

УДК 532.575

І.К.Лебедь (Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Київ)

## Експериментальна установка з дослідження гідродинаміки руху двофазного середовища

*Для ефективної експлуатації обладнання ГеоТЕС до робочої рідини геотермального джерела (геотермального теплоносія) ставляться підвищені вимоги. Постає проблема відділення з робочої рідини як твердого, так і газового баласту. У статті обґрунтовується технологія використання низькопотенціального геотермального теплоносія та обладнання для відділення розчинених газів і сепарації дисперсної рідини. Бібл. 9, рис. 4.*

**Ключові слова:** геотермальний теплоносій, сепарація, геотермальна свердловина.

Orcid: 0000-0002-6079-8742

**Вступ та актуальність роботи.** Система видобутку геотермальних ресурсів – це комплекс технологічних і технічних засобів, які забезпечують видобуток геотермальних джерел енергії, їх трансформацію та зворотне закачування охолодженого геотермального теплоносія. Способи видобутку термальних вод поділяються на фонтанний, з примусовим відкачуванням та зі зворотним закачуванням. Найбільш широко розповсюдженим та екологічно безпечним шляхом є використання геотермальних циркуляційних систем (ГЦС). ГЦС – це системи видобутку глибинної теплоти Землі з підземних шарів (колекторів) шляхом примусового руху геотермального теплоносія по замкнутому контуру.

В цих обставинах до геотермального теплоносія ставляться підвищені вимоги. Твердий залишок, який поступає з робочою рідиною, може спричинити накопичення відкладень на внутрішніх стінках теплообмінника і, як наслідок, погіршення його характеристик або вихід із ладу. Газова фаза в геотермальному теплоносії перебуває у вигляді розчинених газів, які накопичуються у пласті геотермального джерела суміші зі стисненим повітрям, що подається у свердловину для відкачки теплоносія (система газліфту). Дебіт геотермальної свердловини у випадку газліфту підвищується, але в той же час знижується густина суміші внаслідок вводу газу. Тому виникає потреба в сепараційному устаткуванні, яке відділить від геотермального теплоносія газову фазу.

Сепаратори-осушувачі жалюзійного типу мають багато переваг, серед яких необхідно відзначити наступні: достатня ефективність сепарації рідини в крапельному вигляді; висока надійність експлуатації; малий гідравлічний опір; запобігання вторинному виносу рідини.

До числа недоліків жалюзійних осушувачів можна віднести значну металоемність, а для горизонтальних – несприятливі умови дренажу відсепарованої води.

**Мета і задачі дослідження.** Метою даної роботи є науково-технічне обґрунтування на підставі комплексних експериментальних досліджень процесів гідродинаміки при нисхідному та перехресному русі газорідних систем і на цій основі розробка методик розрахунку енергоефективних сепараційних апаратів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі дослідження:

- на підставі аналізу фізичної моделі системи "плівка рідини – газовий потік" стосовно каналів із сітчастим покриттям та без нього визначити межу втрати стійкості та вплив геометричних розмірів сіток на її зміну;

- з аналізу експериментальних досліджень встановити вплив динаміки потоку газу і фізико-хімічних властивостей матеріалу покриття на гідродинаміку плівкової течії;

- експериментально дослідити процес крапельного виносу з плівки рідини при вимушеному русі газу в каналах при варіюванні геометрич-

них характеристик каналу і режимних параметрів плівки та газу;

- визначити особливості сепараційних процесів, встановити вплив початкових параметрів рідини і геометричних характеристик на процеси.

**Фізичне уявлення процесу.** Процеси, які протікають у сепараційному пристрої обладнання ГеоТЕС, дуже складні і надзвичайно важко піддаються теоретичному дослідженню. До теперішнього часу не існує теорії, яка повністю описувала б сепараційні процеси. Висока ефективність процесів сепарації в основному залежить від конфігурації каналів, характеру взаємодії плівки рідини і газу, а також від особливостей поверхні контакту.

Необхідно звернути увагу на причини вторинного виносу, які пов'язані з гідродинамікою двофазних систем. Для гравітаційного руху плівки рідини характерні три основні режими: ламінарний, хвильовий і турбулентний. Складна конфігурація хвиль на поверхні плівки рідини приводить до того, що автори в роботі [1] на основі аналізу поверхневих збурень виділили п'ять режимів течії, додавши перехідні режими між ламінарним і хвильовим, хвильовим і турбулентним. Проте в більшості робіт автори вважають достатнім класифікувати рух плівки рідини на три основні режими.

Розглядаючи режими хвильового руху плівки, необхідно виділяти початкову ділянку, на якій характеристики плівки істотно відрізняються від характеристик на гідродинамічно стабільній ділянці течії. У зв'язку з цим виділяють наступні зони течії:

- 1) початкова ділянка, що характеризується відсутністю хвиль і формуванням плівкової течії;
- 2) ділянка двовимірних хвиль, які по мірі зростання збурень розпадаються;
- 3) ділянка нестационарних солітоподібних тривимірних хвиль.

Враховуючи складний характер хвильового руху плівки, аналітичне і чисельне моделювання можливе тільки з істотними спрощеннями, внаслідок чого отримані результати не завжди адекватно описують процес.

Експериментальні дослідження характеристик хвильової течії, пов'язані з визначенням мінімальної, максимальної та середньої товщини плівки, амплітуди і частоти хвиль, локальної та середньої швидкості, зважаючи на малу товщину плівки, пов'язані зі значними труднощами.

Виникнення ламінарно-хвильового і турбулентного режимів руху плівки не позначається чіткою границею. Згідно з роботами [2, 3], в яких визначалася локальна дотична напруга, область переходу знаходилася в діапазоні зміни чисел Рейнольдса  $200 < Re_{\delta} < 1000$ , хоча в роботах [4, 5] визначено, що при  $Re_{\delta} \geq 400$  настає розвинена турбулентна течія.

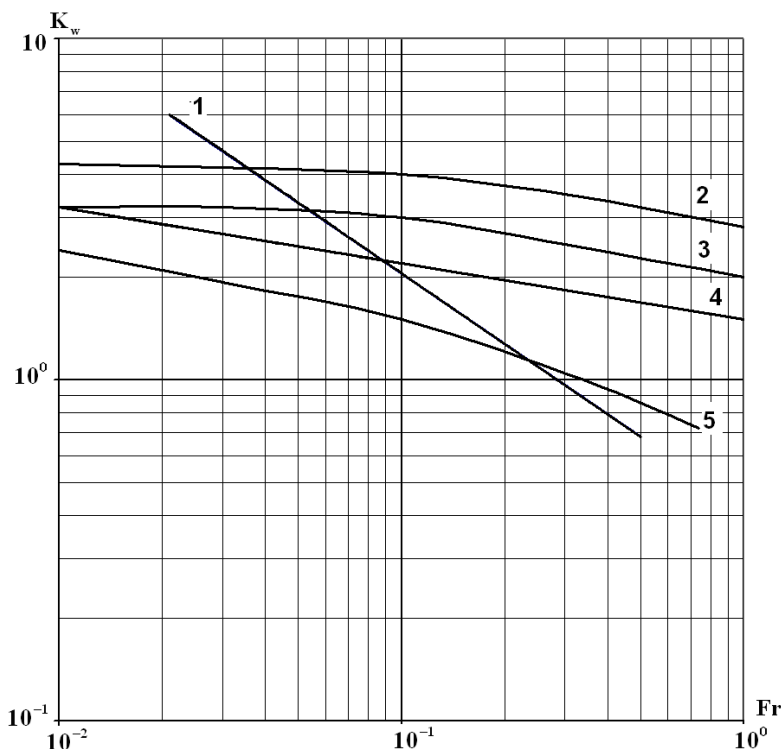
При турбулентному русі плівки збурення настають усередині плівки на границі в'язкого пограничного шару. Утворення вихорів приводить до інтенсивного перемішування рідини в поперечному перетині плівки, що приводить до збільшення її товщини та гідравлічного опору.

На даний час у промисловості широко використовуються сепараційні апарати контактного типу, в яких, виходячи із вимог технологічних процесів, реалізуються наступні схеми руху робочого тіла і теплоносія:

- протитечійний рух при гравітаційному русі плівки рідини;
- нисхідний або висхідний прямогоки, де в першому випадку плівкова течія організовується за допомогою дії сил гравітації, а в другому – в результаті перевертання циркуляції, яке викликає взаємодією висхідного потоку газу або пари і плівки рідини;
- перехресний рух.

Порівняння експериментальних даних із дослідження процесу перевертання циркуляції у вертикальних трубах для плівки води і потоку повітря представлені на рис. 1.

Аналіз наведених залежностей показує значну розбіжність результатів розрахунку за залежностями, які отримані різними авторами. Істотні розбіжності можуть бути пояснені використанням різних експериментальних методів дослідження кризи кільцевого руху двофазної системи, а також визначення власне процесу початку захливання при нисхідній протитечії.



**Рис. 1. Співставлення результатів розрахунку для нижньої границі захлинання:**

*1 – у відповідності з теоретичним рівнянням з роботи [5]; 2, 3 – згідно даних роботи [6] при різних вхідних умовах на кінцях труб; 4 – згідно даних роботи [7]; 5 – згідно даних роботи [8].*

Кризове явище визначає верхню границю захлинання висхідного потоку газу і гравітаційно стікаючої плівки рідини. В результаті узагальнення експериментальних даних було встановлено, що для верхньої границі процесу захлинання інверсія плівки не залежить від витрати рідини і числа  $Bo$ , при цьому критерій стійкості приймає постійне значення:

$$K_w = 3,2. \tag{1}$$

Таким чином, на підставі аналізу і узагальнення раніше одержаних експериментальних даних отримані залежності, що характеризують кризові явища при контакті газового потоку і гравітаційно стікаючої плівки рідини у вертикальних каналах із гладкими стінками. Використання цих залежностей для розрахунку сепараційних пристроїв обмежує діапазон швидкостей 1-2 м/с, що призводить до значного збільшення масогабаритних характеристик сепараторів. З метою запобігання вторинному виносу при збільшенні швидкості робочого тіла пропонується вплинути на характер взаємодії плівки і газового потоку. Для цього на поверхню міжфазної границі пропонується встановлювати капілярно-пористий матеріал (наприклад, сітку),

який за рахунок адгезії змінить динаміку взаємодії системи "плівка – газовий потік".

**Експериментальна установка.** Дослідження гравітаційного руху плівки рідини проводилося на робочій ділянці, яка являла собою канал без сітчастого покриття та з нанесеним покриттям. Експериментальна установка (рис. 2) складалася з насоса (1), регулюючих вентилів (2), системи ротаметрів для визначення витрати води та повітря (3), яка складається з послідовно сполучених ротаметрів РС-3 з різним діапазоном витрат і з перекриттям шкал вимірювань, регуляторів напруги (4), нагрівача рідини (5), робочої ділянки (6), нагрівача повітря (7) та компресора (8).

Схема експериментальної ділянки наведена на рис. 3. При проведенні експериментальних досліджень особлива увага приділялася точності та коректності вимірювань. Одним із важливих чинників, що впливають на точність вимірювання параметрів гравітаційно стікаючих плівок рідини, є рівномірність зрошування по перетину каналу, тому велика увага приділялася конструкції зрошувальних пристроїв. Подача рідини на стінки каналу здійснювалася через

зрошувальний пристрій переливного типу з пористою вставкою, яка забезпечувала рівномірне зрошування по всьому перетину каналу. Для запобігання перетікання рідини по горизонтальному перетину плівки робоча ділянка фіксувалася виключно по вертикалі.

Верхня межа режиму роботи сепараційних пристроїв визначається умовами взаємодії потоку

газу з гравітаційно стікаючою плівкою. Наявність потоку газу приводить до виникнення дво- і тривимірних хвиль на поверхні плівки. Збільшення амплітуди хвилі сприяє зриву крапель із гребенів, а процес взаємодії двофазних систем визначається критерієм стійкості, який, у свою чергу, залежить від параметрів плівкової течії.

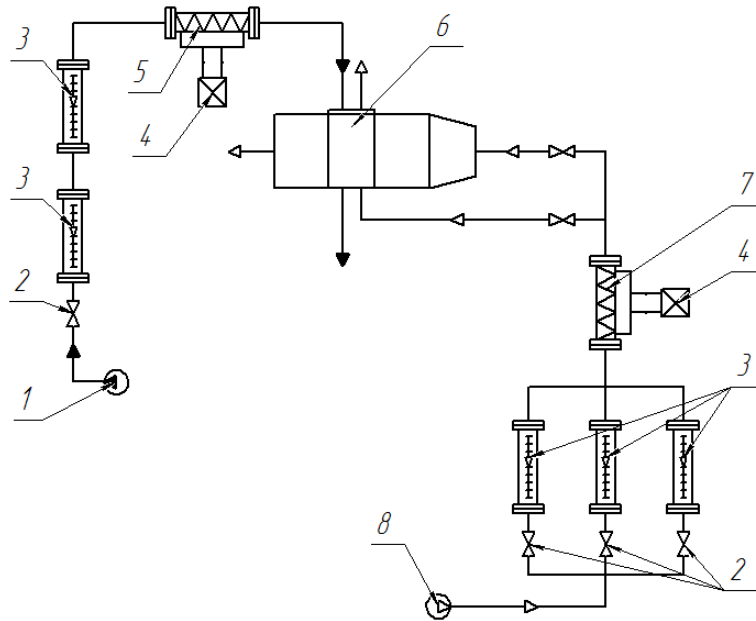


Рис. 2. Схема експериментальної установки: 1 – насос; 2 – регулюючі вентилі; 3 – ротаметри; 4 – регулятори напруги; 5 – нагрівач рідини; 6 – робоча ділянка; 7 – нагрівач повітря; 8 – компресор.

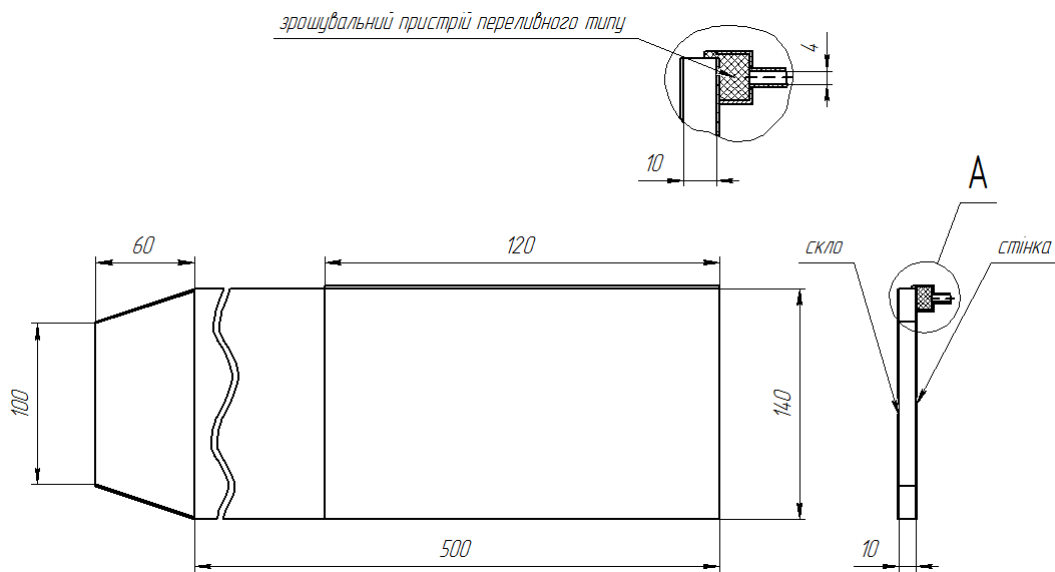


Рис. 3. Схема експериментальної ділянки.

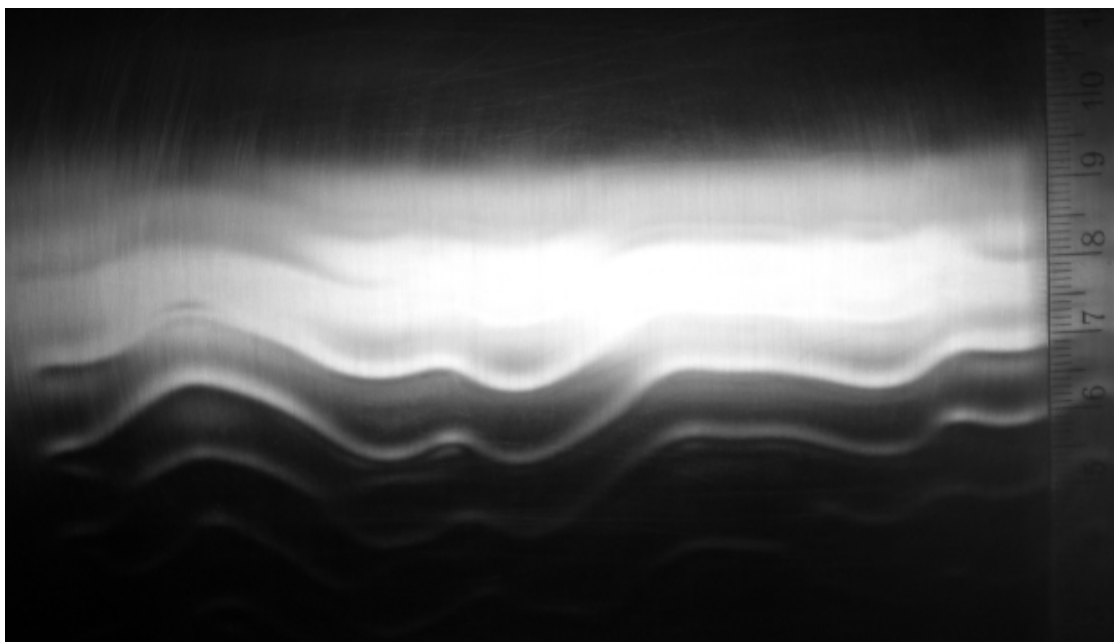


Рис. 4. Зміна режиму течії гравітаційно стікаючої плівки від безхвильового режиму до режиму течії з солітоподібними тривимірними хвилями.

На рис. 4 представлена візуалізація течії плівки. На даному зразку добре видно ділянку безхвильового режиму та зміну на хвильовий режим течії, ділянку двовимірних хвиль, які по мірі зростання збурень розпадаються на нестационарні солітоподібні тривимірні хвилі. Такий режим течії сприяє виникненню процесу краплевиносу.

Для фіксації гідродинамічної картини двофазної течії контролювався поздовжній градієнт повних втрат тиску  $\Delta P/L$ , який визначався як відношення загального перепаду тиску в потоці  $\Delta P$  до відстані між відборами  $L$ . У зв'язку з адіабатними умовами течії в досліджуваному каналі повний перепад тиску визначався за формулою:

$$\Delta P = \Delta P_{mp}, \quad (2)$$

де  $\Delta P_{mp}$  – падіння тиску в каналі на подолання сил тертя.

Значення сил тертя і відповідної дотичної напруги залежать від фізичних властивостей рідини (в'язкість при ламінарному і турбулентному режимах течії) і шорсткості внутрішньої поверхні стінок каналу. Для прямих ділянок каналів насадок довжиною  $L$  з метою визначення зниження тиску можна скористатися залежністю Дарсі-Вейсбаха:

$$\Delta P = \xi_{mp} \frac{\rho_2 w_2^2}{2} = \xi_{on} \frac{L}{d} \frac{\rho_2 w_2^2}{2}. \quad (3)$$

**Висновки.** 1. В результаті проведення експериментів отримана картина течії на робочій ділянці, що представляє собою елемент сепараційного пристрою.

2. З метою визначення області стійкої роботи сепараційного пристрою проведено дослідження гідродинамічних процесів на робочих ділянках, які моделюють елемент каналу цього пристрою.

3. Для інтенсифікації процесів сепарації і розширення меж стабільного діапазону роботи, в якому зберігається найбільш ефективна схема руху двофазних потоків, запропоновано використовувати вертикальні канали з капілярно-пористою структурою.

4. В зазначеній статті використана інформація з робіт [6, 7, 8, 9].

1. *Ishigai S.* Hydrodynamics and heat transfer of vertical falling liquid films / S.Ishigai, S.Nakanisi, T.Koizumi, Z.Oyabi // Bull. JSME – 1972. – Vol. 15. – P. 594-602.

2. *Алексеев С.В.* Волновое течение плёнок жидкости / С.В.Алексеев, В.Е.Накоряков, Б.Г.Покусаев. – Новосибирск: ВО "Наука", 1992. – 256 с.

3. *Накоряков В.Е.* Исследование турбулентных течений двухфазных сред / В.Е.Накоряков, А.П.Бурдуков, Б.Г.Покусаев. – Новосибирск.: ИТ СО АН СССР, – 1973. – 315 с.

4. *Гимбутис Г.* Теплообмен при гравитационном течении плёнки жидкости / Г.Гимбутис. – Вильнюс : Мокслас, 1988. – 233 с.

5. *Воронцов Е.Г.* Теплообмен в жидкостных плёнках / Е.Г.Воронцов, Ю.М.Тананайко. – К: Техника, 1978. – 194 с.

6. Капица П.Л. Волновое течение тонких слоёв вязкой жидкости / П.Л. Капица // ЖЭТФ. – 1948. – Т. 18, вып. 1. – С. 3-28.

7. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения: Пер. с англ. / Г. Уоллис – М: Мир, 1972. – 237 с.

8. Сорокин Ю.Л. Исследование устойчивости плёночного режима течения жидкости в вертикальной трубе при восходящем движении газа / Ю.Л. Сорокин, А.Г. Кирдяшкин, Б.Г. Покусаев // Хим. и нефт. машиностроение. – 1965. – № 5. – С. 35-38.

9. Тобилевич Н.Ю. Нисходящее движение плёнки жидкости в вертикальных трубах в противотоке воздуха и паром / Н.Ю. Тобилевич, И.И. Сагань, Ю.Г. Поржезинский // ИФЖ. – 1968. – Т. 15, № 5. – С. 855-861.

## REFERENCES

1. Ishigai S. Hydrodynamics and heat transfer of vertical falling liquid films/ S.Ishigai, S.Nakanisi, T.Koizumi, Z.Oyabi // Bull. JSME — 1972. — Vol. 15. — № 83 — P. 594-602. (eng)

2. Alexseenko S.V. Liquid film wave flow/ Alexseenko S.V., Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G. -Novosibirsk: publishing house "Nauka", 1992. — 256p. (rus)

3. Nakoryakov V.E. Research of two-phase surfaces turbulent flow/ Nakoryakov V.E., Burdukov A.P., Pokusaev B.G. -Novosibirsk.: ET RF USSR,— 1973. — 315p. (rus)

4. Gimbutis G. Heat exchange during gravity film flow / Gimbutis G. — Vilnius: Mokslas, 1988. — 233p. (rus)

5. Voroncov E.G. Heat exchange in liquid contact films/ Voroncov E.G., Tananayko Y.M.. — Kiev: "Technika", 1978. — 194p. (rus)

6. Kapiczka P.L. Liquid film viscous, thin layer wave flow / Kapiczka P.L. // ЕТР. — 1948. — volume -18 — pages: 3-28. (rus)

7. Wallis G. Simultaneously two-phase flows: translation from eng./ Wallis G. -Moscow: "Mir", 1972. — 237p. (rus)

8. Sorokin Y.L. Research of stability film flow mode in vertical pipe during oncoming movement of gas/ Sorokin Y.L., Kurdiashkin A.G., Pokusaev B.G.// Chemical and petroleum engineering. — 1965. — № 5. — С. 35-38p. (rus)

9. Tobilevich N.Y. Top-down film flow in vertical pipe during oncoming movement of gas and steam/ Tobilevich N.Y., Sagan I.I., Porjezinskiy Y.G./ RPM. — 1968. — volume 15, № 5. — pages 855-861. (rus)

**И.К.Лебедь** (Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, Киев)

#### Экспериментальная установка для исследования гидродинамики движения двухфазной среды

Для эффективной эксплуатации оборудования ГеоТЭС к рабочей жидкости геотермального источника (геотермального теплоносителя) предъявляются повышенные требования. Возникает проблема отделения от рабочей жидкости как твердого, так и газового балласта. В статье обосновывается технология использования низкопотенциального геотермального

теплоносителя и оборудования для отделения растворенных газов и сепарации дисперсной жидкости. Библ. 9, рис. 4.

**Ключевые слова:** геотермальный теплоноситель, сепарация, геотермальная скважина.

**Lebed I.** (Institute of Renewable Energy, NAS of Ukraine, Kyiv)

#### Experimental assembly (test facility) research of hydrodynamics of two-phase surface motion

For effective operation of the geothermal power plant equipment to the working fluid geothermal sources (geothermal heat carrier) lays increased requirements. This introduces the problem with the separation solid and gas ballast from the working fluid. In the article the technology of low-grade geothermal heat carrier and equipment for the separation of dissolved (liquefied) gases and separation of the dispersed liquid. References 9, figures 4.

**Keywords:** geothermal heat carrier, separation, geothermal wells.

## SYNOPSIS

Extraction of geothermal resources – is a complex technological and technical means that provide output of geothermal energy sources, their transformation and their reinjection of cooled geothermal fluid.

In these circumstances, to geothermal heat carrier are required increasing demands. The solid phase that comes from working fluid can cause the accumulation of sediment on the inner walls of the heat exchanger and the resulting reduction in its performance or even failure. The gas phase in the geothermal fluids, is in the form of dissolved gases that accumulate in the underground reservoir mixture of compressed air that is fed into the well for pumping coolant (gas-lift system). Debit geothermal wells, in the case of gas-lift system increases, but at the same time as a result of reduced density. Therefore there is a need for separation equipment, which is separate gas phase from geothermal coolant.

The aim of this work is the scientific and technical justification based on experimental studies of complex hydrodynamic processes at downstream and cross movement of gas-liquid and on this basis to develop methods of calculating energy efficiency separation apparatus.

The study of gravitational motion of liquid film carried on the work site, which was the channel without mesh coating and coated.

As a result of experimental studies of flow pattern obtained on the working area, which is the element separation device.

To determine the field of sustainable separation device for installation presented research was carried out hydrodynamic processes at work sites, which modeled element channel separation device.

A separation process to intensify and expand the boundaries of the stable range, which remains the most effective plan of the two-phase flow using vertical channels of capillary-porous structure.

Стаття надійшла до редакції 31.10.16

Остаточна версія 28.11.16