

УДК 620.9; 666.9-13

д.т.н., проф. Андрій Редько,
andrey.ua-mail@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2331-7273,

Сумський національний аграрний університет

д.т.н., проф. Ігор Редько,
igor.redko1972@gmail.com, ORCID: 0009-0005-1556-0830,

Український державний університет залізничного транспорту

к.арх. доц. Артем Бородай,
tyomaboroday@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4221-0332,

к.т.н., ст.викл. Сергій Андрух,

sl_a@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5041-885X,

ст. викл. Сергій Бородай,

boroday1@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1281-7766,

Сумський національний аграрний університет

РОЗРОБЛЕННЯ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ РІДИНИ ВІД МЕХАНІЧНИХ ДОМІШОК ТА РОЗЧИНЕНИХ ГАЗІВ

Анотація. Наведено результати розроблення технології та пристрій для очищення геотермальної рідини від механічних домішок та розчинених газів. Присутність розчинених вуглеводневих газів (метан і важкі вуглеводні до 60-90 %) у термальних водах суттєво підвищують їхній енергетичний потенціал. Однак, присутність розчинених CO_2 , N_2 , H_2S викликають корозію обладнання. Тому дегазація термальних вод та очищення від механічних домішок дозволяє підвищити надійність експлуатації геотермальних родовищ. Технологія забезпечує очищення геотермальної рідини від часток з дисперсністю від 50 до 300 мкм і карбонатно-кальцієвих механічних домішок та видалення розчинених газів. Технологія заснована на використанні гідродинамічних процесів поділу твердих домішок в турбулентному потоці рідини, що обертається. У пристрої розміщено лопатеві завихрювачі малого діаметра та вихрові турбулентні промивачі. Висока тангенціальна швидкість у завихрювачах забезпечує очищення рідини від домішок. За рахунок обертання потоку поверхня рідини диспергується з утворенням краплинно-зірнистого шару, крізь який проходить газ, що очищується. При зниженні тиску рідини в пристрої та завихрювачах з геотермальної рідини виділяються розчинені гази (метан, двоокис вуглецю, сірководень), які створюють достатньо високий тиск над рідиною для роботи завихрювачів. Остаточне очищення газів від краплинної рідини проводиться за допомогою конусних лопаткових промивачів. Пристрій може бути використаний у технологіях розроблення геотермальних родовищ

Ключові слова: механічні домішки, турбулентний потік, геотермальна рідина, дисперсність, гідродинамічний процес, поділ твердих домішок, геотермальне родовище.

Вступ. Наявність механічних домішок та піску в експлуатаційних свердловинах знижують надійність циркуляційних геотермальних систем. Збільшення дебіту свердловин призводить до збільшення депресії на пласт та збільшення виносу твердих частинок. Продукти корозії експлуатаційної колони є джерелом механічних домішок, руйнування гірських порід також призводить до винесення механічних домішок. Причинами передчасного виходу з ладу занурювальних електровідцентрових насосів (ЕЦН) є абразивне зношування і засмічення насосів твердими частинками, зваженими в потоці рідини, що перекачується, а також вібрація насосів. Великі механічні частинки викликають заклинювання насосів, а дрібні-вібрацію та абразивне зношування. За технічними умовами експлуатації ЕЦН допускається кількість механічних домішок трохи більше 100 мг/л. Пропонуються стандартні технічні рішення (шламовловлювачі, фільтри) для захисту ЕЦН. Однак ефективність механічних пристроїв захисту ЕЦН залежить від розміру частинок (100=500 мкм), швидкості та масової витрати рідини. Розробляються різні методи захисту ЕЦН від впливу механічних домішок. Однак ефективність засобів та обладнання захисту недостатня. В даний час розроблено велику кількість конструкцій свердловинних фільтрів: щілинні, каркасно-дротяні та сітчасті. При інтенсивному винесенні механічних частинок застосовуються сепаратори механічних домішок та шламовловлювачі. Однак строк експлуатації їх становить до 100 діб і потрібний ремонт. Зменшення міжремонтного періоду технологічного обладнання знижує рентабельність виробництва теплоти. Кожна конструкція характеризується певними умовами експлуатації, рядом переваг та недоліків. Універсальних конструкцій не існує. Найбільш ефективним підходом до проблеми винесення механічних домішок у геотермальній рідині є розроблення заходів та пристроїв, що запобігають негативному впливу на промислове обладнання.

Утворення твердих відкладень на поверхнях технологічного та теплообмінного обладнання є однією із складних технічних проблем експлуатації геотермальних родовищ. У геотермальних циркуляційних системах також потрібне водопідготовка при зворотному закачуванні відпрацьованої геотермальної рідини до пласту. Хімічний склад відкладень складається з твердої фази карбонату кальцію. Відкладення утворюються внаслідок порушення карбонатно-кальцієвої рівноваги та виділення твердої фази CaCO_3 у розчині геотермальної рідини при виході на поверхню Землі. Геотермальні рідини також характеризуються високою мінералізацією від одиниць до 500 г/л

та складним хімічним складом.

Наявні технології не вирішують проблеми захисту геотермальних енергетичних систем та пристроїв від карбонатних відкладень. Використання хімічних реагентів стикається з економічними та екологічними проблемами. Недостатньо вивчено вплив інгібіторів на процеси масообміну при зворотному закачуванні геотермальної рідини у пласт. Вплив магнітного поля та ультразвуку не забезпечує надійного захисту від утворення відкладень. Основна маса частинок має розмір менше 3 мкм при концентрації 20-25 мг/л, що вказує на можливість застосування методу стабілізації геотермальної рідини кристалічною затравкою (подрібнені відкладення, крейда, пісок). Однак метод недостатньо вивчений. Таким чином, на сьогодні найбільш ефективним методом лишається сепарація.

Останні дослідження та публікації. Розчинність газів у рідинах суттєво залежить від складу, температури та тиску. Багато процесів здійснюються при тисках у кілька сотень атмосфер. Наприклад, при видобутку нафти та газу тиск може досягати до 500 – 700 атм. [3].

Підземні води містять розчинені гази, такі як азот, двоокис вуглецю, сірководень, метан та інші [4]. Кількість розчинених газів у водах окремих нафтогазових басейнів змінюється у широких межах. Вона залежить від потужності та властивостей водовмісних товщ, інтенсивності генерування та розсіювання вуглеводнів, газоємності пластових вод тощо. Так газонасиченість пластових вод Середньо – Каспійського нафтогазового басейну (Азербайджан) становить до 4 – 5 м³ газу при н. у. на 2 м³ пластової води [1]. При вивільненні газів у обмеженому просторі може утворюватися високий тиск – 10 і більше МПа. Як правило, кількість розчиненого газу зростає із збільшенням глибини, досягаючи 3 – 4 м³ газу при н. у. на 1 м³. У пластових водах нафтогазових басейнів кількість розчиненого газу може бути ще більшою. Вона досягає на глибинах 5 - 6 км до 5 - 6 м³ при н. у. і більше на 1 м³ пластової води. У нафтогазових басейнах серед розчинених газів переважають вуглеводневі гази, частка яких може досягати 90 - 98 % від загальної кількості розчинених газів [4].

Розчинність газів у рідинах суттєво залежить від складу, температури та тиску. Багато процесів здійснюються при тисках у кілька десятків мегапаскаль. Наприклад, при видобутку нафти та газу тиск може досягати до 50-70 МПа [3].

Вивченню складу, властивостей та параметрів розчинених газів у пластових водах присвячені роботи Корценштейна В.М. та Кірюшкіна В.М. [2, 3]. За даними численних глибинних досліджень, загальна газонасиченість підземних вод змінюється від 1,0 до 6 - 7 м³ на 1 м³ води. Найбільшою газонасиченістю відрізняються води періоду юри і неокома, води інших

комплексів, зокрема і тріасу, мають значно знижену газонасиченість [5]. У міру відновлення водовмісних порід, газ набуває більш однорідного (метанового) характеру. Головною складовою розчинених газів є вуглеводні (60 - 95 %), основною часткою яких є метан [5]. Тиск насичення розчинених газів пластових вод змінюється від 8 до 40 МПа і більше, тобто досягає величини пластових тисків на глибинах 3500 - 4000 м [5].

Використання газовмісних термальних вод у народному господарстві пов'язане з певними труднощами. Розчинені в термальних водах сірководень та вільна вуглекислота сприяють високій корозійній агресивності до металу. Необхідно також враховувати, що в трубопроводах та наземних комунікаціях при зниженні тиску може виділятися та накопичуватися такий вибухонебезпечний газ, як метан. У той же час, як зазначає Дворов І.М., дегазація термальних вод може багато в чому полегшити експлуатацію тих геотермальних родовищ, де виникають труднощі із відкладенням солей і корозією. Видобуток вуглеводневих газів з родовищ термальних вод не вигідний через малий їхній уміст унаслідок поганого розчинення у воді метану та його гомологів. Однак, при видобутку геотермальної води як носія термічної енергії вилучення вуглеводневих газів стає економічно вигідним навіть при порівняно малій концентрації цих газів.

Присутність у термальних водах вуглеводневих газів суттєво підвищує їхній енергетичний потенціал, і при концентрації газу близько 10 м^3 при н. у. на 1 м^3 води енергетичний еквівалент газу, залежно від глибини відбирання, може досягати термічного потенціалу термальних вод. Як показує практика, видобування газів доцільне навіть за вмісту супутніх вуглеводневих газів $1,4 \text{ м}^3$ при н.у. на 1 м^3 води [6].

Використання закручених потоків у техніці [7, 8] обумовлено можливістю створення в обертових потоках поля відцентрових сил, що істотно перевершують гравітаційні сили і викидають частинки з потоку, і збільшенням за рахунок обертання потоку довжини траєкторій частинок і крапель (часу контакту), що рухаються в ньому, порівняно з випадком поступального руху. У цьому випадку вдається отримати високий ступінь очищення, недосяжний звичайними методами.

Пристрої, в яких реалізуються закручені потоки, мають такі назви: відцентрові, циклонні, циклонно-вихрові і вихрові камери, труби вихрові, циклони і гідроциклони, вихрові сепаратори, вихрові промивачі тощо. Спільною рисою їх є наявність робочої камери (зазвичай, циліндричної чи конічної форми) і завихрювача потоку (зазвичай тангенціального чи осьового) [9, 10].

Відомий скрублер Вентурі [11] містить корпус, батарею труб Вентурі,

зрошувальний пристрій та краплевідділювач. Недоліком такого апарату є високий гідравлічний опір, значний краплинос.

Автором Савченко Є.А. [12] розроблено метод фрикційного нагрівання природного газу в енергетичному роздільнику, який дозволяє підвищувати ефективність процесу нагрівання та вилучити можливість утворення кристалогідратів у регуляторі тиску газу.

Авторами М.М. Лях, Є.В. Юр'єв, В.М. Вакалюк і Я.В. Солонічний [13] розроблено математичну модель сепаратора, в основі якої лежить інерційний механізм сепарації газорідинної суміші. На базі даної моделі отримано функціональні залежності коефіцієнта ефективності сепаратора від параметрів, які відіграють визначальну роль у технологічному процесі поділу газорідинної суміші на рідку та газову фази. Основним недоліком моделі є те, що вона надмірно спрощена і не враховує деякі процеси (конденсацію, коагуляцію і подрібнення крапель), які можуть відбуватися всередині апарату.

У роботі [14] у процесі вивчення проблеми забруднення водних ресурсів розроблено ефективне очищення стічних вод від механічних мінеральних домішок. В основу роботи поставлено завдання удосконалення прямотечієвих гідроциклонів шляхом тангенціального підведення та тангенціального відведення рідини, що забезпечує стабільний гідродинамічний режим потоку та відсутність протитечії. Виконані дослідження показали високу ефективність затримання механічних мінеральних домішок (до 95 %) і значне збільшення зольності осаду.

Створення нових високоефективних і малогабаритних апаратів можна здійснити тільки при підвищенні інтенсивності процесів, що відбуваються в них шляхом використання нових технічних рішень. Ця задача може бути вирішена за рахунок створення нової конструкції вихрового турбулентного промивача, який очищує геотермальну рідину.

Мета роботи – розроблення конструкції сепаратора для ефективного очищення геотермальної рідини від розчиненого газу та механічних частинок.

Основна частина. Розроблено мультिवихровий турбулентний промивач (рис. 1, 2) для очищення геотермальної рідини від завислих та газоподібних домішок.

Газ, який очищується, подається в нижню камеру 1 патрубком 3, врізаним тангенціально до нижньої камери 1, а також каналом змінного перерізу 3 через щілину постійної висоти 4 з закручуванням за допомогою лопаткових завихрювачів 5, розміщених по зовнішній стороні корпусу. Закручений потік рідини в камері 1 очищується від твердих домішок. З нього також виділяються розчинені гази, які утворюють згори пристрою газонаповнений об'єм під високим тиском.

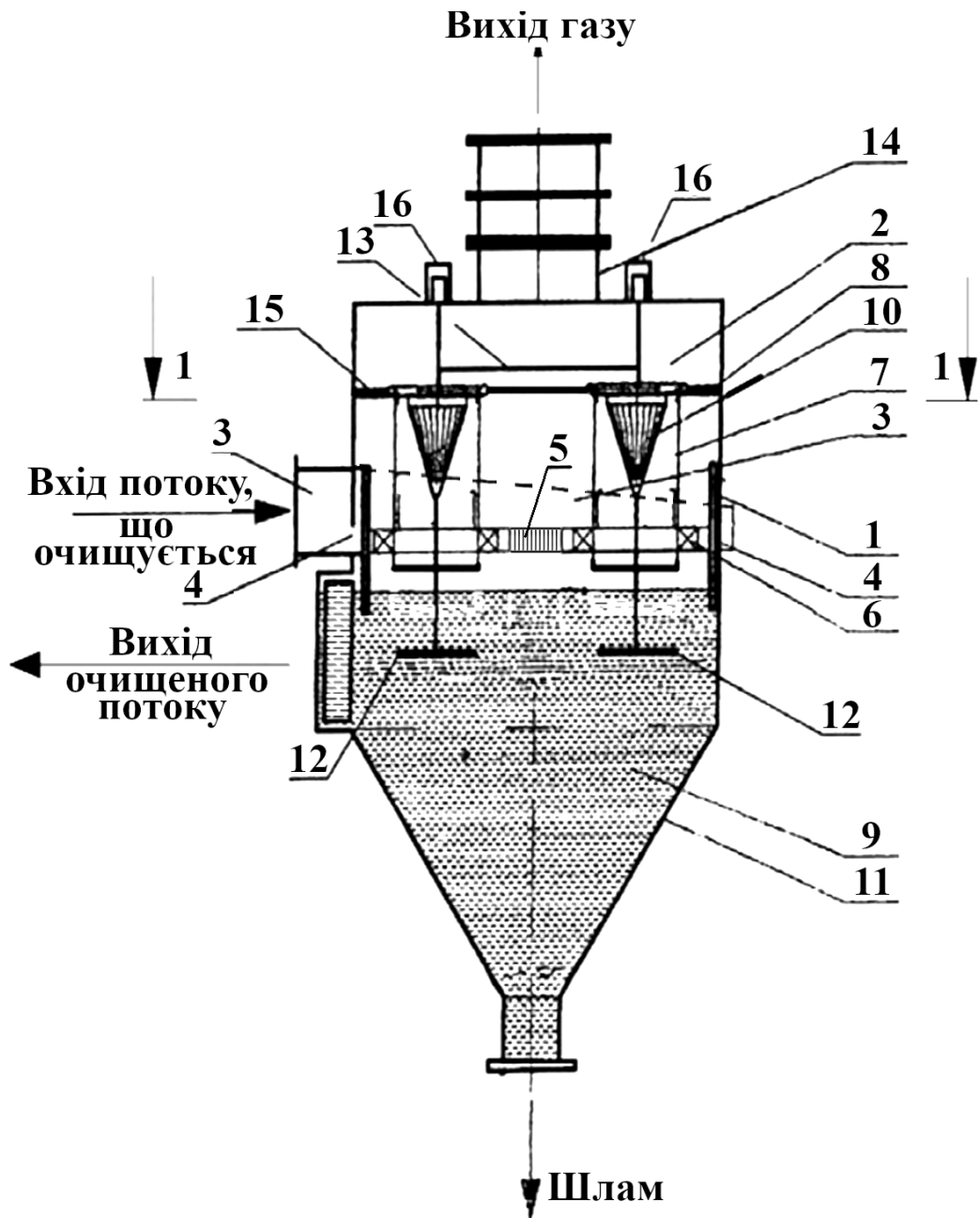


Рис.1. Пристрій для очищення геотермальної рідини:

1 – нижня камера, 2 – верхня камера, 3 – канал змінного перерізу, 4 – щілина однакової висоти, 5 – лопатки інерційного відділювача, 6 – лопаткові завихрювачі, 7 – вихровий турбулентний промивач, 8 – перекриття нижньої камер – рідина, 10 – конусний лопатковий краплевловлювач, 11 – бункер, 12 – горизонтальний диск, 13 – шток, 14 – патрубок, 15 – колектор, 16 – пристрій для вимірювання глибини зануреного диска

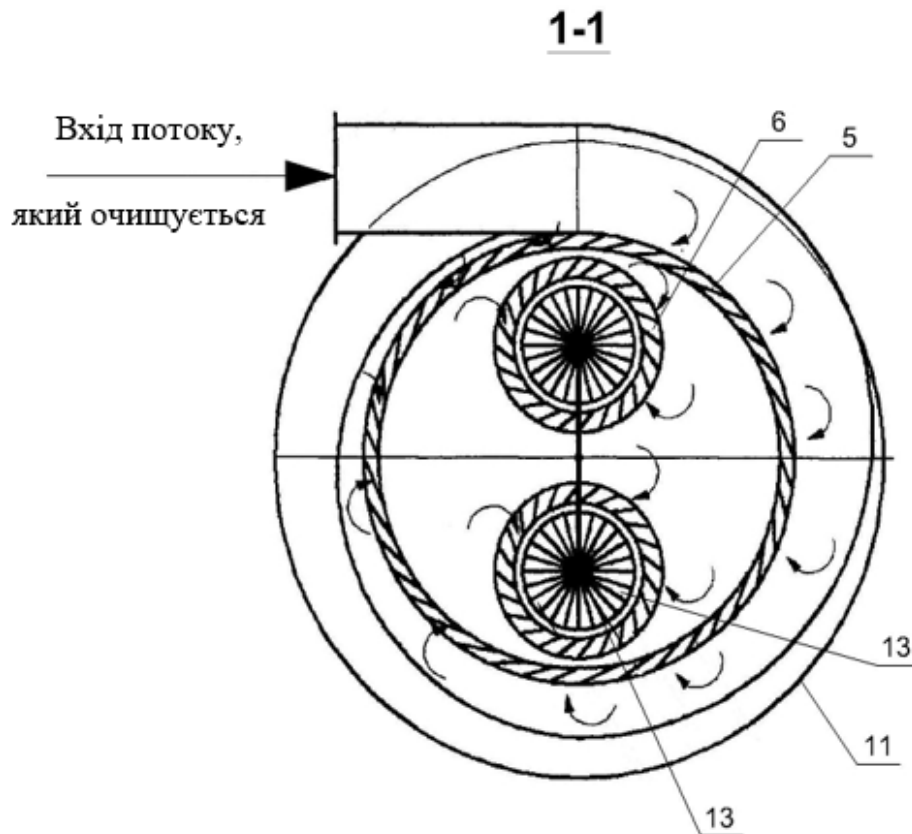


Рис. 2. Поперечний розріз апарата:
позначки див. рис. 1.

Вивільнені гази заходять крізь аналогічні до позиції 5 лопатеві завихрювачі 6, прикріплені вздовж периметру кожного модуля вихрового турбулентного промивача 7 вище рівня рідини мінімум на один діаметр модуля. Тиску газу у верхній частині апарата достатньо для ефективної роботи закручувачів 6. Потрапляючи вглиб модулів вихрових турбулентних промивачів 7, потік газу, який обертається, наводить рух на поверхню рідини 9. За рахунок обертання газу над нерухомим шаром рідини під дією доцентрових сил, рідина зрушується в приосьову зону і диспергується повітряним потоком з утворенням крапельно-зернистого шару, який постійно оновлюється. Виділені розчинні гази проходять крізь крапельно-зернистий шар, при цьому в результаті тепломасообміну здійснюється його очищення від зважених та газоподібних домішок. Під дією сили тяжіння надлишок рідини повертається вниз. Тверді домішки з рідини під дією сил тяжіння опускаються до бункера 11 і видаляється з апарата.

Витрата рідини, що рециркулює в модулях вихрових турбулентних промивачів 7, регулюється за рахунок зміни глибини занурення в рідину дисків 12 штоками 13 за допомогою пристроїв 16. При підйомі диска 9 штоком 10 питоме зрошення газу, який очищується, зростає і відповідно підвищується ефективність очищення газу. Газ який очищується і крапельна рідина потрапляють у зону робочої камери модуля вихрового турбулентного промивача

7, де відцентровими силами відокремлюється основна маса крапель, які виносяться. Остаточне очищення газу від крапель рідини проводиться за допомогою лопаткового краплєвловлювача 10. Далі газ проходить через патрубок 14 для видалення очищеного газу. Для обмивання корпусу від пилу, що налипає, служать колектори 15, крізь які подається вода або спеціальна рідина.

Випробування моделі за рис. 1 і рис. 2 показали, що дана конструкція забезпечує очищення від механічних частинок розміром 100-300 мкм та видалення розчинених газів на 95 %. Цього достатньо для забезпечення надійності експлуатації теплообмінного та технологічного обладнання.

Висновки. Розроблена конструкція сепаратора-турбулентного промивача геотермальної рідини забезпечує очищення від механічних частинок розміром 100-300 мкм та розчинених газів на 95 % задля надійної експлуатації теплообмінного та технологічного обладнання. Це досягнуто новою конструкцією апарата, що поєднує зону очищення рідини в нижній частині апарата та вихровий турбулентний промивач газів з диспергуванням рідини закрученим газовим потоком.

References

1. Razakov A.T. Teplofizychni protsesy pry formuvanni ta vykorystanni heotermalnykh resursiv. Diss. abstract. Instytut tekhnichnoi teplofizyky NAN Ukrainy. 2007 (in Ukrainian)
2. Kortsenstein V.N. Rastvorenniyie gazy podzemnoi gidrosfery Zemli. "Nedra" 1984. (in Russian)
3. Namiot A.Yu., Bondareva M.M. Rastvorimost gazov v vode pod davleniem. "Gostoptekhzdat", 1963. (in Russian)
4. Kortsenstein V.N. "Novyye dannyye o resursakh rastvorenykh gazov plastovykh vod krupnykh vodonapornykh sistem i ikh znachenie dlia otsenki prognoznykh zapasov nefli i gaza." Doklady AN SSSR. T. 215, №1, 1974, pp. 178-180. (in Russian)
5. Kissin I.H. Vostochno-Predkavkazskyy artezyanskyy basseyn. "Nauka", 1964. (in Russian)
6. Zorkin L.M., Kortsenstein V.N., Stadnyuk E.V. Uglevodorodnyie gazy plastovykh vod neftegazonosnykh basseynov – vozmozhnyie istochniki polucheniia uglevodorodov. "Doklady AN SSSR". T. 252, №3, 1980, pp. 681-683. (in Russian)
7. Khalatov A.A., Avramenko A.A., Shevchuk I.V. "Teploobmen i gidrodinamika v poliakh tsentrobeznykh massovykh sil". T.3. Zakruchennyie potoky. "ITTF", 2000. (in Russian)

8. Khalatov A.A., Avramenko A.A., Shevchuk I.V. Teploobmen y hydrodynamyka v polyakh tsentrobezkhnykh massovykh syl: T.4. Inzhenernoie i tekhnologicheskoe oborudovanie. "ITTF", 2000. (in Russian)

9. Prykhodko V.P., Prokhorov E.M., Sviridov V.P. "Rezultaty promyshlennykh ispytaniy batareinykh tsentrobezkhnykh separatorov ustanovok separatsii plastovogo gaza vysokogo davleniia". Ekologiya i zdorovie cheloveka. Okhrana vodnogo i vozdušnogo basseinov. Utilizatsiia otkhodov. Sbornik trudov IX mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, 2001, pp. 258–265. (in Russian).

10. Volchkov E.P., Smulsky I.I. "Aerodinamika vikhrevoi kamery s tortsevym i bokovym vduvom. Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii", №2 (17), 1983, pp. 214-219. (in Russian)

11. "Katalog pyle-gazoochistnogo oborudovaniia". Mezhdunarodnyi fond konversii. Tsentr ekologicheskikh problem". 1990. – (in Russian)

12. Savchenko E.A. Friksionnoe nagrevanie pryrodnogo gaza v energeticheskom razdelitele. "ITTF", 2008. (in Russian)

13. Lyakh M.M., Yuriev E.V., Vakaliuk V.M., Solonichnyi Y.V. "Matematychna model separatsii hazoridynnoi sumishi v separatori inertsiiinoho typu". Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch, № 1 (26), 1983, pp. 67–74. (in Ukrainian)

14. Levashova Yu.S. "Ochystka stichnykh vod vid mekhanichnykh mineralnykh domishok u priamotochnykh vykhrovykh aparatakh": Diss. abstract. Kharkivskiy derzhavnyi tekhnichnyi universytet budivnytstva ta arkhitektury, 2007. (in Ukrainian)

UDC 620.9; 666.9-13

Ph.D., prof. **Andriy Redko**,
andrey.ua-mail@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2331-7273,
Sumy National Agrarian University

Ph.D., prof. **Ihor Redko**,
ihor.redko1972@gmail.com, ORCID: 0009-0005-1556-0830,
Ukrainian State University of Railway Transport

Candidate of Architecture, PhD. **Artem Borodai**,
dimaboroday@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4221-0332,

Ph.D., senior lecturer **Serhii Andruh**,
sl_a@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5041-885X,
senior lecturer **Serhii Borodai**,
boroday1@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1281-7766,
Sumy National Agrarian University

DEVELOPMENT OF A DEVICE FOR CLEANING GEOTHERMAL FLUID FROM MECHANICAL IMPURITIES AND DISSOLVED GASES

Abstract. *The results of the development of technology and devices for cleaning geothermal fluid from mechanical impurities and dissolved gases are given. The presence of dissolved hydrocarbon gases (methane and heavy hydrocarbons up to 60-90 %) in thermal waters significantly increases their energy potential. However, the presence of dissolved CO₂, N₂, H₂S cause equipment corrosion. Therefore, degassing of thermal waters and cleaning from mechanical impurities allows increasing the reliability of exploiting of geothermal deposits. The technology provides purification of geothermal fluid from particles with a dispersion of 50 to 300 μm and carbonate-calcium mechanical impurities and removal of dissolved gases. The technology is based on the use of hydrodynamic processes of separation of impurities in the turbulent flow of a rotating liquid and gas. The device is equipped with many small-diameter vane swirlers and vortex turbulent washers. High tangential speed in swirlers ensures cleaning of liquid from impurities. Due to the rotation of the flow, the surface of the liquid is dispersed with the formation of a droplet-granular layer, through which the gas to be purified passes. When the pressure of the fluid in the device and swirlers is reduced, dissolved gases (methane, carbon dioxide, hydrogen sulfide) are released from the geothermal fluid. The final purification of the gases from the dripping liquid is carried out using conical vane washers. The device can be used in technologies of geothermal field development. Existing technologies do not solve the problem of protecting geothermal energy systems and devices from carbonate deposits. Testing the models showed that this design provides cleaning from mechanical particles with a size of 100-300 μm and removal of dissolved gases by 95 %. This is enough to ensure the reliability of operation of heat exchange and technological equipment.*

Keywords: mechanical impurities, turbulent flow, geothermal fluid, dispersion, hydrodynamic process, separation of solid impurities, geothermal deposit.