терміну призводить до зниження очікуваного вуглеводневилучення

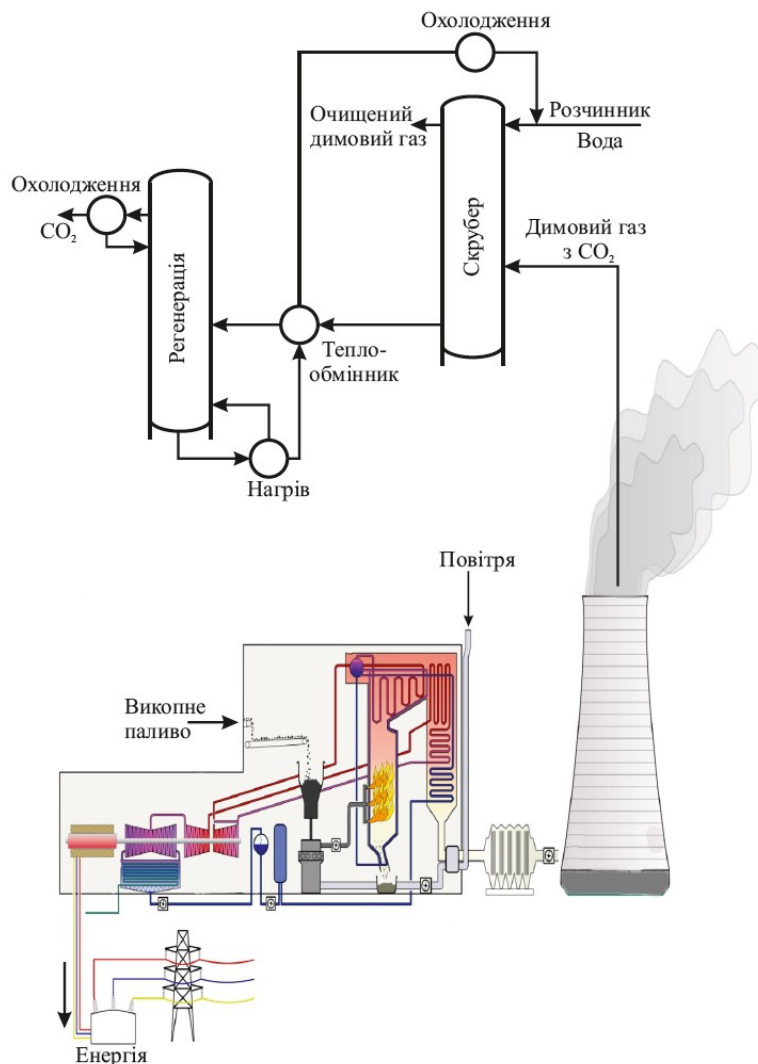


Рисунок 1 – Принципова схема уловлювання діоксиду вуглецю після спалювання органічного палива

[11]. Відсутність надійного джерела діоксиду вуглецю значно обмежує застосування даної технології [12-13].

Перспективні джерела отримання діоксиду вуглецю можна поділити на природні і техногенні. До природних джерел відносяться, в основному, нафтогазові родовища, в яких зосереджена значна його частка, або родовища з запасами саме діоксиду вуглецю. Прикладом є Солотвинське та Мартівське родовища (Україна), вміст діоксиду вуглецю в пластовому газі яких становить 17 % та 95 % відповідно, а родовище Нью-Мехіко (США) характеризується вмістом діоксиду вуглецю на рівні 99 %.

Основним джерелом техногенного діоксиду вуглецю є димові газы теплових електростанцій, димові газы нафтогазопереробних заводів, викідні газы компресорних станцій; побічні газоподібні продукти виробництва аміаку, виробництва спирту і отримання штучного газу з вугілля та сланців [1, 11, 14].

Відомі різні технології уловлювання діоксиду вуглецю з продуктів згоряння, однак серед основних виділяють технологію уловлювання після спалювання, до спалювання і зі спалюванням палива, збагаченого киснем [15]. Найпоширенішою є технологія уловлювання після спалювання, згідно якою відокремлення діоксиду вуглецю відбувається після спалювання палива. Суть цієї технології полягає у використанні рідких розчинників, які в результаті хімічних реакцій з димовими газами відділяють діоксид вуглецю. Як розчинники можуть бути використані аміни, аміак тощо. Серед амінів широкого застосування набули водні розчини етаноламіну, діетаноламіну та триетаноламіну [16].

Принципова схема уловлювання діоксиду вуглецю після спалювання органічного палива наведена на рисунку 1.

Для уловлювання діоксиду вуглецю димові газы направляються до очисного резервуару, в

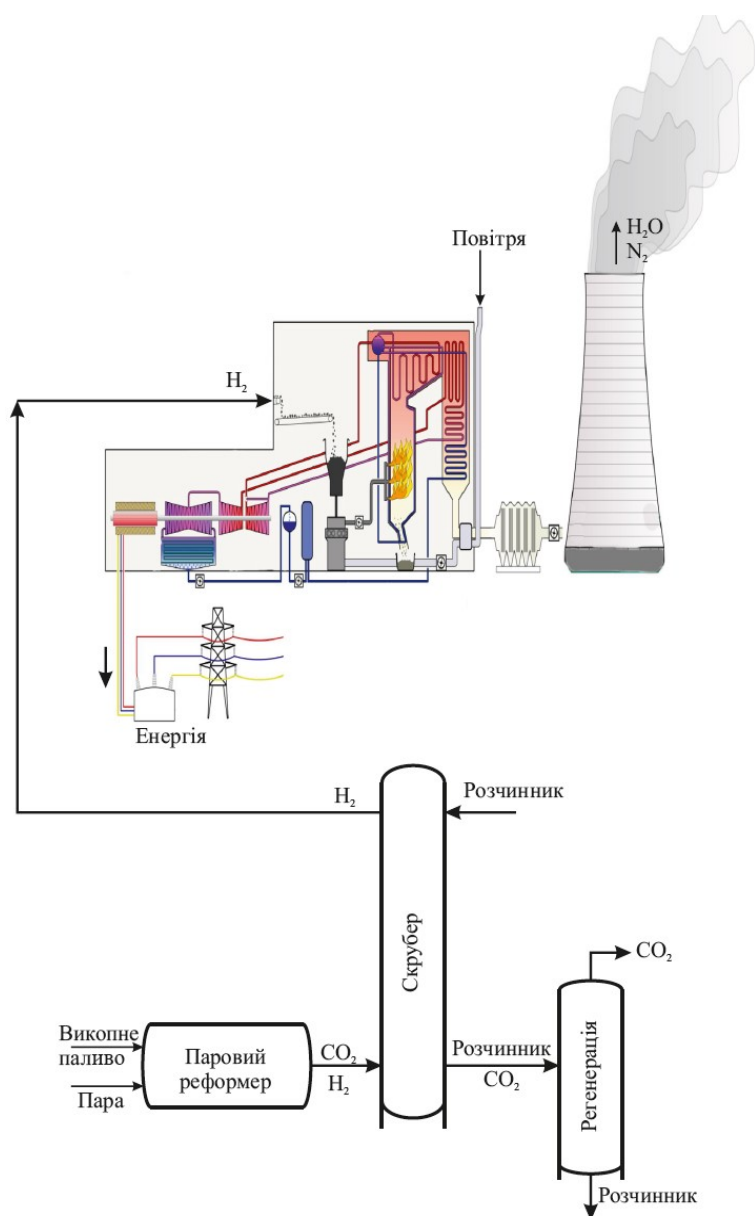


Рисунок 2 – Принципова схема уловлювання діоксиду вуглецю до спалювання органічного палива

якому безпосередньо контактують із рідким розчинником (водний розчин аміну). Пройшовши контактну частину абсорбера, очищений димовий газ відводиться за межі установки, а розчин насиченого аміну надходить у теплообмінник, де відбувається його нагрівання. Після теплообмінника розчин аміну піддається регенерації та направляється до очисного резервуару [16].

У процесі очищення добутого газу розчинами амінів можуть виникати побічні реакції, які в подальшому призводять до зміни складу розчину та знижують його поглинальну здатність. Розчини амінів створюють агресивне середовище, що призводить до корозії устаткування. Наявність у водних розчинах амінів сторонніх домішок обумовлює збільшення швид-

кості корозії вуглецевої сталі. Зважаючи на наведене, виникає необхідність в якісному систематичному очищенні поглинального розчину.

Технологія уловлювання діоксиду вуглецю до спалювання пов'язана з перетворенням палива і застосовується у виробництві різного типу добрив та водню. У процесі газифікації можна отримати суміш водню, оксиду вуглецю та діоксиду вуглецю з викопного палива або ж біомаси. Дана технологія є набагато складнішою порівняно із технологією уловлювання після спалювання, що робить її менш привабливою, з точки зору впровадження на промислових об'єктах.

Принципова схема уловлювання діоксиду вуглецю до спалювання органічного палива наведена на рисунку 2.

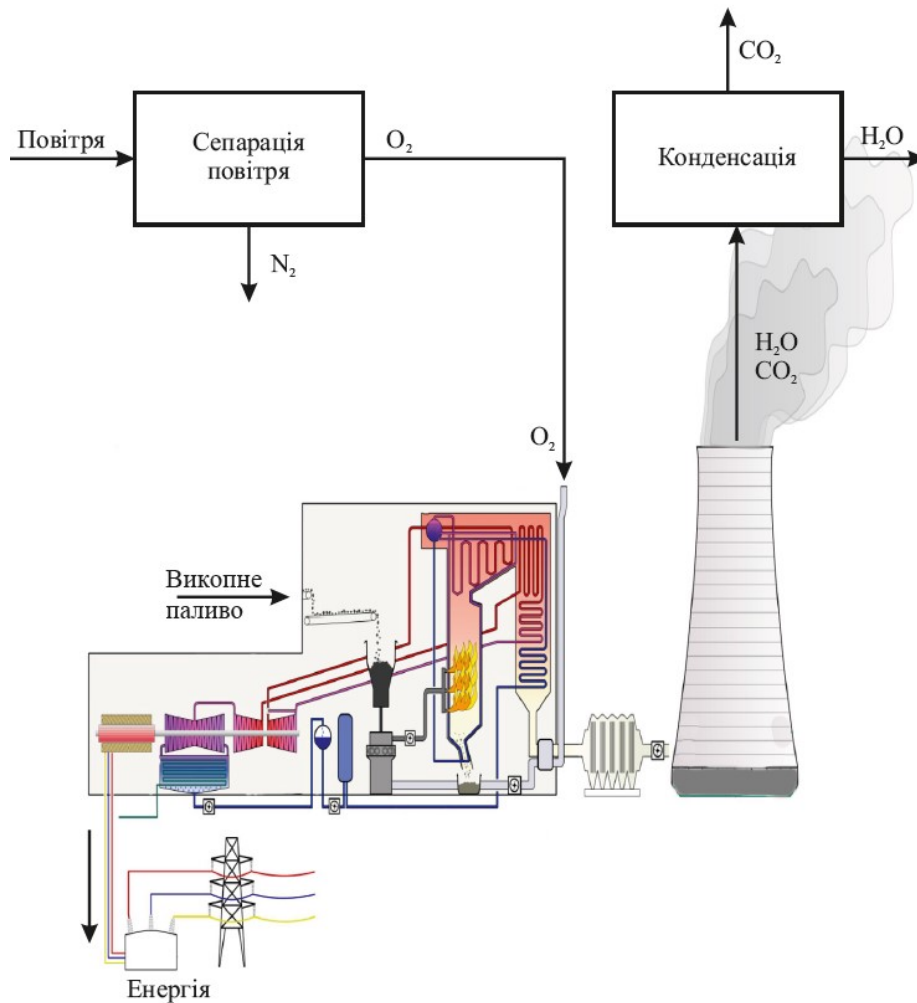


Рисунок 3 – Принципова схема уловлювання діоксиду вуглецю після спалювання збагаченого киснем органічного палива

Однією з високоефективних технологій отримання діоксиду вуглецю є технологія спалювання збагаченого киснем органічного палива. Згідно цієї технології в ролі окиснювача використовується кисень, а не повітря. За допомогою турбодетандерних повітророзділювальних установок повітря розділяється на азот і кисень, який в подальшому подається в змішувач, де змішується з продуктами згорання. Азот при цьому відводиться за межі установки та використовується для промислових потреб. В результаті спалювання органічного палива виробляється пара, яка служить енергією для роботи турбін та вироблення електроенергії. Суміш димових газів, діоксиду вуглецю та водяної пари рециркулюється для контролю температури та поступово охолоджуються. Після цього уловлений діоксид вуглецю висушують, стискають та транспортують до місця зберігання [15]. Однак, значні витрати на отримання кисню дещо обмежують застосування даної технології.

Принципова схема уловлювання діоксиду вуглецю після спалювання збагаченого киснем органічного палива наведена на рисунку 3.

Висока вартість промислових установок та відсутність інфраструктури зазвичай стримують застосування традиційних методів уловлювання діоксиду вуглецю з димових газів. Більш доступною та високоефективною є технологія кальцій-карбонатного циклу, за якою в якості сорбенту використовують оксид кальцію, отриманий з вапняків та доломітів.

Суть технології полягає у переміщенні сорбенту між двома реакторами, в одному з яких за низької температури відбувається поглинання діоксиду вуглецю, а, в іншому, за більш високої температури – розкладання карбонату кальцію. Такого типу технології ефективні на електростанціях з високими викидами діоксиду вуглецю на одиницю виробленої потужності. Дана технологія характеризується високою швидкістю процесу поглинання діоксиду вуглецю, завдяки високій температурі проведення

реакції, скороченням кількості необхідного для реакції кисню та відносною дешевизною методу.

За результатами аналізу основних процесів і технологій уловлювання діоксиду вуглецю встановлено, що всі вони вимагають наявності етапу сепарації діоксиду вуглецю, водню або кисню від основного потоку газів, який може бути представлений димовими та синтетичними газами, повітрям або неочищеним видобувним газом. Етапи сепарації можуть бути реалізовані за допомогою фізичних або хімічних розчинників, мембран, твердих сорбентів або криогенного поділу. Вибір технології уловлювання діоксиду вуглецю визначається технологічними процесами, в яких вона повинна діяти.

Сучасні технології уловлювання діоксиду вуглецю після або до спалювання призначені для застосування на великих енергоємних підприємствах та можуть уловлювати до 85-95% діоксиду вуглецю. Для уловлювання та компресії діоксиду вуглецю витрачається на 10-40% більше енергії порівняно з відсутністю установок уловлювання. Технології уловлювання діоксиду вуглецю при спалюванні збагаченого киснем палива, можуть забезпечити уловлювання 95-100 % діоксиду вуглецю. Враховуючи необхідність у додаткових обробках газу з метою видалення сірки і азоту, об'єми діоксиду вуглецю дещо знижуються і становить трохи більше 90 % [14-15].

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Енергетична галузь України характеризується високою енергоємністю та водночас дуже низькою ефективністю. Більшість підприємств важкої промисловості, що працюють на вугіллі, застарілі та потребують модернізації. Головним завданням модернізації є зменшення навантаження на навколишнє середовище шляхом мінімізації шкідливих викидів у атмосферу та підвищення ефективності перетворення енергії. Зважаючи на наведене вище, виникає необхідність у залученні великих інвестицій для модернізації енергетичного сектору та забезпеченні високої його конкурентноспроможності.

На сьогоднішній день активно проводяться дослідження з метою підвищення ефективності і зниження вартості всіх типів систем уловлювання. Удосконалені технології уловлювання діоксиду вуглецю в поєднанні з сучасними енергосистемами і новітніми технологіями промислових процесів, можуть значно знизити вартість модернізації енергоємних промислових підприємств. Витрати на промислові установки уловлювання діоксиду вуглецю зазвичай пере-

вищують прогнозу вартість. Однак в результаті проведення додаткових досліджень та отримання практичних знань вартість наступних установок знижується.

За результатами аналізу численних вітчизняних та зарубіжних досліджень, слід відзначити науково-технічний прогрес високорозвинутих країн світу в напрямку декарбонізації енергетичних систем. На сьогоднішній день розроблено значну кількість технологій та методів уловлювання діоксиду вуглецю, які характеризуються високою технологічною ефективністю.

Практичне відставання України стосовно використання передових технологій зумовлено необхідністю високих інвестиційних витрат на реалізацію такого роду проєктів, переважна більшість яких припадає саме на утилізацію діоксиду вуглецю.

Для напрацювання економічних механізмів реалізації високовартісних проєктів з модернізації енергоємних підприємств пропонується використання діоксиду вуглецю у нафтогазовій галузі для підвищення вуглеводневилучення виснажених нафтогазових родовищ. Слід відзначити, що в такому випадку діоксид вуглецю виступає у ролі корисного продукту, а його утилізація в нафтогазових покладах обумовлює отримання економічного ефекту за рахунок додаткового видобутку вуглеводнів. Однак, для забезпечення максимальних коефіцієнтів вилучення вуглеводнів та зниження навантаження на навколишнє середовище необхідні додаткові дослідження з використанням основних інструментів гідродинамічного моделювання на основі цифрових тривимірних моделей родовищ вуглеводнів.

Виклад основного матеріалу

Перспективним напрямом утилізації техногенного діоксиду вуглецю є його нагнітання у газові та газоконденсатні родовища, що розробляються за водонапірного режиму з метою підвищення їх вуглеводневилучення шляхом регулювання процесу обводнення продуктивних покладів та видобувних свердловин [17-21].

Кінцеві коефіцієнти вилучення природного газу в умовах прояву водонапірного режиму становлять 75-80 % [22-23]. Зважаючи на низькі кінцеві коефіцієнти вилучення можна стверджувати про те, що значна частина залишкових запасів природного газу зацемлюється пластовою водою в поровому просторі.

За результатами численних досліджень встановлено, що у випадку нагнітання діоксиду вуглецю в продуктивні поклади на шляху руху

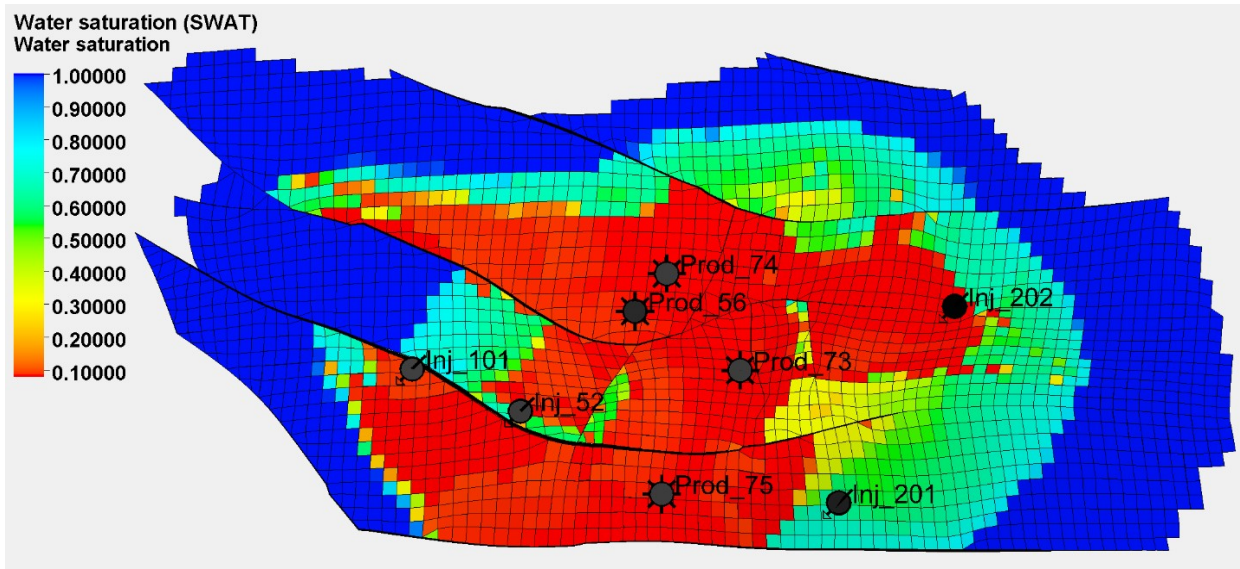


Рисунок 4 - Стан обводненості покладу горизонту В-16 Гадяцького нафтогазоконденсатного родовища та розміщення нагнітальних і видобувних свердловин

пластової води створюється додатковий гідродинамічний та фільтраційний бар'єри, завдяки чому відбувається часткове блокування процесу надходження пластової води в поклади та сповільнюється процес обводнення [24-28].

Результати моделювання на основі синтетичних тривимірних моделях свідчать про те, що завдяки впровадженню технологій нагнітання діоксиду вуглецю стає більш контрольованим процес розробки родовищ в умовах прояву активного водонапірного режиму, а також подовжується період стабільної та безводної експлуатації видобувних свердловин [29-30].

Для дослідження ефективності впровадження технології нагнітання діоксиду вуглецю з метою регулювання фронту руху пластової води вибрано Гадяцьке нафтогазоконденсатне родовище. За результатами критичного аналізу стану розробки родовища встановлено, що поклад горизонту В-16 на поточний час не розробляється через обводнення практично всіх діючих свердловин.

Відновлення розробки покладу горизонту В-16 передбачається шляхом переведення видобувних свердловин (№№ 56, 73, 74, 75), які розробляють нижчезалягаючі поклади горизонтів після завершення їх розробкою, у нагнітальні. Для впровадження технології нагнітання діоксиду вуглецю використано існуючі свердловини на родовищі. В рамках проведення досліджень на основі постійно діючої геолого-технологічної моделі родовища проведено розрахунок п'яти варіантів розробки покладу, які відрізняються за кількістю та просторовим розміщенням нагнітальних свердловин:

1 варіант – нагнітання діоксиду вуглецю в свердловини №№52-201;

2 варіант – нагнітання діоксиду вуглецю в свердловини №№52-202;

3 варіант – нагнітання діоксиду вуглецю в свердловини №№101-202;

4 варіант – нагнітання діоксиду вуглецю в свердловини №№201-202;

5 варіант – нагнітання діоксиду вуглецю в свердловини №№52, 101, 201, 202;

Стан обводненості покладу горизонту В-16 Гадяцького нафтогазоконденсатного родовища та розміщення нагнітальних і видобувних свердловин наведено на рисунку 4.

На основі результатів моделювання встановлено, що завдяки впровадженню технології нагнітання неуглеводневого газу відтермінується прорив пластової води до видобувних свердловин. Динаміка накопиченого видобутку пластової води в залежності від кількості та просторового розміщення нагнітальних свердловин на площі покладу горизонту В-16 Гадяцького нафтогазоконденсатного родовища наведена на рисунку 5.

Відповідно до результатів розрахунків встановлено, що найбільший технологічний ефект від впровадження технології нагнітання діоксиду вуглецю з метою регулювання процесу обводнення продуктивних покладів та видобувних свердловин можна отримати у випадку використання максимальної кількості нагнітальних свердловин (№ 52, 101, 201, 202). Такий результат досягається завдяки більш повному охопленню контура газоносності діоксидом вуглецю і блокування руху води проходить на значно більшій площі.

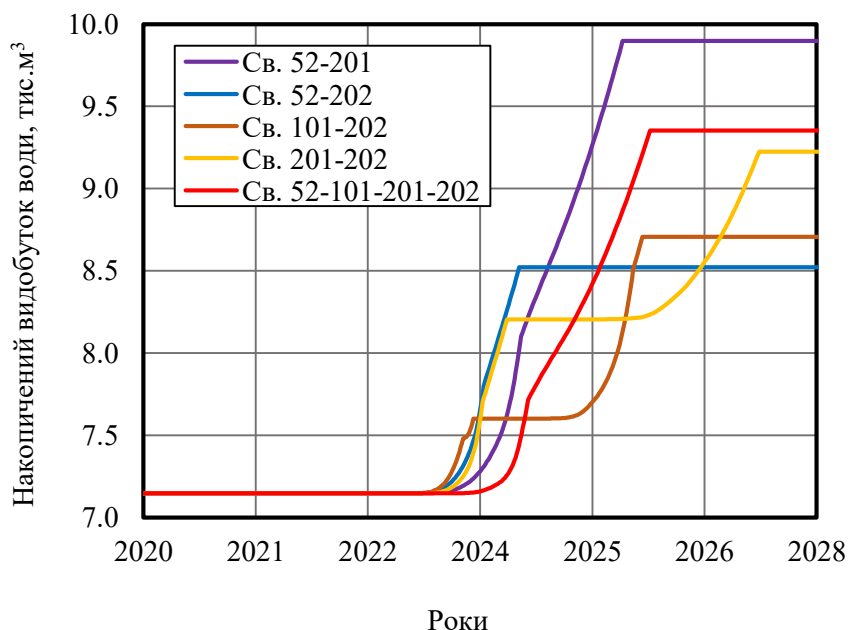


Рисунок 5 – Динаміка накопиченого видобутку пластової води в залежності від кількості та просторового розміщення нагнітальних свердловин на площі покладу горизонту В-16 Гадяцького нафтогазоконденсатного родовища

Таблиця 1 – Узагальнені результати розрахунків прогнозних коефіцієнтів вилучення вуглеводнів від залишкових запасів при нагнітанні діоксиду вуглецю в поклад горизонту В-16 Гадяцького родовища та розробці на виснаження відповідно до розглянутих варіантів

Варіанти розробки	Перелік нагнітальних свердловин	Коефіцієнт вилучення газу, %		Δ, %	Коефіцієнт вилучення конденсату, %		Δ, %
		Нагнітання	Виснаження		Нагнітання	Виснаження	
1	52, 201	31,71	29,57	2,14	7,44	6,68	0,76
2	52, 202	32,82	31,49	1,33	7,50	6,97	0,53
3	101, 202	37,42	36,11	1,31	8,23	7,69	0,54
4	201, 202	35,33	34,21	1,12	8,12	7,50	0,62
5	52, 101, 201, 202	32,56	29,61	2,95	7,92	6,68	1,24

За результатами проведених досліджень здійснено розрахунок прогнозних коефіцієнтів вилучення вуглеводнів на момент прориву діоксиду вуглецю до видобувних свердловин від залишкових запасів вуглеводнів. Результати розрахунків коефіцієнтів вилучення вуглеводнів від залишкових запасів при нагнітанні діоксиду вуглецю в поклад горизонту В-16 Гадяцького родовища та розробці на виснаження згідно розглянутих варіантів наведено в таблиці 1.

Результати проведених досліджень дозволяють удосконалити існуючу систему розробки продуктивних покладів та обґрунтувати оптимальний варіант розробки. Згідно результатів моделювання найвищі коефіцієнти вуглеводневилучення забезпечуються у випадку використання максимальної кількості нагнітальних свердловин (№№ 52, 101, 201, 202). Прогноз-

ний коефіцієнт вилучення природного газу збільшується на 2,95 % порівняно з розробкою на виснаження, а коефіцієнт вилучення конденсату – на 1,24 %.

У зв'язку із погіршенням структури і якості залишкових запасів вуглеводнів та збільшенням частки важковидобувних запасів все більше зусиль спрямовується на пошуки нових та удосконалення існуючих технологій розробки родовищ вуглеводнів, які б дозволили забезпечити високі коефіцієнти вуглеводневилучення за мінімальних витрат. При використанні діоксиду вуглецю як агента нагнітання досягаються значно вищі кінцеві коефіцієнти вуглеводневилучення порівняно з розробкою продуктивних покладів на виснаження та знижується навантаження на навколишнє середовище.

Висновки

Більшість родовищ вуглеводнів в Україні та в світі перебувають на завершальній стадії розробки. Видобуток залишкових запасів вуглеводнів традиційними методами характеризується недостатньою ефективністю. Тому актуальним питанням на сьогоднішній день є напрацювання оптимальних шляхів вилучення важковидобувних запасів вуглеводнів. Пріоритетним напрямом підвищення кінцевого вуглеводневилучення є впровадження вторинних та третинних технологій дорозробки виснажених родовищ з використанням неуглеводневих газів.

Результати проведених досліджень з підвищення кінцевого вуглеводневилучення Гадяцького нафтогазоконденсатного родовища в умовах прояву водонапірного режиму свідчать про високу технологічну ефективність використання діоксиду вуглецю якості агенту нагнітання. За результатами проведених досліджень встановлено, що у випадку впровадження технології нагнітання діоксиду вуглецю кінцевий коефіцієнт вилучення газу збільшується на 2,95 %, а конденсату – на 1,24 % від залишкових запасів вуглеводнів.

Світовий досвід впровадження технологій нагнітання діоксиду вуглецю підтверджує ефективність цього методу підвищення вуглеводневилучення виснажених нафтогазових родовищ за умови наявності надійного джерела його постачання. На території України є велика кількість металургійних, хімічних та інших енергоємних підприємств, результатом роботи яких є продукти згоряння з високим вмістом діоксиду вуглецю. Посилення кліматичних норм та вимог щодо зниження концентрації діоксиду вуглецю в атмосфері обумовлює потреби в модернізації застарілого обладнання великих підприємств, а також пошуку шляхів утилізації значних об'ємів діоксиду вуглецю.

Використання діоксиду вуглецю в нафтогазовій галузі є перспективним напрямом в рамках всього процесу декарбонізації енергетичного сектору України. Нагнітання техногенного діоксиду вуглецю у продуктивні поклади за різними технологічними схемами дозволить підвищити кінцеве вуглеводневилучення виснажених нафтогазових родовища зменшити навантаження на навколишнє середовище.

Література

1. Кіт Уїрріскі. Уловлювання та зберігання вуглецю: Українські перспективи для промисловості та забезпечення енергетичної безпеки:

Міжнародне екологічне об'єднання «Біллона», Осло, Норвегія, 2013. С. 48.

2. Martyniuk & Ogarenko. Resource efficiency gains and green growth Perspectives in Ukraine. Fridrich Ebert Stiftung. 2012. P. 14.

3. Кондрат Р.М., Дорошенко В.М., Кондрат О.Р. Особливості завершальної стадії розробки родовищ нафти і газу. *Нафтогазова енергетика*. 2007. № 1. С.17-21.

4. Кондрат Р. М. Газоконденсатотдача пластов. М.: Недра, 1992. 255 с.

5. Бойко В.С., Кондрат Р.М., Яремійчук Р.С. Довідник з нафтогазової справи. К.: Львів, 1996. 620 с.

6. Закиров С.Н. Индрупский И.М., Закиров Э. С. [и др.] Новые принципы и технологии разработки месторождений нефти и газа. М.-Ижевск: Институт компьютерных технологий. Ч. 2. 2004. 484 с.

7. Закиров С.Н., Закиров И.С., Батанова М.Н. [и др.] Новые принципы и технологии разработки месторождений нефти и газа. М.-Ижевск: Институт компьютерных технологий. Ч. 1. 520 с.

8. Закиров С.Н. Разработка газовых, газоконденсатных и нефтегазоконденсатных месторождений. М.: Струна, 1998. 628 с.

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

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

11. Кондрат Р.М., Серединський Д.Ю., Кондрат О.Р. Дослідження застосування вуглекислого газу для вилучення залишкової нафти з обводнених нафтових покладів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2010. № 2(35). С. 26-30.

12. Ибрагимов Г.З. Фазлутдинов К.С., Хисамутдинов Н.И. Применение химических реагентов для интенсификации добычи нефти: справочник. М.: Недра, 1991. 384 с.

13. Сургучев М.Л. Вторичные и третичные методы увеличения нефтеотдачи пластов. М.: Недра, 1985. 308 с.

14. Joris Koornneef, Andrea Ramirez, Toonvan Harmelen, Arjanvan Horssen, Wim Turkenburg, Andre Faaij. The impact of CO₂ capture in the power and heat sector on the emission of SO₂, NO_x, particulate matter, volatile organic compound and NH₃ in the European Union. *Atmospheric Environment*. 2010. No 44(11). P. 1369-1385.

15. Ахмедов Р.Б. Автономное энергосбережение нефтяных месторождений с попутным

производством CO₂ с целью повышения нефтеотдачи и улучшения экологии. *Нефтяное хозяйство*. 1998. №9. С. 46-48.

16. URL: <https://gazsurf.com/ru/gazopererabotka/oborudovanie/modelnyj-ryad/item/aminovaya-ochistka>. (дата звернення: 19.01.2021).

17. Sim S.S.K., Turta A.T., Singhal A.K., Hawkins B.F. (2008). Enhanced Gas Recovery: Factors Affecting Gas-Gas Displacement Efficiency. 9th Canadian International Petroleum Conference. June 17-19. 2008. Calgary. Alberta.

18. Review of the 30 Years' Experience of the CO₂ Imported Oil Recovery Projects in Hungary. S. Doleschall, A. Szittar, G. Udvardi. International Meeting on Petroleum Engineering, Beijing, China, March, 1992.

19. Turta A.T., Sim S.S.K., Singhal A.K., Hawkins B.F. (2009). Enhanced Gas Recovery: Effect of Reservoir Heterogeneity on Gas-Gas Displacement. Canadian International Petroleum Conference. 16-18 June. Calgary, Alberta. 2009.

20. Oldenburg C. M., Law D. H., Gallo Y. L. and White S. P: Mixing of CO₂ and CH₄ in Gas Reservoirs: Code Comparison Studies, USA, Canada and New Zealand, 2003. P. 1-5.

21. Mamora D. D., Seo J. G. (2002). Enhanced Gas Recovery by Carbon Dioxide Sequestration in Depleted Gas Reservoirs, SPE Technical Conference and Exhibition, 29 Sept. - 2 Oct. 2002, San Antonio, Texas, Pp. 1-9.

22. Firoozabadi A., Olsen G. and Golf-Racht V. T.. Residual Gas Saturation in Water-Drive Gas Reservoir, SPE California Regional Meeting held in Ventura, California. 1987 April 8-10. USA. P. 1-4 (319-322).

23. Charles S. R., Tracy S. W. Farrar R. L.: Applied Reservoir Engineering, Vol. 1, OGC Publications, Oil and Gas Consultants International, 1999, Inc. U.S.A. P. 5 - 77 to 5 - 22.

24. Матківський С.В. Дослідження ефективності витіснення защемленого газу неуглеводневими газами з обводнених газоконденсатних покладів. *Нафтогазова енергетика*. 2020. № 2(34). С. 26-33

25. Matkivskyi S., Kondrat O. The influence of nitrogen in injection duration at the initial gas-water contact on the gas recovery factor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. № 1(6) (109). P. 77-84.

26. Kondrat O., Matkivskyi S. Research of the influence of the pattern arrangement of injection wells on the gas recovery factor when injecting carbon dioxide into reservoir. *Technology and system of power supply*. 2020. № 5/1 (55). С. 12-17.

27. Matkivskyi S., Kondrat O., Burachok O. Investigation of the influence of the carbon dioxide (CO₂) injection rate on the activity of the water pressure system during gas condensate fields development. *Global Trends, Challenges and Horizons*. November. 2020. Dnipro. Ukraine. P. 1-10.

28. Ли, Дж. Эксплуатация обводняющихся газовых скважин: пер. с англ. / Дж. Ли, Г. Никенс, М. Уэллс. М.: ООО «Премиум Инжиниринг», 2008. 384 с.

29. Matkivskyi S. Effects of the rate of natural gas production on the recovery factor during carbon dioxide injection at the initial gas-water contact. *Technology and system of power supply*. 2021. № 1/3 (57). P. 6-11.46.

30. Рассохин Г.В. Завершающая стадия разработки газовых и газоконденсатных месторождений. М.: Недра. 1997. 184 с.

References

1. Kit Uiriski. Ulovliuvannia ta zberihannia vuhletsiu: Ukrainski perspektyvy dlia promyslovosti ta zabezpechennia enerhetychnoi bezpeky: Mizhnarodne ekolohichne obiednannia «Billona», Oslo, Norvehiiia, 2013. P. 48. [in Ukrainian]

2. Martyniuk & Ogarenko. Resource efficiency gains and green growth Perspectives in Ukraine. *Fridrich Ebert Stiftung*. 2012. P. 14. [in Ukrainian]

3. Kondrat R.M., Doroshenko V.M., Kondrat O.R. Osoblyvosti zavershalnoi stadii rozrobky rodovyshch nafty i hazu. *Naftohazova enerhetyka*. 2007. № 1. P.17-21. [in Ukrainian]

4. Kondrat R. M. Hazokondensatootdacha plastov. М.: Nedra, 1992. 255 p. [in Ukrainian]

5. Boiko V.S., Kondrat R.M., Yaremiichuk R.S. Dovidnyk z naftohazovoi spravy. K.: Lviv, 1996. 620 p. [in Ukrainian]

6. Zakirov S.N. Indrupskiy I.M., Zakirov E. S. [i dr.] Novyie printsipy i tehnologii razrabotki mestorozhdeniy nefti i gaza. М.-Izhevsk: Institut kompyuternyih tehnologiy. Part. 2. 2004. 484 p. [in Russian]

7. Zakirov S.N., Zakirov I.S., Batanova M.N. [i dr.]. Novyie printsipy i tehnologii razrabotki mestorozhdeniy nefti i gaza. М.-Izhevsk: Institut kompyuternyih tehnologiy. Part. 1. 520 p. [in Russian]

8. Zakirov S.N. Razrabotka gazovyih, gazokondensatnyih i neftegazokondensatnyih mestorozhdeniy. М.: Struna, 1998. 628 p. [in Russian]

9. Zakirov S.N. Teoriya i proektirovanie razrabotki gazovyih i gazokondensatnih

- mestorozhdeniy: uchebn. pos. dlya vuzov. M.: Nedra, 1980. 334 p. [in Russian]
10. Sovershenstvovanie tehnologi razrabotki mestorozhdeniy nefi i gaza / Pod red. S. N. Zakirova. M.: Graal, 2000. 643 p. [in Russian]
11. Kondrat R.M., Seredinskiy D.Yu., Kondrat O.R. Doslidzhennya zastosuvannya vuglekislogo gazu dlya viluchennya zalishkovoi nafti z obvodnenih naftovih pokladiv. *Rozvidka ta rozrobka naftovih i gazovih rodovisch.* 2010. No 2(35). P. 26-30. [in Ukrainian]
12. Ibragimov G.Z. Fazlutdinov K.S., Hisamutdinov N.I. Primenenie himicheskikh reagentov dlya intensivatsii dobyichi nefi: spravochnik. M.: Nedra, 1991. 384 p. [in Russian]
13. Surguchev M.L. Vtorichnyie i tretichnyie metodyi uvelicheniya nefteotdachi plastov. M.: Nedra, 1985. 308 p. [in Russian]
14. Joris Koornneef, Andrea Ramirez, Toonvan Harmelen, Arjanvan Horsen, Wim Turkenburg, Andre Faaij. The impact of CO₂ capture in the power and heat sector on the emission of SO₂, NO_x, particulate matter, volatile organic compound and NH₃ in the European Union. *Atmospheric Environment.* 2010. No 44(11). P. 1369-1385.
15. Ahmedov R.B. Avtonomnoe energosbezrezhenie neftyanyh mestorozhdeniy s poputnyim proizvodstvom SO₂ s tselyu povysheniya nefteotdachi i uluchsheniya ekologii. *Neftyanoe hozyaystvo.* 1998. No9. P. 46-48. [in Russian]
16. URL: <https://gazsurf.com/ru/gazopererabotka/oborudovanie/modelnyj-ryad/item/aminovaya-ochistka>. (19.01.2021).
17. Sim S.S.K., Turta A.T., Singhal A.K., Hawkins B.F. (2008). Enhanced Gas Recovery: Factors Affecting Gas-Gas Displacement Efficiency. 9th Canadian International Petroleum Conference. June 17-19. 2008. in Calgary, Alberta.
18. Review of the 30 Years' Experience of the CO₂ Imported Oil Recovery Projects in Hungary. S. Doleschall, A. Szittar, G. Udvardi. International Meeting on Petroleum Engineering, Beijing, China, March, 1992.
19. Turta A.T., Sim S.S.K., Singhal A.K., Hawkins B.F.. Enhanced Gas Recovery: Effect of Reservoir Heterogeneity on Gas-Gas Displacement. Canadian International Petroleum Conference. 16-18 June 2009. Calgary, Alberta. 2009.
20. Oldenburg C. M., Law D. H., Gallo Y. L. and White S. P: Mixing of CO₂ and CH₄ in Gas Reservoirs: Code Comparison Studies, USA, Canada and New Zealand, 2003. P. 1-5.
21. Mamora D. D., Seo J. G. Enhanced Gas Recovery by Carbon Dioxide Sequestration in Depleted Gas Reservoirs, SPE Technical Conference and Exhibition, 29 Sept. - 2 Oct. 2002, San Antonio, Texas, P. 1-9.
22. Firoozabadi A., Olsen G. and Golf-Racht V. T.. Residual Gas Saturation in Water-Drive Gas Reservoir, SPE California Regional Meeting held in Ventura, California. 1987 April 8-10. USA. P. 1-4 (319-322).
23. Charles S. R., Tracy S. W. Farrar R. L.: Applied Reservoir Engineering, Vol. 1, OGCI Publications, Oiland Gas Consultants International, 1999, Inc. U.S.A. P. 5 - 77 to 5 - 22.
24. Matkivskiy S.V. Doslidzhennia efektyvnosti vytisnennia zashchemlenoho hazu nevhlevodnevyh hazamy z obvodnenykh hazokondensatnykh pokladiv. *Naftohazova enerhetyka.* 2020. No 2 (34). P. 26-33. [in Ukrainian]
25. Matkivskiy S., Kondrat O. The influence of nitrogen in injection duration at the initial gas-water contact on the gas recovery factor. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2021. No 1(6 (109)). P. 77-84.
26. Kondrat O., Matkivskiy S. Research of the influence of the pattern arrangement of injection wells on the gas recovery factor when injecting carbon dioxide into reservoir. *Technology and system of power supply.* 2020. No 5/1 (55). C. 12-17.
27. Matkivskiy S., Kondrat O., Burachok O. Investigation of the influence of the carbon dioxide (CO₂) injection rate on the activity of the water pressure system during gas condensate fields development. Global Trends, Challenges and Horizons. November. 2020. Dnipro. Ukraine. P. 1-10.
28. Li, Dzh. Eksploatatsiya obvodnyayuschihysya gazovih skvazhin: per. s angl. / Dzh. Li, G. Nikens, M. Uells. M.: OOO «Premium Inzhiniring», 2008. 384 p. [in Russian]
29. Matkivskiy S. Effects of the rate of natural gas production on the recovery factor during carbon dioxide injection at the initial gas-water contact. *Technology and system of power supply.* 2021. No 1/3 (57). P. 6-11.46.
30. Rassohin G.V. Zavershayuschaya stadiya razrabotki gazovyih i gazokondensatnih mestorozhdeniy. M.: Nedra. 1997. 184 p. [in Russian]