

УДК 62-176.2

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИНАРНЫХ ЦИКЛОВ В УТИЛИЗАЦИИ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ НА ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

А.М. Гафуров¹, Б.М. Осипов¹, Н.М. Гафуров², Р.З. Гатина²

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

²Казанский национальный исследовательский технологический университет,
г. Казань, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3470-4933>, progress150987@rambler.ru

Резюме: Рассмотрен опыт проектирования и эксплуатации отечественных бинарных геотермальных электростанций, особенности применения гидротермальных источников в качестве источников теплоты для бинарных энергоустановок на низкокипящих рабочих телах по выработке электроэнергии. Предлагается в качестве низкокипящего рабочего тела в бинарных циклах использовать сжиженный углекислый газ или пропан.

Ключевые слова: гидротермальные источники, технологии бинарного цикла, низкокипящие рабочие тела.

PERSPECTIVES OF USE OF BINARY CYCLES IN UTILIZATION OF LOW- POTENTIAL WARMTH ON GEOTHERMAL POWER STATIONS

A.M. Gafurov¹, B.M. Osipov¹, N.M. Gafurov², R.Z. Gatina²

¹Kazan state power engineering university, Kazan, Russia

²Kazan national research technological university, Kazan, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3470-4933>, progress150987@rambler.ru

Abstract: Experience of design and operation of domestic binary geothermal power stations is considered. Features of application of hydrothermal sources in quality of sources of warmth for binary power installations on the low-boiling working mediums on electricity production. It is offered as the low-boiling working medium in binary cycles to use the liquefied carbon dioxide gas or propane.

Keywords: hydrothermal sources, technologies of a binary cycle, the low-boiling working mediums

В настоящее время существует достаточное количество геотермальных электростанций, использующих энергию низкоэнтропийных гидротермальных источников, в которых реализован органический цикл Ренкина (ОЦР). Температура воды в гидротермальных источниках имеет различную температуру, от нескольких десятков до 300°C. В 1965 году советские ученые С.С. Кутателадзе и А.М. Розенфельд получили патент на получение электроэнергии из горячей воды с температурой более 80°C. В 1967 году в СССР на Камчатке была построена и пущена в опытно-промышленную эксплуатацию первая в мире Геотермальная электростанция (ГеоЭС) с бинарным циклом (фреоновая энергетическая установка УЭФ-90/05) – Паратунская ГеоЭС, мощностью 670

кВт, с применением фреона (R12) в качестве рабочего тела паросиловой установки. Греющей средой для установки служила геотермальная вода Средне-Паратунского месторождения с температурой 80°C [1, 2].

Технологическая схема Паратунской ГеоЭС реализует органический цикл Ренкина, который совершается низкокипящим рабочим телом (R12) в закрытом теплосиловом контуре, в котором за счет теплоты термальной воды образуется пар заданных параметров. В соответствии со схемой (рис. 1) жидкий фреон питательным насосом 4 подается последовательно в три подогревателя 3, испаритель 2 и пароперегреватель 1 поверхностного типа. После пароперегревателя 1 фреоновый пар с давлением 1,4 МПа и температурой 75°C направляется в турбину 7, где расширяется до конечного давления 0,5 МПа и при температуре 15°C конденсируется в поверхностном конденсаторе 6. Жидкий фреон поступает через промежуточный ресивер 5 к питательным насосам 4, и цикл повторяется [3].

В течение 1967–1974 гг. на Камчатке в лаборатории натуральных испытаний Института теплофизики СО АН СССР проводились эксплуатационные исследования, подтвердившие надежную работу энергоустановки при использовании столь низкотемпературного источника теплоты в 80°C. Однако в СССР сооружение таких станций не получило должного развития из-за низкой стоимости органического топлива в стране.

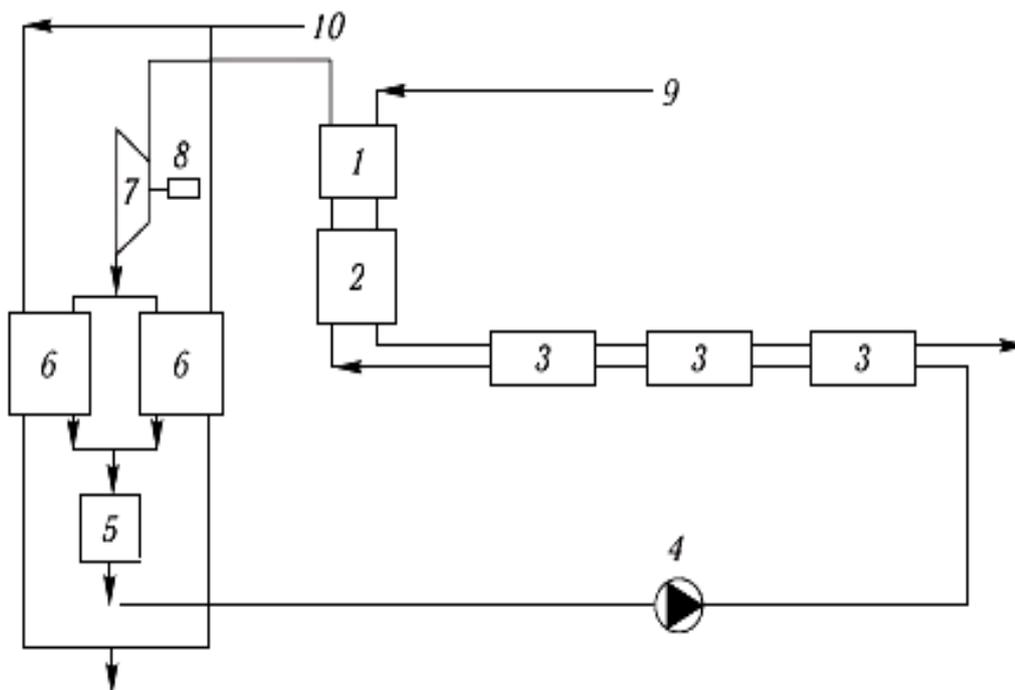


Рис. 1. Схема Паратунской бинарной ГеоЭС: 1 – пароперегреватель; 2 – испаритель; 3 – подогреватели низкокипящего рабочего агента; 4 – питательный насос; 5 – ресивер; 6 – конденсаторы; 7 – турбина; 8 – генератор; 9 – вход горячей термальной воды; 10 – вход охлаждающей воды

Сегодня бинарные ГеоЭС в России могут быть экономически эффективными при температуре термальной воды 70–200°C. К настоящему времени бинарные ГеоЭС работают во многих странах, их суммарная мощность превышает 500 МВт. В настоящее время за рубежом несколько компаний (в первую очередь израильская фирма "Ормат")

Технология бинарного цикла основана на использовании среднетемпературного тепла сбросного сепарата (горячей воды). Ранее горячую воду, выходящую вместе с паром из геотермальной скважины, не использовали в процессе выработки электроэнергии. Однако в представленном замкнутом цикле (рис. 2) горячую воду направляют в специально разработанный испаритель, где осуществляется процесс нагрева и испарения низкокипящего рабочего тела – хладона (R-134a). Полученный хладоновый пар под давлением раскручивает турбину (БТ). Затем он охлаждается, конденсируется и становится жидкостью, которую направляют на сжатие в насос, и цикл повторяется.

Технические характеристики пилотного проекта Паужетской бинарной ГеоЭС мощностью 2,5 МВт приведены в табл. 1 [8].

Таблица 1

Технические характеристики пилотного проекта Паужетской бинарной ГеоЭС

Показатель параметра, размерность	Значение
Установленная мощность, кВт	2500
Температура теплоносителя – горячей воды (сепарата) на входе, °С	120
Температура горячей воды (сепарата) на выходе из испарителя, °С	62
Расход горячей воды (сепарата), кг/с	118
Температура охлаждающей воды из реки Паужетка, °С	8
Расход охлаждающей воды из реки Паужетка, м ³ /ч	1500
Температура пара (R-134a) перед турбиной (БТ), °С	76
Давление пара (R-134a) перед турбиной (БТ), МПа	2,3
Температура пара (R-134a) в конденсаторе, °С	33
Давление пара (R-134a) в конденсаторе, МПа	0,76
Расход хладона (R-134a) в контуре, кг/с	144,8

Планируется строительство четвертого энергоблока Верхне-Мутновской ГеоЭС электрической мощностью 6,5 МВт с комбинированным бинарным циклом. На этот энергоблок Верхне-Мутновской ГеоЭС будет подаваться избыточная пароводяная смесь из существующих скважин, не используемая на первых трех энергоблоках. В верхней части цикла будет использована противодавленческая паровая турбина мощностью 2,5 МВт модульного типа, а в нижней части цикла – бинарная энергоустановка на низкокипящем рабочем теле мощностью 4 МВт. На рис. 3 показана тепловая схема предполагаемого четвертого энергетического блока мощностью 6,5 МВт с комбинированным циклом для опытно-промышленной Верхне-Мутновской ГеоЭС [9].

Климатические условия на Мутновском геотермальном месторождении уникальны в связи с его расположением в северном районе на значительной высоте над уровнем моря. Среднегодовая температура воздуха - 1,5°С, в течение восьми месяцев (с октября по май) средняя температура ниже -5°С. Это позволяет понизить температуру конденсации в энергетическом цикле до 10–20°С, что дает большой прирост (на 10–20%) в выработке электроэнергии по сравнению с ГеоЭС, которые расположены в районах жаркого или умеренного климата.

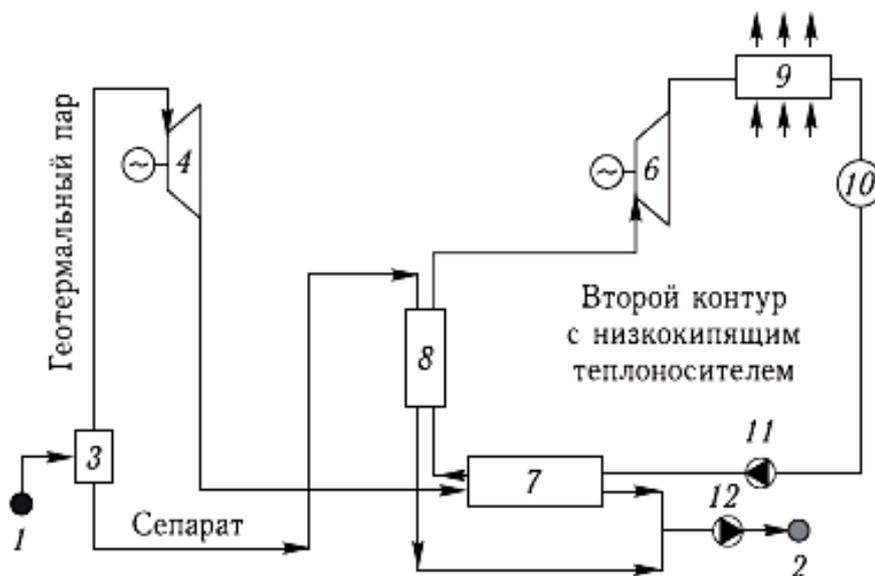


Рис. 3. Принципиальная тепловая схема комбинированной геотермальной электростанции с бинарным циклом мощностью 6,5 МВт для Верхне-Мутновской ГеоЭС: 1 – добычная скважина; 2 – нагнетательная скважина; 3 – сепаратор; 4 – паровая турбина; 5 – генератор; 6 – турбина на низкокипящем рабочем агенте; 7 – конденсатор-испаритель; 8 – пароперегреватель; 9 – воздушный конденсатор; 10 – ресивер (конденсатосборник); 11 – циркуляционный насос; 12 – нагнетательный насос

Турбина 4 (рис. 3) мощностью 2,5 МВт работает на геотермальном паре при давлении 0,8 МПа и температуре около 170°C (степень его влажности не превышает 0,05%), получаемом при сепарации 3 пароводяной смеси, поступающей с добычных скважин 1. Водяной пар после турбины 4, с давлением 0,11 МПа и температурой около 100°C, поступает в конденсатор-испаритель 7, где конденсируется, отдавая свою теплоту на нагрев и испарение низкокипящего теплоносителя (изобутана), циркулирующего во втором контуре. Низкокипящий теплоноситель после пароперегревателя 8 поступает в турбину 6 мощностью 4 МВт. Охлаждение и последующее сжижение низкокипящего теплоносителя осуществляется в воздушном конденсаторе 9, который соединен с ресивером 10, откуда циркуляционным насосом 11 сжиженный теплоноситель направляется в конденсатор-испаритель 7. Сепарат после пароперегревателя 8 и конденсат геотермального пара из испарителя 7 направляются к нагнетательной скважине 12 для закачки по скважине 2 в подземный горизонт.

Рабочие тела бинарной энергоустановки должны иметь низкую температуру замерзания для обеспечения нормальной зимней эксплуатации и предотвращения замерзания при аварийных остановах. В качестве низкокипящего теплоносителя второго контура выбран изобутан – углеводород класса алканов, изомер нормального бутана. Его температура кипения минус 11,75°C, температура плавления минус 159,42°C. Экологически чистая схема использования низкокипящего теплоносителя (изобутана) с воздушным конденсатором позволяет исключить прямой контакт рабочего тела с окружающей средой [10].

В ходе разработки, изготовления и испытания данных комбинированных энергоблоков необходимо решить целый ряд научно-технических вопросов, таких как выбор оптимального низкокипящего рабочего тела второго контура, определение предельной минимальной температуры охлаждения конденсата, выбор оптимального метода удаления неконденсирующихся газов из конденсатора-испарителя, вопросы по

турбины, куда поступает отработавший в турбине пар при давлении в 3,5 кПа и температуре 28,57°C. Конденсация пара сопровождается выделением скрытой теплоты парообразования (около 2150 кДж/кг), которая отводится на нагрев и испарение сжиженного газа CO₂ (или C₃H₈) до температуры перегретого газа 21,67°C. Далее перегретый газ CO₂ (или C₃H₈) расширяется в турбодетандере, который соединен с электрогенератором. На выходе из турбодетандера отработавший в турбине газ направляют на охлаждение в конденсатор водяного или воздушного охлаждения, где, в процессе охлаждения газа CO₂ (или C₃H₈) ниже его температуры насыщения, происходит интенсивное сжижение, после чего сжиженный газ направляют в конденсатный насос, и цикл повторяется.

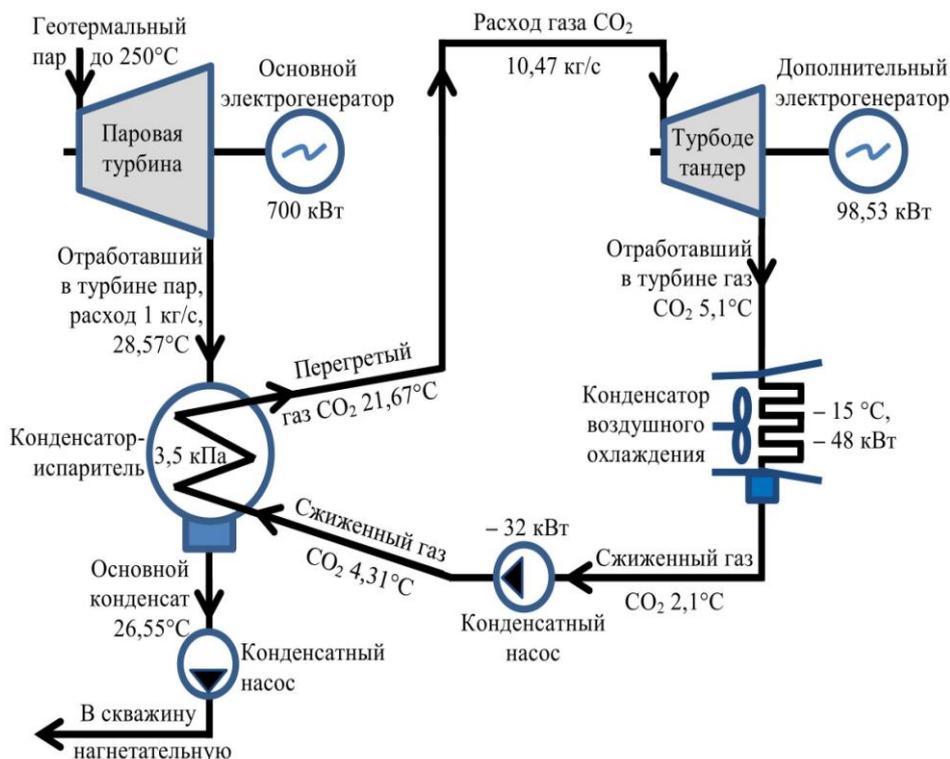


Рис. 5. Принципиальная схема бинарной энергоустановки на CO₂, охлаждаемого воздушными ресурсами окружающей среды при температуре минус 15°C

Сравним основные термодинамические и теплофизические свойства (табл. 2) предлагаемых низкокипящих рабочих тел CO₂ и C₃H₈ с применяемыми R-134a и изобутаном (C₄H₁₀) [13, 14].

Таблица 2

Термодинамические и теплофизические показатели низкокипящих рабочих тел					
Показатель параметра, размерность	R-134a	C ₄ H ₁₀	CO ₂	C ₃ H ₈	Преимущества
Критическая температура, °C	101,06	134,66	31	96,7	CO ₂
Критическое давление, МПа	4,0593	3,629	7,3773	4,2512	-
Температура тройной точки, °C	-103,3	-159,42	-56,56	-187,6	CO ₂

Давление тройной точки, МПа	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-8}$	0,518	$1,7 \cdot 10^{-10}$	CO ₂
Температура кипения при давлении не ниже 0,1 МПа, °С	-26,07	-11,75	-56,56	-42,11	CO ₂
Плотность жидкой фазы, кг/м ³	1278	575	896	522	R-134a
Плотность газообразной фазы, кг/м ³	17	5	114	12	CO ₂
Кинематическая вязкость жидкой фазы, см ² /с	0,002	0,0033	0,001	0,0023	CO ₂
Кинематическая вязкость газообразной фазы, см ² /с	0,006	0,014	0,0013	0,0063	CO ₂
Теплопроводность жидкой фазы, Вт/м·К	0,090	0,097	0,1043	0,1034	CO ₂
Теплопроводность газообразной фазы, Вт/м·К	0,012	0,015	0,0216	0,0163	CO ₂
Удельная теплота парообразования (фазового перехода), кДж/кг	195	350	215	368	-
Изобарная теплоемкость жидкой фазы при докритических параметрах, кДж/кг·К	1,33-7,1	2,3-10,3	2,4-16	2,48-8,6	CO ₂

Из табл. 2 видно, что углекислый газ CO₂ характеризуется высокой теплопроводностью жидкой и газообразной фазы, имеет низкую кинематическую вязкость жидкой и газообразной фазы, характеризуется высокой плотностью газообразной фазы. При этом использование сжиженного CO₂ в качестве рабочего тела и охлаждающей жидкости в конденсаторе паровой турбины при температуре от 5°С до 31°С характеризуется повышенной изобарной теплоемкостью от 2,4 до 16 кДж/кг·К, что является соизмеримым показателем для воды H₂O при докритических параметрах.

Актуальность проблемы импорт замещения решаются созданием конструкций бинарных энергоустановок из обычных материалов и отечественных комплектующих (низкий уровень температур, минимальные окружные скорости и напряжения).

Выводы

Россия располагает огромными запасами геотермальной теплоты. В северных районах Дальнего Востока, и особенно на Камчатке и Курильских островах, достаточно подземных источников теплоты для того, чтобы полностью обеспечить теплом и электроэнергией большие районы. Возможность использования различных температурных режимов и климатических условий окружающей среды позволяет эффективно производить электроэнергию с помощью бинарных энергоустановок на CO₂ и C₃H₈:

1. Температурный диапазон использования сжиженного газа CO₂ в качестве низкокипящего рабочего тела в тепловом контуре бинарного цикла ограничивается показателями критической температуры в 31°С и температурой в тройной точке минус 56,56°С. Поэтому использование сжиженного газа CO₂ в температурном диапазоне от 60°С до минус 55°С позволит обеспечить приемлемые давления контура циркуляции теплового двигателя и затраты на его сжатие.

2. Температурный диапазон использования сжиженного газа C₃H₈ в качестве низкокипящего рабочего тела в тепловом контуре бинарного цикла ограничивается показателями критической температуры в 96,7°С и температурой насыщения при давлении не менее 0,1 МПа. Поэтому использование сжиженного газа C₃H₈ в температурном диапазоне от 100°С до минус 42°С позволит исключить проблемы

создания вакуума и обеспечения прочности и герметичности трубопроводов и арматуры.

Литература

1. Огуречников Л.А. Геотермальные ресурсы в энергетике // Альтернативная энергетика и экология. 2005. № 11. С. 58–66.
2. Поваров О.А., Васильев В.А., Томков Ю.П., Томаров Г.В. Геотермальные электрические станции с комбинированным циклом для северных районов России. [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=223.
3. Использование геотермальной энергии для выработки электроэнергии. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <https://metallurgy.zp.ua/ispolzovanie-geotermalnoj-energii-dlya-vyrabotki-elektroenergii/>.
4. Гафуров А.М. Зарубежный опыт эксплуатации установок на низкокипящих рабочих телах // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2014. Т. 24., №4 (24). С. 26–31.
5. Паужетская ГеоЭС на Камчатке увеличит мощность на 2,5 МВт к концу 2012 г. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://neftegaz.ru/news/view/102910-Pauzhetskaya-GeoES-na-Kamchatke-uvlichit-moschnost-na-25-MVt-k-kontsu-2012-g>.
6. Бинарный энергоблок на Паужетской ГеоЭС. Инновации в действии. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://blog.rushydro.ru/?p=1753>.
7. Паужетская ГеоЭС испытала экспериментальную бинарную технологию. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.ortea.ru/News/1183.html>.
8. Стратегия развития возобновляемой энергетики России. [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://nts-es.ru/sites/default/files/strategiya_razvitiya_vozobnovlyemoy_energetiki_rossii.pdf.
9. Мутновский геотермальный энергетический комплекс на Камчатке. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.kamlib.ru/resourses/mutn2.htm>.
10. Манушин Э.А., Бирюков В.В. Паротурбинная установка геотермальной электростанции бинарного цикла для геотермальных месторождений камчатского края. // Наука и образование. 2011. № 09. 8 с.
11. Патент на изобретение №2560505 РФ. Способ работы тепловой электрической станции / Гафуров А.М., Гафуров Н.М. 20.08.2015 г.
12. Патент на изобретение №2564748 РФ. Способ работы тепловой электрической станции / Гафуров А.М., Гафуров Н.М. 10.10.2015 г.
13. Гафуров А.М. Использование сбросной низкопотенциальной теплоты для повышения экономической эффективности ТЭС в зимний период времени. // Энергетика Татарстана. 2014. № 3-4 (35-36). С. 69–76.
14. Гафуров А.М., Осипов Б.М., Гафуров Н.М., Гатина Р.З. Способ утилизации тепловых вторичных энергоресурсов промышленных предприятий для выработки электроэнергии. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 11-12. С. 37–43.

Авторы публикации

Гафуров Айрат Маратович – инженер I категории отдела «Управление научно-исследовательской работы» Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: progress150987@rambler.ru.

Осипов Борис Михайлович – канд.техн.наук., профессор кафедры «Энергетическое машиностроение» (ЭМ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). E-mail: obm0099@yandex.ru.

Гафуров Наиль Маратович – студент 4 курса кафедры «Химия и технология высокомолекулярных соединений» Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ). E-mail: hankmpro@mail.ru.

Гатина Резеда Зуфаровна – студентка 4 курса, кафедры «Химия и технология высокомолекулярных соединений» Казанского национального исследовательского технологического университета (КНИТУ).

References

1. Ogurechnikov L.A. Geothermal resources in power // Alternative power engineering and ecology. 2005. No. 11. pp. 58-66.
2. Cooks O. A., Vasilyev V.A., Tomkov Yu.P., Tomarov G.V. Geothermal power plants with the combined cycle for the northern regions of Russia. [Electronic resource] / Access mode: http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=223.
3. Use of geothermal energy for power generation. [Electronic resource] / Access mode: <https://metallurgy.zp.ua/ispolzovanie-geotermalnoj-energii-dlya-vyrabotki-elektroenergii/>.
4. Gafurov A.M. Foreign operating experience of installations on the low-boiling working medium. // Bulletin of the Kazan state power university. 2014. T. 24. No. 4 (24). pp 26-31.
5. Pauzhetskaya GEOES on Kamchatka will increase power by 2,5 MW by the end of 2012. [Electronic resource] / Access mode: <http://neftegaz.ru/news/view/102910-Pauzhetskaya-GeoES-na-Kamchatke-uvlechit-moschnost-na-25-MVt-k-kontsu-2012-g>.
6. The binary power unit on Pauzhetskaya GEOES. Innovations in operation. [Electronic resource] / Access mode: <http://blog.rushydro.ru/?p=1753>.
7. Pauzhetskaya GEOES tested experimental binary technology. [Electronic resource] / Access mode: <http://www.ortea.ru/News/1183.html>.
8. Strategy of development of renewable power industry of Russia. [Electronic resource] / Access mode: http://nts-ees.ru/sites/default/files/strategiya_razvitiya_vozobnovlyaemoy_energetiki_rossii.pdf.
9. Mutnovsky geothermal power complex on Kamchatka. [Electronic resource] / Access mode: <http://www.kamlib.ru/resources/mutn2.htm>.
10. Manushin E.A., Biryukov V.V. Steam turbine installation of geothermal power plant of a binary cycle for geothermal fields of Kamchatka Krai. // Science and education. 2011. No. 09. 8 pages.
11. Patent for the invention No. 2560505 of the Russian Federation. Mode of work of thermal power plant / Gafurov A.M., Gafurov N.M. 20.08.2015.
12. Patent for the invention No. 2564748 of the Russian Federation. Mode of work of thermal power plant / Gafurov A.M., Gafurov N.M. 10.10.2015.
13. Gafurov A.M. Use of waste low-potential warmth for increase of economic efficiency of thermal power plant in a winter time span. // Power industry of Tatarstan. 2014. No. 3-4 (35-36). pp 69-76.
14. Gafurov A.M., Osipov B.M., Gafurov N.M., Gatina R.Z. A way of utilization of thermal secondary energy resources of the industrial enterprises for power generation. // News of higher educational institutions. Power problems. - 2016. - No. 11-12. – pp 37-43.

Authors of the publication

Airat M. Gafurov – engineer of the I category of department «Management of research work» Kazan state power engineering university (KSPEU). E-mail: progress150987@rambler.ru.

Boris M. Osipov – cand. tech. sci., professor department «Power engineering» Kazan state power engineering university (KSPEU). E-mail: obm0099@yandex.ru.

© *А.М. Гафуров, Б.М. Осипов, Н.М. Гафуров, Р.З. Гатина*

Nail M. Gafurov – 4th year student, department «Chemistry and Technology of Macromolecular Compounds» Kazan National Research Technological University (KNRTU). E-mail: hankmpro@mail.ru.

Rezeda Z. Gatina – 4th year student, department «Chemistry and Technology of Macromolecular Compounds» Kazan National Research Technological University (KNRTU).

Поступила в редакцию

2 мая 2017 г.