
**ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ,
ГИДРОЭНЕРГЕТИКА**

**РОССИЙСКАЯ ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА:
СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ**

© 2023 г. В. А. Бутузов^а, *, Г. В. Томаров^б

^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

*e-mail: ets@nextmail.ru

Поступила в редакцию 15.09.2022 г.

После доработки 09.11.2022 г.

Принята к публикации 25.11.2022 г.

Представлены данные ресурсной базы геотермальных пароводяных месторождений России с их локализацией на полуострове Камчатка и Курильских островах утвержденными запасами 285.5 кг/с и добычей в 2020 г. 13 млн т. Перспективные запасы пароводяной смеси оценены до 1100 МВт по объемному методу и при естественной разгрузке парогидротерм. Приведены результаты исследований Института вулканологии и сейсмологии РАН и Института проблем геотермии и возобновляемой энергии Объединенного института высоких температур РАН. Оценены перспективы исследований по бурению скважин у подножия вулканов полуострова Камчатка для получения флюидов со сверхкритическими параметрами (более 450°C, 25 МПа). Описана деятельность АО “Тепло Земли” по добыче пароводяной смеси на полуострове Камчатка. Приведены хронология и описание технических решений по ГеоЭС в России. Представлены основные технические характеристики, тепловые схемы и результаты эксплуатации Паужетской, Верхне-Мутновской и Мутновской ГеоЭС установленной мощностью 74 МВт и выработкой электрической энергии в 2020 г. 428 ГВт · ч. Анализируются результаты современных российских исследований по бинарным геотермальным энергоблокам с теплоносителем температурой от 120 до 180°C, комбинированию бинарных энергоблоков с водородным перегревом геотермального пара, расширению Мутновской ГеоЭС энергоблоками прямого и комбинированного циклов с повышением мощности на 50–63 МВт. Предложены увеличение целевого финансирования, сооружение опытных установок, демонстрационных объектов, создание Центра компетенций геотермальной энергетики.

Ключевые слова: геотермальные месторождения, пароводяная смесь, геотермальные ресурсы, геотермальная электростанция, паровые турбины, бинарные энергоблоки, скважины, сепараторы, реинжекция, водородно-кислородные парогенераторы

DOI: 10.56304/S0040363623040021

По данным Всемирного геотермального конгресса (WGC-2020), суммарная установленная мощность геотермальных электростанций (ГеоЭС) в мире в 2021 г. составляла 16 ГВт, а выработка электрической энергии – 105 ТВт · ч. В России высокотемпературные пароводяные геотермальные месторождения находятся на полуострове Камчатка и Курильских островах. Утвержденные запасы камчатских месторождений оцениваются в 285.5 кг/с, годовая добыча геотермального пара в 2021 г. равнялась 13 млн т. На полуострове Камчатка эксплуатируются три ГеоЭС суммарной установленной мощностью 74 МВт, и в 2021 г. годовая выработка ими электрической энергии составила 428 ГВт · ч. Исследования геотермальных пароводяных ресурсов на полуострове Камчатка и Курильских островах выполняются, главным

образом, специалистами Института вулканологии и сейсмологии (ИВиС) Дальневосточного отделения РАН (г. Петропавловск-Камчатский), научные исследования и разработки геотермального оборудования ГеоЭС – сотрудниками ПАО “Калужский турбинный завод” (КТЗ), ООО “Геотерм-М” и других учреждений. Бурение и эксплуатацию месторождений осуществляет АО “Тепло Земли” (п. Термальский, Камчатский край), эксплуатацию ГеоЭС – филиал “Возобновляемая энергетика” ПАО “Камчатскэнерго” (г. Петропавловск-Камчатский). В России в 2021 г. работали Паужетская ГеоЭС (12 МВт), Верхне-Мутновская ГеоЭС (12 МВт), Мутновская ГеоЭС (50 МВт). Анализ состояния и эксплуатации ГеоЭС на полуострове Камчатка в 2018 г. представлен в [1], обзор геотермальных ресурсов, про-

Таблица 1. Мощность и год пуска в эксплуатацию российских ГеоЭС

ГеоЭС	Мощность, МВт	Год пуска
Паужетская:		
две турбины МК-6 (демонтированы)	5.0	1966
турбина МК-6-1	6.0	1980
турбина ГТЗА-01	6.35	2006
бинарный энергоблок (остановлен)	2.5	2014
Паратунская (демонтирована)	0.67	1967
Менделеевская (на реконструкции)	3.6	1994
Верхне-Мутновская	12.0	1999
Океанская (демонтирована)	3.6	2007
Мутновская	50.0	2002

изводства электроэнергии и теплоснабжения в 2019 г. – в работе [2].

В табл. 1 приведены данные по мощности и срокам сооружения российских ГеоЭС. Первая в стране Паужетская ГеоЭС после ввода в эксплуатацию в 1966 г. неоднократно модернизировалась. В 1980 г. одна из двух турбин МК-6 КТЗ мощностью 2.5 МВт была заменена на паровую турбину КТЗ типа МК-6-1 мощностью 6 МВт, а в 2006 г. вторая турбина МК-6 – на паровую турбину ГТЗА-01 мощностью 6 МВт Кировского завода (Санкт-Петербург). В 2014 г. для утилизации тепла сепарата геотермальной пароводяной смеси был разработан и смонтирован бинарный энергоблок мощностью 2.5 МВт. В 2021 г. установленная мощность Паужетской ГеоЭС составляла 14.5 МВт. В 1967 г. в 50 км от г. Петропавловск-Камчатский была построена первая в мире Паратунская бинарная ГеоЭС мощностью 0.67 МВт. После отработки экспериментальных режимов эксплуатации она в 1969 г. была демонтирована. В 1994 г. на Курильском острове Кунашир была построена Менделеевская ГеоЭС мощностью 3.6 МВт, в 2021 г. она была реконструирована. В 2007 г. на Курильском острове Итуруп была сооружена Океанская ГеоЭС той же мощности. После нескольких лет работы она была выведена на реконструкцию. В 1999 г. в 100 км от г. Петропавловск-Камчатский была построена Верхне-Мутновская ГеоЭС мощностью 12 МВт, а в нескольких километрах от нее в 2002 г. – самая мощная в России Мутновская ГеоЭС (50 МВт).

РЕСУРСНАЯ БАЗА: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В геотермальной энергетике большая часть затрат приходится на разведку, бурение и обустройство месторождений. В СССР решение по сооружению ГеоЭС принималось после технико-экономических исследований и утверждения запасов геотермальных месторождений [3]. Были опти-

мизированы энергетические циклы и освоено производство основного оборудования ГеоЭС [4]. Опыт эксплуатации месторождений был обобщен в нормативных документах, в том числе в Правилах [5] (отменены в 2021 г.). Геотермальные ресурсы для электрогенерации по прямому энергоциклу при температуре теплоносителя свыше 170°C исследовались на Камчатке с 30-х годов XX в., а в 1957 г. разведочное бурение подтвердило наличие первого в СССР Паужетского пароводяного геотермального месторождения [6]. В 80-х годах XX в. для создания бинарных ГеоЭС в СССР были разведаны несколько месторождений, на которых пробурены скважины глубиной до 4.5 км, подтвердившие прогнозируемые параметры теплоносителя [7]. По экономическим соображениям эти работы в дальнейшем были приостановлены.

К 2021 г. в России были разведаны и эксплуатировались для электрогенерации, в основном, три пароводяных месторождения на Камчатке. Самое первое из них, эксплуатируемое с 1966 г., Паужетское месторождение пароводяной смеси (ПВС) в южной части полуострова имеет утвержденные до 2023 г. запасы $G = 35.5$ кг/с при температуре ПВС $t_{\text{ПВС}} = 170\text{--}190^\circ\text{C}$. С начала разведочного бурения в 1957 г. и до 2021 г. там были выполнены 45 скважин, из которых АО “Тепло Земли” как владелец этих скважин в 2021 г. эксплуатировало 10. В 100 км от г. Петропавловск-Камчатский разведаны и с 1999 г. эксплуатируются Верхне-Мутновское и Мутновское месторождения при $t_{\text{ПВС}} = 170\text{--}190^\circ\text{C}$ и $G = 250$ кг/с. Они обеспечивают работу Верхне-Мутновской и Мутновской ГеоЭС. Эти месторождения, как и ГеоЭС, эксплуатируются филиалом “Возобновляемая энергетика” ПАО “Камчатскэнерго”. В 2021 г. из 11 скважин было добыто 12.3 млн т ПВС. На Верхне-Мутновском и Мутновском месторождениях отработанные сепарат и конденсат закачиваются в реинжекционные скважины для обеспечения эко-

логической чистоты эксплуатации ГеоЭС и поддержания пластовых давлений (по две скважины).

В обустройстве геотермальных пароводяных месторождений полуострова Камчатка реализованы рассредоточенное и централизованное технические решения по отделению паровой фазы теплоносителя от жидкостной [1]. На Паужетском месторождении каждая скважина оборудована первичными сепараторами первой ступени, а перед ГеоЭС установлены сепараторы второй ступени. На Мутновском и Верхне-Мутновском месторождениях реализована централизованная двухступенчатая схема сепарации ПВС непосредственно на ГеоЭС. Основные недостатки рассредоточенной схемы ГеоЭС – большие потери геотермального пара и экологические проблемы при сливе высокотемпературного сепарата на рельеф.

Исследования геотермальных ресурсов и разработка пароводяных месторождений в России в 2021 г. выполнялись в ИВиС, Институте проблем геотермии и возобновляемой энергетики (ИПГиВЭ) Объединенного института высоких температур РАН в г. Махачкала, Дальневосточном научном центре РАН в г. Хабаровск. Институт вулканологии и сейсмологии имеет самый большой опыт исследований месторождений ПВС. В табл. 2 представлены его прогнозные оценки ресурсов пароводяных месторождений полуострова Камчатка [8]. Интервалы оценки ресурсов соответствуют результатам исследований разных ученых. По прогнозу ИВиС ресурсы пароводяных месторождений могут обеспечить работу ГеоЭС на полуострове Камчатка общей мощностью до 1100 МВт по объемному методу и при естественной разгрузке парогидротерм и до 3900 МВт по показателю вулканической активности. В Хабаровском научном центре совершенствуются способы разработки пароводяных месторождений [9].

Одно из перспективных направлений работы ИВиС – разведка месторождений ПВС у подножия вулканов со сверхкритическими параметрами (СКП) теплоносителя. Это направление развития мировой геотермальной геологии подтверждено более чем десятью пробуренными скважинами и исследованиями в разных регионах Земли [10]. Первая из таких скважин была пробурена по программе IDDP-1 в 2009 г. на геотермальном месторождении Крафла в Исландии. На глубине 2104 м бур при работе попал в расплав магмы температурой более 900°C и был остановлен 20-метровой пробкой обсидианового стекла. При наличии перфорации до глубины 2080 м скважина мощностью до 36 МВт работала три года при температуре перегретого пара на устье 374°C, давлении 14 МПа и расходе 10–12 кг/с.

Геологические условия Исландии близки к условиям полуострова Камчатка. В ИВиС выполнены исследования по бурению скважин у подно-

Таблица 2. Прогнозные ресурсы пароводяных месторождений с температурой геотермального флюида $t_{\text{ПВС}} = 220^\circ\text{C}$ полуострова Камчатка

Месторождение	Прогнозные ресурсы, МВт	
	по тепловой энергии резервуара	по естественной тепловой нагрузке
Кошелёвское	431 ± 129	505.0
Нижне-Кошелёвское	201 ± 60	–
Паужетское	466 ± 140	95.7
Мутновское	920 ± 276	–
Северо-Мутновское	345 ± 103	–

жия камчатских вулканов. В [11] представлены данные исследований по бурению скважин для получения теплоносителя со сверхкритическими параметрами на Паужетском геотермальном месторождении, а в [12] – на Мутновском. Следует отметить суровые климатические условия для ведения работ на втором месторождении: высота площадки бурения скважины составляет 2000 м над уровнем моря, расчетная зимняя температура -20°C , высота снежного покрова до 20 м. В [13] дана оценка возможности использования тепла магматического очага вулкана Авачинский для тепло- и электроснабжения. В ИПГиВЭ выполняются лабораторные исследования характеристик горных пород с флюидами при СКП [14].

Для дальнейшего развития российской геотермальной ресурсной базы необходимо адаптировать опыт СССР к современным условиям, освоить передовые мировые технологии разработки месторождений. Необходимы обработка и цифровизация материалов исследований, результатов бурения и испытаний скважин, возобновление широкомасштабного разведочного бурения. Новые скважины для добычи ПВС (взамен вышедших из строя) в настоящее время бурятся по устаревшим технологиям. Исследования ИВиС по кремнеземным отложениям [15] пока не дали должного результата. Мировой геотермальный опыт в России используется весьма ограниченно. Участие российских ученых в работе Мирового геотермального конгресса WGC-2020/2021 было скромным.

В мировой практике для исследований в области возобновляемой энергетики, в том числе геотермальной, широко применяется метод оценки энергетической окупаемости EROI, по которому энергозатраты на добычу, производство оборудования и его эксплуатацию сопоставляются с количеством энергии, выработанной за срок эксплуатации ГеоЭС. В 80-е годы XX в. в научной школе Е.И. Янговского велись эксергетические исследования энергетических циклов. Россий-

ские ученые в последние годы выполнили исследования экономической окупаемости солнечной и ветровой энергетики. Однако, несмотря на то что отечественные заводы [КТЗ, АО “Подольский машиностроительный завод” (ЗиО) и др.] освоили производство геотермического оборудования, аналогичные работы для ГеоЭС не ведутся. В программе ДПМ-ВИЭ-2.0 не предусмотрено строительство ГеоЭС, что во многом объясняется отсутствием концепции, в основе которой должны быть утвержденные запасы месторождений, освоение производства в России оборудования, адаптированного к современным технологиям добычи ресурсов.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ГеоЭС

В настоящее время в России эксплуатируются геотермальные электростанции на полуострове Камчатка и Курильских островах. В [2, 4] представлены основные характеристики российских ГеоЭС общей установленной мощностью 83.9 МВт с выработкой в 2020 г. 428 млн кВт · ч. В 2021 г. установленная мощность эксплуатируемых ГеоЭС на Камчатке составила 74 МВт. В табл. 3 приведены основные характеристики этих ГеоЭС.

Паужетская ГеоЭС – первая в нашей стране геотермальная электростанция установленной мощностью 12 МВт расположена на юге полуострова Камчатка на побережье Охотского моря в долине р. Паужетка. В технологическом цикле подготовки геотермального теплоносителя Паужетской ГеоЭС (рис. 1) задействовано девять продуктивных скважин 1 и одна реинжекционная 12. На всех продуктивных скважинах установлены скважинные сепараторы 2. После реконструкции в 2004–2006 гг. в состав Паужетской ГеоЭС входят паровые турбины МК-6-1 (КТЗ) и ГТЗА (Кировский завод) общей установленной мощностью 12 МВт.

В 2012 г. на площадке ГеоЭС был построен бинарный энергоблок установленной мощностью 2.5 МВт для утилизации тепловой энергии геотермального сепарата, который состоит из фреоновой турбины (хладагент R-134a), экономайзера, испарителя, пароперегревателя, водяного конденсатора. В настоящее время бинарный энергоблок не эксплуатируется.

В 2020 г. в связи с дефицитом геотермального пара располагаемая мощность ГеоЭС составляла 5.6 МВт, выработка электроэнергии – 43.5 млн кВт · ч. Подключенная мощность потребителей энергорайона была равна 6 МВт, установленная мощность резервных электрогенераторов на дизельном топливе – 3.6 МВт. Ресурс паровых турбин МК-6-1 и ГТЗА-01 в настоящее время выработан.

Геотермальный скважинный комплекс принадлежит и эксплуатируется АО “Тепло Земли”, а ГеоЭС – филиалу “Возобновляемая энергетика” ПАО “Камчатскэнерго”, потребители – жители трех поселков и сезонные рыбоперерабатывающие предприятия. Перспективы роста электрических нагрузок этой южной части полуострова Камчатка не определены.

Верхне-Мутновская ГеоЭС была построена в 1999 г. и является примером блочно-модульного строительства в труднодоступном регионе с суровыми климатическими условиями. Толщина снежного покрова, лежащего с октября по июнь, в отдельные годы может составлять до 17 м при средней толщине 7–8 м, сила ветра достигает 50 м/с. Район расположения электростанции относится к девятибалльной зоне сейсмоопасности по шкале MSK-64. С учетом короткого летнего сезона (около трех месяцев), в течение которого можно вести строительные работы, проектирование электростанции реализовали по модульному принципу – модули высокой заводской готовности поставлялись в габаритах железнодорожных вагонов на строительную площадку. Тепломехани-

Таблица 3. Основные характеристики эксплуатируемых на полуострове Камчатка ГеоЭС

ГеоЭС	Год пуска в эксплуатацию	P_y , МВт	P_p , МВт*	Э, млн кВт · ч**	Тип турбины	n	Схема подготовки (сепарирования) пара	Тип конденсатора
Паужетская	1966	12.0	5.6	43.5	МК-6-1 (КТЗ)	1	РД***	ВСТ
					ГТЗА-01 (Кировский завод)	1	То же	То же
Верхне-Мутновская	1999	12.0	11.0	55.2	“Туман-4К” (КТЗ)	3	ЦД	В
Мутновская	2002	50.0	47.0	322.7	К-25-06-Гео (КТЗ)	2	ЦД	В

Примечание. P_y – установленная мощность; P_p – располагаемая мощность; Э – выработка электроэнергии; n – число турбин.

* Снижение располагаемой мощности вызвано дефицитом геотермального пара;

** В 2020 г.;

*** РД – рассредоточенная двухступенчатая; ЦД – централизованная двухступенчатая; ВСТ – водяной, смешивающего типа; В – воздушный.

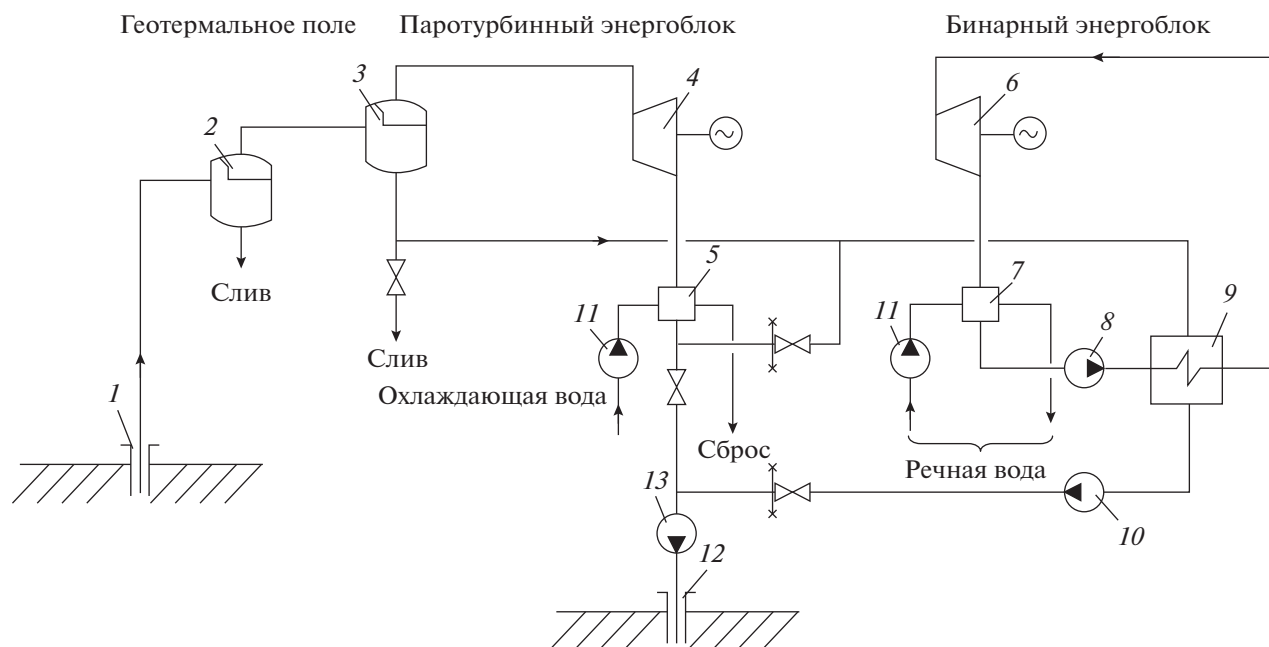


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема Паужетской ГеоЭС с бинарным энергоблоком.

1, 12 – добычная и реинжекционная скважины; 2, 3 – сепараторы первой (скважинный) и второй (станционный) ступени; 4, 6 – паровая и фреоновая турбины; 5, 7 – конденсатор смешивающего типа и конденсатор фреоновый; 8, 10, 11, 13 – насосы фреоновый, сепарата, охлаждающей воды и конденсата; 9 – пароперегреватель, конденсатор-испаритель, экономайзер фреоновые

ческое оборудование электростанции размещено в 14 модулях вагонного типа, соединенных между собой закрытыми межмодульными переходами.

Верхне-Мутновская ГеоЭС создавалась как пилотный проект освоения Мутновского геотермального месторождения. Она состоит из трех энергоблоков с конденсационными турбинами типа “Туман-4К” мощностью 4 МВт каждый и комплекса модулей общестанционных систем. Геотермальный теплоноситель транспортируется от продуктивных скважин 1 (рис. 2) к сепараторам гравитационного типа первой 2 и второй 3 ступеней сепарации установки подготовки пара. Пар после сепараторов второй ступени поступает в паровую турбину 4.

При создании Верхне-Мутновской ГеоЭС впервые в отечественной практике были применены воздушные конденсаторы. После турбины пар направляется в воздушно-конденсационную установку 5, а затем конденсат поступает в конденсатный бак 6. Технологическая схема Верхне-Мутновской ГеоЭС предусматривает удаление из конденсаторов неконденсирующихся газов с помощью двухступенчатых паровых эжекторов и растворения их в конденсате. Неконденсирующиеся газы, удаленные из конденсатора, направляются в абсорбер 8, где растворяются в конденсате, и далее эта смесь реинжекционным насосом 9 закачивается в скважины закачки 10 без контакта с

внешней средой. Таким образом реализована концепция экологически чистой электростанции.

Верхне-Мутновская ГеоЭС обладает высокой маневренностью – пуск из холодного состояния занимает 4 ч. В 2020 г. выработка электроэнергии на электростанции составила 55.2 млн кВт · ч при установленной мощности 12 МВт. Располагаемая мощность 11 МВт определялась дефицитом геотермального пара 8.0 кг/с из-за заноса скважин кремнеземом. Основные технические решения при строительстве этой электростанции были впоследствии применены при создании Мутновской ГеоЭС.

Мутновская ГеоЭС мощностью 50 МВт была построена на полуострове Камчатка в 2002 г. При ее создании было принято решение использовать самое передовое оборудование, включая высокоэффективные горизонтальные сепараторы гравитационного типа (изготовлены на ЗиО), экономичные двухпоточные паровые турбины с внутриканальной сепарацией (произведены на КТЗ), современную автоматизированную систему управления технологическими процессами на основе оборудования фирмы Siemens.

На рис. 3 представлена принципиальная тепловая схема Мутновской ГеоЭС, состоящей из двух энергоблоков мощностью 25 МВт каждый. Пароводяная смесь массовым содержанием пара 30–100% поступает по отдельным магистральным трубопроводам от восьми продуктивных скважин 1 в два

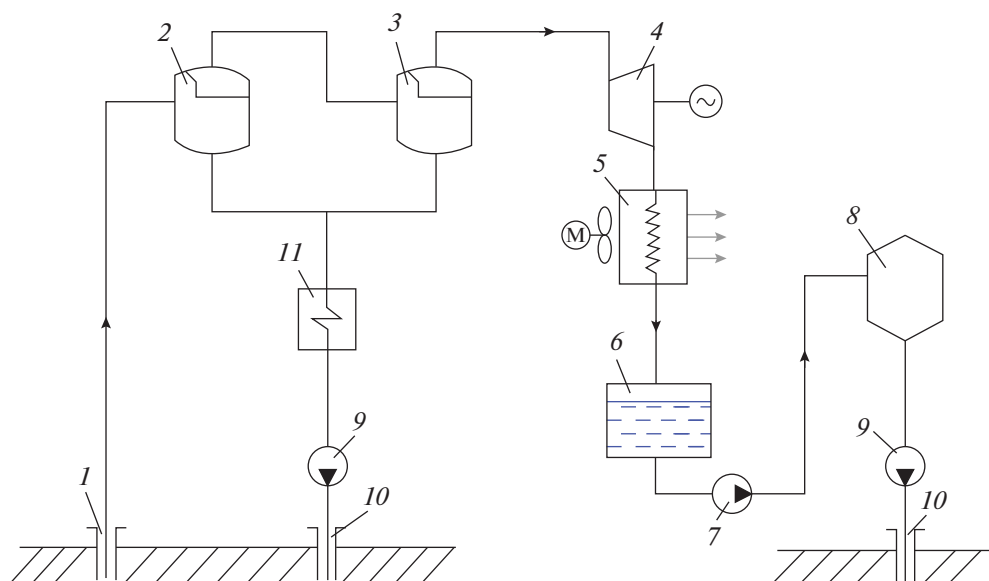


Рис. 2. Принципиальная тепловая схема Верхне-Мутновской ГеоЭС.

1, 10 – продуктивная и реинжекционная скважины; 2, 3 – сепараторы первой и второй ступени; 4 – паровая турбина; 5 – воздушный конденсатор; 6 – конденсатный бак; 7 – насос; 8 – абсорбер; 9 – насос реинжекционный; 11 – теплообменник собственных нужд

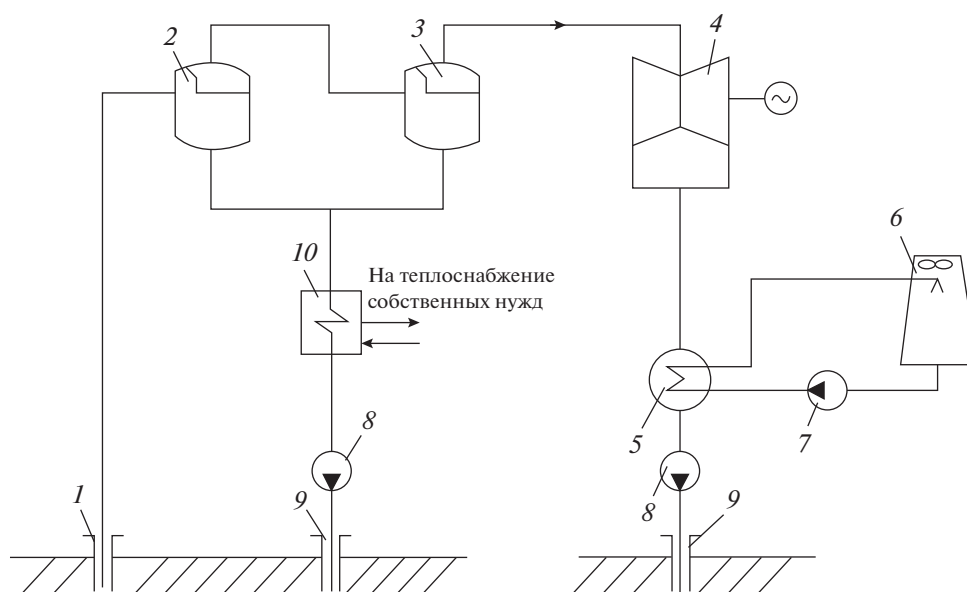


Рис. 3. Принципиальная тепловая схема Мутновской ГеоЭС.

1, 9 – скважины продуктивная и реинжекционная; 2, 3 – сепараторы первой и второй ступени; 4 – турбина паровая двухпоточная; 5 – конденсатор; 6 – вентиляционная градирня; 7 – насос; 8 – реинжекционный насос; 10 – теплообменник собственных нужд

сепаратора 2 первой ступени. После сепараторов второй ступени 3 геотермальный пар сухостью $x > 0.9998$ и давлением 0.65 МПа направляется к турбинам 4.

Отсепарированная вода температурой около 160°C используется для нагрева сетевой воды в теплообменнике 10 системы теплоснабжения ГеоЭС, а затем при температуре 145°C закачивается в скважины реинжекции 9. После паровых

турбин пар поступает в смешивающие конденсаторы 5, где конденсируется с помощью холодной воды, подаваемой из градирен 6. Часть конденсата насосами 8 закачивается через скважины реинжекции 9 в геотермальный резервуар.

Для Мутновской ГеоЭС были разработаны одноцилиндровые двухпоточные турбоагрегаты с рабочими лопатками последней ступени высотой 450 мм. В турбине применен комплекс мероприя-

тий, обеспечивающих эффективную внутрикапельную сепарацию влаги и позволяющих удалить из проточной части до 80% жидкой фазы в виде крупных капель и жидких пленок. Начиная с 4-й турбинной ступени используется развитая система периферийной сепарации влаги, а в 7-й и 8-й ступенях обоих потоков применена сепарация влаги в сопловых решетках. Использование в качестве 5-й ступени специальной ступени-сепаратора позволило увеличить КПД всей турбины почти на 2%. Для уменьшения потерь в выходном патрубке за последней турбинной ступенью установлен осекольцевой диффузор с косым срезом.

На Мутновской ГеоЭС для охлаждения воды используется четырехсекционная вентиляторная испарительная градирня американской фирмы PSI. Несущие и ограждающие конструкции градирни изготовлены из стеклопластика, что обеспечивает ее надежную работу в условиях агрессивной среды. Из стеклопластика выполнены также и все трубопроводы охлаждающей воды, а бассейн градирни изготовлен из специального кислотостойкого бетона и имеет защитное эпоксидное покрытие. Оборудование ГеоЭС установлено в двух основных зданиях, соединенных переходом. Опыт эксплуатации Мутновской ГеоЭС подтвердил правильность принятых проектных решений.

В настоящее время достоверные сведения о работе Менделеевской ГеоЭС на Курильском острове Кунашир отсутствуют.

СОВРЕМЕННЫЕ РОССИЙСКИЕ РАЗРАБОТКИ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ ПРОЕКТЫ

В ООО «Геотерм-М» при финансовой поддержке Минобрнауки РФ выполнен комплекс научно-исследовательских работ по определению перспективных направлений развития геотермальной энергетики, совершенствованию технологий и оборудования. Результаты исследований по основным параметрам, свойствам рабочих тел, техническим характеристикам оборудования бинарных энергоустановок, в том числе на низкотемпературном геотермальном теплоносителе (70°C), представлены в [16, 17]. В [18] изложены предложения по совершенствованию фреоновой электростанции БЭС-2.5. В исландской компании Verkis разработан эскизный проект бинарной ГеоЭС мощностью 50 МВт на основе цикла Калины для месторождения в Чеченской Республике.

В [19, 20] описан способ повышения эффективности геотермальных турбин прямого цикла с применением перегрева пара вторичного вскипания в водородно-кислородном парогенераторе. На примере Мутновской ГеоЭС выполнены оптимизационные исследования параметров рабочего контура и режимов эксплуатации оборудования

комбинированного бинарного цикла с двумя давлениями сепарации и перегревом в водородно-кислородном парогенераторе пара вторичного вскипания. Установлено, что наибольшая эффективность комбинированного цикла достигается при использовании органических тел R-31-10, R-227ea и RC-318 [21, 22].

Изучены особенности мультикаскадных схем с инкрементальным (пошаговым) преобразованием теплового потенциала высокотемпературного геотермального однофазного водного теплоносителя в бинарных энергоустановках. Выполнены оптимизационные расчетные исследования термодинамических показателей и технических характеристик двух- и трехкаскадных бинарных энергокомплексов с высокотемпературным (180°C) [23] и среднетемпературным (120°C) геотермальными теплоносителями [24].

На рис. 4 показана принципиальная тепловая схема ГеоЭС с комбинированным бинарным циклом и перегревом геотермального пара в водородно-кислородном парогенераторе, разработанная с учетом результатов проведенных исследований.

В ООО «Геотерм-М» разработаны варианты расширения Мутновской ГеоЭС [25]. На первом этапе предлагается увеличить мощность электростанции на 13 МВт (8 МВт на паротурбинных и 5 МВт на бинарных энергоустановках) без бурения новых скважин путем утилизации пара вторичного вскипания сепарата. В данном случае целесообразно использовать производимые на КТЗ геотермальные паровые турбины мощностью 4 МВт, работающие на Верхне-Мутновской ГеоЭС, а также бинарный энергоблок мощностью 2.5 МВт, сооруженный на Паужетской ГеоЭС.

Рассмотрены два варианта расширения ГеоЭС с бурением дополнительных скважин на втором этапе. Оба варианта предусматривают увеличение электрогенерации прямого цикла мощностью 50 МВт (две паровые турбины мощностью 25 МВт каждая). Планируется использовать геотермальные паровые турбины производства КТЗ, работающие на первой очереди Мутновской ГеоЭС. По второму варианту предлагается установить дополнительно бинарные энергоблоки, что позволит увеличить мощность второй очереди до 63 МВт (рис. 5). Кроме того, рассматриваются предложения по производству водорода на новых ГеоЭС.

При решении вопроса о дополнительных электрических нагрузках для Паужетской ГеоЭС или строительстве магистральных линий электропередачи до энергоемких потребителей будет актуальна реконструкция этой ГеоЭС, в том числе замена рассредоточенной сепарации геотермального пара на централизованную и существу-

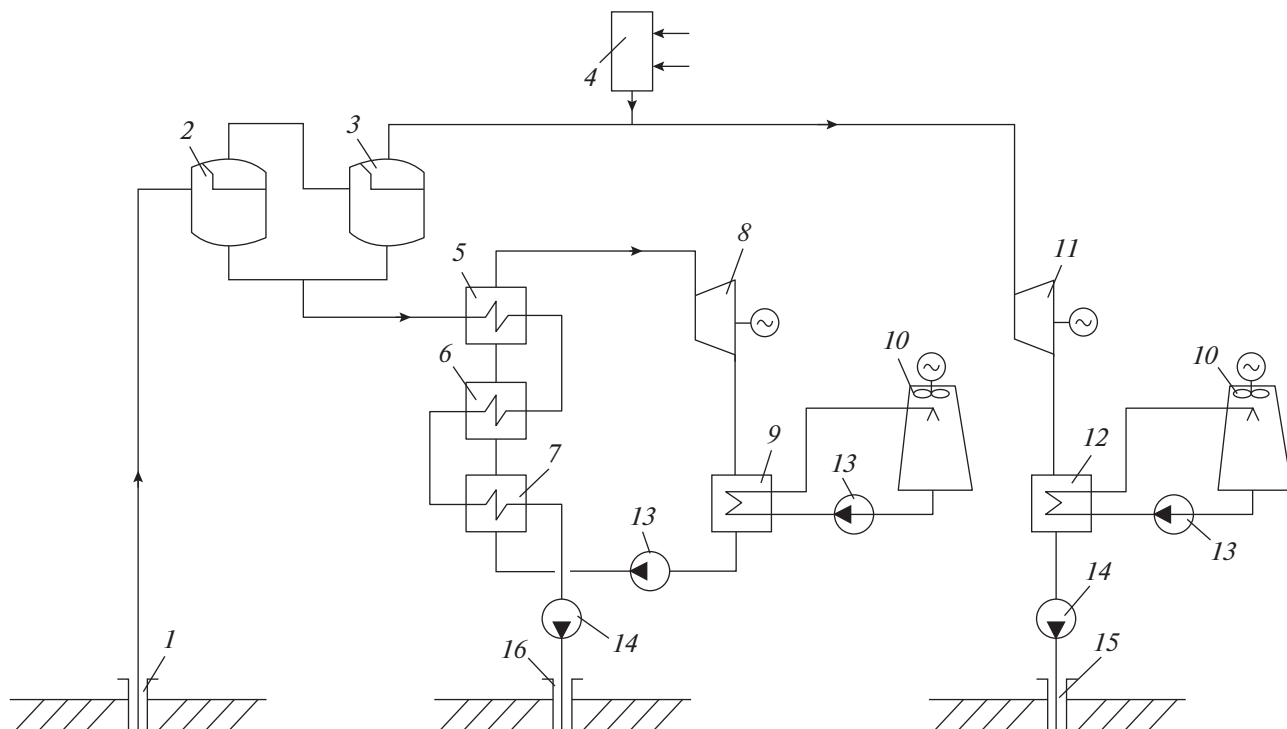


Рис. 4. Принципиальная тепловая схема комбинированного энергоблока с пароводяным и бинарным циклами и встроенным водородно-кислородным парогенератором.

1 – скважина ПВС продуктивная; 2, 3 – сепараторы первой и второй ступени; 4 – водородно-кислородный парогенератор; 5, 6, 7 – пароперегреватель, испаритель, экономайзер фреоновые; 8, 11 – турбины фреоновая и паровая; 9, 12 – конденсаторы фреоновый и водяной; 10 – градирня; 13 – насос; 14 – насос реинжекционный; 15, 16 – скважины реинжекционные конденсата и сепарата

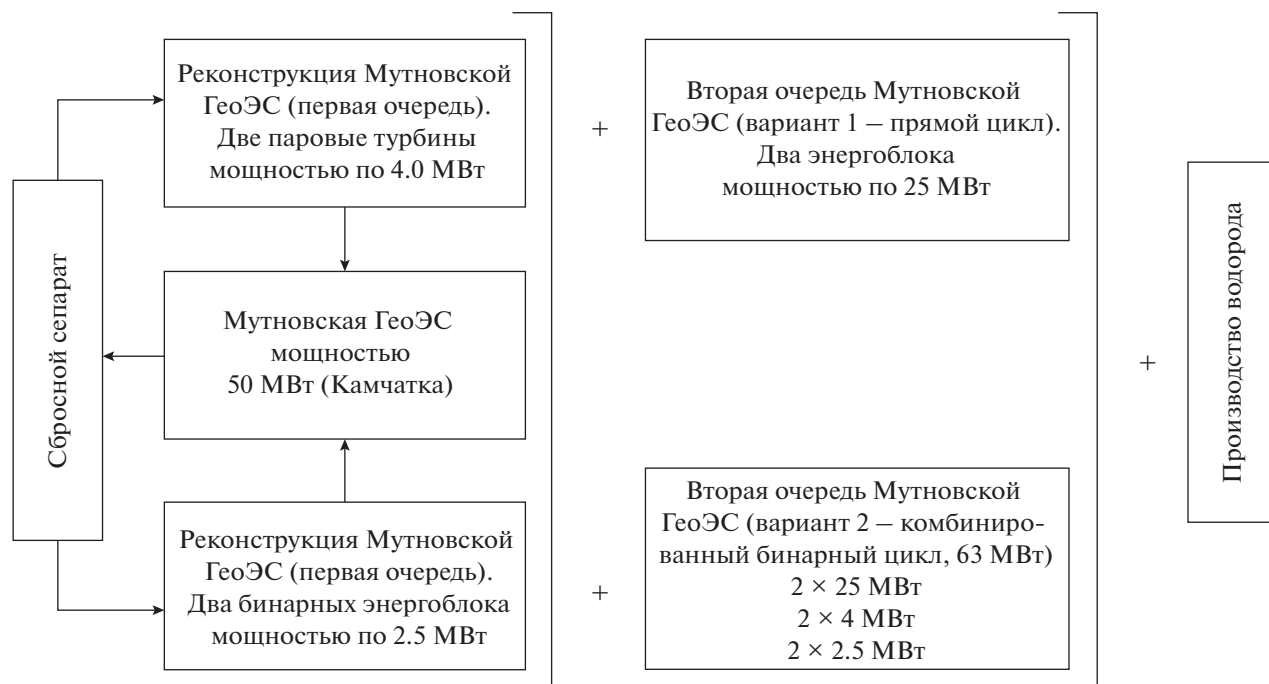


Рис. 5. Схема развития геотермального энергетического комплекса на Мутновском месторождении (полуостров Камчатка)

ющих паровых турбин на новые, а также ввод в эксплуатацию бинарной энергоустановки.

ВЫВОДЫ

1. Ресурсная база геотермальной энергетики России была исследована в XX в. и позволяеткратно увеличить мощности российских ГеоЭС. Перспективным направлением является изучение возможности и эффективности использования для электрогенерации пароводяных месторождений со сверхкритическими параметрами. Эксплуатируемые ГеоЭС обеспечены утвержденными запасами пароводяной смеси. Для дальнейших исследований ресурсной базы пароводяных геотермальных месторождений необходимо освоение современных методов разведки и бурения геотермальных скважин.

2. Следует внести геотермальную энергетику в российскую программу развития возобновляемых источников энергии до 2035 г. (ДПМ-ВИЭ-2) с выполнением соответствующих исследований и обоснованием сооружения новых ГеоЭС.

3. Требуется научное сопровождение эксплуатации отечественных ГеоЭС для поддержания их работоспособности и совершенствования технологии и энергетического оборудования. Так, при избыточной установленной мощности Паужетской ГеоЭС недостает геотермального пара, а система его сбора и сепарации работает с экологическими рисками. Паровые турбины отработали расчетный ресурс, а бинарный энергоблок не эксплуатируется. Верхне-Мутновская и Мутновская ГеоЭС работают с дефицитом пароводяной смеси вследствие кремнеземных отложений в скважинах.

4. В последние годы российские ученые провели исследования действующих ГеоЭС и выдвинули технические предложения по модернизации схем с увеличением их мощности, а также разработали геотермальные технологии электрогенерации с использованием бинарного и комбинированного циклов, мультикаскадных бинарных энергокомплексов и систем перегрева геотермального пара в водородно-кислородных парогенераторах.

5. Для дальнейшего развития геотермальной энергетики необходимы целевое финансирование исследований и сооружение опытных установок и демонстрационных объектов с созданием центра компетенций, а также расширение подготовки специалистов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бутузов В.А., Томаров Г.В.** Геотермальная энергетика Камчатки // Теплоэнергетика. 2020. № 11. С. 50–63.
<https://doi.org/10.1134/S0040363620110041>
2. **Геотермальная энергетика России: ресурсная база, электроэнергетика, теплоснабжение (обзор) / В.А. Бутузов, Г.В. Томаров, А.Б. Алхасов, Р.М. Алиев, Г.Б. Бадавов // Теплоэнергетика. 2022. № 1. С. 3–17.
<https://doi.org/10.1134/S004036362112002X>**
3. **Кремнёв О.А., Журавленко В.Я., Шурчков А.В.** К вопросу освоения тепла глубинных горных пород // Изучение и использование глубинного тепла Земли: сб. статей. М.: Наука, 1973. С. 25–34.
4. **Геотермальная энергетика: справ.-метод. изд. / Г.В. Томаров, А.И. Никольский, В.Н. Семенов, А.А. Шипков. М.: Интехэнерго-издат, 2015.**
5. **ПБ 07-599-03.** Правила разработки месторождений теплоэнергетических вод. М.: Госэнергонадзор России, 2003.
6. **Бутузов В.А.** Российская геотермальная энергетика: анализ столетнего развития научных и инженерных концепций // Окружающая среда и энергетика. 2019. № 3. С. 4–21.
7. **Алхасов А.Б.** Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии. М.: Физматлит, 2008.
8. **Кирюхин А.В., Сугробов В.М.** Геотермальные ресурсы Камчатки и ближайшие перспективы их освоения // Вулканология и сейсмология. 2019. № 6. С. 50–65.
9. **Шулюпин А.Н.** Способы обеспечения устойчивой работы пароводяных скважин // Георесурсы. 2019. Т. 1. С. 99–106.
10. **Supercritical geothermal systems – A review of past studies and ongoing research activities / P. Dolso, H. Asamuta, E. Huenges, F. Poletto, T. Reinsch, B. Sanjuan // Proc. of the 41st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford, California, Stanford University, 13–15 Febr. 2017.**
11. **Belousov V., Belousova I., Khubaeva O.** The project of deep well drilling in the Pauzhetsky geothermal area // Proc. of the World Geothermal Congress. Reykjavik, Iceland, 26 April–2 May 2020.
12. **Eichelberger J., Kiryukhin A.** Scientific drilling project on Russia's Mutnovsky volcano // EOS, Trans. Amer. Geophys. Union. 2006. V. 87. Is. 50. P. 569.
13. **Возможности использования тепла магматического очага Авачинского вулкана и окружающих его пород для тепло- и электроснабжения / С.А. Федоров, В.М. Сугробов, И.С. Уткин, Л.И. Уткина // Вулканология и сейсмология. 2007. № 1. С. 32–46.**
14. **Магомедов М.М.-Ш.** О лабораторных исследованиях теплофизических свойств материи в РТ-условиях, сопутствующих коре, мантии и ядру планеты // Материалы XII Школы молодых ученых им. Э.Э. Шпильрайна “Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов”. Вып. 8. Махачкала: АЛЕФ, 2020. С. 240–246.
15. **Belousov V.I., Belousova J.V.** Colloids in the hydrothermal-magmatic system of Kamchatka and the Kuril islands // Proc. of the Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford, California, Stanford University, 11–13 Febr. 2019.
16. **Томаров Г.В., Шипков А.А., Сорокина Е.В.** Совершенствование геотермальных энергоустановок с бинарным циклом // Теплоэнергетика. 2015. № 12.

- С. 40–48.
<https://doi.org/10.1134/S0040363615120103>
17. **Томаров Г.В., Шипков А.А., Сорокина Е.В.** Выбор оптимального рабочего тела для бинарных установок на предельно низкотемпературном теплоносителе // Теплоэнергетика. 2016. № 12. С. 59–67.
<https://doi.org/10.1134/S0040363616120067>
 18. **Анализ** и предложения по совершенствованию фреоновой электростанции БЭС-2.5 / Ю.М. Петин, И.И. Гогонин, Д.В. Колесников, А.А. Любин // Промышленная энергетика. 2022. № 7. С. 39–44.
 19. **Повышение** эффективности и надежности работы геотермальных турбин с применением системы перегрева пара вторичного вскипания / Г.В. Томаров, В.И. Борзенко, А.А. Шипков, Е.В. Сорокина // Теплоэнергетика. 2018. № 10. С. 70–77.
<https://doi.org/10.1134/S0040363618100119>
 20. **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 водородно-кислородного парогенератора // Теплоэнергетика. 2019. № 10. С. 84–93.
<https://doi.org/10.1134/S0040363619100060>
 21. **Томаров Г.В., Борзенко В.И., Шипков А.А.** Применение на ГеоЭС водородно-кислородных парогенераторов для перегрева пара вторичного вскипания // Теплоэнергетика. 2021. № 1. С. 52–62.
<https://doi.org/10.1134/S0040363620120103>
 22. **Томаров Г.В., Шипков А.А.** Геотермальная комбинированная бинарная электростанция с системой перегрева пара вторичного вскипания: выбор оптимальных рабочих тел // Теплоэнергетика. 2019. № 11. С. 63–71.
<https://doi.org/10.1134/S0040363619110067>
 23. **Томаров Г.В., Шипков А.А.** Мультикаскадные геотермальные бинарные энергокомплексы: утилизация высокотемпературного теплоносителя (180°C) // Теплоэнергетика. 2022. № 4. С. 31–40.
<https://doi.org/10.1134/S0040363622030109>
 24. **Томаров Г.В., Шипков А.А.** Мультикаскадные геотермальные бинарные энергокомплексы: утилизация среднетемпературного теплоносителя (120°C) // Теплоэнергетика. 2022. № 5. С. 49–57.
<https://doi.org/10.1134/S004036362205006X>
 25. **Повышение** эффективности использования геотермальных ресурсов на основе применения комбинированного энергоблока с бинарной установкой на сбросном сепарате Мутновской ГеоЭС / Г.В. Томаров, А.А. Шипков, А.И. Никольский, В.Н. Семенов // Теплоэнергетика. 2016. № 6. С. 31–35.
<https://doi.org/10.1134/S0040363615120115>

Russian Geothermal Electric Power Industry: State and Development Prospects

V. A. Butuzov^{a, *} and G. V. Tomarov^b

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

^b *ООО Geoterm-M, Moscow, 111250 Russia*

*e-mail: ets@nextmail.ru

Abstract—The article presents data on the resource base of Russia’s geothermal steam–water fields located in the Kamchatka Peninsula and Kuril Islands with the approved reserves of 285.5 kg/s and production in 2020 amounting to 13 million t. The prospective steam–water mixture reserves are estimated at up to 1100 MW according to the volume method and with the natural discharge of steam–hydrotherms. The results of studies accomplished by the Institute of Volcanology and Seismology, Russian Academy of Sciences and the Institute of Geothermy and Renewable Energy Problems of the Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, are given. The prospects of explorations on drilling wells at the foot of volcanoes in the Kamchatka Peninsula for obtaining fluids with supercritical parameters (above 450°C and 25 MPa) are estimated. The activity conducted by АО Тепло Земли (Heat of the Earth) on producing a steam–water mixture in the Kamchatka Peninsula is described. The chronology and description of technical solutions on geothermal power plants in Russia are given. The key technical characteristics, thermal process cycle diagrams, and operation results of the Pauzhetka, Verhkne-Mutnovsky, and Mutnovsky geothermal power plants (GeoPPs) with the total installed capacity equal to 74 MW and amount of electricity production in 2020 equal to 428 GW h are presented. The article analyzes the results of modern studies carried out in Russia on binary geothermal power units with a geothermal fluid having a temperature from 120 to 180°C, on combining binary power units with hydrogen-assisted geothermal steam superheating and expanding the Mutnovsky GeoPP with direct-cycle and combined cycle power units with increasing the plant capacity by 50–63 MW. Proposals on increasing the target financial support, constructing experimental installations and demonstration facilities, and establishing a center for geothermal power engineering competences are suggested.

Keywords: geothermal fields, steam–water mixture, geothermal resources, geothermal power plant, steam turbines, binary power units, wells, separators, reinjection, hydrogen–oxygen steam generators