
**ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ,
ГИДРОЭНЕРГЕТИКА**

**ОПЫТ РАЗВИТИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ
НА ПРИМЕРЕ ИСЛАНДИИ**

© 2023 г. В. А. Бутузов*

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

**e-mail: ets@nextmail.ru*

Поступила в редакцию 13.02.2023 г.

После доработки 24.03.2023 г.

Принята к публикации 30.03.2023 г.

Представлены данные о ресурсной геотермальной базе Исландии: 25 высокотемпературных (температурой свыше 200°C в забое) и 250 низкотемпературных (150°C) месторождений. Отмечено сходство геологических условий и основных характеристик термоводозаборов Исландии и Камчатского края России. Проведен анализ правового обеспечения геотермальной энергетики Исландии, а также деятельности государственного учреждения *Orkustofnun* по лицензированию, исследованиям геотермальных месторождений и созданию крупнейшей в мире библиотеки геотермальной литературы. Описан процесс реализации госпрограммы *IDDP* по бурению и исследованию скважин у подножия вулкана *Krafla* при сверхкритических параметрах (СКП) флюидов. Приведены основные характеристики восьми геотермальных электростанций (ГеоЭС) общей мощностью 753 МВт с выработкой электроэнергии в 2021 г. 6208 ГВт · ч, описаны тепловые схемы и циклы. Указано, что самая мощная в Исландии ГеоЭС – *Hellisheiði* (303 МВт), геотермальный теплоноситель которой подается в г. Рекиявик, расположенный на расстоянии 19.5 км от нее. Эта станция оснащена установленной системой утилизации углекислого газа в карбонатные подземные породы. На двух ГеоЭС построены энергоблоки с бинарными циклами: *Husavik* (2 МВт) по циклу Калины, *Svartsergi* (7 × 1.2 МВт) с органическим теплоносителем. Отмечено, что Исландия обладает крупнейшей в мире геотермальной теплогенерацией [2373 МВт, 9340 ГВт · ч (2021 г.)] с преобладанием отопления [1650 МВт; 6840 ГВт · ч (2021 г.)]. Описана самая мощная в стране и в мире система теплоснабжения г. Рекиявик: ее мощность составляет 1150 МВт, протяженность – 2230 км. Представлены данные о неэнергетическом использовании геотермальной воды: на рыбных фермах, в плавательных бассейнах, теплицах, установках по утилизации углекислого газа. Сделан вывод, что опыт Исландии особенно значим для развития геотермальной энергетики России.

Ключевые слова: геотермальные месторождения, скважины, сверхкритические параметры, реинжекция, электрогенерация, ГеоЭС, топливно-энергетический баланс, паровые турбины, сепарация пара, бинарные энергоблоки, утилизация углекислоты, теплогенерация, геотермальные технологии

DOI: 10.56304/S0040363623090011

Исландия – островное государство площадью 103 тыс. км². В недрах острова содержатся огромные ресурсы геотермальной тепловой энергии в виде пароводяной смеси и горячей воды. Население страны составляет 370 тыс. человек. В топливно-энергетическом балансе Исландии преобладает электрическая энергия: при суммарном годовом потреблении энергоресурсов 4100 тыс. т у.т. (100%) на ее долю приходится 53.5% (рис. 1). На втором месте тепловая энергия (27.5%), на третьем – нефтепродукты (16.6%). Прочие используемые виды энергоресурсов соответствуют планке в 2.4%. При годовом производстве электрической энергии 19.5 млрд кВт · ч (100%) ее промышленное потребление равняется 81.7%, в основном, из-за затрат на выплавку алюминия. При суммарном значении установленных мощностей электрогене-

рации (рис. 2) 2979 МВт (100%) мощность, приходящаяся на гидроэнергетику, составляет 2104 МВт (70.6%), а на ГеоЭС – 756 МВт (25.5%). Основой электроэнергетики Исландии являются гидроэлектростанции общей установленной мощностью 2104 МВт (70.6% всех генерирующих мощностей страны). Самые крупные гидроэлектростанции – *Kárahnjúkar* (690 МВт) и *Búrfell* (270 МВт). Все ГЭС работают совместно с ГеоЭС в единой энергосистеме страны. Главная нагрузка в энергобалансе страны – электроснабжение алюминиевых заводов. Большинство гидроэлектростанций принадлежат национальной энергетической компании *Landsvirkjun*.

В основе развития возобновляемой энергетики Исландии лежит комплексный подход [1] – правовая база с законами о земельных ресурсах,

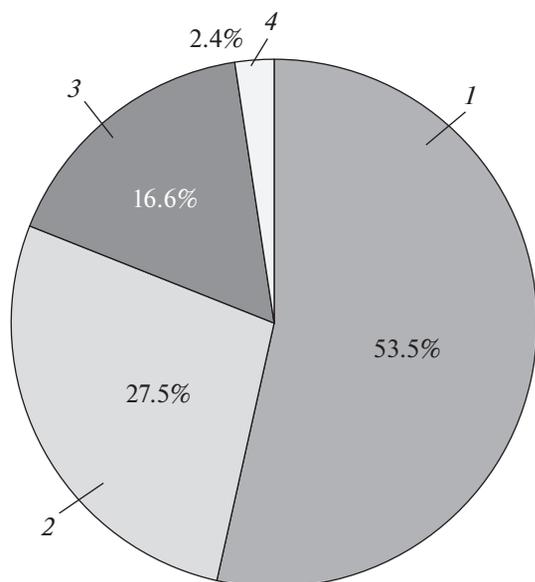


Рис. 1. Диаграмма топливно-энергетического баланса Исландии в 2021 г. при общем потреблении 4100 тыс. т у.т. (100%).
Источники энергии, тыс. т у.т.: 1 – электрическая, 2194; 2 – тепловая, 1126; 3 – получаемая при сжигании нефтепродуктов, 680; 4 – прочие, 100

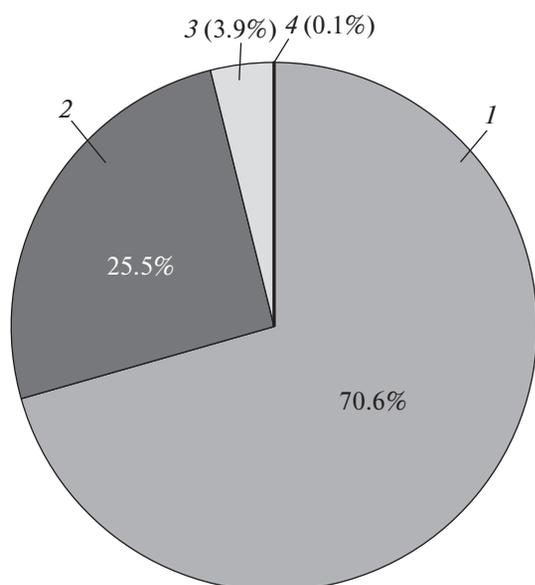


Рис. 2. Диаграмма распределения установленной мощности электрогенерации Исландии в 2021 г. [всего 2979 МВт (100%)].
Электростанции (мощность, МВт): 1 – ГЭС (2104); 2 – ГеоЭС (756); 3 – ТЭС (117); 4 – ветровые (2)

энергетике, охране природы и строительстве. Что касается частной собственности на землю, то государством созданы нормы использования ее ресурсов, в том числе геотермальных. При министерстве

окружающей среды, энергетики и климата работает учреждение Orkustofnun, которое осуществляет лицензирование, мониторинг разработки и эксплуатации энергетических и минеральных ресурсов, регулирование энергетического рынка, а также проводит исследования в области энергетики. На сайте учреждения представлены данные о гидроэнергетике, геотермальной энергетике, разведке нефти и газа в Исландии, а также крупнейшая в мире библиотека по геотермальной энергетике (20 тыс. единиц хранения), в том числе Справочник геотермальных скважин Исландии, пробуренных с 1904 по 2021 г., количество которых составляет более 14 тыс. Для реализации геотермальных проектов правительством создан Энергетический фонд, который помимо разведки и бурения скважин осуществляет субсидирование электрического и нефтяного отопления для выравнивания цен (по сравнению с геотермальным) на энергоресурсы, подаваемые потребителям. В Исландии продолжительность работ по геотермальным проектам от разведки до ввода в эксплуатацию ГеоЭС составляет в среднем семь лет.

Геотермальная ресурсная база Исландии состоит из 25 высокотемпературных месторождений (свыше 200°C в забое) и 250 низкотемпературных (150°C), из них девять эксплуатируются с погружными насосами [2]. Термоводозаборы, работающие без реинжекции, в большинстве своем высокопродуктивны и имеют дебиты скважин 65–877 кг/с (Reykir, Reykjahlid, Laugarnes, Ellidaar). Малопродуктивные месторождения с дебитами 15–38 кг/с эксплуатируются как в фонтанном режиме (Skatudalur, Namar), так и с реинжекцией (Laugaland) [3]. А.Р. Гарднер из Геологического института РАН исследовал геотермальные ресурсы Исландии в период с 1973 по 2005 г. [4]. Геологические и геотермальные условия формирования пароводяных и водяных термоводозаборов полуострова Камчатка аналогичны условиям Исландии, а оценки ресурсной базы сопоставимы с ней [5]. Так, перспективная геотермальная электрогенерация на термоводозаборах российского полуострова оценена в 1000 МВт по объемному методу при естественной разгрузке парогидротерм и до 3900 МВт по показателю вулканической активности. Помимо Камчатки, геотермальная теплогенерация используется также на Северном Кавказе (Республики Дагестан и Адыгея, Краснодарский и Ставропольский края), а ее перспективы оценены в 2000 МВт [6].

ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

В Исландии с 2021 г. эксплуатировались восемь системных ГеоЭС общей установленной мощностью 752.6 МВт и выработкой электрической энергии 6208 (ГВт · ч)/год, функционирова-

ли также небольшие станции, построенные в 2018 г.: Flúðavirkjun (1 МВт) и Flúðir (0.6 МВт) [7]. Геотермальные электростанции расположены на геотермальных месторождениях сухого пара, пароводяной смеси (ПВС) и высокотемпературной воды на севере острова (три ГеоЭС) и в южной его части (пять станций). На исландских ГеоЭС применяются все известные принципиальные тепловые схемы: с непосредственной подачей сухого пара в турбины, с одно- и двухступенчатой сепарацией ПВС, с использованием бинарных энергоблоков. Проектирование и сооружение большинства ГеоЭС выполнила исландская фирма Mannvit Engineering, имеющая пятидесятилетний опыт работы. Проектирование систем централизованного теплоснабжения осуществляет исландская компания Verkis Engineering, а эксплуатирует 18 ГЭС и ГеоЭС компания Landvirkjuk. На геотермальных электростанциях страны установлены паровые турбины главным образом японских производителей.

В таблице [7] представлены основные характеристики ГеоЭС. Первая сетевая ГеоЭС Vjarnarflag была построена на севере страны в 1969 г. по схеме с одноступенчатой сепарацией (single flash – SF) (рис. 3) и паровой турбиной мощностью 3.2 МВт. Температура пара равна 182°C, давление – 9.5 бар (0.95 МПа), выработка электрической энергии в 2020 г. составила 30 ГВт · ч.

Геотермальная электростанция Krafla установленной мощностью 60 МВт, построенная в период 1987–1997 гг., расположена в 10 км от ГеоЭС Vjarnarflag. На месторождении пробурено 33 скважины глубиной 2222 м каждая, из которых в 2021 г. эксплуатировалось 17 скважин, в том числе 5 скважин сухого пара. Геотермальная электростанция находится рядом с вулканом и в 1980 г. пережила его извержение. После восстановления станции в 1997 г. на ней была установлена вторая паровая турбина мощностью 30 МВт. В 2021 г. мощность станции составила 60 МВт. ГеоЭС работает по схеме с двухступенчатой сепарацией (double flash – DF) (рис. 4). На территории ГеоЭС Krafla в 1999 г. компанией Mannvit Engineering была пробурена первая скважина для добычи флюида сверхкритических параметров по самой перспективной в геотермальной энергетике технологии [8].

Геотермальная ПВС у подножия вулканов при сверхкритических параметрах: температуре свыше 450°C и давлении 140 бар (14 МПа) – приобретает особые свойства. Вода имеет плотность в разы меньшую, чем при обычных параметрах, а растворимость в ней существенно повышается. Кардинально меняются и свойства пара. Лучшие в мире практические результаты бурения скважин для добычи ПВС с СКП получены в Исландии при реализации национальной программы Iceland

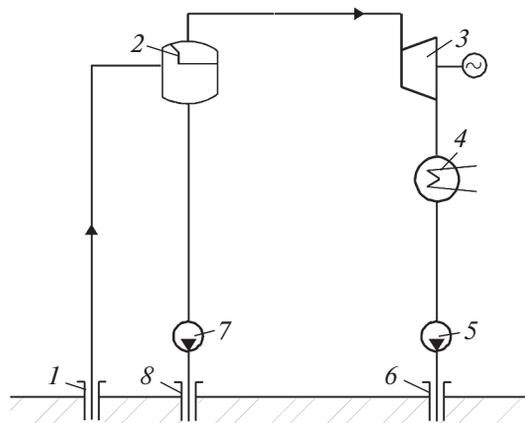


Рис. 3. Схема ГеоЭС с одноступенчатой сепарацией (SF).

1 – продуктивная скважина; 2 – сепаратор; 3 – паровая турбина; 4 – конденсатор; 5 – реинжекционный насос конденсата; 6 – скважина реинжекции конденсата; 7 – сепарационный насос реинжекции; 8 – скважина реинжекции сепарата

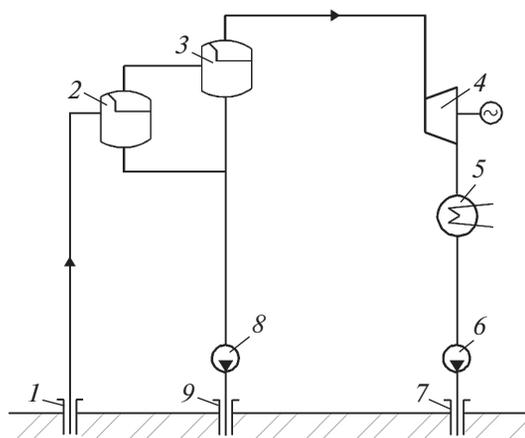


Рис. 4. Схема ГеоЭС с двухступенчатой сепарацией (DF).

1 – продуктивная скважина; 2, 3 – сепараторы I и II ступеней; 4 – паровая турбина; 5 – конденсатор; 6, 8 – насос реинжекции конденсата и сепарата; 7, 9 – скважина реинжекции конденсата и сепарата

Deep Drilling Project (IDDP) [9]. При сооружении первой скважины на глубине 2104 м по этой программе (IDDP-1) в 1999 г. бур попал в расплавленную магматическую породу. Бурение было остановлено и при перфорации ствола скважины до глубины 2080 м была организована добыча флюида, имевшего такие параметры на устье: температуру 450°C, давление 140 бар (14 МПа), массовый расход до 12 кг/с, тепловую мощность до 36 МВт. Работы на скважине продолжались три года до выхода ее из строя в 2012 г. из-за коррозии арматуры и ствола [10]. В 2022 г. на площадке ГеоЭС Krafla фирма

Основные технические характеристики ГеоЭС Исландии (2020 г.)

ГеоЭС	Установленная мощность, электрическая/тепловая МВт	Годы строительства	Единичная мощность турбин, МВт	Число энергоблоков	Тип энергодвигателя*	Температура пара перед турбиной, °С	Давление пара, бар (МПа)	Расход теплоносителя, т/ч	Выработка электрической энергии, ГВт·ч/год
Krafla	60.0	1978	30	1	DF	172	6.70/1.20** (0.670/0.120)	400/130**	480
		1997	30	1	DF	122			
Svartsengi	74.4/150.0	1981	6	1	SF	155	4.50 (0.450)	124	611
		1989–1993	1.2	7	B	103	0.12 (0.012)	131	
		1999	30	1	SF	162	5.50 (0.550)	275	
		2007	30	1	DS	201	15.00 (1.500)	288	
Bjarnarflag	3.2	1969	3.2	1	SF	182	9.50 (0.950)	45	30
Nesjavellir	120.0/300.0	1998	30	2	SF	192	12.00 (1.200)	432	960
		2001	30	1	SF	192	12.00 (1.200)	198	
		2005	30	1	SF	192	12.00 (1.200)	198	
Húsavík	2.0/23.5	2000	2	1	B	122	–	324	16
Reykjanes	100.0	2006	50	2	SF	210	18.00 (1.800)	576	800
Hellisheiði	303.0/133.0	2006	45	2	SF	178	8.50 (0.850)	600	2573
		2007	33	1	SF	178	1.25 (0.125)	315	
		2008	45	2	SF	178	8.50 (0.850)	600	
		2011	45	2	SF	178	8.50 (0.850)	600	
Theistareykir	90.0	2017–2018	45	2	SF	178	8.50 (0.850)	560	738
Всего	752.6			29					6208

* SF – single flash (одноступенчатая сепарация); DF – double flash (двухступенчатая сепарация); DS – dry steam (сухой пар); B – binare (бинарный цикл).

** Турбина двухпоточная: в числителе давление и расход пара перед первой ступенью, в знаменателе – перед второй.

Mannvit Engineering проводила подготовительные работы к бурению новой скважины для добычи геотермального теплоносителя с СКП – Krafla Magma Testbed. Проект бурения подобной скважины на полуострове Камчатка в России описан в статье [11].

Третья станция Húsavík на севере Исландии установленной мощностью 2 МВт была построена в 2000 г. на основе бинарного энергоцикла Калины с водоаммиачной смесью в качестве рабочего тела (цикл KCS34) [12] (рис. 5). На сегодняшний день эта станция обеспечивает электро- и теплоснабжение города Húsavík – “китовой столицы” Исландии.

В 30 км от ГеоЭС Húsavík в 2018 г. была возведена ГеоЭС Theistareykir установленной мощностью 90 МВт. Электростанция получает ПВС от девяти скважин и работает по схеме с одноступенчатой сепарацией. На ГеоЭС установлены две турбины мощностью 45 МВт каждая.

Строительство самой мощной исландской ГеоЭС Hellisheiði (303 МВт) велось в 2006–2011 гг. Источником ПВС являются 30 геотермальных скважин глубиной от 2000 до 3000 м. Параметры геотермального пара после одноступенчатой сепарации следующие: температура 178°C, давление 8.5 бар (0.85 МПа). Установлены шесть турбин фирмы Mitsubishi мощностью 45 МВт каждая и одна турбина фирмы Toshiba с давлением на входе 1.25 бар (0.125 МПа) и мощностью 33 МВт. Отработанный в турбинах геотермальный теплоноситель в теплообменниках (общая тепловая мощность 133 МВт) подогревает артезианскую воду питьевого качества, которая по теплоизолированной трубе диаметром 1000 мм и протяженностью 19.5 км подается на теплоснабжение г. Рейкьявик. Рядом с ГеоЭС в 2021 г. была построена установка OrkaCCSc по утилизации углекислого газа с последующими растворением его в отработанной на ГеоЭС геотермальной воде и закачкой в подземные пласты для кристаллизации в горных породах (производительность 4 тыс. т/год). Проектирование и строительство ГеоЭС выполняла фирма Mannvit Engineering (Исландия), магистрального теплопровода – компания Verkis Engineering (Исландия), установки по утилизации CO₂ – фирма Climeworks (Швейцария).

Геотермальная электростанция Reykjanes имеет установленную электрическую мощность 100 МВт. Источник ПВС – 12 геотермальных скважин глубиной 2700 м каждая. Параметры сухого пара: температура 290–320°C, давление 19 бар (1.9 МПа). На станции функционируют две паровые турбины мощностью по 50 МВт. Охлаждение конденсаторов осуществляется морской водой. На площадке ГеоЭС в 2017 г. по программе IDDP-2 была пробурена вторая скважина глубиной 4650 м. Параметры в забое в режиме охлаждения буровой жидкостью

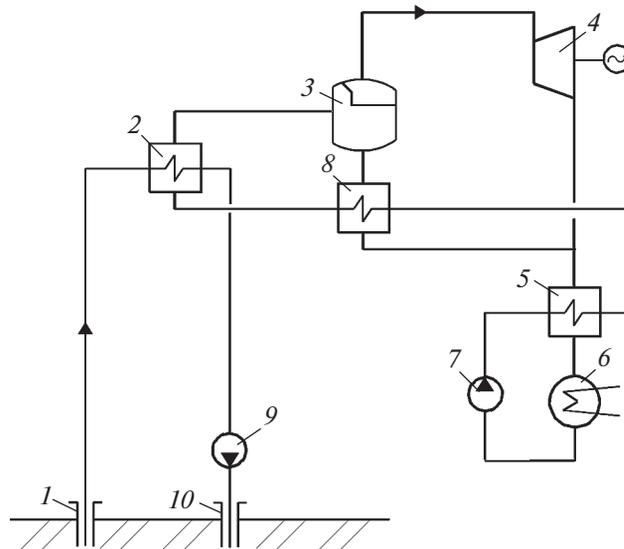


Рис. 5. Схема бинарной ГеоЭС по циклу Калины с водоаммиачной смесью в качестве рабочего тела. 1 – продуктивная скважина; 2 – испаритель; 3 – сепаратор; 4 – турбина, работающая на водоаммиачной смеси; 5 – рекуператор; 6 – конденсатор; 7, 9 – питательный и реинжекционный насос; 8 – подогреватель; 10 – скважина реинжекционная

следующие: температура 426°C, давление 340 бар (34 МПа). При отсутствии охлаждения буровой жидкостью температура породы достигала 535°C. При дальнейших испытаниях скважины произошло обрушение обсадной колонны, и проект был остановлен.

Геотермальная электростанция Svartsengi установленной мощностью 74.4 МВт получает ПВС и сухой пар от 13 геотермальных скважин глубиной 1800 м каждая (8 скважин с ПВС и 5 с сухим паром). Первая паровая турбина мощностью 6 МВт была установлена в 1981 г. В 1989–1993 гг. фирмой ORMAT на ПВС после турбины с температурой 103°C и давлением 0.1 бар (0.01 МПа) были смонтированы семь бинарных энергоблоков единичной мощностью 1.2 МВт каждый с изопентаном в качестве рабочего тела (рис. 6). В 1999 г. на станции была введена в эксплуатацию паровая турбина с одноступенчатой сепарацией мощностью 30 МВт, а в 2007 г. – паровая турбина мощностью 30 МВт на сухом паре (dry steam – DS) (рис. 7). Теплоноситель после прохождения турбин общей тепловой мощностью 150 МВт направляется на теплоснабжение г. Рейкьявика по магистральному теплопроводу протяженностью 45 км, а также к плавательным бассейнам геотермального курорта “Голубая лагуна” (Blue Lagoon). На ГеоЭС Svartsengi построен завод по производству биотоплива для транспорта – метанола производительностью до 5 млн дм³/год. В качестве сырья используются углекислый газ,

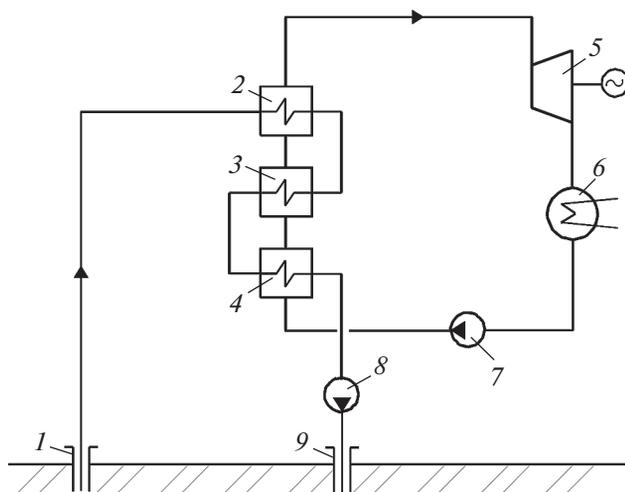


Рис. 6. Схема бинарного энергоблока с органическим рабочим телом.

1 – продуктивная скважина; 2 – пароперегреватель; 3 – испаритель; 4 – экономайзер; 5 – паровая турбина; 6 – конденсатор; 7 – фреоновый насос; 8 – реинжекционный насос; 9 – скважина реинжекционная

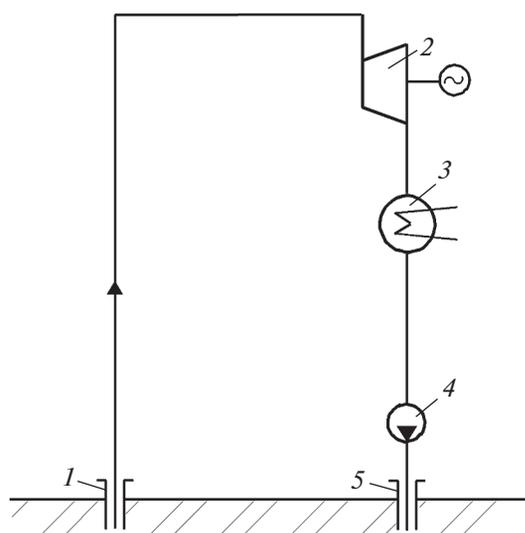


Рис. 7. Схема ГеоЭС с сухим паром (DS).

1 – продуктивная скважина; 2 – паровая турбина; 3 – конденсатор; 4 – насос конденсата реинжекционный; 5 – скважина реинжекционная

отсепарированный из геотермального теплоносителя [13], и водород, полученный из воды методом электролиза с потреблением электроэнергии от ГеоЭС.

В ГеоЭС Nesjavellir установленной электрической мощностью 120 МВт поступает ПВС от 25 скважин. ГеоЭС работает по схеме с одноступенчатой сепарацией. На электростанции Nesjavellir установлены четыре паровые турби-

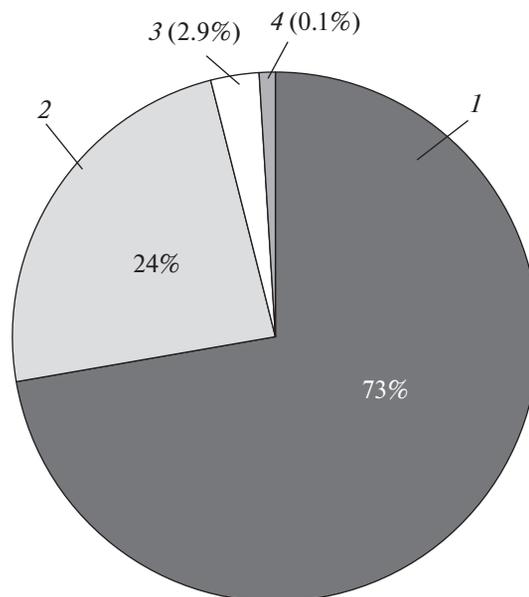


Рис. 8. Диаграмма использования для нужд отопления тепловой энергии, полученной от разных источников в 2021 г. [всего 9453 ГВт·ч/год (100%)], ГВт·ч: 1 – геотермальный теплоноситель напрямую от скважин, 6900; 2 – то же, после ГеоЭС, 2285; 3 – с помощью электрической энергии, 264; 4 – на основе нефтепродуктов, 5

ны мощностью по 30 МВт. Подключенная тепловая мощность составляет 300 МВт. Отработанный геотермальный теплоноситель подогревает по закрытой схеме воду, которая направляется на теплоснабжение г. Рейкьявик.

ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ТЕПЛОГЕНЕРАЦИЯ

Теплогенерация в Исландии преимущественно геотермальная (97%). В годовом балансе геотермальная тепловая энергия непосредственно от скважин составляет 6900 ГВт·ч (73%), а геотермальное отопление после ГеоЭС – 2285 ГВт·ч (24%) (рис. 8).

Распределение общей установленной мощности (2373 МВт) геотермальной теплогенерации Исландии в 2021 г. по видам потребления показано на рис. 9, а по тепловой энергии (9340 ГВт·ч/год) – на рис. 10.

Как видно на рисунках, преобладает геотермальное отопление – 1650 МВт (70%) и 6840 ГВт·ч/год (71%). На втором месте по мощности – плавка снега 260 МВт (11%), при этом расход тепловой энергии составляет всего 525 ГВт·ч (5.5%). По потреблению тепловой энергии на втором месте располагаются плавательные бассейны – 898 ГВт·ч (9.3%).

В Исландии централизованное геотермальное теплоснабжение имеется в 30 городах и населен-

ных пунктах, его общая установленная мощность составляет 1650 МВт (69.6%). В столице страны г. Рейкьявик находится крупнейшая в мире система теплоснабжения тепловой мощностью 1150 МВт (2020 г.). Город потребляет 80 млн м³ геотермальной воды в год. Общая протяженность тепловых сетей равняется 2230 км. Расчетный температурный график варьируется от 75°C в подающем трубопроводе до 35°C в обратном.

На рис. 11 представлена схема источников геотермальной теплогенерации г. Рейкьявик. Система включает в себя четыре основных геотермальных месторождения: Laugaveite, Mosfellssveit из региона Reykir, Elliðaag и Laugarnes [15], а также три тепломагистралей, “исходящие” от ГеоЭС Svartsengi, Nesjavellir и Hellisheiði. Проанализировав опыт эксплуатации этих месторождений и, в частности, Laugarnes с реинжекцией отработанного теплоносителя, авторы [16] разработали системы централизованного геотермального теплоснабжения городов, расположенных на полуострове Камчатка: Петропавловска-Камчатского, Елизово, Вилючинска – с расчетной тепловой мощностью 216 МВт.

Геотермальное теплоснабжение г. Рейкьявик [17] началось в 1930 г. с прокладки тепломагистрали длиной 3 км от скважин месторождения Laugaveite с их дебитом 330 дм³/с при температуре 87°C. На втором этапе (1943 г.) в город проложили теплопровод протяженностью 18 км от месторождения Mosfellssveit региона Reykir с температурой флюида 85–90°C. Общая тепловая мощность тепловода составляет 200 МВт (рис. 12). Температурный график отопления зданий города 75/35°C (температуры в подающем и обратном трубопроводах) меняется в зависимости от температуры наружного воздуха. Теплоноситель после систем отопления зданий подается в системы снеготаяния, находящиеся под дорогами, общая площадь которых равняется 550 тыс. м² (всего в Исландии такие системы простираются на 740 тыс. м²) [14], и далее на слив. Геотермальная вода месторождения Mosfellssveit характеризуется низкой минерализацией и отсутствием коррозионно-активных элементов. Два этих фактора обусловили применение одноконтурной системы. В 1958 г. к городу был подключен термоводозабор Laugarnes тепловой мощностью 120 МВт с температурой теплоносителя 130°C (рис. 13). Режим эксплуатации скважин – фонтанный. В 1967 г. система теплоснабжения г. Рейкьявик была дополнена месторождением Elliðaag с восемью скважинами суммарным дебитом 220 дм³/с, температурой на устьях 85–95°C и общей тепловой мощностью 40 МВт. Схема этого геотермального термоводозабора одноконтурная, аналогичная схеме месторождения Laugarnes.

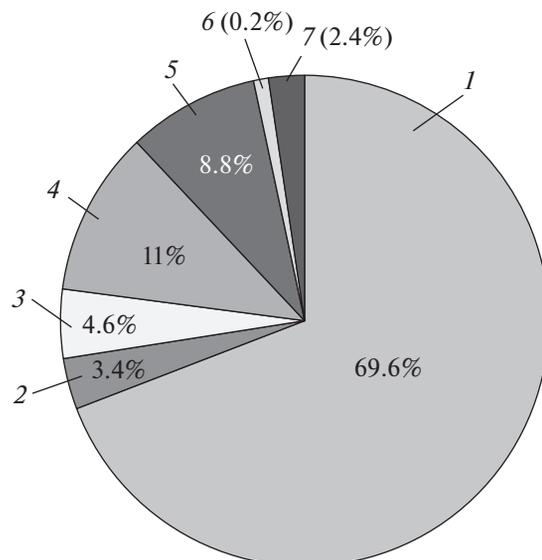


Рис. 9. Диаграмма распределения установленной мощности геотермальной теплогенерации [всего 2373 МВт (100%)], МВт: 1 – отопление, 1650; 2 – промышленное использование, 80; 3 – рыболовство, 110; 4 – плавление снега, 260; 5 – плавательные бассейны, 210; 6 – тепловые насосы, 5.6; 7 – теплицы, 57

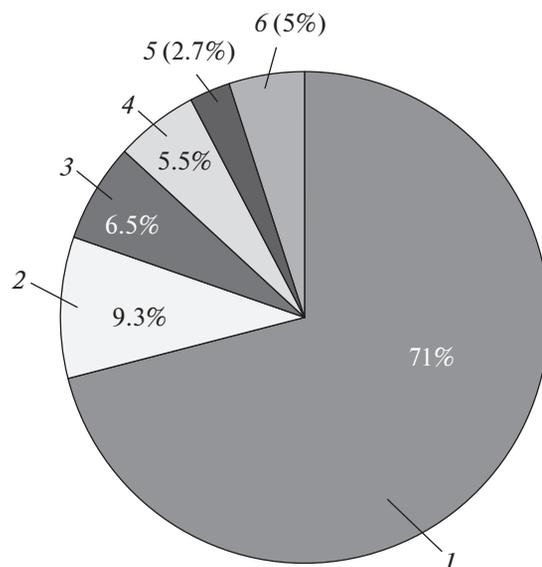


Рис. 10. Диаграмма потребления геотермальной тепловой энергии в 2021 г. [всего 9340 ГВт·ч (100%)], ГВт·ч: 1 – отопление, 6840; 2 – плавательные бассейны, 898; 3 – рыболовство, 630; 4 – плавление снега, 525; 5 – промышленность, 256; 6 – тепловые насосы, 19

Суммарная установленная мощность геотермальной теплогенерации трех ГеоЭС, работающих для теплоснабжения г. Рейкьявик, составляет 583 МВт, самая большая из них – ГеоЭС Nesjavellir – вырабатывает 300 МВт тепловой энергии (рис. 14).

ГЕОТЕРМАЛЬНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

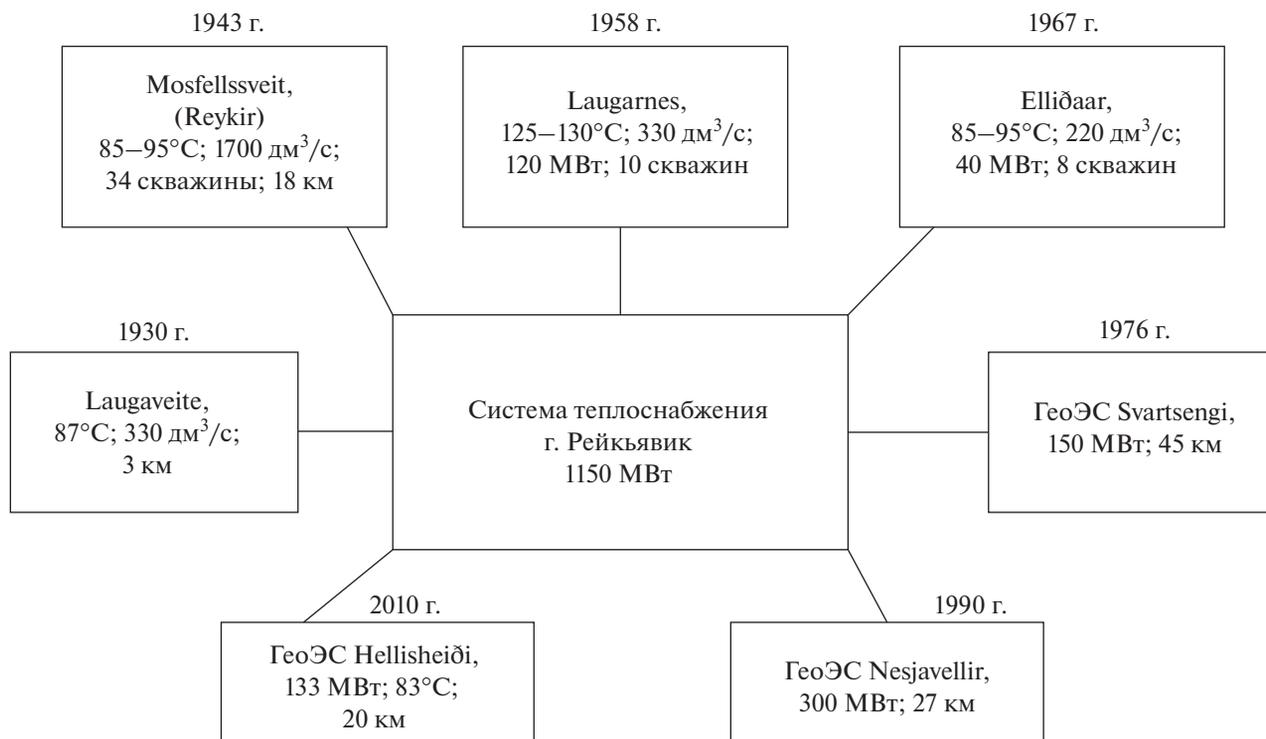


Рис. 11. Схема геотермальных месторождений, от которых осуществляется теплоснабжение г. Рейкьявик

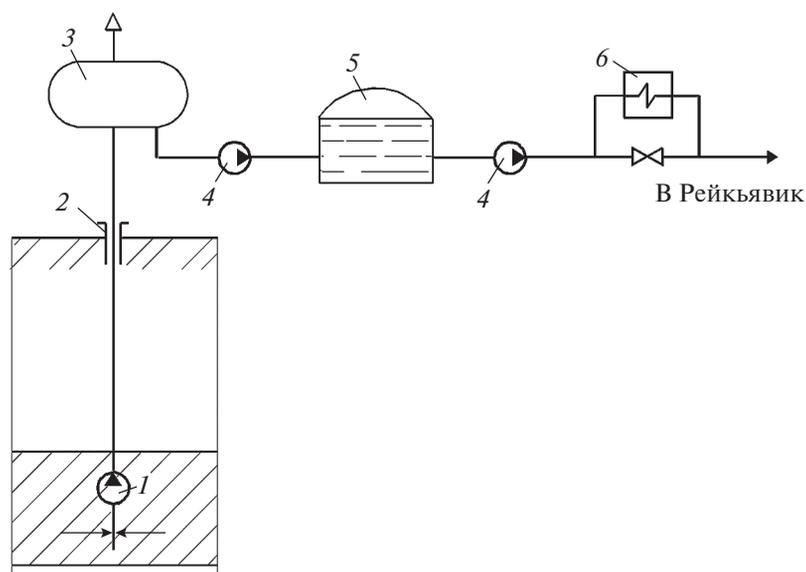


Рис. 12. Схема геотермального теплоснабжения г. Рейкьявик от месторождения Mosfellssveit.

1 – погружной насос; 2 – геотермальная скважина; 3 – бак-газоотделитель; 4 – насос; 5 – бак-аккумулятор; 6 – пиковая котельная

НЕЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ВОДЫ

Всего в Исландии 140 геотермальных бассейнов общей площадью 28 тыс. м². Самый большой в стране открытый плавательный бассейн Langardalsland площадью 1500 м² находится в г. Рейкья-

вик. Всего в городе располагаются 17 таких бассейнов, а в 47 км от столицы – самый знаменитый бассейн “Голубая лагуна”.

Около трети рыбных ферм страны (20 шт.) потребляют геотермальную энергию в размере 630 ГВт · ч. В поселке Хверагерды, в 45 км от

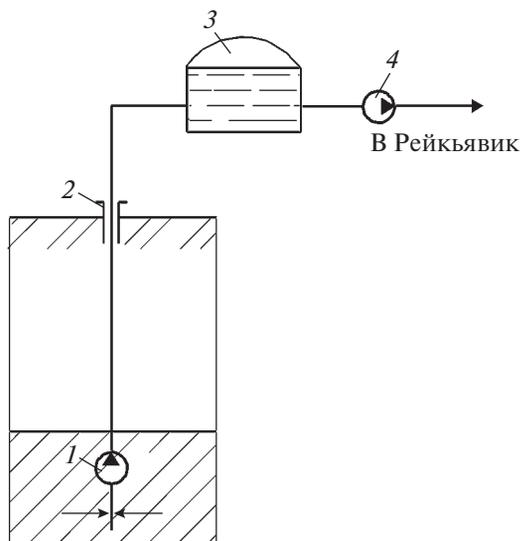


Рис. 13. Схема геотермального теплоснабжения г. Рейкьявик от месторождения Laugarnes. 1 – погружной насос; 2 – геотермальная скважина; 3 – бак-аккумулятор; 4 – насос

г. Рейкьявик, построены теплицы общей площадью 200 тыс. м². Геотермальная вода применяется также для сушки рыбы (до 15 тыс. т/год), морских водорослей (до 4 тыс. т/год) и выпаривания морской соли.

Углекислый газ геотермальных скважин в Исландии используется при реализации одной из трех технологий:

сепарации из воды с последующим сжижением выделившегося CO₂ для теплиц;

сепарации из воды и использования CO₂ для производства метанола;

утилизации CO₂ из воздуха, растворения его в сепарате ГеоЭС и реинжекции в подземные горизонты.

По первой технологии работает установка на месторождении Grimsnes (2 тыс. м³/год). На ГеоЭС Svartsengi функционирует завод по производству метанола (5 млн дм³/год). На ГеоЭС Hellisheiði фирмой OrkaCCS построена установка по утилизации CO₂ из воздуха с закачкой его в растворен-

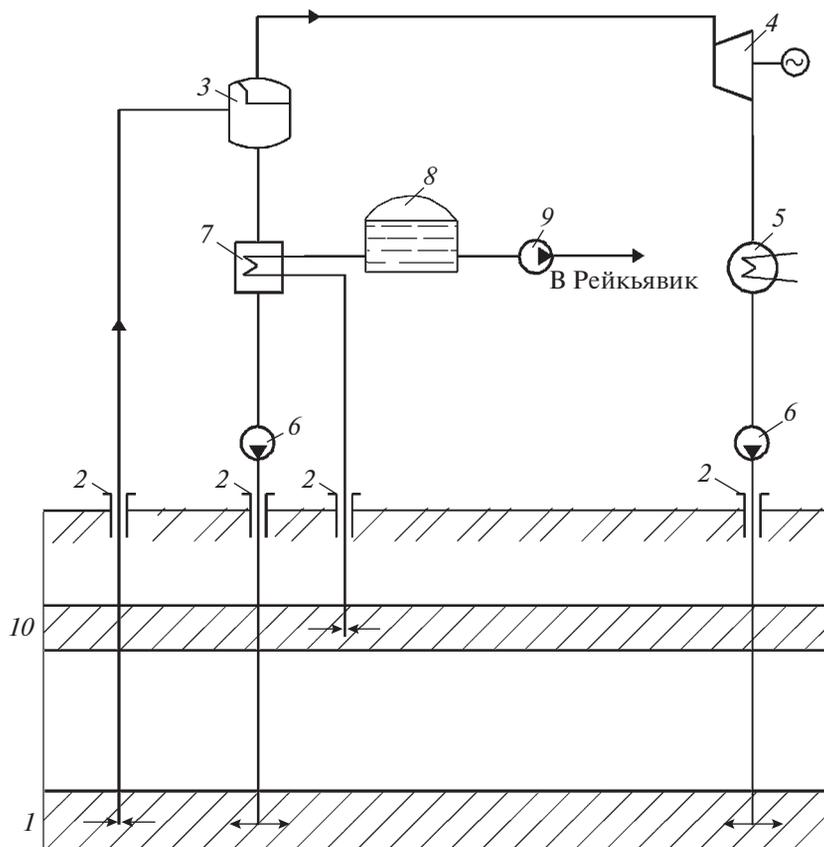


Рис. 14. Схема тепловой генерации на ГеоЭС Nesjavellir.

1 – продуктивный пласт; 2 – геотермальная скважина; 3 – сепаратор; 4 – паровая турбина; 5 – конденсатор; 6 – реинжекционный насос; 7 – теплообменник; 8 – бак-аккумулятор; 9 – насос; 10 – пласт артезианской воды

ном состоянии в подземные пласты (производительность 4 тыс. т/год).

ВЫВОДЫ

1. В Исландии сформирована нормативная база развития геотермальной энергетики и действует государственное учреждение Orkustofnun, осуществляющее лицензирование, мониторинг разработки и эксплуатации геотермальных месторождений, создана крупнейшая в мире библиотека по геотермальной энергетике. В настоящее время Orkustofnun обеспечивает регулирование энергорынка. Финансированием разработки новых месторождений и субсидированием рынка теплоснабжения занимается Энергетический фонд.

2. Перспективным направлением развития геотермальных исследований являются бурение скважин у подножия вулканов и добыча теплоносителя сверхкритических параметров. По программе IDDP в Исландии были пробурены две скважины и проведены испытания на них.

3. В Исландии эксплуатируются восемь системных ГеоЭС с 29 энергоблоками суммарной установленной мощностью 752.6 МВт и годовой выработкой электрической энергии 6208 ГВт · ч. Большинство энергоблоков ГеоЭС (18 шт.) работают по схеме одноступенчатой сепарации ПВС. Эксплуатируются восемь бинарных энергоблоков, два с двухступенчатой сепарацией ПВС и один с сухим паром. Подавляющее большинство паровых турбин изготовлены японской фирмой Mitsubishi. Применяются как воздушные, так и водяные конденсаторы с охлаждением, в том числе морской водой. Проектирование и строительство ГеоЭС осуществляет главным образом исландская фирма Mannvit Engineering, а эксплуатацию – компания Landvirjuk.

4. Система централизованного геотермального теплоснабжения г. Рейкьявик является самой крупной в мире (установленная мощность 1150 МВт). Она работает с 1930 г. и имеет теплосети протяженностью 2230 км. В состав системы входят четыре геотермальных месторождения, в том числе с погружными насосами, и три магистральных теплопровода от ГеоЭС протяженностью до 50 км каждый.

5. Опыт развития геотермальной энергетики Исландии имеет большое значение для наиболее удаленного российского региона – Камчатского края, геологические условия формирования термодозаборов которого аналогичны, а отсутствие месторождений органических энергоносителей способствует актуализации использования исландского варианта развития энергетики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Steingrímsson B., Björhsson S., Adelsteinsson H.** Master plan for geothermal and hydropower development in Iceland // Short Course on Geothermal Development and Geothermal Wells (UNU-GTP and LaGeo). Santa Tecla, El Salvador, 11–17 March 2012.
2. **A half-century** of geologic and geothermic investigations in Iceland: The legacy of Kristján Samundsson / B. Voight, A. Clifton, Á. Hjartarson, B. Steingrímsson, B. Brandsdóttir, C. Rodríguez, D. McGarvie, F. Sigmundsson, G. Ívarsson, G. Ó. Friðleifsson, G. Larsen, G. S. Jónsdóttir, H. Noll, I. McDougall, I. Kaldal et al. // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2020. V. 391. P. 1–31. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.08.012>
3. **Georgsson L.S., Johannesson H., Bjarnason T.** Geothermal activity in Borgarfjörður, W-Iceland, and the exploration, development and utilization of the Varmaland/Laugaland geothermal field // Proc. of the World Geothermal Congress. Bali, Indonesia, 25–29 April 2010.
4. **Галтнер А.Р.** Вулканогенно-осадочный литогенез в наземной рифтовой зоне Исландии // Труды Геолог. ин-та. 2014. Вып. 586.
5. **Кирюхин А.В., Сугробов В.М.** Геотермальные ресурсы Камчатки и ближайшие перспективы их освоения // Вулканология и сейсмология. 2019. № 6. С. 50–65. <https://doi.org/10.31857/S0203-03062019650-65>
6. **Бутузov В.А., Томаров Г.В.** Российская геотермальная электроэнергетика и перспективы развития // Теплоэнергетика. 2023. № 4. С. 23–32. <https://doi.org/10.56304/S0040363623040021>
7. **Ragnarsson A., Steingrímsson B., Thorhallsson S.** Geothermal development in Iceland 2015–2019 // Proc. of the World Geothermal Congress 2020 + 1. Reykjavik, Iceland, Apr.–Oct. 2021.
8. **Supercritical** geothermal systems – a review of past studies and ongoing research activities / P. Dobson, H. Asanuma, E. Huenges, F. Poletto, T. Reinsch, B. Sanjuan // Proc. of the 41st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University. Stanford, California, 13–15 Febr. 2017.
9. **Site** selection for the IDDP-1 well in Krafla / G. Ó. Friðleifsson, H. Ármannsson, Á. Guðmundsson, K. Árnason, A.K. Mortensen, B. Pálsson, G.M. Einarrsson // Geothermics. 2014. V. 49. P. 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2013.06.001>
10. **Elders W.A., Friðleifsson G.O.** The Iceland deep drilling project – scientific opportunities // Proc. of the World Geothermal Congress. Antalya, Turkey, 24–29 Apr. 2005.
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 Apr.–2 May 2020.
12. **Геотермальная** энергетика / Г.В. Томаров, А.И. Никольский, В.Н. Семенов, А.А. Шипков. М.: Интех-энерго-Издат, Теплоэнергетик, 2015.
13. **Ármannsson H.** Carbon dioxide emissions from Icelandic geothermal areas wells // Procedia Earth and Plan-

- etary Sci. 2017. V. 17. P. 104–107.
<https://doi.org/10.1016/j.proeps.2016.12.015>
14. **Low-temperature** geothermal utilization in Iceland – decades of experience / G. Axelsson, E. Gunnlaugsson, T. Jónasson, M. Ólafsson // *Geothermics*. 2010. V. 39. Is. 4. P. 329–338.
<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2010.09.002>
 15. **Gunnlaugsson E.** Geothermal district heating in Reykjavik, Iceland // *Proc. of the Intern. Geothermal Days POLAND 2004*. Zakopane, Poland, 13–17 Sept. 2004. International Course on Low Enthalpy Geothermal Resources – Exploitation and Development. P. 162–169.
 16. **Кирюхин А.В., Журавлев Н.Б.** Возможности использования Паратунского геотермального месторождения для теплоснабжения Камчатки // *Вулканонология и сейсмология*. 2019. № 2. С. 21–33.
<https://doi.org/10.31857/S0203-03062019221-33>
 17. **Ragnarsson A., Steingrímsson B., Thorhallsson S.** Geothermal country update for Iceland // *Proc. of the 7th African Rift Geothermal Conf. Kigali, Rwanda*, 31 Oct.–2 Nov. 2018.

Experience of the Development of Geothermal Energy on the Example of Iceland

V. A. Butuzov*

Trubilin Kuban State Agrarian University, Krasnodar, 350044 Russia

**e-mail: ets@nextmail.ru*

Abstract—Data on the geothermal resource base of Iceland are presented: 25 high-temperature (temperature over 200°C at the bottom) and 250 low-temperature (150°C) deposits. The similarity of the geological conditions and the main characteristics of thermal water intakes in Iceland and Kamchatka krai of Russia is noted. The analysis of the legal support of geothermal energy in Iceland, as well as the activities of the state institution Orkustofnun for licensing, research of geothermal deposits, and the creation of the world's largest library of geothermal literature, was carried out. The process of implementation of the IDDP state program for drilling and testing wells at the foot of the Krafla volcano at supercritical parameters (SCP) of fluids is described. The main characteristics of eight geothermal power plants (GeoPP) with a total capacity of 753 MW with electricity generation in 2021 of 6208 GW h are given and thermal schemes and cycles are described. It is indicated that the most powerful GeoPP in Iceland is Hellisheiði (330 MW), the geothermal coolant of which is supplied to Reykjavik, located at a distance of 27 km from it. This station is equipped with an installed system for the utilization of carbon dioxide into carbonate underground rocks. Power units with binary cycles were built at two GeoPPs: Husavik (2 MW) in the Kalina cycle and Svartsergi (7 × 1.2 MW) with organic coolant. It is noted that Iceland has the world's largest geothermal heat generation (2373 MW, 9340 GW h (2021)), with heating predominating (1650 MW; 6840 GW h (2021)). The most powerful heat-supply system in the country and in the world, in Reykjavik, is described: its capacity is 1150 MW and the length is 2230 km. Data are presented on the nonenergy use of geothermal water in fish farms, swimming pools, greenhouses, and carbon dioxide utilization plants. It is concluded that the experience of Iceland is especially significant for the development of geothermal energy in Russia.

Keywords: geothermal fields, wells, supercritical parameters, reinjection, power generation, GeoPP, fuel and energy balance, steam turbines, steam separation, binary power units, carbon dioxide utilization, heat generation, geothermal technologies