

**ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ,
ГИДРОЭНЕРГЕТИКА**

**ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ЭНЕРГЕТИКА РОССИИ: РЕСУРСНАЯ БАЗА,
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ (ОБЗОР)**

© 2022 г. В. А. Бутузов^а *, Г. В. Томаров^б, А. Б. Алхасов^с, Р. М. Алиев^{д, е}, Г. Б. Бадавов^с

^аКубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина,
ул. Калинина, д. 13, г. Краснодар, 350044 Россия

^бООО «Геотерм-М», ул. Лефортовский Вал, д. 24, Москва, 111250 Россия

^сИнститут проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал Объединенного института высоких температур РАН, просп. И. Шамиля, д. 39а, г. Махачкала, Республика Дагестан, 367030 Россия

^дДагестанский государственный технический университет, просп. И. Шамиля, д. 70, г. Махачкала,
Республика Дагестан, 367030 Россия

^еООО «Геоэкпром», просп. И. Шамиля, д. 55а, г. Махачкала, Республика Дагестан, 367030 Россия

*e-mail: ets@nextmail.ru

Поступила в редакцию 23.12.2020 г.

После доработки 18.03.2021 г.

Принята к публикации 21.04.2021 г.

Геотермальные ресурсы России исследуются с 1956 г. Разработаны три варианта геотермальных карт страны и оценки запасов месторождений расчетным суммарным дебитом 218 м³/с. Наибольшими запасами обладают Камчатский край, Курильские острова, Республика Дагестан, Краснодарский и Ставропольский края, Республика Адыгея. При этом месторождения парогидротерм в основном находятся на Камчатке и острове Кунашир (Курилы). Всего в России в 2019 г. эксплуатировалось 26 геотермальных водных месторождений, в том числе на Камчатке 11, в Дагестане 4, в Краснодарском и Ставропольском краях и Республике Адыгея 11. В 2019 г. было добыто 743.5 тыс. т геотермального пара (без Мутновского и Верхне-Мутновского месторождений) и 20.2 млн м³ геотермальной воды, в том числе на Камчатке 13.9 млн м³, в Дагестане 4.3 млн м³, в Краснодарском и Ставропольском краях и Республике Адыгея 2.0 млн м³. В России в 2019 г. эксплуатировались 161 геотермальная скважина, в том числе на Камчатке 84, в Дагестане 42, в Краснодарском и Ставропольском краях и Республике Адыгея 35. Представлен обзор российской геотермальной электроэнергетики суммарной установленной мощностью 83.9 МВт с выработкой в 2019 г. 428 млн кВт · ч электрической энергии. Рассмотрены основные технические характеристики и принципиальные тепловые схемы Паужетской и Мутновской геотермальных электростанций (ГеоЭС), указаны проблемы их эксплуатации и перспективы развития. Геотермальное теплоснабжение регионов России в 2019 г. осуществляли 23 термораспределительные станции (ТРС) и центральные тепловые пункты (ЦТП) суммарной тепловой мощностью 82.5 МВт с выработкой тепловой энергии 282 тыс. МВт · ч/год. Суммарная протяженность геотермальных тепловых сетей в двухтрубном исчислении составляла 172 км. Указаны особенности эксплуатации ТРС и ЦТП, определены перспективы развития геотермального теплоснабжения.

Ключевые слова: геотермальные воды, парогидротермы, геотермальная электростанция, геотермальная система теплоснабжения, скважина, реинжекция, термораспределительная станция, геологический пласт

DOI: 10.1134/S004036362112002X

Систематические геотермальные исследования в России выполняются с 1956 г. [1]. Результаты этой работы обобщены в Атласах геотермальных ресурсов [2, 3], оценки запасов геотермальных месторождений представлены в [4–6]. В СССР для реализации государственного геотермального проекта в составе Мингазпрома было создано научно-производственное объединение «Союзбургеотермия», состоявшее из пяти региональных управлений по использованию глубин-

ного тепла Земли и института НИПИГеотерм в г. Махачкала. Максимальная добыча геотермальной воды в СССР 60 млн м³ была достигнута в 1985 г., установленная электрическая мощность ГеоЭС составляла 15.6 МВт. Геотермальные системы теплоснабжения (ГСТ) имели суммарную тепловую мощность 307 МВт. Современное состояние геотермальных ресурсов Камчатки представлено в [7], месторождений Северного Кавказа по данным на 2008 г. – в [8], сведения о состоянии

геотермального теплоснабжения Краснодарского края – в [9]. Результаты обзора некоторых российских ГСТ приведены в [10]. Опыт эксплуатации геотермальных месторождений был обобщен в Правилах [11]. Проектирование геотермальных систем теплоснабжения выполнялось в соответствии с нормами [12].

Последние 10 лет исследования геотермальных ресурсов в России в основном ведут две научные организации: на Камчатке Институт вулканологии и сейсмологии ДНЦ РАН, на Северном Кавказе ИПГВЭ ОИВТ РАН в г. Махачкала. Добычей и эксплуатацией геотермальных месторождений занимаются: на Камчатке АО “Тепло Земли”, в Дагестане ООО “Геоэкопром”, в Краснодарском и Ставропольском краях и Республике Адыгея АО “Нефтегазгеотерм”. Комплексные исследования термодозаборов, разработку методов освоения месторождений выполняет ИПГВЭ – филиал ОИВТ РАН. Исследованием физико-химических процессов в многокомпонентных геотермальных средах, разработкой оптимальных технологических схем и совершенствованием оборудования ГеоЭС занимается ООО “Геотерм-М”.

Россия обладает огромными запасами геотермальной энергии в Предкавказье, Западной и Восточной Сибири, на Камчатке, Курильских островах, Сахалине, Дальнем Востоке с расчетным суммарным дебитом 218 м³/с [13].

ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ РОССИИ

Наиболее полная оценка ресурсов геотермальных месторождений России была выполнена в [14]. Всего к 2002 г. было разведано 62 месторождения геотермальных вод с запасами 268.2 тыс. м³/сут и 4 месторождения парогидротерм с запасами 40.7 тыс. м³/сут. Максимальная добыча геотермальной воды 60 млн м³ была достигнута в 1985 г. В 2002 г. в стране эксплуатировалось 33 месторождения с добычей 27.7 млн м³/год. В регионах России на 31.12.2002 мощность прямого использования геотермальных ресурсов оценивалась в 307 МВт, в том числе Камчатки 122 МВт, Краснодарского и Ставропольского краев, Республики Адыгея и Карачаево-Черкессии 109 МВт, Дагестана 71 МВт, Курил 20 МВт, Кабардино-Балкарии 2 МВт, Северной Осетии 3 МВт. По видам использования первые два места занимали обогрев теплиц (160 МВт) и теплоснабжение (110 МВт), далее следовали индустриальные процессы (25 МВт), плавательные бассейны, сушка продуктов, животноводство и рыбозаводство (по 4 МВт). В табл. 1–3 представлены основные характеристики эксплуатирующихся на 01.01.2020 геотермальных месторождений России.

ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ КАМЧАТСКОГО КРАЯ И КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ

Камчатский край и Курильские острова – единственные регионы в России, где имеются высокотемпературные пароводяные смеси, а также многочисленные месторождения геотермальных вод. Всего разведано 16 месторождений, из которых в 2020 г. эксплуатировались 11 с запасами геотермальной воды 77 тыс. м³/сут. Бурение скважин было начато в 1957 г., а в 1966 г. были образованы специализированное предприятие по бурению и эксплуатации геотермальных скважин “Камчатскбургеотерм” и Камчатское промышленное управление по использованию глубинного тепла Земли. Правопреемником их в настоящее время является АО “Тепло Земли”, имеющее лицензии на эксплуатацию геотермальных месторождений в Елизовском, Мильковском и Усть-Большерецком районах и г. Вилючинск с суммарными запасами по пару 35.5 кг/с, по воде 77.0 тыс. м³/сут. В табл. 1 приведены характеристики основных эксплуатируемых месторождений Камчатки. Самые крупные пароводяные геотермальные месторождения России Мутновское и Верхне-Мутновское с суммарными запасами 250 кг/с работают с реинжекцией. Из 50 пробуренных скважин на Мутновском месторождении функционируют восемь продуктивных и две для обратной закачки, на Верхне-Мутновском соответственно три и две. Эксплуатацией скважин, сборных паропроводов этих месторождений и оборудования ГеоЭС с 1990 г. занимается филиал Камчатскэнерго “Возобновляемая энергетика”.

Использование парогидротерм в России началось в 1966 г. на Паужетском месторождении, запасы которого 01.12.2007 были утверждены на 25 лет. Месторождение в основном используется для производства электроэнергии без реинжекции со сбросом сепарата в реки и ручьи. Эксплуатацией скважин и сепараторов занимается АО “Тепло Земли”. Согласно прогнозной оценке авторов [7], геотермальные ресурсы Камчатки достаточны для выработки электроэнергии на установках мощностью 680–1100 МВт по объемному методу и естественной разгрузке (оценка по поверхностным выходам пароводяных смесей) и 3000–3900 МВт по интенсивности вулканической активности. Прогнозные геотермальные ресурсы для теплоснабжения оцениваются в 1350 МВт.

Дальнейшие перспективы увеличения масштабов использования доступных геотермальных ресурсов на Камчатке могут быть связаны с доразведкой Больше-Банного, Нижне-Кошелёвского и Верхне-Паратунского геотермальных месторождений. Использование данных детальных сейсмологических наблюдений в сочетании с термогидродинамическим TOUGH2–E051-моделированием

Таблица 1. Основные характеристики месторождений геотермальной воды и парогидротерм Камчатского края на 01.01.2020

Эксплуатационная организация	Филиал, участок	Месторождение	Разведанные и утвержденные запасы, тыс. м ³ /сут	Температура на устье, °С	Количество скважин		Добыча, тыс. м ³ /год
					всего	продуктивных/реинжекционных	
Камчатск-энерго	“Возобновляемая энергетика”	Мутновское*	250.0 кг/с	170–190	50	8/2	–
		Верхне-Мутновское				3/2	
АО “Тепло Земли”	Паужетский	Паужетское**	35.5 кг/с	170–190	45	10	743.5 тыс. т/год
		Южно-Озерновское	0.68	81–97	2	2	223.4
	Паратунский	Паратунское	24.8	72.0	47	38	7649.7
		Верхне-Паратунское	23.3	76.8	23	8	333.0
		Южно-Бережное	0.561	58.0	3	1	0.64
	Быстринский	Эссовское	20.7	75.0	12	9	4886.4
		Анавгайское	3.37	75.0	4	1	670.5
Быстринское		0.76	43.0	2	2	93.0	
Пушинское		2.85	62.0	8	2	–	
Всего		77.0 тыс. м ³ /сут 285.5 кг/с			196	84/4	13856.64 тыс. м ³ /год 743.5 тыс. т/год

* Филиал Камчатскэнерго “Возобновляемая энергетика” эксплуатирует скважины, паропроводы, способ эксплуатации – реинжекция.

** АО “Тепло Земли” эксплуатирует скважины, сепараторы, паропроводы до Паужетской ГеоЭС.

позволило выявить на доступных для бурения глубинах скрытые геотермальные резервуары с гидротермальной циркуляцией, связанные с магматическими питающими системами вулканов Мутновский и Корякский. Эти резервуары также могут рассматриваться в качестве источников геотермальной энергии.

ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ РЕСПУБЛИКИ ДАГЕСТАН

Наиболее полные гидрогеологические исследования Дагестана были выполнены М.К. Курбановым, их результаты представлены в [15]. Систематические исследования геотермальных месторождений Дагестана с 1980 г. проводятся специалистами ИПГВЭ – филиала ОИВТ РАН в г. Махачкала. В [8] приведены характеристики всех разведанных геотермальных месторождений

Дагестана. В [16] представлены данные исследований, выполненных НПО “Союзбургеотермия”. Актуализированные характеристики разведанных и эксплуатируемых месторождений представлены по состоянию на 2019 г. в [17]. В табл. 2 приведены основные характеристики месторождений геотермальных вод Дагестана с температурами на устьях скважин 40–105°С, на которых пробурено 87 скважин, в том числе 42 эксплуатирующихся в 2020 г. В 2019 г. объем добычи геотермальной воды в Дагестане составил 4.332 млн м³. При этом наибольшее ее количество (2414 тыс. м³) было добыто на Кизлярском месторождении. На скважинах этого месторождения совместно используются геотермальные воды разных геологических горизонтов (чокракского с температурой 105°С и апшеронского – 48°С). На этом месторождении на двух термоводозаборах несколько лет успешно велась обратная закачка отработанного геотермального

Таблица 2. Основные характеристики месторождений термальных вод Республики Дагестан на 01.01.2020

Участок	Месторождение	Запасы, тыс. м ³ /сут		Температура на устье, °С	Дебит скважин, м ³ /сут	Минерализация, г/дм ³	Количество скважин		Добыча, тыс. м ³ /год
		разведанные	утвержденные				всего	продуктивных	
Махачкалинский	Махачкалинское	10.2	10.9	60	1000–1500	1.8–7.5	32	17	591
	Тернаирское	21.5	–	60–105	1000–4400	5.6–24.0	22	7	747
Кизлярский	Кизлярское	21.9	–	40–105	1000–3000	1.8–10.8	17	9	2414
Избербашский	Избербашское	4.54	4.54	55	300–1500	1.5–6.4	16	9	580
Всего		58.14	–				87	42	4332

Примечания: 1. Эксплуатационная организация – ООО “Геоэкопром”. 2. Способ эксплуатации – без реинжекции.

теплоносителя, остановленная по экономическим соображениям.

ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ КРАСНОДАРСКОГО И СТАВРОПОЛЬСКОГО КРАЕВ, РЕСПУБЛИК АДЫГЕЯ И КАРАЧАЕВО-ЧЕРКЕССИЯ

Геотермальные условия и ресурсы геотермальных вод на территории Краснодарского края впервые были исследованы В.С. Котовым и В.Н. Матвиенко [18]. Территория в геологическом разрезе на глубину до 3.5 км представляет собой чередование водовмещающих осадочных пород и водоупоров (пласты глин). Наибольшими потенциалами обладают нижнемеловые и среднемиоценовые отложения. Глубинные разломы в северной части Ставропольского края и на юге Краснодарского края обеспечивают поступление тепловой энергии из магматических очагов и формирование геотермальных месторождений. По данным отчетов ВНИПИгеотерм, по состоянию на 01.10.1982 разведанные эксплуатационные ресурсы Краснодарского края и Республики Адыгея были оценены в 44.0 тыс. м³/сут, Ставропольского края и Карачаево-Черкессии – в 11.1 тыс. м³/сут.

В табл. 3 приведены основные технические характеристики эксплуатируемых геотермальных месторождений Краснодарского и Ставропольского краев и Адыгеи [9]. Самым крупным месторождением Восточно-Кубанского бассейна является Мостовское, разбуренное семнадцатью скважинами глубиной 2000–2200 м с дебитами 2000–2500 м³/сут при температурах на устьях 67–75°С и минерализации 0.9–1.9 г/дм³ при соответствии ГОСТ на качество питьевой воды [19]. На этом месторождении были пробурены три реинжекционные скважины и запроектирована насосная станция. В настоящее время месторожде-

ние эксплуатируется в режиме свободного излива скважин без реинжекции. Запасы Мостовского месторождения в последний раз утверждались в 1979 г. по категориям А, В и С при фонтанной добыче в объеме 11.1 тыс. м³/сут. В непосредственной близости от данного месторождения в этом же Мостовском районе эксплуатируются Ново-Ярославское месторождение (пять скважин), Ульяновское (четыре скважины) и Межчокракское (две скважины).

Вторыми по запасам и числу скважин месторождениями Краснодарского края являются Вознесенское и Южно-Вознесенское, которые в геологическом и географическом отношении можно рассматривать как единое целое. Глубина скважин составляет 2500–2700 м при температурах на устьях 100–112°С, минерализации 0.8–2.8 г/дм³. Качество воды большинства скважин этих месторождений соответствует ГОСТ [19]. В этом же районе Кубани эксплуатируются Северо-Ереминское (две скважины) и Грязноречинское (одна скважина) и законсервированы Лабинское (четыре скважины) и Харьковское (одна скважина) месторождения.

Три геотермальных месторождения в Отрадненском районе Кубани (Отрадненское, Приурупское и Попутненское) разбурены десятью скважинами глубиной около 2000 м, дебитами каждой 600–1100 м³/сут с температурами на устьях 81–95°С и минерализацией 1 г/дм³.

В Ставропольском крае в 2020 г. эксплуатировалось Казьминское месторождение с двумя скважинами глубиной 2300–2500 м, дебитами 950–1100 м³/сут, температурой на устьях 117–124°С и минерализацией 3 г/дм³.

Майкопское геотермальное месторождение в Республике Адыгея разбурено 12 скважинами глубиной 1300–1700 м при температурах на устьях 82–86°С, минерализацией 3.2–8.7 г/дм³. Из-за вы-

Таблица 3. Основные характеристики месторождений термальных вод Краснодарского и Ставропольского краев и Республики Адыгея на 01.01.2020

Месторождение	Запасы разведанные, тыс. м ³ /сут	Температура на устье, °С	Дебит скважин, м ³ /сут	Минерализация, г/дм ³	Количество скважин	
					всего	продуктивных
Краснодарский край:						
Мостовское	11.1	67–75	2000–2500	0.9–1.9	14	7
Ульяновское	1.9	75	1700–1900	2.0	2	1
Ново-Ярославское	–	86–89	485–1000	2.4–4.3	5	2
Вознесенское	6.37	100–112	1260–1685	0.8–2.8	9	7
Южно-Вознесенское	–	100–112	900–2000	0.8–2.8	6	4
Северо-Ереминское	2.4	107–117	830–2108	1.3–2.9	2	1
Грязнореченское	–	107	1500	3.1	1	1
Отраденское	–	95	750–1080	1.0	4	2
Дагестано-Курджипиское	–	81	600–1100	0.9	3	1
Ставропольский край:						
Казьминское	–	117–124	950–1100	3.0	2	2
Республика Адыгея:						
Майкопское	4.98	82–86	500–1500	3.2–8.7	12	7
Всего					60	35

Примечания: 1. Эксплуатационная организация – АО “Нефтегазгеотерм”. 2. Способ эксплуатации – без реинжекции. 3. Добыча всего, тыс. м³/год: по субъектам – 2000.0, по России – 20188.64.

сокого содержания фенолов эксплуатация нескольких скважин запрещена. Максимальная добыча геотермальной воды этого месторождения в объеме 1.25 млн м³ была достигнута в 1983 г. В Адыгее также имеются два законсервированных из-за отсутствия потребителей месторождения: Ходзевское и Абадзехское.

В Карачаево-Черкессии были пробурены 13 скважин глубиной 900–2000 м с дебитами до 2000 м³/сут, температурами на устьях 44–77°С. Максимальная добыча в объеме 1.2 млн м³ была достигнута в 1981 г. В настоящее время месторождение не эксплуатируется.

Таким образом, в Краснодарском и Ставропольском краях и в Республике Адыгея в 2020 г. эксплуатировались 11 месторождений геотермальных вод (60 скважин), добыча из 35 скважин составляла 2.0 млн м³/год.

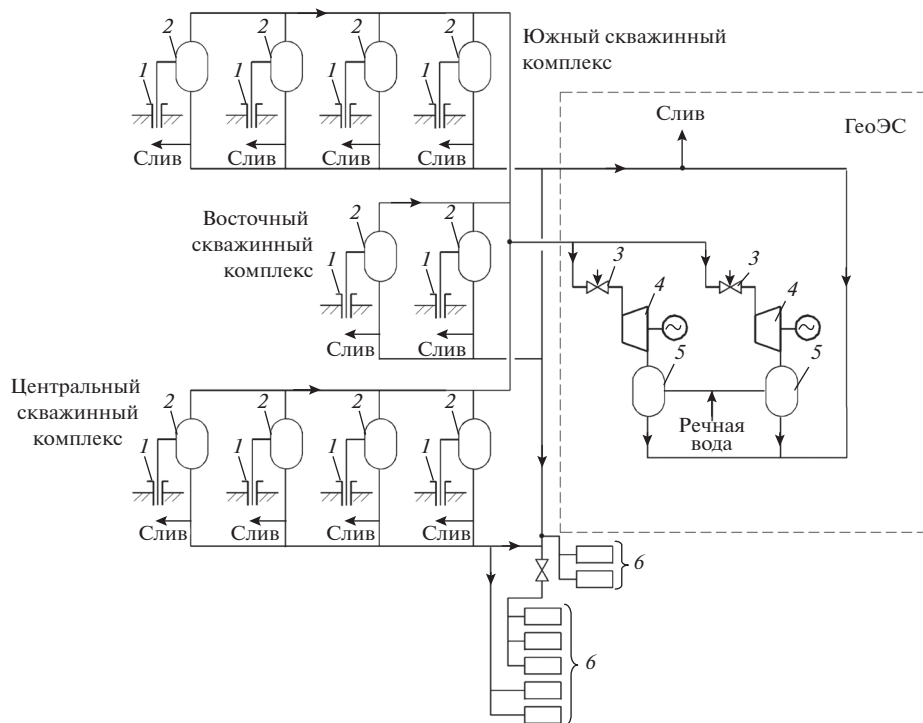
В целом по России в 2020 г. эксплуатировались 26 геотермальных месторождений, в том числе 23 месторождения геотермальных вод и 3 месторождения парогидротерм, на которых из 320 скважин работали 161. Годовая добыча геотермальной воды в 2019 г. составила 20.2 млн м³, пароводяной смеси – 473.5 тыс. т (без Мутновского и Верхне-Мутновского месторождений на Камчатке).

ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Обзор развития российской геотермальной энергетики представлен в [20]. Геотермальные

электростанции в России работают в Камчатском крае и на острове Кунашир (Курильские острова, Сахалинская обл.). В табл. 4 представлены основные характеристики этих ГеоЭС общей установленной мощностью 83.9 МВт. Выработка ими электроэнергии в 2019 г. составила 428 млн кВт · ч.

Первая в СССР Паужетская ГеоЭС прямого цикла с распределенной сепарацией и смешивающим конденсатором на речной воде была построена в 1966 г. на полуострове Камчатка. В настоящее время ее установленная мощность равна 12 МВт (две турбины по 6 МВт), работают 10 добычных и одна реинжекционная скважины. Запасы пароводяной смеси месторождения были утверждены в 2008 г. на 25 лет суммарным дебитом 35.5 кг/с со средней энтальпией 737.4 кДж/кг при удельном расходе пара 2.5 кг/(с · МВт) и минимальном давлении на устье 0.25 МПа. За 55 лет пробурено 45 разведочных скважин глубиной 220–1205 м. На рисунке показана принципиальная технологическая схема Паужетской ГеоЭС. На каждой эксплуатационной скважине установлен устьевой сепаратор объемом 10 м³ с шумоглушителем. Все добычные скважины объединены магистральными паропроводами. В настоящее время сепарат в количестве 87% сливается в поверхностные водоемы. Геотермальный пар из станционного сепаратора подается в паровые турбины. После турбин геотермальный пар поступает в конденсатор смешивающего типа, охлаждаемый впрыском речной воды из подручного водозабора. Некон-



Принципиальная тепловая схема Паужетской ГеоЭС.

1 – добычная геотермальная скважина; 2 – сепаратор; 3 – клапан регулирующий; 4 – паровая турбина; 5 – конденсатор смешительный; 6 – потребители тепла

денсирующиеся газы удаляются из конденсатора эжекторами.

Первоначально в 1966 г. на электростанции были установлены две паровые турбины МК-2.5 мощностью по 2.5 МВт, которые в 1980 г. были заменены на паровые турбины МК-6-1 производства Калужского турбинного завода (КТЗ) и в 2006 г. на турбину ГТЗА-01 (АО “Кировский завод”).

В 2012 г. для использования тепла сепарата (420 м³/ч при температуре 120°C) был сооружен

бинарный энергоблок мощностью 2.5 МВт с конденсатором поверхностного типа, разработанный АО “Геоинком” [20]. Сепарат последовательно передает тепловую энергию фреону R-134a в экономайзере, испарителе, пароперегревателе, после чего насосом закачивается в реинжекционную скважину. Паровая фракция фреона подается в турбину и далее в поверхностный конденсатор, охлаждаемый речной водой. Бинарный блок испытан, но не введен в эксплуатацию. В 2018 г. Паужетская ГеоЭС выработала 43.765 млн кВт · ч электроэнергии, в том числе на геотермальном

Таблица 4. Основные характеристики ГеоЭС

Наименование ГеоЭС	Установленная мощность, МВт	Год строительства	Количество скважин		Расчетный расход пара, т/ч
			продуктивных	реинжекционных	
Паужетская	12.0	1966	10	1	9.8
Паужетская, бинарная	2.5	2012	—	1	9.8
Верхне-Мутновская	12.0	1999	3	2	96.0
Мутновская	50.0	2002	8	2	324.0
Менделеевская	7.4	2019	—	—	—

паре 42.97 млн кВт · ч (98%). Валовая выручка в 2019 г. составила 413.649 млн руб. при затратах 363.072 млн руб.

Основная проблема при эксплуатации Паужетской ГеоЭС – дефицит геотермального пара. Из десяти добычных скважин только одна оборудована как эксплуатационная. Остальные скважины – разведочные, имеют меньшие диаметры и дебиты, а также не имеют колонн с фильтрами, что повышает опасность обрушения пород в стволах. В настоящее время фактическая максимальная располагаемая мощность ГеоЭС составляет 5.6 МВт, суммарная установленная мощность геотермальных турбин – 12 МВт, дизельэлектрогенераторов – 3.56 МВт, бинарного энергоблока – 2.5 МВт при мощности потребителей около 6.0 МВт. По данным [7] расчеты, выполненные с помощью термогидродинамического TOUGH2-моделирования, с прогнозом эксплуатации продуктивных геотермальных резервуаров при известных фильтрационно-емкостных и энергетических свойствах показали возможность увеличения электрической мощности Паужетского месторождения с использованием бинарной технологии до 11 МВт.

Самая мощная в России Мутновская ГеоЭС установленной мощностью 50 МВт (два энергоблока по 25 МВт) была пущена в эксплуатацию в 2002 г. [20]. Принципиальная тепловая схема этой электростанции приведена в [21] и имеет следующие особенности в технологии и оборудовании: пар перед турбинами проходит предварительную промывку и вторичную сепарацию, применены компактные одноцилиндровые двухпоточные паровые турбины и конденсатор смешивающего типа, обеспечена полная автоматизация управления технологическими процессами. Геотермальный пар от восьми продуктивных скважин поступает на ГеоЭС по отдельным паропроводам. После двухступенчатой сепарации пар давлением 0.65 МПа подается в две турбины К-25-06-Гео (КТЗ), все ступени которых выполнены с небольшой корневой реактивностью. В последней ступени лопатки сопловой решетки расположены под наклоном по направлению вращения (саблевидные лопатки), что увеличивает КПД ступени на 2%. Первые четыре ступени изготовлены с надбандажным лабиринтным уплотнителем. Для уменьшения потерь энергии в выхлопном патрубке за последней ступенью установлен высокоэффективный кольцевой диффузор с косым срезом.

В проточной части турбины начиная с 4-й ступени применена развитая система периферийной сепарации, позволяющая удалять влагу до 8%. В 7-й и 8-й ступенях используется внутренканальная сепарация в сопловых решетках. В главном корпусе электростанции расположены турбины, сепараторы второй ступени, конденсаторы, вспомога-

тельное оборудование, приборы автоматизированной системы управления тепловыми процессами (АСУ ТП) и т.п. Он соединен закрытым переходом со зданием, в котором размещены сепараторы первой ступени, шумоглушители, реинжекционные насосы, вспомогательное оборудование. Применено комплектное распределительное устройство с элегазовой изоляцией (КРУЭ-220) типа 8 DN 9 фирмы Siemens. Режим работы энергоблоков № 1, 2, общестанционного оборудования, сепараторной, градирни, оборудования геотермального поля поддерживает и контролирует АСУ ТП, которая представлена программно-техническим комплексом Teleperm ME (ТПТС-51).

При эксплуатации Мутновской ГеоЭС были выявлены и решены некоторые проблемы. В 2006 г. были пробурены дополнительные скважины, которые позволили устранить недостаток геотермального пара. Из-за отложений соединений кремниевой кислоты в скважинах, трубопроводах, сепараторах потребовалось выполнить дополнительные работы по их очистке и замене дырчатых листов сепараторов. Была усилена защита градирен конденсаторов от обледенения в зимнее время. Предусмотрена ежегодная очистка проточной части турбин от отложений. Воздействие сероводорода усилило коррозию медных контактов и проводов в укрытиях скважин, что потребовало провести их замену на алюминиевые.

В настоящее время Мутновская ГеоЭС является самой экономичной электростанцией Камчатки. Средний тариф на электроэнергию ПАО “Камчатск-энерго” в 2018 г. составил 7.4 руб/(кВт · ч), тариф АО “Геотерм” (Мутновская ГеоЭС) – 3.4 руб/(кВт · ч). При этом Мутновская ГеоЭС в определенные периоды выступает объектом регулирования энергосистемы при заполнении графиков суточного потребления электроэнергии. Это приводит к изменению дебитов пароводяных добычных скважин, снижению дебитов реинжекционных скважин и, как следствие, к усилению процессов образования отложений в скважинах и уменьшению располагаемой мощности электростанции.

Одна из основных проблем эксплуатации камчатских ГеоЭС – дефицит геотермального теплоносителя. Так, в настоящее время Паужетская ГеоЭС обеспечена геотермальным паром только на половину установленной мощности. На Верхне-Мутновской и Мутновской ГеоЭС недостача геотермального пара в 2018 г. составляла соответственно 17.4 и 8.0 кг/с. Также важной проблемой является образование отложений солей в стволах скважин и трубопроводах. Основные результаты исследований образования отложений кремнезема в высокотемпературных геотермальных месторождениях приведены в [22]. Авторы отмечают, что метеорные воды при контакте на глубинах

5–6 км с магматическими породами насыщаются коллоидами кремнезема. В потоке высокотемпературного флюида концентрация кремнезема постоянно изменяется от 5 до 35 мг/кг в зависимости от температуры и химических свойств горных пород. Осаждение кремнезема происходит практически по всему геотермальному контуру: добычная скважина, трубопроводы, сепараторы, турбины, скважина обратной закачки.

Снижение мощности ГеоЭС производится путем сброса избыточного расхода пара в атмосферу перед турбинами (Паужетская ГеоЭС) либо уменьшением его расхода от скважин (Мутновская, Верхне-Мутновская ГеоЭС). При парлифтном способе добычи пароводяной смеси (ПВС) уменьшение дебита и увеличение давления на устье скважины приводят к изменению температурного поля ствола и снижению энтальпии, а рост давления до его значения в пласте может вызвать “запирание” скважины. При изменении режимов работы скважин увеличивается интенсивность отложения солей.

Наиболее благоприятным режимом работы геотермальных скважин с ПВС является поддержание неизменными дебитов и давлений геотермального теплоносителя. Для обеспечения такого режима эксплуатации турбоустановок ГеоЭС целесообразно применение систем повышения энергopotенциала свежего пара перед турбиной и пара вторичного вскипания на основе водородно-кислородных парогенераторов [23, 24]. В данном случае утилизируются излишки электроэнергии в периоды суточных разгрузок для производства и накопления водорода и кислорода обеспечивает более эффективную работу ГеоЭС в номинальном режиме.

В табл. 4 приведены технические характеристики ГеоЭС Камчатки и Курил. По оценкам Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН [7], имеются возможности увеличения мощности Мутновского геотермального месторождения до 105 МВт. Программой перспективного развития электроэнергетики Камчатского края на 2019–2023 гг. для использования тепловой энергии сепарата на Мутновской ГеоЭС предусмотрено ее расширение путем установки двух энергоблоков прямого цикла мощностью по 4.0 МВт (I очередь) и двух бинарных энергоблоков мощностью по 2.5 МВт (II очередь), а также сооружение Мутновской ГеоЭС-2 (50 МВт) с двумя энергоблоками прямого цикла мощностью по 25.0 МВт каждый. На острове Кунашир (Курильские острова) в 2019 г. завершены работы по реконструкции Менделеевской ГеоЭС установленной мощностью 7.4 МВт с бинарным циклом.

В настоящее время компетенциями по исследованиям геотермальных ресурсов располагает Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН в г. Петропавловск-Камчатский, фундаменталь-

ные исследования и разработку технологии и оборудования ГеоЭС, в том числе бинарных энергоблоков, выполняет ООО “Геотерм-М” в Москве.

ГЕОТЕРМАЛЬНОЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ В РОССИИ

Геотермальное теплоснабжение в России практикуется в основном в следующих регионах: Камчатский край, остров Кунашир (Курилы), Республика Дагестан, Краснодарский и Ставропольский края, Республика Адыгея. В 2019 г. для этого было израсходовано около 20.2 млн м³ геотермальной воды. Геотермальные системы теплоснабжения эксплуатируют на Камчатке АО “Тепло Земли”, в Дагестане ООО “Геоэкопром”, в Краснодарском и Ставропольском краях и Республике Адыгея АО “Нефтегазгеотерм”. В табл. 5 представлены основные характеристики ГСТ России.

Основными нормативными документами для проектирования ГСТ являются Правила [11] и Нормы [12] (отменены в 2021 г.). Актуальны также теоретические основы расчета и проектирования, развитые в [25–28].

ГЕОТЕРМАЛЬНОЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ КАМЧАТСКОГО КРАЯ И КУРИЛ

Геотермальное теплоснабжение на Камчатке началось в 1966 г. с обустройства Паужетского месторождения парогидротерм. Скважинный геотермальный комплекс состоит из южной, восточной и центральной частей. На каждой скважине установлены сепараторы с шумоглушителями. Все скважины соединены последовательно, а три комплекса объединяются вместе перед площадкой ГеоЭС. Тепловая мощность 20 скважин составляет 12 МВт, протяженность паропроводов – 11.2 км, реализация тепловой энергии – 42.97 тыс. МВт · ч/год. Теплоснабжение потребителей пос. Паужетка осуществляется от паропроводов южного и центрального скважинных комплексов с подключением по открытой схеме. Эксплуатирует скважинные комплексы и паропроводы до здания Паужетской ГеоЭС АО “Тепло Земли”. От Нижне-Озерновского месторождения отапливаются объекты рыболовецкого колхоза по открытой схеме в селе Запорожье с реализацией геотермальной воды от одной скважины 113.4 тыс. м³/год и аналогичные объекты в селе Ключи с реализацией от одной скважины 51 тыс. м³/год.

Самое большое на Камчатке Паратунское месторождение с утвержденными запасами 24.8 тыс. м³/сут при температуре 72°C из 38 добычных скважин обеспечивает теплоснабжение по открытой схеме объектов в поселках Паратунка и Термальный в 70 км от г. Петропавловск-Камчатский, а также термального курорта Паратунка.

Таблица 5. Основные характеристики геотермальных систем теплоснабжения России

Адрес ГСТ	Месторождение	Число добычных скважин	Температура теплоносителя, °С	Тип системы теплоснабжения	Расчетная мощность, МВт	Количество ТРС (ЦТП)	Протяженность тепловых сетей, км	Реализация тепловой энергии, тыс. МВт·ч/год	Теплоснабжающая организация
<i>Камчатский край, Сахалинская обл.</i>									
Паратунский участок	Паратунское	38	68–77	Открытая	12.0	4	33.7	83.0	АО «Тепло Земли»
Быстринский участок	Верхне-Паратунское	8							
	Южно-Бережное	1							
	Эсовское	9							
Паужетский участок	Анавайское	1	42–75	«	18.3	Открытая	32.0	41.6	АО «Тепло Земли»
	Быстринское	2							
	Пушинское	2							
Остров Кунашир	Паужетское	10	81–190	«	12.0	Открытая	11.2	42.97	*
	Южно-Озерновское	2							
Итого	Менделеевское	4	90	Закрытая	18.0	2	10.0	–	–
					60.3	6	86.9	167.57	–
<i>Республика Дагестан</i>									
г. Махачкала	Махачкала-Тернаирское	2	57–60	Закрытая	13.0	3	29.3	29.8	ООО «Гео-экопром»
		7	40–105	Комбинированная	20.7	3	9.0	52.1	
г. Кизляр	Кизлярское	10	55–60	Открытая	1.3	2	21.7	8.8	
Итого	Избербашское				35.0	8	60.0	90.7	

Таблица 5. Окончание

Адрес ГСТ	Месторождение	Число добычных скважин	Температура теплоносителя, °С	Тип системы теплоснабжения	Расчетная мощность, МВт	Количество ТРС (ЦТП)	Протяженность тепловых сетей, км	Реализация тепловой энергии, тыс. МВт · ч/год	Теплоснабжающая организация
<i>Краснодарский край</i>									
Пос. Мостовской Мостовского района, ул. Горького, 142	Мостовское	1	72	Открытая	2.1	1	1.5	6.5	МУП “Мостовские тепловые сети”
Пос. Мостовской Мостовского района, ул. Северная	Мостовское	1	72	Открытая	3.5	1	3.2		То же
Пос. Розовый Лабинского района	Вознесенское, Южно-Вознесенское	2	100	Закрытая	2.4	2	15.0	3.0	МУП “Коммунальник”
Станица Вознесенская Лабинского района, Вознесенский техникум пищевых производств	Вознесенское	3	100	Закрытая	3.2	1	8.0	6.6	МУ МП “Вознесенский”
Пос. Красный Лабинского района	Грязнореченское	1	105	Открытая	3.0	1	3.8	5.8	То же
Итого					14.2	6	31.5	21.9	
Всего по России					109.5	20	178.4	280.17	

* Паужетское месторождение тепловой мощностью 12 МВт с теплотсетями протяженностью 11.2 км обеспечивает работу ГеоЭС.

Геотермальная вода относится к классу слабоминерализованной, сульфатной, кальциево-натриевой, кремнистой, щелочной лечебной и лечебно-столовой. Расчетная тепловая мощность потребителей месторождения составляет 12 МВт, работают четыре насосных геотермальных ЦТП с баками разрыва струи со сбросом отработанного теплоносителя в реки и ручьи. Общая протяженность тепловых сетей составляет 33,7 км, реализация тепловой энергии равна 83 тыс. МВт · ч/год. Геотермальная вода Верхне-Паратунского месторождения (восемь добычных скважин) имеет аналогичный химический состав и температуру. Объем добычи в 2019 г. составил 234,4 тыс. м³. В состав Паратунского эксплуатационного участка АО «Тепло Земли» входит также Южно-Бережное месторождение в окрестностях г. Вилючинск у восточного берега Тихого океана с добычей от одной скважины 0,638 тыс. м³/год.

На Быстринском промысловом участке эксплуатируются по открытой схеме системы геотермального теплоснабжения в селах Эссо, Анавгай, Быстринское, Пушкинское суммарной расчетной тепловой мощностью 18,3 МВт. Общая протяженность тепловых сетей составляет 18,3 км, реализация тепловой энергии 41,6 тыс. МВт · ч/год.

Всего в 2019 г. в Камчатском крае АО «Тепло Земли» добыто 743,5 тыс. т геотермального пара для Паужетской ГеоЭС и теплоснабжения объектов пос. Паужетка и 13,9 млн м³ геотермальной воды. Суммарная тепловая мощность объектов теплоснабжения полуострова равна 42,3 МВт. Реализация тепловой энергии в 2019 г. составила 167,57 тыс. МВт · ч. Прогнозная оценка Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН по установленной мощности геотермального теплоснабжения Камчатки составляет 1350 МВт [7].

Комплекс перспективных мероприятий по развитию геотермального теплоснабжения Камчатки включает в себя: технико-экономическое обоснование теплопровода от Мутновской ГеоЭС мощностью 150 МВт до г. Петропавловск-Камчатский, систему геотермального теплоснабжения г. Вилючинск мощностью 132 МВт от Верхне-Паратунского месторождения (предложение Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН о геотермальном теплоснабжении от Паратунского месторождения тепловой мощностью 216 МВт), предложение АО «Росгеология» по использованию теплового потенциала мощностью 1100 МВт Авачинской группы вулканов для теплоснабжения Камчатки [29].

В Сахалинской обл. на острове Кунашир в 1994 г. от Менделеевского геотермального месторождения были подключены к теплоснабжению поселки Горячий Ключ и Южно-Курильск. Система теплоснабжения последнего тепловой мощностью 18 МВт состоит из ЦТП и Менделеевской

ГеоЭС, магистрального теплопровода протяженностью 10 км и переоборудованных котельных поселка [1].

ГЕОТЕРМАЛЬНОЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ РЕСПУБЛИКИ ДАГЕСТАН

Дагестан в России является пионером в использовании глубинного тепла Земли и геотермального теплоснабжения. В 1949 г. в г. Махачкала была переоборудована из нефтяной первая скважина для геотермального теплоснабжения [1]. С 1997 г. эксплуатируются три термораспределительные станции от двух геотермальных скважин общей мощностью 13 МВт, которые отапливают здания площадью 177 тыс. м² и обеспечивают горячее водоснабжение (ГВС) 10 тыс. человек. В связи с высокой минерализацией геотермальной воды ТРС выполнены по закрытой схеме с отдельным теплообменником отопления и двухступенчатым подогревом. Теплоноситель скважины догревается до требуемой температуры в первой ступени. В [17] приведена схема ТРС г. Махачкала. Следует отметить, что все ТРС в Дагестане имеют баки-дегазаторы с разрывом струи в соответствии с [11] и насосы подачи теплоносителя к теплообменникам. Суммарный отпуск геотермальной тепловой энергии всех ТРС г. Махачкала в 2020 г. составил 29,8 тыс. МВт · ч при тарифе 527 руб/(МВт · ч).

В г. Кизляр с 1970 г. эксплуатируются три ТРС от семи геотермальных скважин общей установленной мощностью 20,7 МВт, в том числе пять скважин, разбуренных на чокракский горизонт глубиной 2960 м с температурой на устьях 100°C, дебитом каждой 75–145 м³/ч при давлении 0,7–1,0 МПа и две скважины на апшеронский горизонт глубиной 1000 м с температурой на устьях 49°C, дебитом каждой 25–100 м³/ч при давлении 0,35 МПа. В [17] представлена схема одной из таких ТРС, особенностью которой является работа скважин чокракского горизонта на подогрев в открытой системе отопления и ГВС, подпитка которой производится апшеронской геотермальной водой после ее подогрева чокракской. Третья ТРС имеет упрощенную систему, в которой по закрытой схеме используется геотермальный теплоноситель только чокракского горизонта. Общая протяженность геотермальных тепловых сетей г. Кизляр составляет 9 км, отпуск тепловой энергии – 52,1 тыс. МВт · ч/год. Геотермальным отоплением обеспечивается 106 тыс. м² зданий (11,3% жилого фонда города) при тарифе в 2020 г. 168 руб/(МВт · ч).

Особенность геотермального теплоснабжения г. Избербаш – сравнительно низкие температуры на устьях скважин (43–62°C) при соответствии химического состава ГОСТ [19] на питьевую воду, что обуславливает их применение только на

ГВС. В городе работают две ТРС общей мощностью 3.9 МВт. Принципиальная схема этих ТРС отличается простотой. Геотермальная вода из скважин подается в бак-аккумулятор и далее насосом на ГВС потребителей. Общая протяженность геотермальных тепловых сетей города составляет 21.7 км, отпуск тепловой энергии — 8.8 тыс. МВт · ч/год. Теплораспределительные станции обеспечивают горячее водоснабжение 6 тыс. человек при тарифе в 2020 г. 477 руб/(МВт · ч). В целом по Дагестану установленная мощность восьми ТРС составляет 35 МВт, тепловые сети имеют протяженность 60 км, реализация тепловой энергии в 2019 г. — 90.7 МВт · ч.

ГЕОТЕРМАЛЬНОЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ ЧЕЧЕНСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

В окрестностях г. Грозный в 70-х годах прошлого века по инициативе А.А. Аветисянца на Ханкальском геотермальном месторождении была создана первая в СССР реинжекционная система. Из 36 продуктивных скважин ежегодно добывалось 7.0 млн м³ геотермальной воды, а в четыре реинжекционные скважины производилась обратная закачка [30]. В 2013 г. на Ханкальском месторождении была построена дуплетная геотермальная станция, включающая в себя добычную скважину глубиной 900 м с температурой на устье 95°C и реинжекционную скважину глубиной 1000 м. Расчетная тепловая мощность данной ТРС составляет 8.7 МВт. Она предназначена для отопления тепличного комбината [31–33]. В результате испытаний установлена возможность работы дуплетных скважин без насосов на термосифонной циркуляции.

ГЕОТЕРМАЛЬНОЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ

Наибольший опыт создания геотермальных систем Краснодарского края имеет ГТС мощностью 2.1 МВт в пос. Мостовской по ул. Горького, д. 142, выполненная по циклической схеме с периодическим сбросом отработанного геотермального теплоносителя. В [9] приведены ее схема и результаты многолетней эксплуатации. Низкая минерализация и температура геотермального теплоносителя до 75°C Мостовского месторождения обусловили применение открытых систем с непосредственной подачей воды на ГВС. По аналогичной схеме выполнена система мощностью 3.5 МВт в пос. Мостовской по ул. Северная.

Геотермальные месторождения Лабинского района Вознесенское и Южно-Вознесенское имеют температуры на устьях скважин 55–60°C, минерализацию до 3 г/дм³ и соответствие химического состава ГОСТ [19] на питьевую воду. В 2010 г. была выполнена реконструкция системы

геотермального теплоснабжения пос. Розовый Лабинского района мощностью 2.4 МВт. В [9] представлены схема и результаты эксплуатации этой системы. В центре поселка построен ЦТП с независимым подключением систем отопления зданий, на кровле которого сооружена гелиоустановка для ГВС в межотопительный период. Особенностью систем геотермального теплоснабжения комплекса зданий техникума в станице Вознесенская Лабинского района мощностью 3.2 МВт является подключение систем отопления и ГВС зданий по открытой схеме. В пос. Красный Лабинского района работает открытая система геотермального теплоснабжения жилых и административных зданий с температурой на устье скважины Грязнореченского месторождения 105°C.

Системы геотермального теплоснабжения мощностью до 1 МВт работают в станицах Костромская Мостовского района, Вознесенская, Упорная (школа-интернат) и Ереминская Лабинского района.

Геотермальные воды используются для бальнеолечения в десяти санаторно-оздоровительных комплексах, в том числе в г. Краснодар, санатории “Минеральный” в г. Хадыженск, санатории “Приволенские воды” в станице Каневская, санатории “Лабинск”, СПА-курорте “Кремниевые термы” в станице Ярославская Мостовского района, бальнеологических комплексах в селе Велюковское, у хутора Кубанский в Белореченском районе. Геотермальные воды используются также в 20 плавательных бассейнах гостиниц и баз отдыха.

С 1987 по 2015 г. на Троицком геотермальном йодобромном месторождении с температурой на устьях 66 скважин 50–60°C с минерализацией 60–70 г/дм³ и годовым дебитом 3.6 млн м³ успешно работал Троицкий йодный завод, бывший единственным российским производителем кристаллического йода.

Добычу геотермальной воды в Краснодарском и Ставропольском краях и Республике Адыгея осуществляет АО “Нефтегазгеотерм” (пос. Мостовской Краснодарского края). Суммарная мощность эксплуатируемых систем геотермального теплоснабжения составляет 14.2 МВт, протяженность тепловых сетей — 18 км, реализация тепловой энергии от шести ЦТП — 21.9 тыс. МВт · ч/год.

ВЫВОДЫ

1. Российская геотермальная научная школа имеет значительные результаты развития, реализованные в виде Атласов геотермальных ресурсов, разведанных месторождений, методов и способов эксплуатации термоводозаборов, а также созданных и эксплуатируемых ГеоЭС на Камчатке и Курильских островах. Геотермальные исследу-

дования применительно к энергетике в России проводятся в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (г. Петропавловск-Камчатский), Институте проблем геотермии и возобновляемой энергетики (филиал ОИВТ РАН в г. Махачкала), ООО “Геотерм-М” (Москва). Использование и развитие результатов этих работ на практике могут обеспечить надежное, недорогое и экологически чистое электро- и теплоснабжение ряда регионов страны. В настоящее время в России эксплуатируются 23 месторождения геотермальных вод и 3 месторождения парогидротерм на Камчатке, в Дагестане, Краснодарском и Ставропольском краях и Республике Адыгея. На них пробурено 320 скважин, из которых в 2019 г. эксплуатировалась 161. Добыча геотермальной воды в 2019 г. составила 20.2 млн м³, геотермального пара – 743.5 тыс. т (без Мутновского и Верхне-Мутновского месторождений), что по воде втрое меньше, чем добывалось в 1985 г. в СССР. Добычей геотермальной воды и пара, эксплуатацией термоводозаборов занимаются преемники структур Газпрома СССР АО “Тепло Земли” (Елизовский район, г. Петропавловск-Камчатский), ООО “Геокопром” (г. Махачкала), АО “Нефтегазгеотерм” (пос. Мостовской Краснодарского края).

2. Россия является одной из немногих стран мира, способных разрабатывать, изготавливать и строить ГеоЭС. В 2019 г. в стране работали четыре ГеоЭС суммарной установленной мощностью 76.5 МВт с выработкой электроэнергии 428 млн кВт · ч/год. На Камчатке ГеоЭС вырабатывают 23% всей потребляемой электроэнергии, а их тариф почти вдвое меньше, чем на традиционных тепловых электростанциях. В связи с ограниченностью на Камчатке местных газовых ресурсов, которые сегодня являются топливной основой для ТЭЦ, в ближайшие годы станет актуальным вопрос о расширении масштабов использования геотермальных месторождений в энергобалансе центрального региона полуострова. Оценки показывают, что геотермальных ресурсов Камчатки достаточно для обеспечения работы ГеоЭС общей мощностью до 3900 МВт. Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Институт геотермии и возобновляемой энергетики (филиал ОИВТ РАН в г. Махачкала) и ООО “Геотерм-М” продолжают исследования по изучению геотермальных ресурсов, совершенствованию оборудования и технологий использования геотермального теплоносителя для производства электроэнергии и тепла, в том числе с применением бинарных установок и тепловых насосов, а также для извлечения полезных ископаемых из геотермального флюида.

3. Геотермальное теплоснабжение является основным потребителем термоводозаборов России (около 90% теплоносителя). В 2019 г. геотермальные системы теплоснабжения эксплуатировались в основном в следующих регионах: Камчатка,

Курилы, Дагестан, Краснодарский и Ставропольский края, Республика Адыгея с суммарной подключенной тепловой мощностью 82.5 МВт и выработкой тепловой энергии 282 тыс. МВт · ч/год. В настоящее время работают 23 термораспределительные станции и центральные тепловые пункты, протяженность тепловых сетей в двухтрубном исчислении составляет 172 км. Для каждого из вышеперечисленных регионов выполнен анализ применяемых схем геотермальных систем теплоснабжения и определены перспективы развития. В то же время имеющаяся практика тарифообразования снижает конкурентоспособность геотермального теплоснабжения. Существующие нормативные документы, регламентирующие разработку термоводозаборов и проектирование геотермальных систем теплоснабжения, требуют доработки в соответствии с современными условиями.

4. Актуальными направлениями исследований в области отечественной геотермии являются разведка и оценка ресурсной базы, совершенствование технологий геотермальных тепло- и электро-снабжения, создание нового оборудования для эксплуатации термоводозаборов (погружные насосы, реинжекционные насосные станции, системы очистки сбросной воды и т.п.) и комбинированных систем геотермального и традиционного теплоснабжения, обоснование экономической целесообразности широкомасштабного геотермального тепло- и электроснабжения.

5. С учетом конкурентных преимуществ геотермальной энергетики (высокий КИУМ, независимость от климатических условий и др.) по сравнению с другими возобновляемыми источниками энергии (ветер, солнце и др.), а также значительного отечественного опыта в данной области при соответствующей государственной политике геотермия может стать основой для устойчивого и недорогого энергоснабжения многих регионов России. Этому будут способствовать включение геотермальной энергетики в закон по возобновляемым источникам энергии, разработка и реализация целевых федеральных и региональных программ развития российской геотермальной энергетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бутузov В.А.** Российская геотермальная энергетика: анализ столетнего развития научных и инженерных концепций // *Окружающая среда и энергетика*. 2019. № 3. С. 4–21.
2. **Макаренко Ф.А., Велого А.Я., Покровский В.А.** Геотермальная карта СССР в масштабе 1 : 5 000 000. Объяснительная записка. М.: Наука, 1972.
3. **Атлас карт ресурсов термальных вод СССР.** Л.: М-во геологии СССР, 1984.
4. **Дядькин Ю.Д.** Разработка геотермальных месторождений. М.: Недра, 1989.

5. **Богуславский Э.И.** Освоение тепловой энергии недр. М.: Спутник, 2018.
6. **Маврицкий Б.Ф., Локшин Б.А., Вольфенфельд А.В.** Прогнозные запасы термальных вод СССР и возможные объемы внедрения геотермального теплообеспечения. М.: Наука, 1973.
7. **Кирюхин А.В., Сугробов В.М.** Геотермальные ресурсы Камчатки и ближайшие перспективы их освоения // Вулканология и сейсмология. 2019. № 6. С. 50–65.
8. **Алхасов А.Б.** Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии. М.: Физматлит, 2008.
9. **Бутузов В.А.** Геотермия Краснодарского края: ресурсы, опыт использования, перспективы // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2019. № 4. С. 80–85.
10. **Бутузов В.А., Амерханов Р.А., Григораш О.В.** Геотермальное теплоснабжение в России // Теплоэнергетика. 2020. № 3. С. 3–12. <https://doi.org/10.1134/S0040363620030029>
11. **ПБ 07-599-03.** Правила разработки месторождений теплоэнергетических вод. М.: Госэнергонадзор России, 2003.
12. **ВСН 56-87.** Геотермальное теплохладоснабжение жилых и общественных зданий. М.: Стройиздат, 1989.
13. **Шулюпин А.Н., Варламова Н.Н.** Современные тенденции в освоении геотермальных ресурсов // Георесурсы. 2020. Т. 22. № 4. С. 113–122.
14. **Кононов В.И., Поляк Б.Г., Хуторской М.Д.** Гидрогеотермальные ресурсы России // Георесурсы. 2005. Т. 2. № 17. С. 29–33.
15. **Курбанов М.К.** Гидротермальные и гидроминеральные ресурсы Восточного Кавказа и Предкавказья. М.: Наука, 2001.
16. **Алиев М.Г., Омаров М.А.** Основные научно-технические и практические задачи развития геотермального теплоснабжения в СССР // Сб. науч. тр. ВНИПИгеотерм и ВНИИЭгазпром. М., 1985. С. 3–11.
17. **Геотермальное** теплоснабжение Дагестана / В.А. Бутузов, А.Б. Алхасов, Р.М. Алиев, Г.Б. Бадавов // Энергосбережение и водоподготовка. 2020. № 4. С. 30–40.
18. **Котов В.С., Матвиенко В.Н.** Геотермальные исследования и ресурсы термальных вод Азово-Кубанского нефтегазового бассейна // Региональная геотермия и распространение термальных вод в СССР. М.: Наука, 1967. С. 125–130.
19. **ГОСТ Р 51232-98.** Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества. Введ. в действие с 07.01.1999. <http://docs.cntd.ru/document>
20. **Геотермальная** энергетика: справ.-метод. изд. / Г.В. Томаров, А.И. Никольский, В.Н. Семенов, А.А. Шипков. М.: Интехэнерго-Издат, 2015.
21. **Томаров Г.В.** Геотермальные энерготехнологии России // Вестник МЭИ. 2020. № 4. С. 29–41.
22. **Belousov V.I., Belousova I.V.** Colloids in the hydrothermal-magmatic systems of Kamchatka and the Kuril Islands // Proc. of the 43rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, California, 11–13 Febr. 2019. SGP-TR-214.
23. **Мальшенко С.П., Счастливцев А.И.** Термодинамическая эффективность геотермальных электростанций с водородным перегревом пара // Теплоэнергетика. 2010. № 11. С. 23–27.
24. **Томаров Г.В., Борзенко В.И., Шипков А.А.** Оптимизационные исследования бинарной установки ГеоЭС комбинированного цикла с двумя давлениями сепарации и перегревом водяного пара вторичного вскипания с использованием водороднокислородного парогенератора // Теплоэнергетика. 2019. № 10. С. 84–94. <https://doi.org/10.1134/S0040363619100060>
25. **Локшин Б.А.** Использование геотермальных вод для теплоснабжения. М.: Стройиздат, 1974.
26. **Геотермальное** теплоснабжение / А.Г. Гаджиев, Ю.И. Султанов, П.Н. Ригер, А.Н. Абдуллаев, А.Ш. Мейланов. М.: Энергоатомиздат, 1984.
27. **Натанов Х.Х.** Подготовка геотермальных вод к использованию. М.: Стройиздат, 1986.
28. **Бутузов В.А., Томаров Г.В.** Геотермальное энергообеспечение южного региона России. Ресурсы, использование, перспективы. Saar; Brucken, Deutschland: Lambert Academie Publishing, 2012.
29. **Бутузов В.А., Томаров В.Г.** Геотермальная энергетика Камчатки // Теплоэнергетика. 2020. № 11. С. 50–63. <https://doi.org/10.1134/S0040363620110041>
30. **Аветисянц А.А., Крылов В.Б.** Опыт строительства циркуляционной системы на Ханкальском геотермальном месторождении // Физические процессы при разработке геотермальных месторождений. Л.: ЛГИ, 1983. С. 85–88.
31. **The results** of the construction project design of a pilot geothermal station with a circulation loop of heat extraction at the Khankala deposit of the Chechen Republic / S.S. Zaurbekov, M.S. Mintsaeв, A.A. Shaipov, S.V. Cherkasov, M.M. Labazanov // Res. J. Pharm., Biol. Chem. Sci. 2015. V. 6. № 3. P. 1941–1949.
32. **Principles** of automation of setting up heat carrier for drying installation of concrete mixing plants / V. Marsov, M. Mintsaeв, Z. Khakimov, M. Isaeva, K. Vakhidova // Int. J. Environ. Sci. Educ. 2016. V. 11. № 18. P. 12763–12769.
33. **Термальные** подземные воды Восточно-Предкавказского артезианского бассейна: экономические аспекты использования на примере Ханкальского месторождения / А.М. Фархутдинов, И.Ш. Хамитов, С.В. Черкасов, М.Ш. Минцаев, Ш.Ш. Заурбеков, А.А. Шаипов, М.М. Лабазанов // Изв. Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328. № 1. С. 50–61.

Geothermal Energy of Russia: Resources, Electric Power Generation, and Heat Supply (a Review)

V. A. Butuzov^{a, *}, G. V. Tomarov^b, A. B. Alkhasov^c, R. M. Aliev^{d, e}, and G. B. Badavov^c

^a Trubilin Kuban State Agrarian University, Krasnodar, 350044 Russia

^b OOO Geoterm-EM, Moscow, 111250 Russia

^c Institute for Geothermy and Renewable Energy, Branch of the Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367030 Russia

^d Dagestan State Technical University, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367030 Russia

^e OOO Geoekoprom, Makhachkala, Republic of Dagestan, 367030 Russia

*e-mail: ets@nextmail.ru

Abstract—The geothermal resources of Russia have been studied since 1956. Three versions of the country's geothermal maps and estimation of geothermal field reserves with a total design yield of 218 m³/s have been developed. The largest reserves are available in Kamchatka krai, the Kuril Islands, the Republic of Dagestan, Krasnodar krai, Stavropol krai, and the Republic of Adygea. Steam-hydrothermal fields are located mainly in Kamchatka and the Kunashir Island (the Kuril Islands). In Russia, a total of 26 geothermal fields were in operation in 2019, including 11 fields in Kamchatka, four in Dagestan, and 11 in Krasnodar krai, Stavropol krai, and the Republic of Adygea. In 2019, 743500 t of geothermal steam (without the Mutnovsky and Verkhne-Mutnovsky fields) and 20.2 million m³ of geothermal water were produced, including 13.9 million m³ in Kamchatka, 4.3 million m³, in Dagestan, and 2.0 million m³ in Krasnodar krai, Stavropol krai, and the Republic of Adygea. In 2019, 161 geothermal wells were in operation in Russia, including 84 wells in Kamchatka, 42 in Dagestan, and 35 in Krasnodar krai, Stavropol krai, and the Republic of Adygea. The Russian geothermal electric power facilities with a total capacity equal to 83.9 MW, which produced 428 million kW h of electric energy in 2019, are reviewed. The main technical characteristics and basic thermal cycle circuits of the Puzhetka and Mutnovsky geothermal power plants (GeoPPs) are considered, and the problems connected with their operation and the prospects for their future development are pointed out. In 2019, 23 heat distribution stations (HDS) and central heat-supply stations (CHSS) with the total thermal power capacity equal to 82.5 MW and the thermal energy output equal to 282000 (MW h)/year supplied geothermal heat for regions in Russia. The total length of geothermal heat networks in the two-pipe equivalent was equal to 172 km. The specific features relating to the operation of HDSs and CHSSs are pointed out, and prospects for the future development of geothermal heat supply are determined.

Keywords: geothermal waters, steam-hydrothermal fields, geothermal power plant, geothermal heat-supply system, well, reinjection, heat distribution station, geological stratum