



ТРАДИЦИИ НАУЧНЫХ ШКОЛ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ

Доктор технических наук, профессор В.А. БУТУЗОВ
(Кубанский государственный аграрный университет
им. И.Т. Трубилина, Краснодар)

Кандидат технических наук, главный специалист Е.В. БРЯНЦЕВА
(ООО "Энерготехнологии-Сервис", Краснодар)

DOI: 10.7868/S023336192307008X

В 2021 г. геотермальная электрогенерация России имела установленную мощность 74 МВт с выработкой энергии 280 ГВт · ч/год, геотермальная теплогенерация составила 110 МВт и 428 ГВт · ч/год соответственно. В статье указано количество геотермальных месторожде-

ний и эксплуатируемых скважин, описаны структура и принципы эксплуатации. Рассмотрены основные результаты развития советской геотермальной энергетики. Представлены результаты исследований российских научных организаций по глубинной и поверхностной геотермии.

Показана перспективность исследований по разработке и сооружению скважин со сверхкритическими параметрами флюидов у подножия вулканов на Камчатке. Указаны направления и наиболее важные результаты исследований отечественной научной школы геотермальной электрогенерации. Отмечены результаты работ российских научно-исследовательских организаций в области геотермальной теплогенерации в Краснодарском крае, Чечне и Дагестане.

Геотермальная энергетика России в 2021 г. имела установленную мощность ГеоЭС 74 МВт, теплогенерации 110 МВт, выработку электрической энергии 280 ГВт·ч/год, тепловой энергии 428 ГВт·ч/год. В стране эксплуатировались три пароводяных геотермальных месторождения с 95 скважинами, из которых в 2021 г. было добыто 13 млн т/год пароводяной смеси (ПВС). На 33 гидрогеотермальных месторождениях со 101 скважиной было добыто 25.7 млн м³/год. Состояние российской геотермальной энергетики в 2019 г. обсуждалось в статье¹. Геотермальная энергетика как объект научных исследований имеет междисциплинарный характер и включает вопросы геологии и геофизики, технологий бурения, разработки и эксплуатации месторождений, технологий и оборудования электрогенерации и теплоснабжения. В зависимости от температуры теплоносителя из недр Земли различают глубинную и поверхностную геотермию (глубина менее 400 м). В формировании ресур-

сов поверхностной геотермии решающее значение имеет воздействие солнечной радиации на поверхность Земли. Глубинная геотермия в зависимости от вида пород разделяется на петрогеотермальную (тепло “сухих” пород) и геотермальную (пароводонасыщенные породы). Отечественная геотермия достигла значительного развития в 1980–2000 гг.² Научные исследования в этой области знаний тогда возглавляла Академия наук СССР, а в работе под её руководством участвовало более 50 организаций. Разведкой, бурением, эксплуатацией геотермальных месторождений занимался Мингазпром СССР, в составе которого научно-производственное объединение (НПО) “Союзгеотерм” выполняло весь комплекс геотермальных исследований. Максимальная добыча геотермальной воды в СССР была достигнута в 1985 г. – 60 млн м³/год. Установленная мощность ГеоЭС в 1999 г. составляла 24 МВт, а теплогенерации – 308 МВт.

Геотермальная наука в СССР имела четыре основные научные школы: московскую (Геологический институт АН СССР, Объединенный институт физики Земли, Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского); ленинградскую (Ленинградский горный институт); киевскую и дагестанскую (НПО “Союзгеотерм”).

В 1996–2012 гг. наиболее значимых результатов достигла научная школа геотермальной энергетики д.т.н., проф. О.А. Поварова. Созданная в НИУ “МЭИ” на основе экспериментальной базы опытной ТЭЦ эта школа в творческом содружестве с Калужским турбинным заводом обеспечила разработку и из-

¹ 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.

² Бутузов В.А. Российская геотермальная энергетика: анализ столетнего развития научных и инженерных концепций // Окружающая среда и энергетика. 2019. № 3.

готовление геотермальных паровых турбин мирового уровня и сооружение на их основе новых российских ГеоЭС.

Первые системные научно-технические разработки в области *геотермальной энергетики* в России были начаты в 1954 г. по решению Президиума Академии наук СССР о создании в г. Петропавловске-Камчатском лаборатории по исследованию геотермальных ресурсов. По инициативе и под руководством академика АН СССР М.А. Лаврентьева в 1955 г. было выполнено первое системное изучение гидротермальных ресурсов. В России на основе проведенного экспедиционного обследования геотермальных источников Камчатки и многолетних исследований советских ученых были разработаны атласы и карты геотермальных ресурсов страны. В работе³ представлены ресурсы геотермальных водяных, а в⁴ – они дополнены петрогеотермальными ресурсами.

В настоящее время исследования в области петрогеотермальных ресурсов ведутся группой ученых под руководством д.т.н., проф. Э.И. Богуславского. В монографии⁵ этого известного российского специалиста по ресурсам поверхностной геотермии (до 400 м) представлены карты “нейтрального” слоя территории России, распределения температур горных пород на глубинах до 200 м, результаты исследований конвективного теплообмена в проницаемых водонасыщенных горных породах и при обтекании ствола

геотермальной скважины подземными водами. Исследования в области поверхностной геотермии выполняют специалисты под руководством д.т.н. Г.П. Васильева. Они изучают теплообмен в горных породах с учётом фазового перехода грунтовых вод, а также ими разработаны теоретические основы этих процессов, результаты которых изложены в монографии⁶; получены результаты моделирования теплообмена в горных породах средней полосы России, представленные в статье⁷.

Ведущей научной организацией страны по глубинной геотермии, в том числе по изучению парогидротермальных месторождений, является Институт вулканологии и сейсмологии (ИВиС) РАН в г. Петропавловске-Камчатском. Результаты его оценки запасов пароводяных и водяных геотермальных ресурсов Камчатки показаны в статье⁸. ИВиС выполняет исследования по изучению технических возможностей и технико-экономической целесообразности бурения и использования геотермальных скважин со сверхкритическими параметрами у подножья Камчатских вулканов⁹. На международных научных конференциях, организованных ИВиС, регулярно принимают участие до 130 учёных, в том числе из зарубежных стран.

⁶ Васильев Г.П. Теплоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев Земли. М.: ИД “Граница”, 2006.

⁷ Васильев Г.П. Геотермальное теплоснабжение в Московском регионе / Г.П. Васильев, В.Д. Горнов и др. // Теплоэнергетика. 2008. № 1.

⁸ Кирюхин А.В. Геотермальные ресурсы Камчатки и ближайшие перспективы их освоения / А.В. Кирюхин, В.М. Сугробов // Вулканология и сейсмология. 2019. № 6.

⁹ Фёдоров С.А. Возможности использования тепла магматического очага Авачинского вулкана и окружающих его пород для тепло- и электроснабжения / С.А. Фёдоров, В.М. Сугробов, И.С. Уткин, Л.И. Уткина // Вулканология и сейсмология. 2009. № 1.

³ Маврицкий Б.Ф. Прогнозные запасы термальных вод СССР и возможные объемы геотермального теплоснабжения / Б.А. Локшин, А.В. Вольфенфельд. М.: Наука, 1973.

⁴ Атлас карт ресурсов термальных вод СССР. М.: Министерство геологии СССР; ВСЕГИНГЕО, 1984.

⁵ Богуславский Э.И. Освоение тепловой энергии недр: монография. М.: Спутник, 2018.

и обеспечила в 1966 г. сооружение первой в СССР Паужетской ГеоЭС прямого цикла на Камчатке, которая состояла из двух энергоблоков мощностью по 2.5 МВт каждый с турбинами МК-2.5–1.8 Калужского турбинного завода¹⁶. После строительства второй очереди в 1982 г. установленная мощность Паужетской ГеоЭС достигла 11.0 МВт.

По проекту Новосибирского отделения ГИПРОНИИ СО АН СССР в 1967 г. была сооружена Паратунская экспериментальная бинарная геотермальная электростанция мощностью 600 кВт¹⁷. Впервые была реализована технология преобразования низкотемпературного тепла в электроэнергию с использованием органического цикла Ренкина. В дальнейшем бинарные энерготехнологии на низкокипящих рабочих телах получили широкое распространение за рубежом для утилизации тепла геотермальных ресурсов и сбросного теплоносителя промышленных предприятий. К сожалению, после этого в нашей стране, обладающей огромными запасами углеводородного топлива, технологии геотермальной электрогенерации долгое время оставались невостребованными.

Новый этап развития российской геотермальной электроэнергетики начался в 1989 г., когда в рамках реализации ГНТП Миннауки РФ “Экологически чистая энергетика” под руководством д.т.н., проф. МЭИ О.А. Поварова были возобновлены научно-технические ис-

следования и разработки по созданию отечественного геотермального энергетического оборудования. В течение 10–15 лет совместными усилиями АО “Наука”, ООО “Геотерм-ЭМ”, научно-исследовательского и учебного центра геотермальной энергетики (НУЦ Гео) Московского энергетического института, Всесоюзного научно-исследовательского и проектно-конструкторского института атомного и энергетического машиностроения (ВНИИАМ) и других научных организаций был выполнен комплекс фундаментальных исследований в области геотермальной энергетики, включая:

- разработку ряда лабораторных и натуральных экспериментальных стендов, установок и приборов;

- проведение физико-химических исследований геотермального теплоносителя, течения многофазных и многокомпонентных сред, процессов и закономерностей эрозионно-коррозионного воздействия на металл геотермального энергетического оборудования;

- разработку технологии и уникального оборудования для геотермальных электростанций, работающих на пароводяном теплоносителе.

В результате сформировалась российская научная школа д.т.н. О.А. Поварова, были разработаны и созданы новые российские ГеоЭС на Камчатке и Курильских островах, за что в 2003 г. О.А. Поварову и коллективу учёных и специалистов была присуждена Госпремия РФ по науке и технике.

Силами ученых и инженеров АО “КТЗ”, АО “Наука”, НУЦ Гео МЭИ, ООО “Геотерм-ЭМ”, ВНИИАМ, ЭНИН и других российских организаций было разработано уникальное оборудование для Верхне-Мутновской ГеоЭС мощностью 12.0 МВт (пущена на Камчатке в эксплуатацию в 1999 г.), включая

¹⁶ Геотермальная энергетика: справочно-методическое издание / Г.В. Томаров, А.И. Никольский, В.Н. Семёнов, А.А. Шипков; под ред. П.П. Безруких. М.: Интехэнерго-Издат; Теплоэнергетик, 2015.

¹⁷ 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.

турбоагрегаты мощностью по 4.0 МВт с системой внутриканальной сепарации и регулирующей расход пара поворотной заслонкой типа “бабочка”; уникальные сепараторы, расширители и паросборники горизонтального типа с новым принципом гравитационного осаждения жидких частиц; воздухоохлаждаемые конденсаторы поверхностного типа. Этот опыт был использован при разработке и создании оборудования флагмана российской геотермальной электроэнергетики – Мутновской ГеоЭС мощностью 50 МВт, с двумя энергоблоками по 25 МВт каждый.

Учёные научной школы геотермальной электроэнергетики, созданной О.А. Поваровым (д.т.н. Г.В. Томаров, к.т.н. В.Н. Семёнов, к.т.н. А.А. Шипков, к.т.н. А.И. Никольский и другие специалисты, объединившиеся с 2007 г. в научно-технической компании ООО “Геотерм-М”), продолжили исследования в области геотермальных бинарных технологий с низкотемпературным рабочим телом. Они разработали и рассчитали параметры технологической схемы бинарного энергоблока мощностью 2.5 МВт для Паужетской ГеоЭС¹⁸.

При поддержке Министерства образования и науки РФ ООО “Геотерм-М” (директор – д.т.н. Г.В. Томаров) выполнило комплекс научных исследований в области оптимизации технологии и выбора низкотемпературного рабочего тела геотермальных бинарных энергоустановок¹⁹. Получены результаты исследований по повы-

шению эффективности использования тепла геотермального теплоносителя различного температурного уровня (70, 120 и 180 °С) на основе применения мультикаскадных геотермальных энергокомплексов²⁰, а также путём использования водородно-кислородных парогенераторов для перегрева пара вторичного вскипания²¹. Наряду с осуществлением научно-технического сопровождения ГеоЭС на Камчатке разработаны технические предложения и технико-экономические обоснования по модернизации действующих Верхне-Мутновской ГеоЭС и Мутновской ГеоЭС путём их расширения паровыми турбинами на паре вторичного вскипания и бинарными энергоблоками на основе утилизации сбросного геотермального теплоносителя без бурения дополнительных скважин²². Эти разработки должны лечь в основу дальнейшего развития отечественных технологий геотермальной электрогенерации.

В советское время ведущей научной школой геотермального теплоснабжения была дагестанская. В восьмидесятых годах прошлого века в НПО “Союзгеотерм” коллектив ученых и инженеров во главе с к.т.н. М.М. Алиевым создал геотермальные системы, в том числе с реинжекцией отработанного теплоносителя, использованием

¹⁸ Томаров Г.В., Шипков А.А. Мультикаскадные геотермальные бинарные энергокомплексы: утилизация среднетемпературного теплоносителя (120 °С) // Теплоэнергетика. 2022. № 5.

¹⁹ Томаров Г.В. Выбор оптимального рабочего тела для бинарных установок на предельно низкотемпературном теплоносителе / Г.В. Томаров, А.А. Шипков, Е.В. Сорокина // Теплоэнергетика. 2016. № 12.

²⁰ Томаров Г.В., Шипков А.А. Мультикаскадные геотермальные бинарные энергокомплексы: утилизация среднетемпературного теплоносителя (120 °С) // Теплоэнергетика. 2022. № 5; Томаров Г.В. Мультикаскадные геотермальные бинарные энергокомплексы: утилизация высокотемпературного теплоносителя (180 °С) / Г.В. Томаров, А.А. Шипков // Теплоэнергетика. 2022. № 4.

²¹ Томаров Г.В. Геотермальная комбинированная бинарная электростанция с системой перегрева пара вторичного вскипания: выбор оптимальных рабочих тел / Г.В. Томаров, А.А. Шипков // Теплоэнергетика. 2019. № 11.

²² Томаров Г.В. Геотермальные энерготехнологии России // Вестн. МЭИ. 2020. № 4.

геотермальной воды двух разных геологических пластов, тепловыми насосами²³. Результатом работы украинской научной школы под руководством д.т.н. Ю.П. Морозова было сооружение нескольких геотермальных систем теплоснабжения (ГСТ) в Крыму, в том числе с использованием отсепарированного из геотермальной воды метана для электрогенерации и пикового дровяного теплоносителя²⁴.

В постсоветское время дагестанскую научную геотермальную школу возглавил и продолжает более 40 лет ею руководить д.т.н., проф. А.Б. Алхасов в Институте проблем геотермии и возобновляемой энергетики (ИПГиВЭ) ОИВТ РАН. В монографиях²⁵ д.т.н. А.Б. Алхасовым изложены результаты многолетних геотермальных исследований, в том числе по теплогенерации. В 2021 г. по добыче геотермальной воды, установленной мощности ГСТ и реализации тепловой энергии Дагестан занимал второе место в РФ после Камчатки. Перспективы развития дагестанских ГСТ представлены в статьях²⁶, а результаты разработок ГСТ ИПГиВЭ

отмечены в сборнике докладов²⁷. Р.М. Алиевым исследуются вопросы технологии геотермального бурения²⁸. Подготовка бакалавров по геотермальной энергетике ведётся в Дагестанском госуниверситете, а ученых в аспирантуре ИПГиВЭ.

Научной геотермальной школой д.т.н., проф. О.А. Поварова с 2008 г. развивалось и геотермальное теплоснабжение²⁹. Для поселка Розового Краснодарского края д.т.н. Г.В. Томаровым совместно с д.т.н. В.А. Бутузовым (ООО "Энерготехнологии-Сервис") в 2012 г. была разработана и реализована первая очередь ГСТ расчётной тепловой мощностью 5 МВт³⁰, особенностью которой является строительство геотермального насосного модуля для стабилизации гидравлического режима работы скважины, геотермального центрального теплового пункта с гелиоустановкой для замещения скважины в межотопительный период³¹. Для пяти горо-

²³ 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.

²⁴ Бутузов В.А. Российская геотермальная энергетика: анализ столетнего развития научных и инженерных концепций // Окружающая среда и энергетика, 2019. № 3.

²⁵ Алхасов А.Б. Геотермальная энергетика: проблемы, ресурсы, технологии. М.: Физматлит, 2008; Алхасов А.Б. Освоение низкопотенциального геотермального тепла. М.: Физматлит, 2017.

²⁶ Алхасов А.Б. Перспективы освоения высокотемпературных высокоминерализованных ресурсов Тарумовского термального вод месторождения / А.Б. Алхасов, Д.А. Алхасова, А.Ш. Рамазанов, М.А. Каспарова // Теплоэнергетика. 2016. № 6; Алхасов А.Б. Комплексное использование низкопотенциальных термальных вод Юга России для тепло-водоснабжения и решения экологических проблем / А.Б. Алхасов, Д.А. Алхасова // Теплоэнергетика. 2019. № 5.

²⁷ Алхасов А.Б. Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал объединённого института высоких температур РАН. Материалы XII Школы молодых учёных им. Э.Э. Шпильрайна "Актуальные проблемы освоения возобновляемых энергоресурсов". Материалы VI Международной конференции "Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы". Вып. 8. Махачкала: Изд-во "АЛЕФ", 2020.

²⁸ Алиев Р.М. Технико-экономические особенности строительства геотермальных скважин / Р.М. Алиев, Г.Б. Бадавов, А.М. Байрамов / Geoenery. Чечня: Материалы международной конференции, 2015.

²⁹ Геотермальная энергетика: справочно-методическое издание / Г.В. Томаров, А.И. Никольский, В.Н. Семёнов, А.А. Шипков; под ред. П.П. Безруких. М.: Интехэнерго-Издат; Теплоэнергетик, 2015.

³⁰ Бутузов В.А. Геотермальное теплоснабжение в России / В.А. Бутузов, Р.А. Амерханов, О.В. Григораш // Теплоэнергетика. 2020. № 3.

³¹ Бутузов В.А. Геотермия Кубани, Ставрополя, Адыгеи и Карачаево-Черкессии // Энергия. 2021. № 3.

дов и населённых пунктов Краснодарского края были разработаны схемы перспективного геотермального теплоснабжения³².

ГСТ с реинжекцией обработанного геотермального теплоносителя расчётной мощностью 7.5 МВт в 2015 г. была разработана и построена на Ханкальском месторождении Чеченской Республики научным коллективом под руководством д.т.н. М.Ш. Минцаева, ныне ректора Грозненского нефтяного университета им. акад. М.Д. Миллионщикова³³. Особенности этого комплексного проекта – моделирование геотермального месторождения³⁴, дуплетное бурение двух скважин, в том числе наклонной для реинжекции, организация насосной и термосифонной циркуляции, геотермальная система отопления теплиц³⁵. Результаты анали-

за современного опыта создания российских ГСТ приведены в статьях³⁶.

Выводы

1. Геотермальная энергетика – один из развивающихся сегментов ВЭ России, имеющий более чем столетнюю историю. Современная разведанная ресурсная база страны позволяет в разы увеличить мощности ГеоЭС и ГТС. В России работает несколько научных школ по изучению геотермальных ресурсов. Ведущие – ИВиС ДВО РАН и ИПГиВЭ ОИВТ РАН. Моделирование разработки геотермальных месторождений реализовано при сооружении Ханкальской ГСТ.

2. Учёные научной школы геотермальной электроэнергетики, созданной д.т.н., проф. О.А. Поваровым в период разработки и сооружения российских геотермальных электростанций с 1996 по 2002 г. (Верхне-Мутновская ГеоЭС и Мутновская ГеоЭС), объединившиеся позднее в ООО “Геотерм-М” (директор – д.т.н., проф. Г.В. Томаров), продолжают выполнять исследования и разработки по совершенствованию действующих отечественных ГеоЭС и перспективных геотермальных энергоблоков с органическим циклом Ренкина.

3. В области геотермальной теплогенерации исследования ведутся в основном д.т.н. В.А. Бутузовым (ООО “Энерготехнологии-Сервис”) и д.т.н. А.Б. Алхасовым (ИПГиВЭ). Разработки поверхностных ГСТ выполняет д.т.н. Г.П. Васильев.

³² Геотермальная энергетика: справочно-методическое издание / Г.В. Томаров, А.И. Никольский, В.Н. Семёнов, А.А. Шипков; под ред. П.П. Безруких. М.: Интехэнерго-Издат; Теплоэнергетик, 2015.

³³ Минцаев М.Ш. Техничко-экономическое обоснование использования геотермальных ресурсов для отопления тепличных комплексов / М.Ш. Минцаев, Т.В. Якубов, М.А. Барзаева // Вестник газовой науки: науч.-техн. сб., 2021. № 4 (49).

³⁴ Черкасов С.В. Методологические основы создания и эксплуатации природно-техногенных систем геотермальной энергетике: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук по спец. 25.00.10. М.: ФГБУН “ГГМ им. В.И. Вернадского”, 2021; Минцаев М.Ш. Разработка ГИС-модуля для комплексного мониторинга геологической среды Ханкальского месторождения Чеченской Республики / М.Ш. Минцаев, Э.В. Эльсункаева // Мониторинг. Наука и технологии. 2021. № 3 (49).

³⁵ Минцаев М.Ш. Автоматизированная система управления Ханкальской геотермальной станцией с циркуляционной системой отбора глубинного тепла земли – образовательный аспект / М.Ш. Минцаев, З.Л. Хакимов, М.А. Лабазанов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион: сер.: “Технические науки”. 2022. № 11 (213).

³⁶ Бутузов В.А. Геотермальное теплоснабжение в России / В.А. Бутузов, Р.А. Амерханов, О.В. Григораш // Теплоэнергетика. 2020. № 3; Бутузов В.А. Геотермия Кубани, Ставрополя, Адыгеи и Карачаево-Черкессии // Энергия. 2021. № 3.