



Геоэкология / Geocology  
Оригинальная статья / Original article  
УДК 550.361, 621.482  
DOI: 10.18470/1992-1098-2017-2-159-170

## ОЦЕНКА ПЕРСПЕКТИВ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ СЕВЕРОКАВКАЗСКОГО РЕГИОНА

*Алибек Б. Алхасов, Джамия А. Алхасова\*, Арсен Ш. Рамазанов*  
Институт проблем геотермии, Дагестанский научный центр РАН,  
Махачкала, Россия, [alkhasova.dzhamilya@mail.ru](mailto:alkhasova.dzhamilya@mail.ru)

**Резюме.** *Цель.* Оценка перспектив комплексного освоения геотермальных ресурсов Северокавказского региона. *Методы.* Предложены технологические решения для комплексного освоения высокотемпературных гидрогеотермальных ресурсов Северокавказского региона. Оценка эффективности предложенных технологий осуществлена с привлечением физико-математических, термодинамических и оптимизационных методов расчета и физико-химических экспериментальных исследований. *Результаты.* Проведена оценка перспектив комплексной переработки высокопараметрических геотермальных ресурсов Восточно-Предкавказского артезианского бассейна (ВПАБ) с преобразованием тепловой энергии в электроэнергию в бинарной ГеоЭС и последующим извлечением растворенных химических соединений. Указаны наиболее перспективные площади для освоения таких ресурсов. В связи с обострившимися экологическими проблемами показана необходимость первоочередного комплексного освоения попутных высокоминерализованных рассолов Южносухокумской группы газонефтяных скважин Северного Дагестана. В настоящее время попутные рассолы с радиоактивным фоном, превышающим допустимые нормы, сбрасываются на поверхностные поля фильтрации, предложены технологические решения по их дезактивации и комплексному освоению. *Выводы.* Комплексное освоение высокотемпературных гидрогеотермальных рассолов является новым направлением в геотермальной энергетике, которое позволит значительно нарастить объемы добычи гидрогеотермальных ресурсов и развивать геотермальную отрасль на более высоком уровне с реализацией энергоэффективных передовых технологий. Масштабное освоение рассолов решит значительные проблемы энергоснабжения региона и импортозамещения, полностью обеспечивая потребности России в пищевой и технической соли и редких элементах.

**Ключевые слова:** геотермальная энергия, бинарная геотермальная электростанция, теплообменник, рассол, химические компоненты, карбонат лития.

**Формат цитирования:** Алхасов А.Б., Алхасова Д.А., Рамазанов А.Ш. Оценка перспектив комплексного освоения геотермальных ресурсов Северокавказского региона // Юг России: экология, развитие. 2017. Т.12, N2. С.159-170. DOI: 10.18470/1992-1098-2017-2-159-170

## EVALUATION OF PROSPECTS OF INTEGRATED DEVELOPMENT OF GEOTHERMAL RESOURCES OF THE NORTH CAUCASUS REGION

*Alibek B. Alkhasov, Dzhamilya A. Alkhasova\*, Arsen Sh. Ramazanov*  
Institute for Geothermal Research, Dagestan scientific center RAS,  
Makhachkala, Russia, [alkhasova.dzhamilya@mail.ru](mailto:alkhasova.dzhamilya@mail.ru)

**Abstract.** The *aim* is to assess the prospects for the integrated development of geothermal resources in the North Caucasus region. *Methods.* Technological solutions are proposed for integrated development of high-temperature hydrogeothermal resources of the North Caucasus region. The evaluation of the effectiveness of the proposed technologies was carried out with the use of physico-mathematical, thermodynamic and optimization methods of calculation and physico-chemical experimental studies. *Findings.* Were estimated the prospects of complex processing of highly parametrical geothermal resources of the Eastern Ciscaucasian artesian basin (ECAB) with conversion of thermal energy into electric power in a binary GeoPP and subsequent



extraction of dissolved chemical compounds. The most promising areas for the development of such resources were indicated. In connection with the exacerbated environmental problems, it was shown the need for the first-priority integrated development of associated high-mineralized brines of the South Sukhokum group of gas-oil wells in North Dagestan. At present, associated brines with a radioactive background exceeding permissible standards are discharged to surface filtration fields; technological solutions for their decontamination and integrated development were proposed. **Conclusions.** The comprehensive development of high-temperature hydrogeothermal brines is a new direction in geothermal energy, which will significantly increase the production of hydrogeothermal resources and develop the geothermal industry at a higher level with the implementation of energy-efficient advanced technologies. Large-scale development of brines will solve significant problems of energy supply in the region and import substitution, fully meeting Russia's needs for food and technical salt and other rare elements.

**Keywords:** geothermal energy, binary geothermal power plant, heat exchanger, brine, chemical components, lithium carbonate.

**For citation:** Alkhasov A.B., Alkhasova D.A., Ramazanov A.Sh. Evaluation of prospects of integrated development of geothermal resources of the North Caucasus region. *South of Russia: ecology, development*. 2017, vol. 12, no. 2, pp. 159-170. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2017-2-159-170

## ВВЕДЕНИЕ

Наиболее перспективным для освоения геотермальной энергии является Северокавказский регион, где температуры в недрах значительно выше в сравнении с другими регионами. Высокие температуры недр в регионе удачно сочетаются с мощными водоносными комплексами, в которых сосредоточены огромные гидрогеотермальные ресурсы разного энергетического потенциала. ВПАБ площадью более 200 тыс. км<sup>2</sup> охватывает практически все субъекты Северокавказского федерального округа и изучен наиболее детально данными бурения более 10000 газонефтяных, геотермальных и артезианских скважин. Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН более 30 лет проводит гидро-геолого-геотермические исследования на территории бассейна [1-5].

Накоплен значительный опыт практического использования на различные теплоэнергетические цели низкопотенциальных (до 70° С) и среднепотенциальных (до 110° С) геотермальных ресурсов [6].

Для комплексного освоения наиболее перспективными являются гидрогеотермальные высокотемпературные рассолы хлоридно-натриевого и кальциевого состава с минерализацией 60 – 210 г/л и пластовыми температурами 130 – 220°С и выше. Рассолы глубокого залегания являются промышленным гидроминеральным сырьем с высоким содержанием лития, рубидия, цезия, стронция, йода, брома, бора, калия и магния. По-

тенциальные ресурсы рассолов составляют 2.6 млн. м<sup>3</sup>/сут [3]. В настоящее время высокотемпературные рассолы не используются, хотя имеется более 2000 простаивающих скважин на выработанных нефтегазовых месторождениях, которых можно перевести на их добычу. Капитальные затраты, связанные с реконструкцией простаивающих нефтегазовых скважин на добычу геотермальных вод, незначительны по сравнению с затратами на бурение и обустройство новых геотермальных скважин. Назрела необходимость в комплексном освоении этих ресурсов с привлечением простаивающих скважин, что позволит решить значительные экономические, экологические и социальные проблемы региона. В пределах ВПАБ на глубинах 3000 – 5500 м выявлено 92 площади с редкометальными промышленными водами, из которых 55 находятся на территории Дагестана, 29 – в Ставропольском крае и 8 – в Чеченской республике [3]. К промышленным водам относятся подземные воды, содержащие полезные компоненты или их соединения в количествах, обеспечивающих их рентабельную добычу и переработку.

Под комплексным освоением высокоминерализованных термальных вод подразумевается использование их теплового потенциала на различные теплоэнергетические нужды и последующее извлечение химических компонентов из геотермального рассола.



Наиболее перспективным является использование теплового потенциала для получения электроэнергии с использованием технологии бинарных ГеоЭС на низкокипящих рабочих агентах. ГеоЭС включает геотермальную циркуляционную систему (ГЦС), в контуре которой циркулирует термальная вода, и цикл паротурбинной установки (ПТУ), где циркулирует низкокипящий вторичный теплоноситель. В ПТУ реализуется термодинамический цикл Ренкина.

Гидрогеотермальные ресурсы ВПАБ оцениваются до 10000 МВт тепловой и 1000 МВт электрической мощности. Для их масштабного освоения необходимо строить высокодебитные скважины большого диаметра

с привлечением огромных капиталовложений, что не реально на современном этапе экономического развития региона. В ближайшей перспективе наиболее оптимальным является освоение части этих ресурсов с использованием простаивающих скважин на выработанных нефтегазовых месторождениях. Только в Северном Дагестане имеется более 1000 простаивающих скважин, пробуренных на глубины от 2000 до 5000 м. Большинство из этих скважин могут быть успешно использованы для добычи термальной воды в системах по выработке электроэнергии в бинарных ГеоЭС.

### МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для ряда выработанных нефтегазовых месторождений проведена оценка строительства бинарных ГеоЭС с ГЦС-технологией [7]. До 30% вырабатываемой электрической мощности в ГеоЭС затрачивается на циркуляцию теплоносителя в контуре ГЦС. Суммарная полезная мощность всех ГеоЭС достигает до 330 МВт (табл. 1).

В современной экономике, ориентированной на высокотехнологичные производства, все больше используются редкие элементы, такие как литий, стронций, рубидий и цезий. В высокотемпературных рассолах ВПАБ в промышленных концентрациях содержатся эти элементы в достаточных количествах для обеспечения различных отраслей экономики России на дальнюю перспективу. Для перечисленных редких элементов установлены нижние пределы их концентраций (мг/л) в промышленных термальных минерализованных водах [8]: литий – 10; стронций – 300; рубидий – 3; цезий – 0,5.

Рассолы ВПАБ как сырье для химической и редкометалльной отраслей промышленности привлекательны в связи с неисчерпаемыми их запасами и относительно невысокой стоимостью извлечения из них практически всех ценных химических элементов. При комплексном освоении геотермальных рассолов практически исключаются затраты на решение экологических проблем.

Минерализации рассолов и содержания редких элементов на некоторых площадях ВПАБ с промышленными водами приведены в табл. 2 [3]. Из табличных данных

следует, что на приведенных площадях в промышленных концентрациях содержатся два и более редких элемента. Необходимо отметить, что при наличии в рассолах двух компонентов кондиционное содержание каждого из них может составлять 75% от его содержания в однокомпонентной системе, с тремя – 60, с четырьмя – 50, а с пятью и более – 45%.

При освоении геотермального рассола в геотехнологическом комплексе с получением электроэнергии и извлечением химических компонентов отпадает необходимость в обратной закачке отработанного и опресненного геотермального ресурса, что приведет к дополнительному приращению мощности ГеоЭС за счет исключения энергетических затрат на его циркуляцию. Опресненная на выходе из геотехнологического комплекса вода может использоваться на различные водохозяйственные цели, что важно для аридного Северокавказского региона, где остро ощущается дефицит в пресной воде, особенно в его равнинной части в пределах ВПАБ.

Комплексное освоение высокотемпературных рассолов ВПАБ с использованием простаивающих скважин на выработанных нефтегазовых месторождениях решит значительные проблемы электроснабжения региона, а также проблемы импортозамещения, полностью обеспечивая потребности России в пищевой и технической соли, карбонате лития и солях других редких элементов.



Таблица 1

Основные параметры ГеоЭС с использованием скважин на выработанных нефтяных и газовых месторождениях

Table 1

The main parameters of GeoPP using wells on the developed oil and gas fields

Наименование месторождения Name of the field	Глубина залегания эксплуатационного горизонта, м / Depth of occurrence of the operational horizon, m	Температура воды на устье скважины, °С / Water temperature at the wellhead, °C	Удельная мощность энергоустановки, кВт·с / Specific power of the power plant, kW s / kg	Оптимальный расход ГЦС из двух скважин, кг/с / Optimal flow of Geo-thermal Circulation System (GCS) from two wells, kg / s	Расстояние между скважинами в ГЦС, м / The distance between the wells in the GCS, m	Общая мощность ГеоЭС с ГЦС из двух скважин, кВт / The total power of the GeoPP with the GCS of two wells, kW	Полезная мощность ГеоЭС с ГЦС из двух скважин, кВт / Useful capacity of GeoPP with GCS of two wells, kW	Количество скважин на месторождении (число ГЦС) / Number of wells in the field (number of GCSs)	Общая полезная мощность ГеоЭС, кВт / Total useful power of GeoPP, kW
Русский Хутор / Russkiy Khutor	3400	130	26,9	30	1040	807	563	10 (5)	2815
Южносухокумск + Мартовское / Yuzhnosukhokumsk + Martovskoye	3500	135	30,5	31	1058	946	670	10 (5)	3350
Сухокумское + В. Сухокумское / Sukhokumsk + V. Sukhokumsk	3600	140	34,1	33	1093	1125	782	10 (5)	3910
Равнинное + Перекрестное / Ravninnoye + Perekrestnoye	4300	150	42,8	34	1112	1455	1028	10 (5)	5140
Дахадаевское + Солончаковское / Dakhadayevskoye + Solonchakovoye	4400	160	53,9	37	1163	1994	1424	32 (16)	22784
Юбилейное +Кумухское / Yubileynoye + Kumukh	4400	160	53,9	37	1163	1994	1427	32 (16)	22784
Степное + Восточно-Степное/ Stepnoye + Vostochno-Stepnoye	3600	150	42,8	36	1145	1540	1089	80 (40)	43560
Озерное + Бешкольское / Ozernoye + Beshkol'skoye	4500	165	63,3	40	1211	2532	1780	80 (40)	71200
Кочубейское + Тарумовское / Kochubeyskoye + Tarumovskoye	5500	175	78,5	41	1228	3218	2278	80 (40)	91120
Северо-Кочубей +	5000	170	72,3	41	1226	2964	2088	40 (20)	41760



Душетское / Severo-Kochubey + Dushetskoye									
Майское + Капиевское / Maiskoye + Kariyevskoye	3600	140	34,1	33	1093	1125	782	40 (20)	15640
Махачкала-Таркинское / Makhachkala-Tarki	3500	140	34,1	33	1093	1125	789	8 (4)	3156
Ачису / Achi-Su	3200	120	20,5	27	985	554	384	8 (4)	1536
Бабаюрт / Babayurt	3500	140	34,1	33	1093	1125	789	10 (5)	3945
<b>Итого / Total:</b>									<b>332700</b>

Таблица 2

Содержание редких элементов в термальных рассолах ВПАБ

Table 2

Content of rare elements in thermal brines of the ECAB

№ скв. Well №	Площадь Area	Интервал перфорации, м Perforation interval, m	Содержание редких элементов, мг/л Content of rare elements, mg/l				Минерализация, г/л Mineralization, g/l
			Li	Rb	Cs	Sr	
Республика Дагестан / Republic of Dagestan							
18 44	Русский Хутор / Russkiy Khutor	3179-3185 3473-3483	37.5 44.9	2.25 4.4	0.43 3.2	750 1035	125 121
4	Сухокумск / Sukhokumsk	3255-3257	44.3	3.36	0.61	756	104.8
4	Восточно-Сухокумск / Vostochno-Sukhokumsk	3367-3371 3691-3695	63.7 72.4	5.46 3.99	0.18	559	133.8 137
14 20	Южно-Сухокумск / Yuzhno-Sukhokumsk	3291-3295 3392-3398	53.6 50	3.59 2.1	0.69 0.7	1169 550	132 127
2	Октябрьская / Oktyabr'skaya	3383-3390	44	4.3	0.7	243	109
4	Таловская / Talovskaya	3443-3455	53.8	5.5	0.9	596	112.4
1	Эмировская / Emirovskaya	3590-3603	75.4	4.24	1.5		134.4
1	Кумухская / Kumukhskaaya	4778-4811	53.9	1.7	0.55		110.5
2	Юбилейная / Yubileynaya	3909-3911	93	5.54	0.86		125
2	Северо-Кочубеевская / Severo-Kochubeyskaya	3436-3446	86.8	5.4	0.91	540	119
1	Комсомольская / Komsomol'skaya	5078-5084	166	10.4	3	1607	203
1	Тарумовская / Tarumovskaya	5429	210	9.3	5.6	1400	210
6	Дахадаевская / Dakhadaevskaya	3636-3642	70.3	4.1	0.4	741	131
14	Солончаковая / Solonchakovaya	3640-3646	122.5	5	0.94	625	124
1	Ногайская / Nogayskaya	3580-3585	66.7	4.6		739	136.4
21	Майская / Mayskaya	3627-3635	80	6.03	1.88	790	129.1



	Маюская						
6	Равнинная / Ravninnaya	3716-3720	63.7			529	132
8	Капиевская / Kariyevskaya	3830-3840	55	3.2	2.1	700	130.3
20	Берикей / Berikay		42	3.4	0.85	520	70
Ставропольский край / Stavropol region							
116	Зимняя Ставка / Zimnyaya Stavka		20	0.1	0.489		106
96	Озек- Суат / Ozek-Suat		21.3	1.7	0.1	312	79
27	Ачикулак / Achikulak		26.3	3.02	0.57		
Чеченская Республика / Chechen Republic							
167	Карабулак-Ачалуки / Karabulak-Achaluki		21	31.2	7.7		
11	Датыхская / Datykhskaya		160	18.3	3.3		

Наиболее подготовленными к промышленному комплексному освоению являются геотермальные рассолы Берикейского и Тарумовского месторождений и попутные высокоминерализованные воды Южно-

сухокумской группы газонефтяных скважин Северного Дагестана [9-12]. В таблице 3 приведено количество продукции, которую можно получить из 1 м<sup>3</sup> рассолов Дагестанских месторождений.

Таблица 3

Количество продукции (кг) из 1 м<sup>3</sup> рассолов

Table 3

Quantity of products (kg) from 1 m<sup>3</sup> of brines

Продукт / Product	Месторождение / Geothermal field		
	Тарумовское Tarumovka	Южносухокумское Yuzhnosukhokumsk	Берикейское Berikay
Карбонат лития (Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ) Lithium carbonate (Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> )	1.0	0.2	0.2
Магнезия жженая (MgO) Calcinated magnesia (MgO)	1.3	1.1	0.4
Карбонат кальция (CaCO <sub>3</sub> ) Calcium carbonate (CaCO <sub>3</sub> )	23.7	18.2	2.6
Соль пищевая поваренная (NaCl) Sodium chloride (salt) (NaCl)	133.1	77.4	58.2

Первоочередными для освоения являются попутные рассолы Южносухокумского газонефтяного месторождения объемом 1,5 млн. м<sup>3</sup>/год, которые сбрасываются на поля фильтрации с гамма-фоном до 32 мкР/ч без какого-либо предварительного обеззараживания, что наносит огромный экологический ущерб окружающей среде. Обязательным при комплексном освоении рассолов является их дезактивация, которая осуществляется по методике, предложенной в работе [11]. В результате дезактивации образуется осадок состоящий в основном из смеси Fe(OH)<sub>3</sub> и CaCO<sub>3</sub> с влажностью

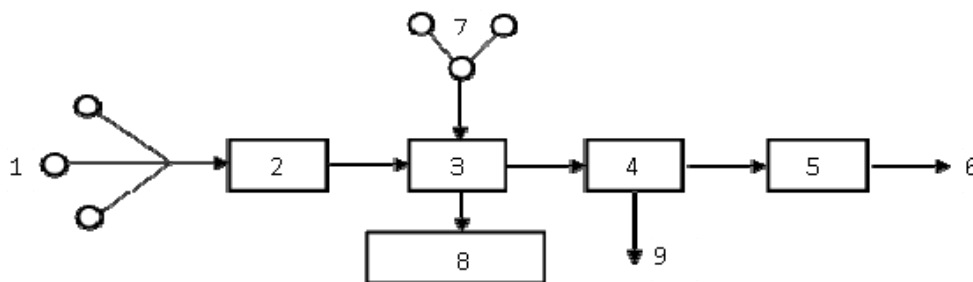
примерно 60 % в количестве 1.95 кг/м<sup>3</sup>, который соосаждает из геотермального рассола радионуклиды, обладает высокой удельной активностью, и должен быть надежно захоронен. С целью уменьшения объема влажный осадок подвергается осушению при 60-100 °С. При этом из 1 м<sup>3</sup> рассола образуется 0.8 кг осадка. В результате дезактивации всего геотермального рассола за год будет выделено 1200 т радиоактивного отхода, который подлежит захоронению. При наличии на месторождении попутного газа осадок можно прокалить и уменьшить его количество примерно в два раза. На дезактивацию

годового объема рассола потребуется 280 т негашеной извести (CaO). При оптовой цене на CaO 5000 руб./т реагентные расходы на дезактивацию рассола составят 1.4 млн. руб./год. Для захоронения 600 т прокаленного радиоактивного отхода состоящего из 500 т CaO и 100 т Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с насыпной массой примерно 1.8 т/м<sup>3</sup> необходимо построить подземный резервуар из бетона объемом 335 м<sup>3</sup>. Стоимость дезактивации 1,5 млн. м<sup>3</sup> рассола с учетом расходов на реагенты, строительство подземного резервуара и эксплуатационных затрат составит до 2,5 млн. руб./год.

Для комплексной переработки подготовленного рассола могут быть успешно применены технологические решения, предложенные для Тарумовского и Берикейского месторождений геотермальных вод [9; 10]. Целевыми продуктами технологии переработки рассолов являются карбонат лития и хлорид натрия, попутно – порошок магнезитовый каустический и химически осажденный мел (карбонат кальция). Переработка 1.5 млн. м<sup>3</sup> рассолов позволит ежегодно получать 300 т карбоната лития, 1650 т порошка магнезитового каустического, 27300 т мела химически осажденного и 116100 т соли поваренной пищевой. Технико-экономическая оценка получения карбоната лития из геотермальных рассолов показывает, что себе-

стоимость целевого продукта будет составлять не более 130 рублей за кг.

На рис.1 представлена принципиальная технологическая схема комплексной переработки геотермальных рассолов Южносухокумского газонефтяного месторождения. Попутно добываемые с нефтью рассолы собираются в единый коллектор и подводятся в теплообменники бинарной ГеоЭС мощностью 0.5 МВт. Температура рассола в ГеоЭС снижается до 60 °С. Далее рассол поступает в блок по съему остаточного тепла, где в теплообменниках типа «труба в трубе» его температура снижается до 30 °С. Для охлаждения рассола в теплообменники противотоком направляется пресная артезианская вода с температурой до 20 °С, залегающая на небольших глубинах в плиоцен-четвертичных отложениях. Охлажденный рассол поступает на блок по дезактивации и далее на химзавод, где извлекаются карбонат лития, каустический магнезит, карбонат кальция и хлорид натрия. Опресненная вода из химзавода направляется на различные водохозяйственные цели, в том числе на оазисное орошение различных сельскохозяйственных культур. Нагретая в теплообменниках до 53 °С артезианская вода используется в различных блоках энергобиологического комплекса (ЭБК).



**Рис. 1. Схема комплексной переработки попутных рассолов Южносухокумского нефтяного месторождения**

1 – скважины; 2 – бинарная ГеоЭС; 3 – блок съема остаточного тепла;  
4 – блок дезактивации; 5 – завод по извлечению химкомпонентов; 6 – опресненная вода;  
7 – артезианские скважины; 8 – энергобиологический комплекс;  
9 – осадок на захоронение

**Fig. 1. Scheme of complex processing of associated brines of the South Sukhokumsk oil field**

1 – wells; 2 – binary GeoPP; 3 – residual heat removal unit; 4 – decontamination unit;  
5 – plant for the recovery of chemical components; 6 – desalinated water; 7 – artesian wells;  
8 – energy-biological complex; 9 – sediment for disposal

Важным элементом систем энерго-снабжения с использованием геотермальных вод является теплообменник, в котором теп-

ло первичного теплоносителя передается вторичному теплоносителю. Снижение массогабаритных характеристик теплообменных



аппаратов является актуальной проблемой, которая может решаться с помощью интенсификаторов теплоотдачи [13]. В качестве одного из способов интенсификации процесса теплообмена используется продольное оребрение теплопередающей поверхности. Увеличение поверхности теплообмена со стороны теплоносителя путем оребрения приводит к росту количества тепла, передаваемого от греющего теплоносителя. В [2] приведена методика расчёта влияния количества и размера продольных ребер на процесс теплообмена в скважинном теплообменнике, а также сформулирован критерий оптимальности выбора числа ребер и их конструктивных параметров.

Общий поток тепла через трубу с продольными ребрами представляет собой сумму

$$q = q_1 + q_2 + q_3.$$

Поток тепла через межреберную поверхность трубы:

$$q_1 = \frac{\pi R - n\delta}{\frac{\delta_T}{\lambda_B} + \frac{\delta_1}{\lambda_M}} (T_1 - T_2)$$

Тепловой поток через все поверхности  $n$  ребер:

$$q_2 = \frac{2n\lambda_B(T_* - T_2)(1 - e^{-kl})(A + e^{kl})}{\delta_T(Ae^{-2kl} + 1)ke^{kl}}$$

Отток тепла через торцевую часть ребер:

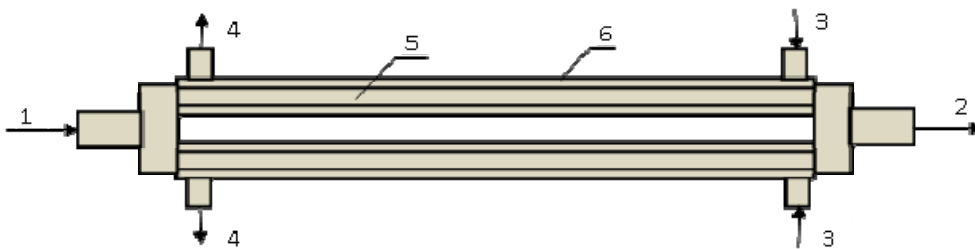
$$q_3 = 2n \frac{\delta}{\delta_T} \lambda_B \frac{T_1 - T_2}{2(1 + \frac{\lambda_B \delta}{\lambda_M \delta_T})} \frac{A + 1}{Ae^{-kl} + e^{kl}};$$

$$A = \frac{1 - \frac{\lambda_B}{\lambda_M} \frac{1}{k\delta_T}}{1 + \frac{\lambda_B}{\lambda_M} \frac{1}{k\delta_T}}; k = \sqrt{\frac{\lambda_B}{\lambda_M \delta \delta_T}}$$

Здесь  $\lambda_B$  – коэффициент теплопроводности воды;  $\lambda_M$  – коэффициент теплопроводности металла;  $\delta$  – толщина стенок ребер,  $\delta_1$  – толщина стенок оребренной трубы;  $\delta_T$  – толщина температурного пристеночного слоя на поверхностях трубы и ребер, при расчетах принимаем эти толщины одинаковыми;  $n$  – количество ребер;  $l$  – высота ребер;  $R$  – радиус оребренной трубы;  $T_1$  – температура первичного теплоносителя во внутренней трубе;  $T_2$  – температура вторичного теплоносителя в кольцевом зазоре;  $T_*$  – температура внешней поверхности внутренней трубы, которую считаем одинаковой, как между ребрами, так и их внутренними торцами. Толщину пристеночного температурного слоя можно определить по формуле

$$\delta_T = \frac{2R}{Nu} [14].$$

Предложена конструкция теплообменника для снятия остаточного тепла с отработанного в ГеоЭС рассола, которая состоит из двух веток типа «труба в трубе» (рис. 2).



**Рис. 2. Теплообменник типа «труба в трубе»**

1 – подвод отработанного в ГеоЭС рассола; 2 – отвод охлажденного рассола на дезактивацию; 3 – подвод пресной артезианской воды; 4 – отвод нагретой воды на блок ЭБК; 5 – внутренняя труба с продольным оребрением; 6 – наружная теплоизолированная труба

**Fig. 2. Heat exchanger of the "pipe-in-pipe" type**

1 – supply of spent brine in GeoPP; 2 – withdrawal of the cooled brine for deactivation; 3 – supply of fresh artesian water; 4 – drainage of heated water to the Bioenergy complex unit; 5 – inner tube with longitudinal finning; 6 – external heat-insulated pipe

Подробно конструкции теплообменников типа «труба в трубе», методы их рас-

чета и интенсификации теплопередачи рассмотрены в предыдущих работах [2; 14].



В таблице 4 приведены расчетные характеристики теплообменника для снятия остаточного тепла с рассолов Южносухотумского месторождения. Общая длина теплообменника при его установке на открытой поверхности составляет 75 м, при установке в помещении его собирают из элементов,

состоящих из двух концентрически расположенных труб определенной длины (3-6 м) последовательно соединенных между собой и расположенных друг над другом (рис. 3). Внутренние трубы соединяются калачами, а наружные патрубками.

Таблица 4

Характеристики теплообменника

Table 4

Characteristics of the heat exchanger

Параметр / Parameter	Значение / Value
Число веток / Number of branches	2
Дебит отработанного рассола, кг/с / Debit of spent brine, kg/s	44
Скорость потока во внутренней трубе, м/с / Flow velocity in the inner pipe, m/s	3.0
Дебит артезианской воды, кг/с / The flow of artesian water, kg/s	40
Скорость потока в межтрубье, м/с / Flow velocity in the intertube, m/s	2.5
Внутренний диаметр и толщина стенки внутренней трубы, мм / Internal diameter and wall thickness of the inner tube, mm	100; 7
Внутренний диаметр и толщина стенки наружной трубы, мм / Internal diameter and wall thickness of outer tube, mm	142; 5
Количество продольных ребер на наружной поверхности внутренней трубы, их высота и толщина, мм / Number of longitudinal ribs on the outer surface of the inner tube, their height and thickness, mm	16; 12; 2
Длина теплообменника, м / Length of the heat exchanger, m	75
Температура рассола на входе и выходе, °С / Brine inlet and outlet temperature, °C	60; 30
Температура артезианской воды на входе и выходе, °С / Inlet and outlet temperature of artesian water, °C	20; 53

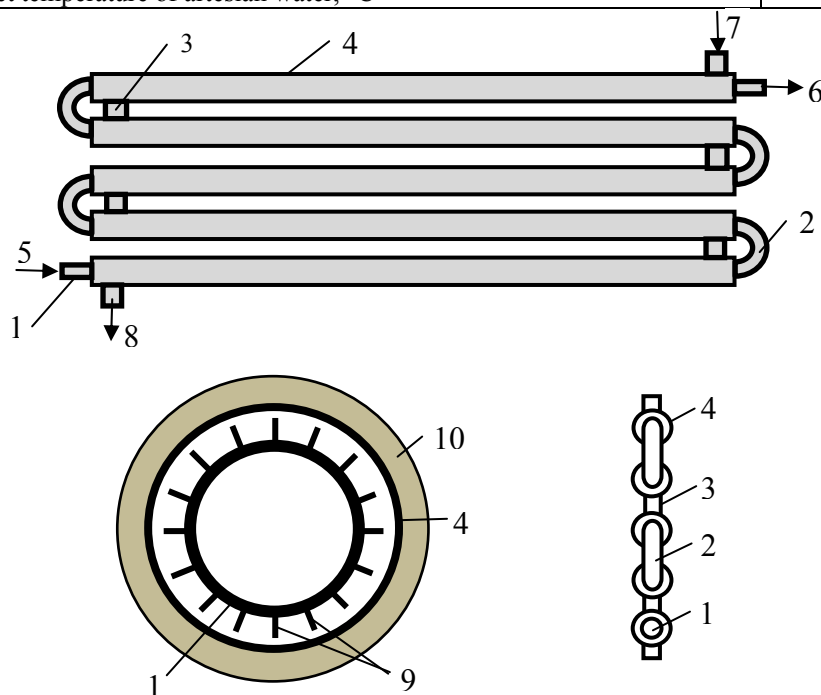


Рис. 3. Теплообменник типа «труба в трубе с продольным оребрением теплопередающей поверхности»

1 – внутренняя труба; 2 – калач; 3 – патрубок; 4 – теплоизолированная наружная труба;  
5 – подвод геотермального теплоносителя; 6 – отвод охлажденного теплоносителя;



7 – подвод нагреваемого теплоносителя; 8 – отвод нагретого теплоносителя;  
9 – продольные теплопередающие ребра; 10 – теплоизоляция

**Fig. 3. Heat exchanger of the "pipe in pipe" type with longitudinal finning of the heat transfer surface**

1 – inner tube; 2 – U-tube; 3 – a branch pipe; 4 – thermally insulated outer tube;  
5 – supply of geothermal coolant; 6 – withdrawal of the cooled coolant;  
7 – supply of the heated coolant; 8 – removal of the heated coolant; 9 – longitudinal heat transfer ribs; 10 – thermal insulation

Скорость потока рассола составляет 3 м/с, что будет препятствовать осаждению солей во внутренней трубе. Кроме того, для предотвращения коррозии и солеотложений в теплообменнике можно использовать эффективный реагент ОЭДФК (оксиэтилидендифосфоновая кислота), обладающий длительным антикоррозионным и антинакип-

ным действием для пассивации поверхности, которое объясняется образованием на ней прочного сцепленного с поверхностью и плохо смываемого слоя комплексона. Восстановление пассивирующего слоя ОЭДФК осуществляется путем периодического импульсного ввода раствора реагента в рассол на входе в теплообменник [1].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение отметим, что стадия водоподготовки – дезактивации при комплексном освоении попутных рассолов Южносухокумского газонефтяного месторождения является необходимой, которая позволит получить рассол, пригодный для получения экологически чистых и безопасных ценных товарных химических продуктов и опресненную воду для различных водохозяйственных нужд. Комплексное освоение геотермальных ресурсов Северокавказского

региона будет способствовать успешному решению экологических, экономических и социальных проблем. Освоение теплового, водоресурсного и химического потенциалов приводит к созданию новых рабочих мест, значительному замещению импорта извлекаемых продуктов, снижению их себестоимости и решению острой экологической проблемы обширной сельскохозяйственной зоны региона.

**Благодарность:** Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы». Уникальный идентификационный номер проекта RFMEFI60414X0120.

**Acknowledgment:** The work was carried out with the financial support of the Ministry of Education and Science of Russia within the framework of the Russian Federal Targeted Program "Research and Development in Priority Areas of Development of the Russian Scientific and Technological Complex for 2014-2020". The unique identification number of the project: RFMEFI60414X0120.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алхасов А.Б. Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии. М., Физматлит, 2008. 376 с.
2. Алхасов А.Б., Алишаев М.Г., Алхасова Д.А., Каймаразов А.Г., Рамазанов М.М. Освоение низкопотенциального геотермального тепла. М.: Физматлит, 2012. 280 с.
3. Курбанов М.К. Геотермальные и гидроминеральные ресурсы Восточного Кавказа и Предкавказья. М., Наука, 2001. 260 с.
4. Алиев Р.М., Васильев В.А., Исрапилов М.И., Бадавов Г.Б. Перспективы крупномасштабного использования геотермальной энергии в республике Дагестан // Известия РАН. Энергетика, 2010. N 5, С. 125-131.
5. Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местным видам топлива (показатели по территориям). Под ред. Безруких П.П. М.: ИАЦ Энергия, 2007. 272 с.
6. Алхасов А.Б., Алхасова Д.А. Современное состояние и перспективы освоения геотермальных ресурсов Северокавказского региона // Теплоэнергетика, 2014, N6. С. 28-34. DOI: 10.1134/S0040363614030023
7. Алхасов А.Б., Алхасова Д.А. Перспективные технологии освоения геотермальных ресурсов // Известия РАН. Энергетика, 2014, N5. С. 144-157.



8. Бондаренко С.С., Куликов Г.В. Подземные промышленные воды. М., Недра, 1984. 358 с.
9. Алхасов А.Б., Алхасова Д.А., Рамазанов А.Ш., Каспарова М.А. Перспективы комплексного освоения высокопараметрических геотермальных рассолов // Теплоэнергетика. 2015. №6. С. 11-17. DOI: 10.1134/S0040363615060016
10. Алхасов А.Б., Алхасова Д.А., Рамазанов А.Ш., Каспарова М.А. Перспективы освоения высокотемпературных высокоминерализованных ресурсов Тарумовского геотермального месторождения // Теплоэнергетика. 2016. №6. С. 25-30. DOI:10.1134/S0040363616060011
11. Рамазанов А.Ш., Каспарова М.А., Сараева И.В., Алхасов А.Б., Рамазанов О.М., Ахмедов М.И. Решение экологических проблем при комплексном использовании геотермальных минерализованных вод Северного Дагестана // Юг России: экология, развитие. 2016. Т.11, №4. С.129-138. DOI: 10.18470/1992-1098-2016-4-129-138.
12. Рамазанов А.Ш., Атаев Д.Р., Каспарова М.А., Сараева И.В. Зависимость сорбционных свойств аморфного гидроксида алюминия по литию от условий получения // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология. 2010, Т. 53, №4. С. 6-8.
13. Дрейцер Г.А. Проблемы создания высокоэффективных трубчатых теплообменных аппаратов // Теплоэнергетика. 2006, №4. С. 31-38.
14. Алхасова Д.А., Алишаев М.Г. Расчет повышения эффективности скважинного теплообменника продольным оребрением теплопередающей поверхности // Теплоэнергетика. 2009, №11. С.69-74.

## REFERENCES

1. Alkhasov A.B. Geothermal'naya energiya: problemy, resursy i tehnologiya [Geothermal energy: problems, resources, and technology]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008. 376 p. (In Russian)
2. Alkhasov A.B., Alishaev M.G., Alkhasova D.A., Kaimarazov A.G., Ramazanov M.M. *Osvoyeniye nizkopotentsial'nogo geotermal'nogo tepla* [Development of Low-Potential Geothermal Heat]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2012. 280 p. (In Russian)
3. Kurbanov M.K. *Geotermal'nyye i gidromineral'nyye resursy Vostochnogo Kavkaza i Predkavkaz'ya* [Geothermal and hydro-mineral resources of the Eastern Caucasus and Ciscaucasia]. Moscow, Nauka Publ., 2001. 260 p. (In Russian)
4. Aliyev R.M., Vasilyev V.A., Israpilov M.I., Badavov G.B. Prospects of large-scale utilization of geothermal energy in the Republic of Dagestan. *Izvestiya RAN. Energetika* [Proceedings of RAS. Power Engineering]. 2010. no. 5. pp.125-131 (In Russian)
5. Bezrukih P.P., ed. Handbook for resources of renewable energy sources in Russia and local types of fuel (territorial parameters) [*Spravochnik po resursam vozobnovlyemykh istochnikov energii Rossii i mestnym vidam topliva (pokazateli po territoriyam)*]. Moscow, IAC Energiya Publ., 2007. 272 p. (In Russian)
6. Alkhasov A.B., Alkhasova D.A. Current state and prospects for the geothermal resources development in the North Caucasus region. *Thermal Engineering*. 2014. no. 6. pp. 28-34. DOI: 10.1134/S0040363614030023 (In Russian)
7. Alkhasov A.B., Alkhasova D.A. Promising technologies for the development of geothermal resources. *Izvestiya RAN. Energetika* [Proceedings of RAS. Power Engineering]. 2014. no. 5. pp.144-157. (In Russian)
8. Bondarenko S.S., Kulikov G.V. *Podzemnyye promyshlennyye vody* [Underground industrial water]. Moscow, Nedra Publ., 1984. 358 p. (In Russian)
9. Alkhasov A.B., Alkhasova D.A., Ramazanov A.S., Kasparova M.A. Prospects of the complex development of highly parameter geothermal brines. *Thermal Engineering*. 2015, no. 6, pp. 11-17. (In Russian) DOI: 10.1134/S0040363615060016
10. Alkhasov A.B., Alkhasova D.A., Ramazanov A.Sh., Kasparova M.A. Prospects of development high temperature resources highly mineralized Tarumovsky geothermal field. *Thermal Engineering*. 2016, no. 6, pp. 25-30. (In Russian) DOI:10.1134/S0040363616060011
11. Ramazanov A.Sh., Kasparova M.A., Saraeva I.V., Alkhasov A.B., Ramazanov O.M., Akhmedov M.I. Addressing environmental challenges under comprehensive utilization of geothermal saline water resources in the Northern Dagestan. *South of Russia: ecology, development*. 2016, vol. 11, no. 4, pp. 129-138. (In Russian) DOI: 10.18470/1992-1098-2016-4-129-138
12. Ramazanov A.Sh., Ataev D.R., Kasparova M.A., Saraeva I.V. Dependency of adsorption parameters of amorphous aluminum hydroxide on lithium on obtaining conditions. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya*. 2010, vol. 53, no. 4, pp. 6-8. (In Russian)
13. Drejcer G.A. The problems of creating high-efficiency tubular heat exchangers. *Teploenergetika* [Thermal Engineering]. 2006. no. 4. pp. 31-38 (In Russian)
14. Alkhasova D.A., Alishaev M.G. Calculation of the increase in the efficiency of the well heat exchanger by the longitudinal ribbing of the heat transfer surface. *Teploenergetika* [Thermal Engineering]. 2009. no. 11. pp. 69-74 (In Russian)



## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

### Принадлежность к организации

**Алибек Б. Алхасов** – д.т.н., профессор, директор Института проблем геотермии ДНЦ РАН, г. Махачкала, Россия, e-mail: alibek\_alhasov@mail.ru

**Джамиля А. Алхасова\*** – к.т.н., старший научный сотрудник Института проблем геотермии ДНЦ РАН. 367030, Махачкала, пр. И. Шамиля, 39А, ИПГ ДНЦ РАН, e-mail: alkhasova.dzhamilya@mail.ru.

**Арсен Ш. Рамазанов** – д.х.н., профессор, главный научный сотрудник Института проблем геотермии ДНЦ РАН, г. Махачкала, Россия, e-mail: a\_ramazanov\_@mail.ru

### Критерии авторства

Алибек Б. Алхасов – постановка задачи. Джамия А. Алхасова – проведение расчетов по определению термодинамической эффективности преобразования тепловой энергии в электрическую в бинарной ГеоЭС. Арсен Ш. Рамазанов – проведение экспериментальных исследований по извлечению химических компонентов из геотермальных рассолов.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила 15.03.2017  
Принята в печать 13.04.2017

## AUTHORS INFORMATION

### Affiliations

**Alibek B. Alkhasov** – Doctor of Technical Sciences, Professor, director of the Institute for Geothermal Research, DSC RAS, Makhachkala, Russia, e-mail: alibek\_alhasov@mail.ru

**Dzhamilya A. Alkhasova\*** – Candidate of Technical Sciences, head of Laboratory at the Institute for Geothermal Research, DSC RAS. 39A, I.Shamil prospekt, Makhachkala, 367030, IPG DSC RAS, e-mail: alkhasova.dzhamilya@mail.ru.

**Arsen Sh. Ramazanov** – Doctor of Chemistry, Professor, chief researcher at the Institute for Geothermal Research, DSC RAS, Makhachkala, Russia, e-mail: a\_ramazanov\_@mail.ru

### Contribution

Alibek B. Alkhasov, statement of the problem. Dzhamilya A. Alkhasova, carrying out calculations to determine the thermodynamic efficiency of conversion of thermal energy into electrical energy in a binary GeoPP. Arsen S. Ramazanov, conducting experimental studies on the extraction of chemical components from geothermal brines.

### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 15.03.2017  
Accepted for publication 13.04.2017