



Геотермальная энергетика: технологии и оборудование

В настоящее время геотермальная энергия используется в 51 стране в электрогенерирующих технологиях. За пять лет (с 2010 по 2015 годы) суммарная мощность геотермальных электростанций возросла на 16 % и составила 12 635 МВт. Существенное увеличение мощности геотермальных электростанций обусловлено экологической безопасностью, существенной экономической эффективностью и высокими показателями использования установленной мощности.

Сегодня геотермальные электростанции (ГеоЭС) эксплуатируются в 26 странах с ежегодной выработкой электроэнергии около 73 549 ГВт [1]. Ожидаемый рост установленной мощности геотермальных электростанций к 2020 году — порядка 21 443 МВт (рис. 1). Значительные показатели в области геотермальной энергетики имеют США: общая установленная мощность ГеоЭС составляет 3450 МВт при ежегодной выработке электроэнергии 16,6 МВт/ч. На втором месте Филиппины с суммарной мощностью ГеоЭС 1870 МВт, на третьем Индонезия — 1340 МВт. При этом наиболее существенный прирост мощности ГеоЭС за последние пять лет отмечен в Турции — с 91 до 397 МВт, то есть на 336 %. Далее следуют Германия — на 280 % (с 6,6 до 27 МВт) и Кения — на 194 % (с 202 до 594 МВт).

В современной геотермальной энергетике наиболее распространёнными яв-

ляются ГеоЭС с тепловой схемой турбоустановки, включающей дополнительное расширение геотермального пара, общая мощность которой составляет 5079 МВт. На перегретом геотермальном паре работают энергоблоки ГеоЭС суммарной мощностью 2863 МВт. Общая мощность энергоблоков ГеоЭС с двумя ступенями расширения пара равна 2544 МВт.

Геотермальные бинарные энергоблоки с органическим циклом Ренкина получают всё большее распространение, и на сегодняшний момент их суммарная мощность превышает 1800 МВт. Средняя единичная мощность бинарных энергоблоков равна 6,3 МВт, энергоблоков с одним давлением сепарации — 30,4 МВт, с двумя давлениями сепарации — 37,4 МВт, а энергоблоков, работающих на перегретом паре, — 45,4 МВт.

Сегодня геотермальные электростанции эксплуатируются в 26 странах с ежегодной выработкой электроэнергии около 73 549 ГВт. Ожидаемый рост установленной мощности геотермальных электростанций к 2020 году — около 21 443 МВт. Значительные показатели в области геотермальной энергетики имеют США

УДК 620.9-62-93

Геотермальная энергетика: технологии и оборудование

Г. В. Томаров, компания ООО «Геотерм-М»

Геотермальные электростанции эксплуатируются в 26 странах с ежегодной выработкой более 70,5 МВт. Основной прирост в суммарной установленной мощности ГеоЭС в мире в последние годы осуществляется за счёт развития бинарных геотермальных энерготехнологий. Геотермальные электростанции работают на геотермальном теплоносителе в виде перегретого пара, пароводяной смеси и горячей воды. ГеоЭС с бинарным циклом в основном применяются на месторождениях с низкотемпературной горячей водой (90–120 °С), которые характеризуются использованием во втором контуре низкокипящего рабочего тела. Наиболее перспективными российскими геотермальными энергетическими проектами являются расширение Мутновской ГеоЭС (50 МВт) и Верхне-Мутновской ГеоЭС (12 МВт).

Ключевые слова: геотермальная электростанция, теплоноситель, бинарный энергоблок, турбоустановка, сепаратор, органическое рабочее тело.

UDC 620.9-62-93

Geothermal energy: technologies and equipment

G. V. Tomarov, "Geoterm-M", Ltd.

Geothermal power plants are operated in 26 countries with an annual production of 70.5 MW. The main increase in the total installed capacity of GeoPP in the world in recent years is due to the development of binary geothermal energy technologies. Geothermal power plants operate on a geothermal coolant in the form of superheated steam, steam-water mixture and hot water. Geothermal power plants with a binary cycle are mainly used in deposits with low-temperature hot water (90–120 °C), which are characterized by the use of a low-boiling working medium in the second circuit. The most promising Russian geothermal energy projects are the expansion of the Mutnovskaya GeoPP (50 MW) and Verkhne-Mutnovskaya GeoPP (12 MW).

Keywords: geothermal power station, coolant, binary power unit, turbine unit, separator, organic working medium.

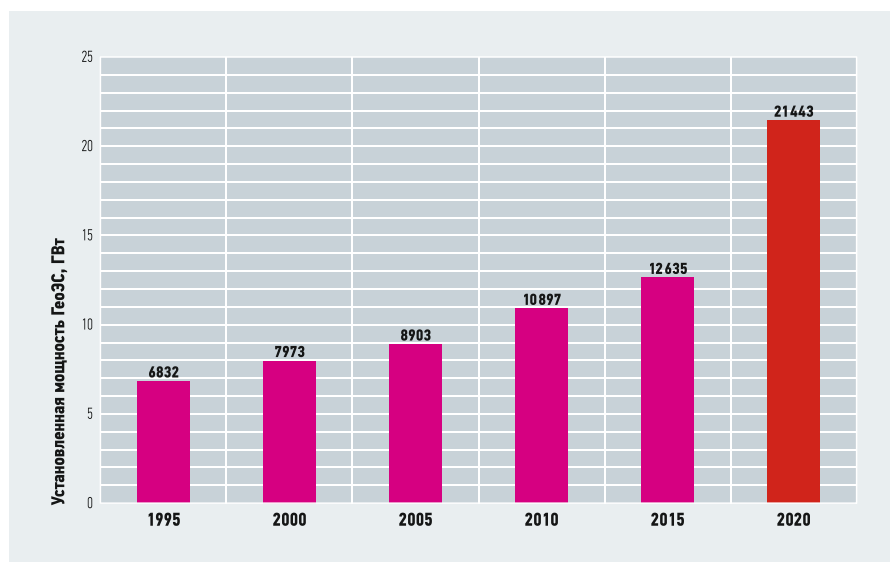


Рис. 1. Рост суммарной установленной мощности геотермальных электростанций в мире

Основной прирост установленной мощности современных геотермальных электростанций в мире в последние годы осуществляется в значительной степени за счёт сооружения новых ГеоЭС с энергоблоками бинарного цикла.

Технологические схемы современных ГеоЭС можно классифицировать по фазовому состоянию геотермального теплоносителя, типу термодинамического цикла и применяемых турбин (рис. 2). Геотермальные электростанции работают на геотермальном теплоносителе в виде перегретого пара, пароводяной смеси и горячей воды. Прямой цикл ГеоЭС характеризуется использованием во всём технологическом тракте в качестве рабочей среды геотермального теплоносителя.

ГеоЭС с бинарным циклом в основном применяются на месторождениях с низкотемпературной горячей водой (90–120 °С), которые характеризуются использованием во втором контуре низкокипящего рабочего тела. Двухконтурные ГеоЭС предполагают использование бинарного и комбинированного бинарного циклов. В комбинированном цикле ГеоЭС паровая турбина работает на геотермальном паре, а утилизация тепла отработавшего или сбросного геотермального теплоносителя в виде жидкой фазы осуществляется в бинарной энергоустановке второго контура.

Конденсационные турбины одноконтурных ГеоЭС работают на геотермальном перегретом паре, а также на насыщенном паре, отсепарированном из пароводяной смеси. Турбины с противодавлением используются на одноконтурных ГеоТЭС, которые наряду с выработкой электроэнергии обеспечивают теплом системы теплоснабжения.

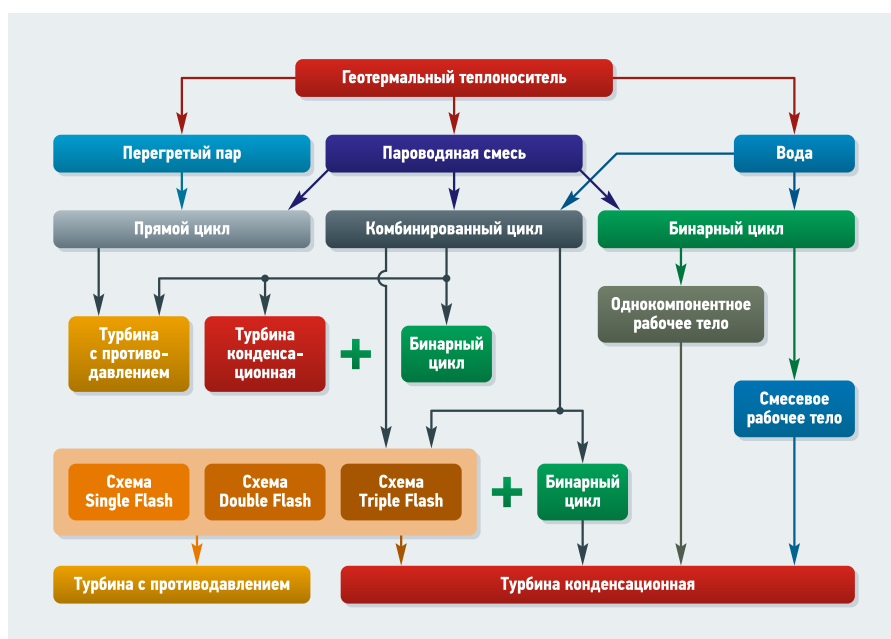


Рис. 2. Классификация геотермальных электростанций по фазовому состоянию и применяемым на практике технологическим схемам

ГеоЭС с бинарным циклом в основном применяются на месторождениях с низкотемпературной горячей водой, которые характеризуются использованием во втором контуре низкокипящего рабочего тела. Двухконтурные ГеоЭС предполагают использование бинарного и комбинированного бинарного циклов. В комбинированном цикле ГеоЭС паровая турбина работает на геотермальном паре, а утилизация тепла отработавшего или сбросного геотермального теплоносителя в виде жидкой фазы осуществляется в энергоустановке второго контура

В настоящее время в России энергоблоки с противодавленческими турбинами эксплуатируются на островах Кунашир и Итуруп (входят в Курильскую гряду). На Калужском турбинном заводе были разработаны энергоблоки «Омега-500», «Туман-2,0» и «Туман-2,5» [2].

Противодавленческие турбоустановки значительно проще конденсационных по своей конструкции, поэтому их цена существенно ниже.

Достаточно часто применяются технологические схемы одноконтурных ГеоЭС с одним, двумя и тремя давлениями сепарации, так называемые схемы Single-Flash, Double-Flash и Triple-Flash, соответственно. Так, ГеоЭС с двумя и тремя давлениями сепарации предполагают использование дополнительного вторичного пара, полученного в расширителе

вследствие вскипания сепарата. Это позволяет увеличить использование тепла геотермального флюида по сравнению с ГеоЭС с одним давлением сепарации.

Геотермальные паротурбинные установки производят компании в Японии, США, Италии и России.

В табл. 1 представлены основные фирмы-производители современных паровых турбоустановок и оборудования для геотермальных электростанций. Конструкция геотермальных турбин обладает рядом особенностей, которые обусловлены использованием низкопотенциального геотермального насыщенного пара в качестве рабочей среды, отличающейся коррозионной агрессивностью и склонностью к образованию отложений.

К современным передовым технологиям повышения эффективности геотермальных турбин можно отнести:

- внутриканальную сепарацию влаги в проточной части турбины, включая периферийную сепарацию влаги, отвод влаги через щели в полых сопловых лопатках и ступень-сепаратор;
- системы периодической промывки проточной части и концевых уплотнений на работающей турбине;
- применение технологии управления физико-химическими свойствами геотермального теплоносителя присадками поверхностно-активных веществ;
- снижение потерь в турбинных решётках за счёт оптимизации геометрии сопловых и рабочих лопаток, включая использование высокоэффективных саблевидных лопаток.

Так, в конструкции геотермальной паровой турбины ОАО «КТЗ» мощностью 25 МВт для Мутновской ГеоЭС применены специальные устройства для сепарации влаги, позволяющие удалить до 80 % жидкой фазы в виде крупных капель и жидких плёнок из проточной части [3]. Начиная с четвёртой турбинной ступени, в проточной части применена развитая система периферийной сепарации влаги. В седьмой и восьмой ступенях обоих потоков турбины используется внутриканальная сепарация влаги в сопловых решётках. Достаточно эффективным методом удаления влаги является применение специальной турбинной ступени-сепаратора, которая позволяет увеличить КПД турбина почти на 2 %.

Солесодержание пара, поступающего в проточную часть турбин ГеоЭС, зависит от минерализации исходного геотермального флюида и эффективности разделения фаз в сепарационных устройствах. Эффективность сепарационных устройств в значительной степени определяет степень заноса проточной части



Рис. 3. Горизонтальные сепараторы в машинном зале Мутновской ГеоЭС

турбин солеотложениями, а также влияет на интенсивность каплеударной эрозии турбинных лопаток и коррозионного растрескивания металла элементов проточной части турбин.

В технологических схемах современных геотермальных электростанций применяются вертикальные и горизонтальные сепараторы. Вертикальные сепараторы используются в основном на ГеоЭС, построенных при участии новозеландских специалистов в Новой Зеландии, Филиппинах и др. странах. Горизонтальные сепараторы применяются в геотермальных энергоблоках в России, США, Японии и Исландии. Причём до 70 % ГеоЭС

в мире работает с вертикальными сепараторами [4]. Вертикальные сепараторы способны в среднем обеспечивать степень сухости пара на выходе до 99,9 %. При этом их эффективность существенно зависит от режимных параметров: расхода и давления влажного пара, влагосодержания пароводяной смеси (ПВС), уровня жидкости в сепараторе и др.

В России разработаны и эксплуатируются на энергоблоках ГеоЭС горизонтальные сепараторы, отличающиеся высокой эффективностью и малогабаритными характеристиками. Степень сухости пара на выходе из сепаратора достигает 99,99 %. В основу этих разработок легли исследования и технологии предприятий, производящих оборудование для АЭС, судостроения и других отраслей [5]. Такие сепараторы установлены и успешно работают в модульных энергоблоках Верхне-Мутновской ГеоЭС и на первой очереди Мутновской ГеоЭС (рис. 3).

Преимущество бинарных установок, заключающееся прежде всего в возможности производить электроэнергию на основе низкотемпературного источника тепла, в значительной степени определило основные направления их применения. Особенно целесообразно использование бинарных установок для:

- энергообеспечения (также и автономного) регионов, обладающих низкотемпературными геотермальными ресурсами;
- повышения мощности действующих ГеоЭС, работающих на высокотемпературном геотермальном теплоносителе, без бурения дополнительных скважин;
- повышение эффективности использования геотермальных источников за счёт применения бинарных установок в технологических схемах вновь проектируемых комбинированных геотермальных электростанций.

В конструкции геотермальной паровой турбины ОАО «КТЗ» мощностью 25 МВт для Мутновской ГеоЭС применены специальные устройства для сепарации влаги, позволяющие удалить до 80 % жидкой фазы в виде крупных капель и жидких плёнок из проточной части

Основные производители оборудования геотермальных паротурбинных установок табл. 1

Фирма (страна)	Основные специализации	Общая установленная мощность поставленных турбин
Toshiba (Япония)	Изготавливает паровые турбины и другое энергетическое оборудование	Более 3000 МВт
Mitsubishi (Япония)	Производство геотермальных паровых турбин и генераторов	Более 2800 МВт (100 энергоблоков)
Fuji (Япония)	Производство геотермальных паровых турбин	2630 МВт (67 энергоблоков)
Ansaldo (Италия)	Крупнейший итальянский производитель геотермальных паровых турбин и энергетического оборудования	1700 МВт (130 энергоблоков)
General Electric (США)	Производство геотермальных паровых турбин	Более 500 МВт
Toyota (Япония)	Производство геотермальных паровых турбин	Более 250 МВт
Alstom (Италия)	50-летний опыт производства геотермальных паровых турбоустановок единичной мощностью от 25 до 60 МВт	200 МВт
«КТЗ» (Россия)	Производитель геотермальных турбоустановок мощностью от 0,5 до 25 МВт	Более 80 МВт

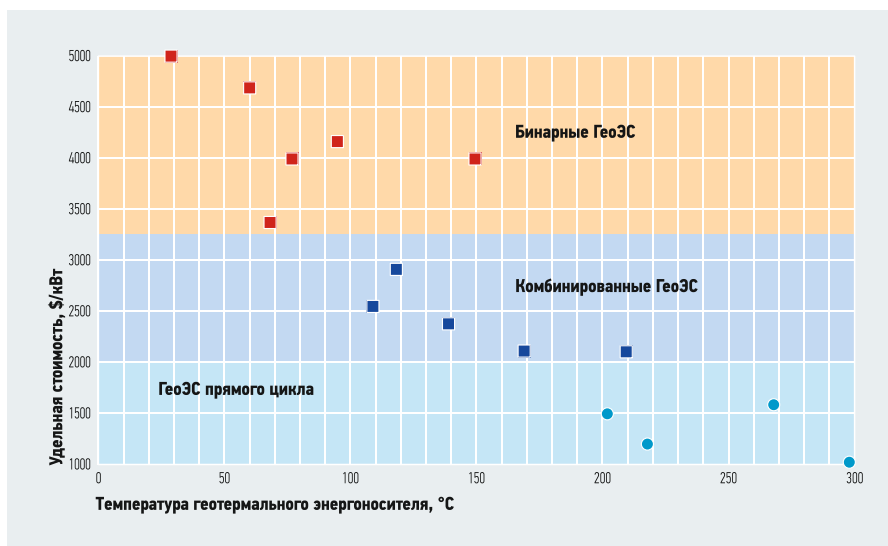


Рис. 4. Сведения о стоимости установленной мощности 1 кВт ГеОЭС (— прямого цикла, — бинарных, — комбинированных ГеОЭС)

Теплофизические, термодинамические и др. свойства органических низкокипящих веществ оказывают существенное влияние на вид и эффективность теплового цикла, технологические параметры, конструкцию и характеристики оборудования, режимы эксплуатации, надёжность и экологичность бинарных установок.

На практике применяются около 15-ти различных низкокипящих органических веществ и смесей в качестве рабочего тела бинарных установок. По факту в настоящее время геотермальные бинарные энергоблоки в основном работают на углеводородах — около 82,7% от суммарной установленной мощности бинарных энергоблоков в мире, фторуглеродах — 6,7%, хлорфторуглеродах — 2,0%, водно-аммиачной смеси — 0,5%, отсутствуют данные по рабочему телу для 8,2% [6].

Геотермальные электростанции с комбинированным бинарным циклом отличаются тем, что геотермальный флюид первого контура не только является источником тепла для второго контура, но и непосредственно используется для преобразования теплоты в механическую работу в паровой турбине.

Паровая фаза геотермального двухфазного теплоносителя используется непосредственно для выработки электрической энергии путём расширения в паровой турбине с противодавлением, а теплоту конденсации геотермального пара (а также сепарата) направляют во второй низкотемпературный контур, в котором для выработки электроэнергии используется органическое рабочее тело. Применение подобной комбинированной схемы ГеОЭС особенно целесообразно в случаях, когда исходный геотермальный флюид содержит большое количество неконденсирующихся газов, поскольку затраты энергии на удаление их из конденсатора могут быть значительными.

Результаты термодинамических расчётов [7] показывают, что при всех равных исходных условиях использование бинарного энергоблока в геотермальных электростанциях комбинированного цикла может увеличить мощность ГеОЭС типа Single-Flash на 15%, а ГеОЭС Double-Flash — на 5%. В настоящее время бинарные установки производятся на заводах в США, Германии, Италии, Швеции, России и др. странах. Сведения о некоторых

технических характеристиках бинарных установок, выпускаемых различными производителями, представлены в табл. 2.

На рис. 4 представлены данные о стоимости установленной мощности в 1 кВт при сооружении различных ГеОЭС с турбоустановками на геотермальном паре и низкокипящем органическом рабочем теле, свидетельствующие о зависимости стоимости ГеОЭС от применяемого цикла и температуры геотермального геофлюида.

Наиболее перспективными российскими геотермальными энергетическими проектами являются расширение Мутновской ГеоЭС (50 МВт) и Верхне-Мутновской ГеоЭС (12 МВт) комбинированными (с бинарным циклом) энергоблоками мощностью 10 и 6,5 МВт, соответственно, за счёт утилизации тепла их сбросного теплоносителя без бурения дополнительных скважин, а также строительство второй очереди Мутновской ГеоЭС мощностью 50 МВт.

Выводы

1. В мировой геотермальной энергетике применяются технологические схемы с ГеОЭС прямого, бинарного и комбинированного циклов — в зависимости от фазового состояния и температуры геотермального теплоносителя.
2. Основной прирост в суммарной установленной мощности ГеОЭС в мире в последние годы осуществляется за счёт развития бинарных геотермальных энерго-технологий.
3. Удельная стоимость установленной мощности геотермальных энергоблоков существенно зависит от температуры геотермального теплоносителя и с её увеличением резко снижается. ●

1. Bertani R. Geothermal Power Generation in the World 2010–2014. Update Report. Proc. of World Geothermal Congress '2015. Melbourne. Australia. 19–25 April 2015.
2. Томаров Г.В., Никольский А.И., Семёнов В.Н., Шипков А.А. Геотермальная энергетика: Справ.-метод. изд. / Под ред. П.П. Безруких. — М.: Интерэнерго-Издат, Теплоэнергетик, 2015. 304 с.
3. Поваров О.А., Лукашенко Ю.Л., Томаров Г.В., Циммерман С.Д. Геотермальные промышленность и технологии в России // Тяжёлое машиностроение, 2001. №1. С. 14–19.
4. Zarrouk S., Purnanto M. Geothermal steam-water separators: Design overview. Geothermics. 2014. No. 53. Pp. 236–254.
5. Поваров О.А., Лукашенко Ю.Л., Томаров Г.В., Циммерман С.Д. Геотермальные промышленность и технологии в России // Тяжёлое машиностроение, 2001. №1. С. 14–19.
6. Orenstein R., Delwiche B., Lovekin J. The Don A. Campbell Geothermal Project — Development of a Low-Temperature Resource. Proc. of WGC'2015. Melbourne. Australia. 19–25 April 2015.
7. Pambudi N., Itoi R., Jalilinasrabady S., Jaelani K. Performance Improvement of Single-Flash Geothermal Power Plant Applying Tree Cases Development Scenarios Using Thermodynamic Methods. Proc. of WGC'2015. Melbourne. Australia. 19–25 April 2015.

References — see p. 95.

Технические характеристики бинарных установок*

табл. 2

Фирма-производитель	Единичная мощность, кВт	Температура источника тепла, °C	Технологические особенности
Ormat (США)	200–70000	150–300	Рабочее тело: n-пентан. Турбина: двухступенчатая осевая
Turboden (Италия)	200–2000	100–300	Рабочее тело: ОМТС. Турбина: двухступенчатая осевая
GMK (Германия)	50–5000	120–350	Турбина: многоступенчатая осевая
Turboden Pure Cycle (США)	280	91–149	Рабочее тело: R245fa. Турбина: радиальная
Cryostare (Франция)	н.д.	100–400	Рабочее тело: R245fa, R134a. Турбина: радиальная
Infinity Turbine (США)	10–50, > 250	< 90, 90–120	Рабочее тело: R134a, R245fa
Barber Nichols (США)	700, 2000, 2700	> 115	н.д.
Trans Pacific Energy (США)	100–5000	30–480	Рабочее тело: смесь органических веществ
Калужский турбинный завод («КТЗ») (Россия)	2500	> 100	Рабочее тело: R134a. Турбина: одноступенчатая радиально-осевая

* Основных мировых производителей для геотермальных и др. тепловых источников энергии.

Geothermal energy: technologies and equipment. Pp. 68–71.

G. V. Tomarov, "Geoterm-M", Ltd.

1. Bertani R. Geothermal Power Generation in the World 2010–2014. Update Report. Proc. of World Geothermal Congress '2015. Melbourne. Australia. 19–25 April 2015.
2. Tomarov G.V., Nikol'skij A.I., Semjonov V.N., Shipkov A.A. Geotermal'naja jenergetika: Sprav.-metod. izd. [Geothermal power engineering: Reference and methodical edition] / Pod red. [Edited by] P.P. Bezrukih. Moscow, "Interjenergo-Izdat" ["Interenergy" Publishers]. "Teplojenergetik" ["Heat power engineer" Publishers]. 2015. 304 p.
3. Povarov O.A., Lukashenko Ju.L., Tomarov G.V., Cimmerman S.D. Geotermal'nye promyshlennost' i tehnologii v Rossii [Geothermal industry and technology in Russia]. Tjzhjoloe mashinostroenie [Heavy Engineering]. 2001. No. 1. Pp. 14–19.
4. Zarrouk S., Purnanto M. Geothermal steam-water separators: Design overview. Geothermics. 2014. No. 53. Pp. 236–254.
5. Povarov O.A., Lukashenko Ju.L., Tomarov G.V., Cimmerman S.D. Geotermal'nye promyshlennost' i tehnologii v Rossii [Geothermal industry and technology in Russia]. Tjzhjoloe mashinostroenie [Heavy Engineering]. 2001. No. 1. Pp. 14–19.
6. Orenstein R., Delwiche B., Lovekin J. The Don A. Campbell Geothermal Project — Development of a Low-Temperature Resource. Proc. of WGC'2015. Melbourne. Australia. 19–25 April 2015.
7. Pambudi N., Itoi R., Jalilinasrabad S., Jaelani K. Performance Improvement of Single-Flash Geothermal Power Plant Applying Tree Cases Development Scenarios Using Thermodynamic Methods. Proc. of WGC'2015. Melbourne. Australia. 19–25 April 2015.