

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ

УДК 621.57.01

Аналіз геотермальних станцій, що працюють на водоаміачному розчині по циклу Каліні

Г. К. Лавренченко¹, О. А. Вассерман², Б. Г. Грудка³✉¹ТОВ «Інститут низькотемпературних енерготехнологій», а/с 188, Одеса, 65026, Україна;²Одеський національний морський університет, вул. Мечнікова, 34, Одеса, 65029, Україна;³Одеська національна академія харчових технологій, вул. Дворянська, 1/3, Одеса, 65082, Україна✉ e-mail: ¹lavrenchenko.g.k@gmail.com; ²avas@paco.net; ³bogdangennadievich@gmail.comORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0002-8239-7587>; ²<https://orcid.org/0000-0001-8147-8417>;³<https://orcid.org/0000-0003-1200-5442>

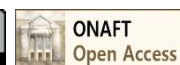
Обмеженість викопних ресурсів, що витрачаються на теплових і атомних станціях, викликає тривогу. До того ж їх використання істотно погіршує екологічну ситуацію. Використання відновлюваних джерел енергії в якості первинного палива є виключно перспективним напрямком в технологіях виробництва електроенергії і тепла. В останні роки велика увага приділяється геотермії, тобто тепловим процесам, що відбуваються в надрах Землі, для виробництва не тільки тепла, але і електроенергії. Значний внесок у створення ефективних геотермальних установок такого типу вніс допитливий інженер і талановитий вчений Олександр Каліна. Ним створено цикл, що носить його ім'я, у якому в якості робочого тіла використовується водоаміачний розчин. Особливість установки, що реалізує цикл Каліні, полягає в тому, що в її основних елементах передбачені такі зміни концентрацій розчину, які обумовлюють істотне зростання термічного ККД. Розглянуто цикли і схеми установок, що використовують водоаміачний розчин. Підтверджена їх висока ефективність. Показано, що при переході від води до розчину вода-аміак може спостерігатися помітне збільшення питомої роботи. Відзначається, що на початковому етапі геотермальні станції споруджувалися в зонах високої вулканічної активності, гарячих джерел і гейзерів. Повідомляється, що можна при будівництві станцій з циклом Каліні орієнтуватися на технологію «Hot Dry Rock», що дозволяє розміщувати їх практично в будь-якому місці нашої планети. Відзначається, що пом'якшення вимог до температури верхнього джерела тепла в циклі Каліні дозволяє розробляти підземні пласти, які раніше визнавалися неперспективними. Проаналізовано можливості більш ефективного вироблення електроенергії за допомогою циклу Каліні, який використовує природну різницю температур між нагрітою поверхнею океану і його студеними глибинами. Відзначається, що альтернативну енергетику, побудовану на геотермії, циклі Каліні і технології HDR, чекає успішне майбутнє.

Ключові слова: Альтернативна енергетика; Цикл Ренкіна; Водоаміачний розчин; Цикл Каліні; Геотермія; Геотермальна електростанція; Технологія «Hot Dry Rock» (HDR)

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v57i1.1980>

© The Author(s) 2021. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

1. Вступ

Споживання електроенергії та тепла, що виробляються на теплових і атомних станціях, не-

ухильно зростає, незважаючи на використання в багатьох країнах світу енергозберігаючих технологій. Тривогу, однак, викликає обмеженість викопних ресурсів, що в них витрачається, і які до

того ж при використанні істотно погіршують екологічну ситуацію.

Тому все більше уваги приділяється альтернативній енергетиці, з якої часто асоціюють енергію вітру, сонця, припливів і відливів. Разом з тим потрібно об'єктивно враховувати, що і ці способи вироблення енергії не позбавлені недоліків. Основний з них – складність забезпечення в електромережах постійного рівня напруги через нестабільне виробництво електроенергії за допомогою цих способів.

Тим часом до альтернативної енергетики слід віднести такий виключно перспективний і практично поновлюваний енергоресурс, яким є геотермія – теплові процеси в надрах Землі [1]. Потужність геотермії дуже значна. Наприклад, якщо враховувати в Німеччині тільки легкодоступні джерела, то можна стверджувати, що їх освоєння в найближчі роки забезпечить 20-25% всієї потреби країни в теплі, не рахуючи вироблену електроенергію. Хоча зараз частка альтернативної енергетики, навіть в Німеччині, що займає лідируючі позиції, не перевищує 7%.

Перша геотермальна станція невеликої потужності (всього в 250 кВт) була споруджена в 1920 р. в Долині гейзерів (Каліфорнія, США). Широке використання геотермальної енергії почалося в 60-ті роки минулого століття. В СРСР в ці роки будувалися станції на Камчатці і Північному Кавказі [2,3]. Як робоче тіло в них застосовувався такий холодоагент, як R12; на цю роль пропонувався також і аміак. Перша в Радянському Союзі геотермальна станція була здана в експлуатацію в 1967 р.

Більшість геотермальних станцій, створених в той період, призначалися для централізованого теплопостачання різних районів, а не для вироблення електроенергії. Більш того, такі станції будувалися тільки в зонах вулканічної активності, а також дії гарячих джерел і гейзерів. Для того, щоб використовувати геотермію поза цими зонами американськими фахівцями в 70-их роках минулого століття була запропонована технологія «Hot Dry Rock» (HDR), тобто «Гарячі сухі гірські породи» [4]. Її базують на явищі, згідно з яким при поглибленні на кожні 100 м температура ґрунту зростає в середньому на 3 градуси. Геофізики США рекомендували, по-перше, бурити дві свердловини на глибину 4-6 км, по-друге, після цього закачувати в одну зі свердловин воду. В результаті з іншої, розташованої на невеликій відстані від першої свердловини, виходив перегрітий пар з температу-

рою 150-200 °С. Все це дає можливість створювати станції в багатьох країнах, незважаючи на відсутність у них природних геотермальних джерел. Це перспективне рішення тільки починають використовувати. Поки ж геотермальні станції, переважно, будуються над глибинними розломами в земній корі.

Чотири геотермальні станції нового покоління були створені на основі ідей, винаходів і циклу Олександра Каліні. Перша станція потужністю 3 МВт була зведена в США в Канога Парку (Каліфорнія). На її будівництво і дослідження було витрачено Каліною 23 млн. доларів. Частина коштів була надана йому дуже заможними приватними інвесторами, які повірили в його геніальні ідеї: підприємець і вчений Рональд Вайс (Австралія); один з п'яти найбільш багатих людей планети Стефан Шмітхайне (Швейцарія) та інші. Потім за участі компанії «Exergy», що належить Каліні, були побудовані ще три геотермальні станції: дві в Японії і одна в Ісландії в Хусавіці, що нараховує 2,5 тисячі жителів. Станція в Ісландії потужністю 1,8 МВт виявилася по її термодинамічним і техніко-економічним показникам найдосконалішою.

Зупинимось на розгляді особливостей циклу Каліні, на основі якого їм була розроблена і впроваджена ефективна технологія, яка дозволила будувати геотермальні станції нового покоління.

2. Шлях від перспективного фахівця до видатного винахідника та вченого

Олександр Ісаєвич Каліна народився в Одесі в 1933 р. У 1957 р. закінчив Одеський технологічний інститут харчової та холодильної промисловості за спеціальністю «Холодильні та компресорні машини і установки». На старших курсах вирішив спеціалізуватися за напрямом «Глибоке охолодження, транспорт і розділення газів». Неабиякі його здатності привернули до нього увагу професора Я.З. Казавчінського, який рекомендував Олександрю Каліні поглиблено вивчати термодинаміку. Порадою професора, який заснував відому Одеську теплофізичну школу [5], він скориствовав повною мірою, застосовуючи пізніше в науковій і винахідницькій діяльності термодинамічний метод дослідження. Каліна про Якова Захаровича говорив, що той зробив з нього вченого [6].

Після закінчення інституту Каліна три роки працював в конструкторському бюро заводу «Холодмаш» (Одеса) у відділі перспективних роз-

робок. Незабаром він вступив в заочну аспірантуру; його науковим керівником став ректор інституту, професор В.С. Мартиновський; тема дисертації була пов'язана з проблемою вдосконалення транспортування природного газу. У 1966 р. Каліна успішно захистив кандидатську дисертацію в спеціалізованій раді Московського інституту хімічного машинобудування.

Вивчивши питання транспорту газу, Каліна перейшов на роботу в науково-дослідний інститут «ВНДІГАЗ», розташований поблизу Москви. У цей час виникла проблема транспортування великих кількостей газу (близько 300 млрд. м³ на рік) з Сибіру до Європи. Проектанти переконували Уряд, що потрібно прокласти десять ниток труб на багато тисяч кілометрів. Каліна зацікавився цією проблемою. Виконані ним розрахунки показали, що система трубопроводів буде коштувати в два рази дешевше. Такого здешевлення проекту можна досягти, якщо транспортувати газ в стані гідрату – з'єднання газу з водою, оскільки об'єм гідрату в кілька разів менше об'єму чистого природного газу. Ця пропозиція дозволяло істотно скоротити кількість гілок трубопроводів, необхідних для транспортування газу.

Під другий варіант транспортування був створений постановою Ради Міністрів СРСР спеціальний інститут «ВНДІТРАНСпрогрес», в який автор ідеї спочатку не потрапив. Тільки після деякої його боротьби був зарахований на посаду керівника одного з відділів [6]. Авторитет Каліни стрімко зростає, і він став також членом наукової ради Міністерства газової промисловості СРСР і радником Держплану.

Крім боротьби за можливість роботи в вищезгаданому інституті, ряд інших обставин викликав у Каліни розчарування радянською дійсністю. Він був автором 90 винаходів, але в багатьох випадках виявляв в авторських свідоцтвах прізвища начальників, абсолютно непричетних до цих винаходів. Йому не давали захистити докторську дисертацію, незважаючи на її позитивну оцінку фахівцями. Все це, а також турбота про майбутнє сина, підштовхнуло Каліну до еміграції в США в 1979 році.

У США Олександр Каліна з дружиною Іриною і сином Маріком спочатку оселилися в Х'юстоні (штат Техас). Співробітникам організації, яка опікала приїжджих, Олександр заявив, що йому необхідний патентний адвокат, так як він хоче продовжити винахідницьку діяльність. Для нього підібрали адвоката Алана Гордона, з яким він по-

товаришував і співпрацював протягом багатьох років.

З перших днів Каліна взаємодіяв з людьми, які представляли його інтереси як винахідника. Але ці люди його часто підводили. Тоді він заснував власну винахідницьку фірму «Exergy», в якій був єдиним співробітником і творцем нових винаходів. Вони відносились переважно до видобутку нафти і використання геотермальних вод. Однак економічний спад підірвав інтерес нафтовиків до його ідей, і Каліна опинився на межі фінансового краху.

Подолати кризу йому допомогла зустріч з видатним вченим в галузі термодинаміки Майроном Трайбусом, професором Масачусетського технологічного інституту. Надзвичайно зайнятий професор погодився прийняти російського фахівця на двадцять хвилин. Насправді ж вони, захопившись, проговорили три години. Професор в кінці зустрічі порадив Олександрові зайнятися підвищенням ефективності паротурбінних установок (ПТУ), які працюють на електростанціях. Каліна, ознайомившись з проблемою, сформульованою Трайбусом, зрозумів, що потрібно знайти таке робоче тіло для ПТУ, щоб кипіння і конденсація в ньому здійснювалися в ізобарних умовах при змінних температурах. Таке тіло має являти собою бінарну неазеотропну суміш. Після цього неважко було зупинити увагу на водоаміачному розчині.

Винахідник в результаті замінив звичайне робоче тіло ПТУ – воду – водоаміачною сумішшю, яка при постійних тисках кипить і конденсується при змінних температурах. Цим цикл Каліни відрізняється від відомого циклу Ренкіна, запропонованого в середині 19-го століття і що лежить в основі сучасних складніших циклів ПТУ. Близькість молекулярних мас води і аміаку, що дуже важливо, дозволяла використовувати в новому циклі звичайні пароводяні турбіни.

Покажемо, що при переході від води до розчину вода-аміак може спостерігатися помітне збільшення питомої роботи. Будемо розглядати цикли Ренкіна при однакових температурах в їх вузлових точках 5 і 2 (рис. 1). При цьому використовуємо еквівалентні цикли Карно [7], в яких виробляється робота при одній і тій ж кількості підведеного тепла q_1 .

$$w = q_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right)$$

У циклі Карно (див. рис. 1,б) середньопланіметрична температура підведеного тепла T_1 вище, ніж в класичному циклі Ренкіна (див. рис. 1,а), а середньопланіметрична температура відведеного тепла T_2 виявляється нижче, ніж в лівому циклі,

зображеному на рис. 1,а. З виразу для w випливає, що при $q_1 = \text{idem}$ одночасне збільшення T_1 і зменшення T_2 призводять до помітного збільшення роботи в циклі, що реалізується на водоаміачному розчині.

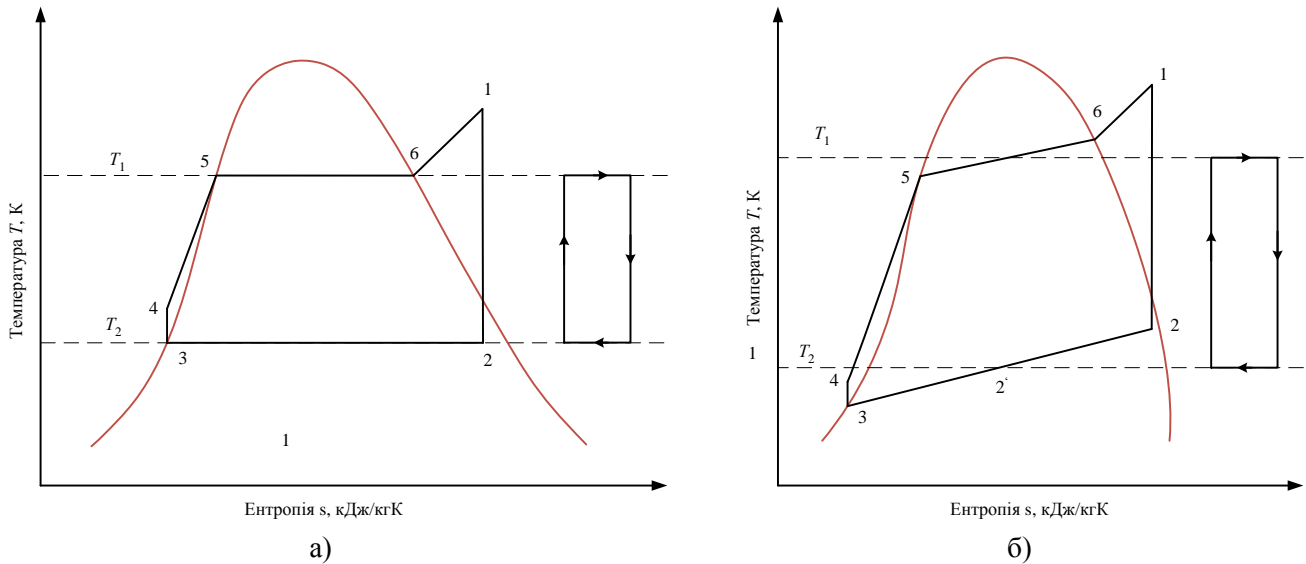


Рисунок 1 – Термодинамічні цикли Ренкіна, що реалізуються на різних робочих тілах:
а – вода; б – водоаміачний розчин

Звернемо увагу на ще одну перевагу водоаміачного розчину. З T,s -діаграми циклу (рис. 1,б), що реалізується на водоаміачній суміші, видно, що для здійснення конденсації потрібна середа з температурою нижче T_3 , тобто згідно термодинамічним вимогам – нижче нижньої температури відведення тепла від циклу. Однак може виникнути питання: «Чи вдасться таким чином реалізувати зазначені процеси?». Якщо не давати розгорнутої відповіді, то можна помітити, що стан водоаміачного розчину характеризується не тільки тиском, температурою і ступенем сухості в двофазній області, але ще вмістом аміаку в паровій і рідинній фазах. Тому є більше можливостей для досягнення необхідних станів.

Ідеї Каліні спочатку насилу сприймалися в США. Коли в 1984 р. він опублікував статтю, присвячену новому циклу [7], вона викликала критику ряду фахівців. Але через два роки Майрон Трайбус організував науковий семінар, в ході якого учасники зрозуміли суть циклу. Однак і після семінару енергетики сумнівалися в можливості його реалізації.

На початку 1993 р., тобто 28 років тому, компанія «General Electric» придбала ліцензію на використання запропонованого Каліною циклу. Цю

компанію заснував в кінці 19-го століття відомий винахідник Томас Едісон. Згодом вона перетворилася в транснаціональну корпорацію, яка контролює дві третини світового енергетичного ринку. Компанія ніколи не купувала чужі винаходи, а розробляла свої. Тому придбання нею згаданої ліцензії стало сенсацією.

Цій сенсації передували важкі для винахідника роки. Його ідею вже не спростовували, але отримати гроші для її реалізації не вдавалося. Енергетичні компанії не хотіли ризикувати, впроваджуючи новий цикл, хоча в перспективі це обіцяло великий економічний ефект. Керівництво «General Electric» з усією серйозністю поставилося до винаходу Каліні. Компанія доручила своїм співробітникам вивчити всі нюанси винаходу. Для цього знадобилося два роки, а потім пройшов ще рік, перш ніж після важких переговорів договір з автором плідної ідеї був підписаний.

Договір з відомою компанією приніс Каліні і його партнерам не тільки гроші (орієнтовно – 100 млн.доларів), вкрай необхідні для утримання експериментальної електростанції і фірми «Exergy». Для промисловців укладення договору означало, що висока репутація винахідника підтверджується солідною корпорацією «General Elect-

гіс»; тому багато з них стали проявляти інтерес до його винаходів [8, 9]. Фірма «Exergy» і автор ефективного циклу знайшли міжнародну популярність. На наукових конференціях стали робити доповіді про цей цикл, розвиваючи ідеї автора.

Спочатку передбачалося застосовувати цикл Каліні в комбінації з газовими турбінами, використовуючи для його роботи теплоту вихлопних газів турбін. Однак при температурах вище 400 °С аміак стає нестабільним, тому в подальшому в якості джерела теплової енергії для цього циклу стали розглядати джерела низького потенціалу. Особлива увага приділялася впровадженню нового циклу в установках з геотермальними джерелами теплоти [10-12]. Таким чином, цикл Каліні перетворився в так званий «Bottom Cycles» [13].

Для використання низькопотенційних джерел теплоти до робіт Каліні застосовувався цикл Ренкіна на органічних робочих тілах (пропан, бутан) званий «Organic Rankine Cycle» (ORC). Аналіз показує, що цикл Каліні має ряд переваг, як зазначалося, завдяки змінній температурі кипіння і конденсації розчину H_2O-NH_3 .

Каліна розширював діапазон досліджень. За відомостями його патентного адвоката, 362 вина-

ходи були запатентовані в декількох країнах світу. До ради директорів компанії «Exergy» включили старого друга Каліні – професора Трайбуса, який залишив університет і зайнявся спільно з автором розробкою геотермальних станцій нового покоління.

Після того як «російська ідея» отримала абсолютне підтвердження в ході випробувань побудованої Каліною геотермальної станції в США (штат Каліфорнія), їм були споруджені ще дві станції в Японії і одна – Ісландії. Так створювалися ефективні станції нового покоління, в яких використовувався цикл Каліні. Подивимося, як в даний час виглядають схеми таких станцій, що ввібрали теоретичні та практичні напрацювання, а також винаходи Олександра Каліні.

3. Особливості технології Каліні

З використанням циклів Ренкіна раніше було показано, що більш високим термічним ККД η буде характеризуватися цикл на водоаміачному розчині. Дослідження цього циклу дозволили встановити, що подальше його вдосконалення можна здійснювати на основі більш складної схеми (рис. 2).

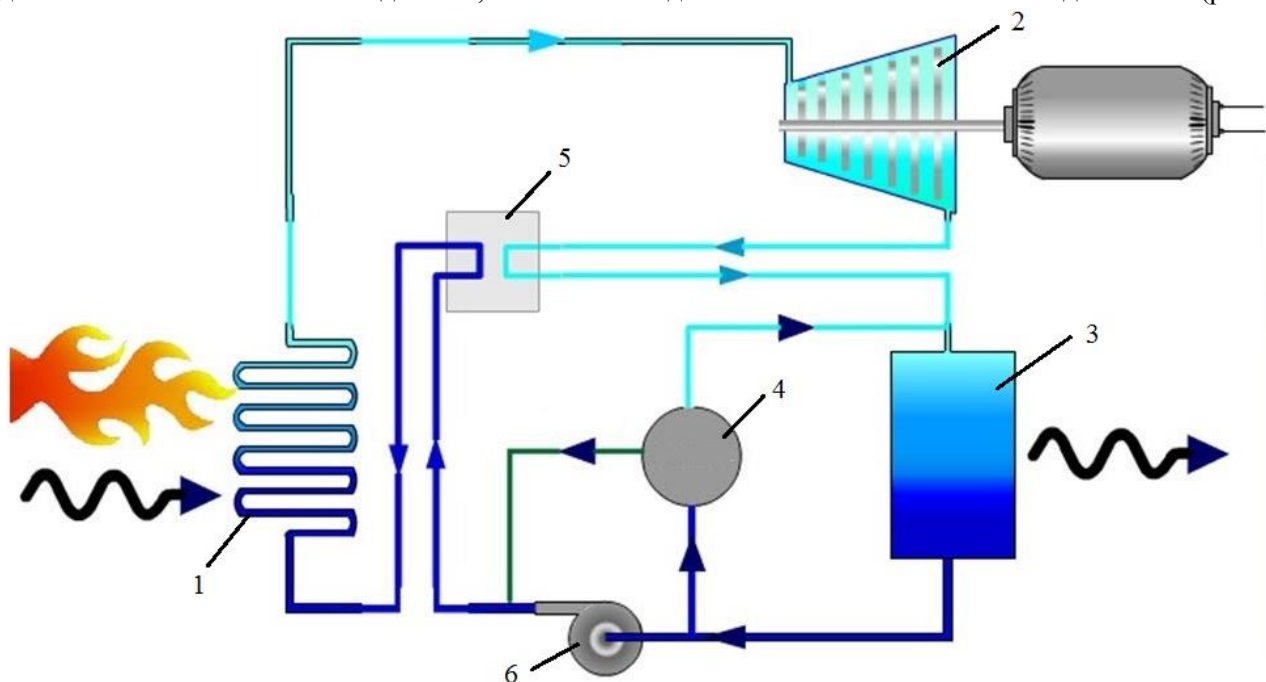


Рисунок 2 – Схема базової установки, що реалізує цикл Каліні: 1 – котел; 2 – турбіна-електрогенератор; 3 – конденсатор-змішувач; 4 – сепаратор; 5 – рекуперативний теплообмінник; 6 – рідинний насос

Це пояснюється тим, що в циклі доцільно при реалізації окремих його процесів змінювати не тільки p і T робочого тіла, а і його склад. Наприклад, для вироблення більшої кількості питомої ро-

боти w необхідно в турбіні 2 розширювати суміш, збагачену NH_3 до 95%, а для зниження тиску в конденсаторі, навпаки, зменшувати вміст аміаку в розчині і тим самим збільшувати середню темпе-

ратуру конденсації. Для зміни концентрації NH_3 в розчині і, як наслідок, досягнення високої ефективності Каліна включив в схему установки сепаратор 4 і конденсатор-змішувач 3.

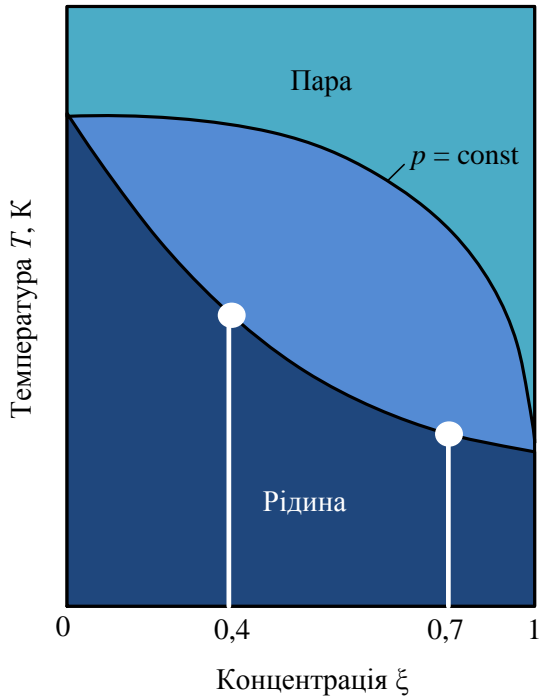


Рисунок 3 – Міцний і слабкий водоаміачні розчини, які поступають в конденсатор-змішувач (див. рис. 2)

Досить велику економію теплоти в циклі вдається забезпечити застосуванням рекуперативного

теплообмінника 5. У сепараторі відбувається розділення утвореного в конденсаторі-змішувачі водоаміачного розчину (див. рис. 3) на міцний і слабкий розчини за змістом в них аміаку.

Таким чином одна з особливостей схеми – спеціально підтримувані різні концентрації аміаку в робочому тілі установки.

Схему, зазначену на рис. 2, Каліна називав базовою [10]. У ній присутні мінімум елементів, що дозволяють зберігати її характерні ознаки і відмінності. Це дозволяє вводити в нові більш складні схеми додаткові процеси і елементи, залишаючи незмінним в ній те, що властиво базовій установці. Як приклад використання такого підходу наведемо (див. рис. 4) схему геотермальної когенераційної установки Каліна.

Зі схеми можна зробити висновок, що вона є двоконтурною; в ній здійснюється замкнутий теплосиловий цикл, в якому виробляється одночасно електроенергія і відносно низькотемпературне тепло. Дійсно, теплоносій з температурою 80°C , який залишає двоконтурний теплообмінник, може застосовуватися для опалення будинків в зимовий час і теплиць протягом цілого року, якщо мати на увазі ісландський проект.

Розгляд схеми показує, що в ній, незважаючи на її деяку складність в порівнянні з рис. 2, використані елементи базової установки.

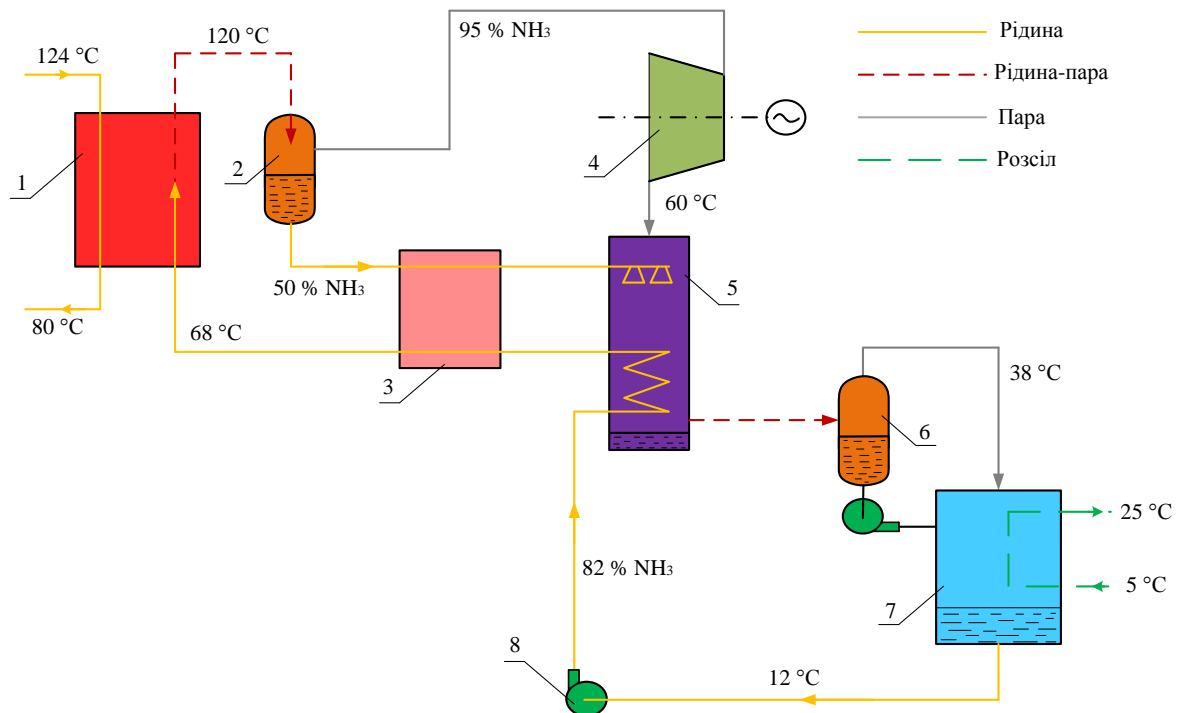


Рисунок 4 – Схема геотермальної станції, що реалізує цикл Каліна: 1 – двоконтурний теплопередавач-теплоприймач; 2 – сепаратор; 3 – рекуператор; 4 – турбіна-електрогенератор; 5 – змішувач; 6 – фазорозділювач; 7 – конденсатор; 8 – рідинний насос

Єдине, що піддано удосконаленню, так це вузол конденсатора-змішувача. У схемі він розділений на кілька елементів: змішувач 5, фазорозділювач 6 і власне конденсатор 7. У конденсатор, враховуючи клімат Ісландії, подається холодний теплоносіє з температурою 5 °С. Каліна пропонував використовувати в цих цілях розсіл [14]. Однак можна застосовувати і повітряні конденсатори, як зазначається в [13], де повідомляється про розробку повітряних конденсаторів для геотермальних станцій [15].

Ще раз торкнемося схеми базової установки, призначеної для реалізації циклу Каліни. Підкреслимо, що в ній не існують зайві елементи. До того ж кожен з них або група елементів виконують цілком певні функції. Наприклад, яким чином в схемі можна домогтися розширення в турбіні майже чистого аміаку, але при цьому здійснювати конденсацію розчину при позитивних температурах і тисках, які кілька перевищують атмосферний? Щоб задовольнити цим взаємовиключним умовам, в схему введені сепаратор, рекуператор і конденсатор-змішувач з функцією абсорбера (див. рис. 2). Це дозволило в потрібному напрямку регулювати концентрацію водоаміачного розчину.

Потрібно відзначити ще одну перевагу циклу Каліни. У його водоаміачному циклі навіть при низьких температурах, які можуть спостерігатися в природі, тиск двофазної суміші перевищує атмосферний. Це дозволяє в порівнянні з пароводяними установками легко долати властиві їм труднощі, викликані вакуумом і великими питомими об'ємами пари [14].



Рисунок 5 – Геотермальна станція, споруджена в Ісландії

У проектуванні і спорудженні геотермальної станції в Ісландії брали участь фірма Каліни «Exergy» і фірма «Power Engineers» зі штаб-квартирою в Хейлі (штат Айдахо). Співробітник цієї фірми Маршалл Ралф (Marshall Ralph) повідомив:

«Ця електростанція, побудована в Ісландії минулої зими (мається на увазі зима 2016 р.), пройшла очікувані з великим нетерпінням випробування на досягнуту потужність. В результаті вона змогла виробити навіть трохи більше енергії, ніж очікувалося. Для нас це була, звичайно, прекрасна новина. Тепер, коли ми наочно продемонстрували, що ця електростанція надійно функціонує і виробляє електроенергію, перед нами відкриті двері банків. А це, в свою чергу, полегшує пошук інших джерел фінансування технології Каліни».

4. Подальше успішне використання технології Каліни

Визначні винаходи Каліни справили великий вплив на розвиток і вдосконалення геотермальної енергетики в усьому світі. Великий інтерес до циклу Каліни проявили в Німеччині. Хоча до цього геотермія вже протягом багатьох років використовувалася в цій країні. Однак побудовані раніше геотермальні станції не призначалися для перетворення витягнутого з глибини Землі тепла в електроенергію; вони безпосередньо забезпечували теплом опалювальні системи.

Єдина в Нойштадті-Глеві (Німеччина) геотермальна станція поряд з теплом виробляє також і електроенергію. Турбіна на цій станції характеризується невисокою потужністю, яка ледь перевищує 200 кВт. Викликано це її роботою по низькокоefficientній технології ORC, яка передбачає використання циклу Ренкіна.

Після успішного тестування компанією «Siemens» технології Каліни було прийнято рішення про спорудження в Баварії (під Мюнхеном в Унтерхахінзі) геотермальної станції потужністю 3,4 МВт [16]. Спеціалісти компанії звернули увагу не тільки на високу ефективність циклу Каліни, але і на те, що, завдяки його винаходу, гарячий теплоносіє може мати температуру не 150-200 °С, а нижче. Пом'якшення вимог до температури верхнього джерела тепла в циклі Каліни дозволяє розробляти підземні пласти, які раніше визнавалися неперспективними.

При створенні станції в Унтерхахінзі використовувалися наступні два ключових рішення: технологія, яка називається умовно як «Цикл Каліни»; технологія HDR, яка розроблена американськими геофізиками і успішно застосовується на ряді об'єктів.

Реалізація цього топпроєкта 21-го століття почалася з забезпечення станції підземним теплом.

Місто Унтерхахінг, що є замовником на ці роботи, а також на проектування, будівництво та обслуговування станції, протягом десяти років витратив 70 млн. євро. Період планування і буріння свердловин тривав три роки. Ризики, пов'язані з бурінням, були застраховані. В результаті на глибині 3346 м був виявлений шар води і пари з температурою 122 °С. Як і прогнозувалося, на поверхню стало надходити зі свердловини 150 л/с води з цією температурою.

У силовій частині геотермальної електростанції застосовувався закритий двоконтурний цикл Каліни з водоаміачним розчином у якості робочого тіла. За програмою, розробленою і заданою винахідником, концентрація розчину в установці змінювалася так, що знижувалися термодинамічні втрати у всіх її частинах.

Побудована в Унтерхахінзі геотермальна станція не тільки скоротила витрати на вироблення електроенергії, але і зменшила викиди в навколишнє середовище діоксиду вуглецю. Розрахунки показують, що місто економить 15% при опаленні споживачів і знижує при цьому емісію CO₂ на 30-40 тис. тон на рік. Останній показник – це дві третини викидів діоксиду вуглецю від загальної емісії традиційної електростанції.

Успішна робота геотермальної станції в Баварії зумовила видачу більше 90 дозволів на проекти, подібні реалізованому в Унтерхахінзі. Загальний обсяг необхідних інвестицій становить близько 4 млрд. євро.

5. Висновки

Основними виробниками енергії в світі є тепло- і атомна енергетика. Стримуючі фактори їх подальшого розвитку – обмеженість природних енергоресурсів.

У зв'язку з цим в останні роки багато уваги приділяється вдосконаленню різних напрямків альтернативної енергетики.

Новаторські роботи Олександра Каліни показали, що великого прогресу можна очікувати в області підвищення ефективності геотермальних електростанцій. Підтвердженням є успішне використання циклу Каліни при спорудженні ряду станцій такого типу.

Створена американськими геофізики технологія HDR дозволяє організовувати теплозабезпечення геотермальних станцій не тільки в місцях активної вулканічної діяльності, але і в інших регі-

онах земної кулі.

На станціях, створених автором на основі власного винайденого ним циклу, вираш в їх термічному ККД становить приблизно 25% в порівнянні з геотермальними установками традиційного типу. Вочевидь, не варто пояснювати, що це – гігантський прогрес в області геотермальної енергетики. Такі високоефективні електростанції будуть економити чверть енергоресурсів і виробляти практично екологічно чисту електроенергію, що не супроводжується емісією діоксиду вуглецю.

Цикл Каліни стане у пригоді також в проекті виробництва електроенергії з використанням температурного градієнта в водах океану. Відомо, що першим був Жорж Клод, який намагався безуспішно в 1920 р. «перетворити» в електрику різницю температур між нагрітою поверхнею океану і його студеними глибинами [17]. У 1974 р. урядом США на Гаваях була створена спеціалізована лабораторія NELHA. Співробітники станції (інженери компаній Lockheed, Dillingham Corp. і Makai Ocean Engineering) побудували експериментальну станцію потужністю всього в 50 кВт. Ефективність використаної технології «Ocean Thermal Energy Conversion» (ОТЕС) була вкрай невисокою. Заплановане застосування в подібній станції циклу Каліни на водоаміачному розчині (при температурі гарячої води 28 °С і холодної 4 °С, тобто при їх різниці всього в 24 °С) дозволить в 2,5 рази збільшити її ефективність у порівнянні з тим, що було раніше досягнуто в лабораторії NELHA.

Вельми привабливо, що і географічно віддалена від тропіків країни, можуть бути також задіяні в проекті ОТЕС. Відзначимо, що на ефективність замкнутого циклу впливає різниця абсолютних температур між температурами верхнього і нижнього джерел тепла. У зв'язку з цим можна, використовуючи в Арктиці низьку температуру повітря і плюсову температуру морської води, досягти їх різниці, що перевищує 30 і навіть 40 градусів. Технологія ОТЕС, завдяки цьому, стане не тільки більш ефективною, а й більш дешевою, так як вже не буде необхідності в кілометрової довжини трубі для подачі в установку глибинної води. Подальшого зростання ефективності можна добитися, передбачаючи застосування циклу Каліни.

Повертаючись знову до геотермальних станцій нового покоління, зауважимо, що інтерес до робіт Каліни зростає. Підтвердженням є часта поява в солідних журналах публікацій, розвиваючих

і поглиблюючих результати його науково-дослідних робіт [18].

Каліна багато років тісно співпрацював з двома видатними фахівцями в області технічної термодинаміки: Майроном Трайбусом і Віктором Бродяньським. З ними він обговорював і потім публікував спільні науково-технічні статті та доповіді [19, 20, 14].

Олександр Каліна – видатний винахідник і вчений – вніс значний вклад в істотне підвищення ефективності геотермальних електростанцій. Його заслуги перед світовою спільнотою – виняткові. Ним протягом відносно невеликого тимчасового періоду пророблена величезна теоретична і практична робота, створені і споруджені станції нового покоління.

Він напружено працював, поспішав зробити багато що із задуманого ним. І багато в чому досяг успіху. Геотермальна енергетика їм сприймалася як порятунок для жителів Землі. Каліна закликав фахівців, – і вчених, і інженерів, – діяти якомога швидше, не чекаючи планетарної катастрофи, коли будуть здобуті останні тонни нафти і останні тисячі кубічних метрів природного газу.

Альтернативну енергетику, побудовану на геотермії, циклі Каліни і технології HDR, чекає успішне майбутнє. І не праві поборники ядерних технологій, лобісти нафтових і газових компаній, вперто не помічаючих прогресу в розвитку і вдосконаленні альтернативних способів виробництва енергії.

Сподіваємося, що створене Олександром Каліною знайде широке застосування, справа його буде продовжена багатьма поколіннями фахівців.

Особистий внесок авторів CRediТ

Лавренченко Г.К.: концептуалізація ідеї, методологія, дослідження, формальний аналіз, написання – оригінальний проект. **Вассерман О.А.:** ресурси, перевірка, верифікація написання – огляд та редагування. **Грудка Б.Г.:** курація даних, візуалізація, програмне забезпечення, написання – огляд та редагування, адміністрування.

Література

1. **Фрадкин В.А.** Альтернативная энергетика. URL:http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=349 (дата звернення 23.12.20).
2. **Розенфельд Л.М., Ткачев А.Г.** Холодильные машины и аппараты. – М.: Госторгиздат, 1960. – 656 с.
3. **Москвичева В.Н., Петин Ю.М.** Опыт и перспективы комплексного использования геотермальных ресурсов Камчатки // Проблемы теплофизики и физической гидродинамики. – Новосибирск: Наука, 1974. – С. 295-304.
4. **Колесников Ю.** Работает подземное тепло. URL:<http://www.russian-Bazar.com/ru/content/7902.htm> (дата звернення 23.12.20).
5. **Вассерман А.А., Лавренченко Г.К., Недоступ В.И.** Одесская термодинамическая школа: её возникновение, становление и развитие // Технические газы. – 2014. – №5. – С. 3-16.
6. **Поповский М.** Мы – там и здесь. URL: <http://www.teneta.rinet.ru/2001/america/non-fiction/txt990649705597065.html> (дата звернення 23.12.20).
7. **Мартыновский В.С.** Циклы, схемы и характеристики термотрансформаторов. – М.: Энергия, 1979. – 288 с.
8. **Kalina A.I.** Combined Cycle with Novel Bottoming Cycle // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 1984. – Vol. 106. – No 4. – P. 737-742.
9. URL: <http://www.rexresearch.com/kalina/kalina.htm>. (дата звернення 23.12.20).
10. **Kalina A.I., Leibowitz H.M.** Application of the Kalina Cycle Technology to Geothermal Power Generation // GRC Transactions. – 1989. – Vol. 13. – P. 605-611.
11. **Kalina A.I.** New Thermodynamic Cycle and Power Systems for Geothermal Applications // GRC Transactions. – 2006. – Vol. 30. – P. 747-750.
12. **Kalina A.I.** Application of Recent Developments in Kalina Cycle Technology to the Utilization of High Temperature Geothermal Sources // GRC Transactions. – 2008. – Vol. 32. – P. 407-411.
13. **Бродянский В.М.** Перспективы использования низких температур окружающей среды в теплоэнергетике и холодильной технике // Холодильная техника. – 2003. – №8. – С. 2-6.
14. **Kalina A., Brodianskii V.** Exergy analysis of Kalina Cycle's thermodynamic efficiency // Proceedings of Flowers '97, Florence Geothermal Congress. – Padova: SGE, 1997. – P. 1143-1155.
15. **Поваров О.А., Саакян В.А., Никольский А.И. и др.** Бинарные электрические станции // Тяжелое машиностроение. – 2002. – №8. – С. 13-15.
16. Геотермия – тепло и энергия из глубин Земли. URL: <http://www.dw.com/ru/a-2966138> (дата звернення 23.12.20).
17. **Санников В.** Киловатты от Нептуна: испарение. URL:<https://www.popmech.ru/technologies/1181>

2-kilovatty-ot-neptuna-isparenie (дата звернення 23.12.20).

18. **Hadi Ghaebi, Towhid Parikhani, Hadi Rostamzadeh et al.** Thermodynamic and thermoeconomic analysis and optimization of a novel combined cooling and power (CCP) cycle by integrating of ejector refrigeration and Kalina cycles // *Energy*. – 2017. – Vol. 139. – P. 262-276.

19. **Kalina A., Tribus M.** Advances in Kalina cycle technology (1980-1991). Part 1: development of a

practical cycle // *Proceedings of Flowers '92, Florence Geothermal Congress*. – New York: Nova Science Publ., 1992. – P. 97-110.

20. **Kalina A., Tribus M.** Advances in Kalina cycle technology (1980-1991). Part 2: iterative improvements // *Proceedings of Flowers '92, Florence Geothermal Congress*. – New York: Nova Science Publ., 1992. – P. 911-919.

Отримана в редакції 11.01.2021, прийнята до друку 08.02.2021

Analysis of geothermal stations working on ammonia-water solution according to the Kalina cycle

G. Lavrenchenko¹, A. Vasserman², B. Hrudka²✉

¹«Institute of Low Temperature Energy Technology», POB 188, Odessa, 65026, Ukraine;

²Odessa National Maritime University, 34 Mechnikov str., Odessa, 65029, Ukraine;

³Odessa National Academy of Food Technologies, 1/3 Dvoryanskaya str., Odessa, 65082, Ukraine

✉ e-mail: ¹lavrenchenko.g.k@gmail.com; ²avas@paco.net; ³bogdangennadievich@gmail.com

ORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0002-8239-7587>; ²<https://orcid.org/0000-0001-8147-8417>;

³<https://orcid.org/0000-0003-1200-5442>

The limited fossil resources spent on thermal and nuclear power plants are alarming. In addition, their use significantly worsens the environmental situation. The use of renewable energy sources as a primary fuel is a very promising area in the production of electricity and heat. In recent years, much attention has been paid to geothermal energy, i.e. thermal processes occurring in the bowels of the Earth, to produce not only heat but also electricity. A curious engineer and talented scientist Oleksandr Kalina made a significant contribution to the creation of efficient geothermal plants of this type. He created a cycle named after him, in which an ammonia-water solution is used as a working fluid. The peculiarity of the installation that implements the Kalina cycle is that its main elements provide for such changes in solution concentrations, which cause a significant increase in thermal efficiency. Cycles and schemes of installations using ammonia-water solution are considered. Their high efficiency is confirmed. It is shown that during the transition from water to water-ammonia solution, a marked increase in specific work can be observed. It is noted that at the initial stage geothermal stations were built in areas of high volcanic activity, hot springs and geysers. It is reported that the construction of stations with the Kalina cycle can focus on the technology of "Hot Dry Rock", which allows you to place them almost anywhere on our planet. It is noted that the mitigation of the requirements for the temperature of the upper heat source in the Kalina cycle allows the development of underground layers, which were previously considered unpromising. The possibilities of more efficient electricity generation using the Kalina cycle, which uses the natural temperature difference between the heated surface of the ocean and its cold depths, are analyzed. It is noted that alternative energy, based on geothermal energy, the Kalina cycle and HDR technology, has a successful future.

Keywords: Alternative energy; Rankine cycle; Ammonia-water solution; Kalina cycle; Geothermy; Geothermal power plant; Hot Dry Rock (HDR) technology

References

1. **Fradkin, V.A.** Alternative energy. Retrieved December 23, 2020, from http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=349.
2. **Rozenfeld, L.M., Tkachev, A.G.** (1960) Refrige-

rating machines and apparatus. *Moscow: Gostorgizdat*, 656.

3. **Moskvicheva, V.M., Petin, Yu.M.** (1974) Experience and prospects for the integrated use of geothermal resources in Kamchatka. *Problems of thermophysics and physical hydrodynamics, Novosibirsk: Nauka*, 295-304.

4. **Kolesnikov, Yu.** Underground heat works. Retrieved December 23, 2020, from <http://www.russian-Bazar.com/ru/content/7902.htm>.

5. **Vasserman, A.A., Lavrenchenko, G.K., Nedostup, V.I.** (2014) Odessa thermodynamic school: its emergence, formation and development. *Tekhnicheskie Gazy*, 5, 3-16.

6. **Popovskii, M.** We are there and here. Retrieved December 23, 2020, from <http://www.teneta.rinet.ru/2001/america/non-fiction/txt990649705597065.html>.

7. **Martynovskiy, V.S.** (1979) Cycles, circuits and characteristics of thermotransformers. *Moscow: Energiya*, 288.

8. **Kalina, A.I.** (1984) Combined Cycle with Novel Bottoming Cycle. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 106, 4, 737-742.

9. Retrieved December 23, 2020, from <http://www.research.com/kalina/kalina.htm>.

10. **Kalina, A.I., Leibowitz, H.M.** (1989) Application of the Kalina Cycle Technology to Geothermal Power Generation. *GRC Transactions*, 13, 605-611.

11. **Kalina, A.I.** (2006) New Thermodynamic Cycle and Power Systems for Geothermal Applications. *GRC Transactions*, 30, 747-750.

12. **Kalina, A.I.** (2008) Application of Recent Developments in Kalina Cycle Technology to the Utilization of High Temperature Geothermal Sources. *GRC Transactions*, 32, 407-411.

13. **Brodyanskii, V.M.** (2003) Prospects for using low ambient temperatures in heat and power engineering

and refrigeration. *Kholodilnaya Tekhnika*, 8, 2-6.

14. **Kalina, A., Brodianskii, V.** (1997) Exergy analysis of Kalina Cycle's thermodynamic efficiency. *Proceedings of Flowers '97, Florence Geothermal Congress, Padova: SGE*, 1143-1155.

15. **Povarov, O.A., Saakjan, V.A., Nikolskiy, V.A. et al.** (2002) Binary electric stations. *Tjazeloe Mashinostroenie*, 8, 13-15.

16. Geothermy – heat and energy from the depths of the Earth. Retrieved December 23, 2020, from <http://www.dw.com/ru/a-2966138>.

17. **Sannykov, V.** Kilowatts from Neptune: evaporation. Retrieved December 23, 2020, from <https://www.popmech.ru/technologies/11812-kilovatty-ot-neptuna-isparenie/>.

18. **Hadi, Ghaebi, Towhid, Parikhani, Hadi, Rostamzadeh et al.** (2017) Thermodynamic and thermoeconomic analysis and optimization of a novel combined cooling and power (CCP) cycle by integrating of ejector refrigeration and Kalina cycles. *Energy*, 139, 262-276.

19. **Kalina, A., Tribus, M.** (1992) Advances in Kalina cycle technology (1980-1991). Part 1: development of a practical cycle. *Proceedings of Flowers '92, Florence Geothermal Congress, New York: Nova Science Publ.*, 97-110.

20. **Kalina, A., Tribus, M.** (1992) Advances in Kalina cycle technology (1980-1991). Part 2: iterative improvements. *Proceedings of Flowers '92, Florence Geothermal Congress, New York: Nova Science Publ.*, 911-919.

Received 11 January 2021

Approved 08 February 2021

Available in Internet 11 February 2021