

На правах рукописи



Варламова Наталья Николаевна

**ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПАРЛИФТНОЙ
ДОБЫЧИ ФЛЮИДА С ДВУХФАЗНОЙ ТРАНСПОРТИРОВКОЙ
НА ГЕОТЕРМАЛЬНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ**

Специальность 2.8.6 – «Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Хабаровск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Хабаровском Федеральном исследовательском центре Дальневосточного отделения Российской академии наук (ХФИЦ ДВО РАН)

Научный руководитель: доктор технических наук, **Шулюпин Александр Николаевич**

Официальные оппоненты: **Пашкевич Роман Игнатьевич**, доктор технических наук, директор Федерального государственного бюджетного учреждения науки Научно-исследовательского геотехнологического центра Дальневосточного отделения Российской академии наук
Попов Владимир Иванович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения ФГБУН Федерального исследовательского центра «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук»

Ведущая организация: Институт проблем геотермии и возобновляемой энергетики – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук

Защита диссертации состоится 01 марта 2023 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.1.478.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук, по адресу: 680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, д. 51, конференц-зал. Тел./факс: +7(4212)32-79-27, e-mail: adm@igd.khv.ru

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук по адресу 680000, г. Хабаровск, ул. Тургенева, д. 51 и на сайте www.khfrс.ru

Автореферат разослан « _____ » _____ 202_ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук



С.И. Корнеева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Практическое использование альтернативных источников энергии в последние годы приобретает все большую значимость. Повышенное внимание к поиску экологичных решений для производства энергии в мире в целом, а также зависимость некоторых регионов от привозного топлива только повышают важность данного вопроса. Использование геотермальной энергии, которая считается возобновляемой и доступна круглосуточно, не зависит от погодных условий и от человека, а также не связана со сжиганием углеродного сырья, сопровождающемся выбросом углекислого газа в атмосферу, является одним из вариантов решения данной проблемы.

В начале нынешнего века масштабы освоения геотермальных ресурсов вышли за рамки дотационных проектов, все чаще работы стали осуществляться на коммерческой основе. В таких условиях особую актуальность приобретают вопросы эффективности применяемых технологий. При освоении высокопотенциальных геотермальных месторождений (месторождений парогидротерм) поднятый на поверхность теплоноситель обычно представляет собой смесь воды и пара, а подъем флюида в добычных скважинах осуществляется за счет парлифта – снижения плотности флюида при вскипании поступающих из пласта перегретых вод. В России разрабатываются четыре высокопотенциальных геотермальных месторождения – два на Камчатке, два на Курилах. Их разработка имеет важное региональное значение, а развитие Дальнего Востока России считается важным, стратегическим направлением. Все добычные скважины отечественных месторождений работают в режиме парлифта. Наиболее крупные отечественные месторождения парогидротерм (Мутновское и Паужетское) располагаются на Камчатке.

Как показывает опыт, не все скважины оказываются способными к работе в режиме парлифта. Неспособность к эксплуатации, как правило, связана с неустойчивостью течения в скважине, которая, кроме условий течения в самой скважине, зависит от реакции устьевого давления на изменение расхода, определяемой условиями транспортировки флюида от скважины. В последнее время при освоении высокопотенциальных геотермальных ресурсов широко используется двухфазная (пароводяная смесь) транспортировка флюидов. В частности, двухфазная транспортировка используется на Мутновском геотермальном месторождении (Камчатка), обеспечивающим выработку около 90% всей отечественной электроэнергии на геотермальных ресурсах. Сложная геометрия трасс обуславливает возможность возникновения неустойчивости течения не только в скважинах, но и в трубопроводах. Неустойчивость в трубопроводе, оказывая дестабилизирующий эффект на течение в скважине, может привести к выводу скважины из эксплуатации и требует отдельного изучения.

Основу работы составляют результаты исследований, полученные при непосредственном участии автора в 2018-2022 гг. в процессе выполнения плана научно-исследовательских работ Института горного дела ДВО РАН по теме «Развитие научных основ эффективных и экологически безопасных

инновационных технологий освоения месторождений полезных ископаемых Дальнего востока России» (ГР № АААА-А18-118020590026-4; ГР № 121121600317-5); плана научно-исследовательских работ Института горного дела ДВО РАН по теме «Развитие научных основ эффективных и экологически безопасных инновационных геотехнологий освоения полезных ископаемых Дальнего Востока России» (ГР № 122042900005-5); работ по грантам РФФИ № 19-15-50084 «Современные тенденции в освоении геотермальных ресурсов» и № 20-05-00161 А (АААА-А20-120030690002-1) «Гравитационная неустойчивость пароводяного течения при освоении геотермальных ресурсов», ряда хозяйственных договоров.

Цель диссертационной работы заключается в научном обосновании мер по повышению устойчивости режима парлифтной добычи геотермального флюида на основе создания условий, препятствующих развитию неустойчивости течения при двухфазной (пар и вода) транспортировке добытого теплоносителя от скважины к потребителю.

Идея диссертации основана на том, что создание благоприятных условий для течения в системе транспортировки двухфазного флюида от добычной скважины к потребителю будет способствовать повышению устойчивости режима парлифтной добычи флюида при разработке геотермального месторождения.

Для реализации идеи и достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

- провести анализ современного состояния отечественных и мировых тенденций в освоении геотермальных ресурсов;
- изучить механизмы, обеспечивающие устойчивую работу добычной скважины в режиме парлифта;
- установить влияние режима эксплуатации и геометрических характеристик трубопровода пароводяной смеси на устойчивость добычи геотермального флюида в режиме парлифта;
- обосновать практические рекомендации по созданию благоприятных условий для транспортировки пароводяной смеси, способствующих предотвращению развития неустойчивости режима парлифтной добычи геотермального флюида.

Методы исследований. Для достижения поставленной цели в диссертационной работе использован комплекс методов, включающий: анализ и обобщение данных по испытанию добычных скважин и эксплуатации наземных трубопроводов пароводяной смеси при разработке месторождений парогидротерм, теоретическое обоснование расчета гравитационной составляющей перепада давления в трубопроводе пароводяной смеси в условиях освоения геотермальных месторождений, математическое моделирование пароводяного течения в скважине и наземном трубопроводе, сопоставление расчетных и опытных данных по перепадам давления в действующем трубопроводе пароводяной смеси.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Подъемная способность парлифта существенно зависит от энтальпии флюида, например, для типовой скважины Паужетского месторождения

охлаждение пластового флюида на 1°С эквивалентно снижению пластового давления на 1 бар, поэтому планируя использование нагнетания для поддержания пластового давления необходимо учитывать риск снижения энтальпии флюида, что может привести к выходу добычных скважин из эксплуатации.

2. При проектировании трубопровода пароводяной смеси на геотермальных месторождениях следует избегать планирования участков восходящих потоков с большим углом наклона, а если наличие таких участков неизбежно, рационально иметь их в средней части трубопровода, при этом для условий, характерных для Мутновского месторождения, рекомендуется выбирать диаметр труб, обеспечивающий транспортировку смеси со скоростями выше 20,7 м/с.

3. С целью повышения устойчивости режима парлифтной добычи геотермального флюида необходимые для функционирования трубопровода пароводяной смеси местные сопротивления, особенно в случае подъема смеси вверх по рельефу, целесообразно размещать в начале трубопровода.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и практических рекомендаций обеспечивается необходимым объемом натуральных данных, корректным использованием законов механики и теоретических положений, использованием верифицированных математических моделей.

Научная новизна выполненных исследований заключается в следующем:

– установлена взаимосвязь давления и энтальпии флюида в питающем пласте с подъемной способностью парлифта и выявлены факторы, определяющие условия, при которых парлифт не сможет обеспечить подъем флюида в стволе добычной скважины;

– разработана процедура расчета истинного объемного паросодержания для определения плотности смеси при моделировании пароводяного течения в трубопроводах на геотермальных месторождениях, основанная на традиционной «модели дрейфа» для восходящих потоков, а для нисходящих потоков на ее модификации, определяющей скорость не газовой, а жидкой фазы;

– установлена возможность существования гравитационной неустойчивости пароводяного течения в условиях освоения геотермальных месторождений, в частности, для Мутновского месторождения возникновение неустойчивости характеризуется скоростями транспортировки менее 20,7 м/с.

– выявлены закономерности влияния рельефа трассы трубопровода и мест расположения на нем местных сопротивлений на устойчивость пароводяного течения при освоении геотермальных месторождений.

Личный вклад автора заключается в:

– проведении численных исследований по выявлению взаимосвязи давления и энтальпии флюида в питающем пласте с подъемной способностью парлифта и факторов, определяющих его предельные возможности;

– разработке процедуры расчета истинного объемного паросодержания для определения плотности смеси в гравитационной составляющей перепада давления при моделировании пароводяного течения в трубопроводах на геотермальных месторождениях;

– проведении тестовых испытаний разрабатываемых вариантов при создании новой математической модели пароводяного течения в наземных трубопроводах на геотермальных месторождениях, учитывающей гравитационную составляющую перепада давления;

– исследовании, на основе математического моделирования с использованием новой модели, влияния рельефа трассы трубопровода и мест расположения на нем местных сопротивлений на устойчивость пароводяного течения при освоении геотермальных месторождений;

– обосновании практических рекомендаций по созданию благоприятных условий для транспортировки пароводяной смеси, способствующих предотвращению развития неустойчивости режима парлифтной добычи геотермального флюида.

Практическая ценность проведенных исследований заключается в обосновании мер по созданию благоприятных условий для транспортировки пароводяной смеси, способствующих предотвращению развития неустойчивости режима парлифтной добычи геотермального флюида, при проектировании и эксплуатации трубопроводов, а также в содействии созданию новой математической модели пароводяного потока и ее компьютерной реализации, учитывающей новые вызовы при освоении высокопотенциальных геотермальных месторождений, предназначенной для замены ранее используемой в отечественной практике компьютерной программы MODEL.

Реализация работы. Результаты исследований представлены в отчетах по хоздоговорным НИР, выполненных по заказу АО «Геотерм» (в настоящее время, после реорганизации – Филиал ПАО «Камчатскэнерго» Возобновляемая энергетика), отчеты приняты заказчиком, полученные результаты учитываются при проектировании системы транспортировки добытого флюида на Мутновском геотермальном месторождении.

Апробация работы. Основные положения и результаты научно-квалификационной работы докладывались в 2018–2022 гг. на научных конференциях: VII Международная научная конференция «Проблемы комплексного освоения георесурсов» (Хабаровск, 2018 г.), Конкурс-конференция молодых ученых, аспирантов и специалистов Института горного дела ДВО РАН «Современные проблем освоения георесурсов» (Хабаровск, 2018 г.), XXI Краевой конкурс молодых ученых и аспирантов (Хабаровск, 2019 г.), XIII Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Проблемы недропользования» (г. Екатеринбург, г. Апатиты, г. Хабаровск (онлайн-конференция), 2019 г.), V Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления» (Хабаровск, 2019 г.), Конкурс-конференция молодых ученых и аспирантов ХФИЦ ДВО РАН (Хабаровск, 2019 г.), XXII Краевой конкурс молодых ученых и аспирантов (Хабаровск, 2020 г.), VIII Международная научная конференция «Проблемы комплексного освоения георесурсов» (Хабаровск, 2020 г.), XXIII Краевой конкурс молодых ученых и аспирантов (Хабаровск, 2021 г.), XV Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Проблемы недропользования» (г.

Екатеринбург, г. Апатиты, г. Хабаровск (онлайн-конференция), 2021 г.), расширенное заседание Ученого совета НИГТЦ ДВО РАН (Петропавловск-Камчатский, 2022 г.), расширенное заседание Научно-технического Совета ПАО «Камчатэнерго» Возобновляемая энергетика (Петропавловск-Камчатский, 2022 г.), семинар лаборатории тепломассопереноса Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (Петропавловск-Камчатский, 2022 г.), научная конференция молодых ученых и аспирантов «Актуальные проблемы освоения георесурсов» (Хабаровск, 2022 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 работ, в том числе 12 в научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования РФ, из которых 6 работ в научных изданиях, индексируемых в базах Scopus и Web of Science и 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Объем и структура работы. Диссертация включает в себя введение, 4 главы, заключение, список использованных источников из 120 наименований, 2 приложения, содержит 128 страниц текста, 37 рисунков и 5 таблиц.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю, д.т.н. А.Н. Шулюпину за всестороннюю помощь и моральную поддержку на всех этапах выполнения работы, А.А. Чермошнцевой за консультирование на протяжении всего выполнения работы, И.И. Черневу и А.А. Любину за содействие в проведении натурных исследований и получении натурных данных на Мутновском геотермальном месторождении, коллективу Института горного дела ДВО РАН за помощь и ценные советы при написании диссертационной работы, а также специалистам Филиала ПАО «Камчатскэнерго» Возобновляемая энергетика за содействие в предоставлении опытных данных и внедрении в производство полученных научных результатов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

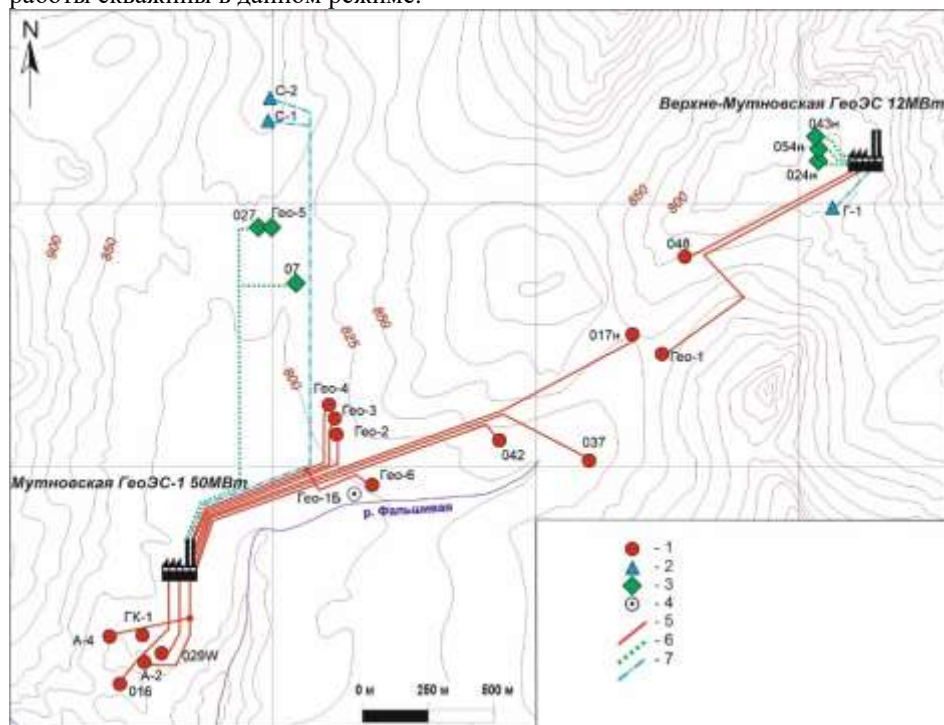
В первой главе приводится анализ современного состояния проблем освоения геотермальных ресурсов, выполнена оценка актуальности вопросов в области освоения геотермальных

В настоящее время геотермальные ресурсы используются более чем в 80 странах как непосредственный источник тепла в системах отопления, тепловых насосах, бальнеологических бассейнах и т.д. Производство электроэнергии на основе геотермальных ресурсов осуществляется более, чем в 20 странах. В будущем считается возможным данным способом производить около 8,3% общей мировой электроэнергии, что позволит обеспечивать потребность около 17% мирового населения.

Работу крупнейших объектов геотермальной энергетики на территории Российской Федерации обеспечивает Мутновское геотермальное месторождение (рис. 1), добычные скважины которого эксплуатируются в режиме парлифта, а теплоноситель от скважин транспортируется в виде пароводяной смеси.

Многолетний отечественный и мировой опыт разработки геотермальных месторождений с транспортировкой флюида в виде пароводяной смеси выявил ряд

проблем, универсального способа решения которых на сегодняшний день не существует. Практически каждая из них приводит к одному исходу – неустойчивость работы системы добычи и транспортировки геотермального флюида. Первой очевидной причиной неустойчивости является низкая скорость транспортировки флюида, обоснованная выбором слишком большого диаметра трубопровода. Другая причина заключается в том, что российские месторождения, выводящие на поверхность пароводяную смесь, а также большинство подобных месторождений в мире характеризуются низким пластовым давлением и статический уровень пластовых вод находится ниже устья. Подъем флюида в таком случае происходит с помощью парлифта. Опыт эксплуатации геотермальных месторождений говорит о наличии изменений условий в питающих пластах в процессе эксплуатации, которые приводят к невозможности работы скважины в данном режиме.



1 – добычная скважина; 2 – скважина водозабора; 3 – реинжеционная скважина; 4 – планируемая скважина; 5 – трубопровод пароводяной смеси; 6 – трубопровод реинжекции; 7 – трубопровод холодного водоснабжения.

Рис. 1 – Схема Мутновского месторождения, Камчатка

Новые представления о режиме работы добычной скважины на месторождениях парогидротерм свидетельствуют о том, что трубопровод является одним из факторов стабилизации ее режима работы. При спонтанном увеличении

расхода на устье, увеличивается перепад давления в трубопроводе, увеличивается устьевое давление, гасится развитие неустойчивости. При спонтанном снижении расхода на устье, снижается перепад давления в трубопроводе, снижается устьевое давление, вызывая компенсационное увеличение расхода.

В этой связи возникает необходимость обоснования мер по повышению устойчивости режима парлифтной добычи геотермального флюида на основе создания условий, препятствующих развитию неустойчивости течения при двухфазной (пар и вода) транспортировке добытого теплоносителя от скважины к потребителю.

Вторая глава посвящена определению условий устойчивого течения в скважине, а также оценке факторов, способных на него повлиять.

Для определения факторов, играющих дестабилизирующую роль в работе скважины, необходимо задаться условием ее устойчивой работы, которое, согласно современным исследованиям, выглядит как

$$\frac{\partial \Delta p_i}{\partial G} + \frac{\partial p_2}{\partial G} > 0, \quad (1)$$

где Δp_i – внутренний перепад давления (сумма перепадов давления на конвективное ускорение, трение и гравитацию); p_2 – внешнее давление на верхнее сечение элемента (давление на устье); G – массовый расход смеси.

Поскольку устьевое давление является суммой давления на выходе из трубопровода (в групповом станционном сепараторе) и перепада давления в наземном трубопроводе, принимая давление на выходе постоянным, не зависящим от расхода скважины, условие устойчивой работы скважины запишем в виде

$$\frac{\partial \Delta p_i}{\partial G} + \frac{\partial \Delta p_{lr}}{\partial G} > 0, \quad (2)$$

где Δp_{lr} – перепад давления в системе наземной транспортировки флюида.

При проведении ряда исследований были выявлены основные причины невозможности обеспечения парлифта: малое статическое пластовое давление; низкая проводимость пласта; неблагоприятные условия течения вниз по потоку от устья; несоответствующий (завышенный) внутренний диаметр обсадной колонны; технические дефекты при строительстве скважины, или возникшие в процессе ее эксплуатации или простаивания; неудачно выбранный способ и нерациональная процедура возбуждения.

В одном из исследований в качестве характеристики подъемной способности парлифта предлагается использовать предельное пластовое давление, соответствующее забойному давлению в точке экстремума на графике характеристики скважины.

Из проведенных в диссертации расчетов для скважин Паужетского и Мутновского месторождений следует, что использование нагнетаний отработанного флюида обратно в пласт и снижение внутреннего диаметра ствола скважины следует использовать в качестве способа обеспечения устойчивой работы скважины только как крайнюю меру, поскольку негативные последствия в виде снижения энтальпии добываемого флюида и снижения эффективности

парлифта с риском преждевременного самозадавливания добычных скважин будут существенно значимей положительного эффекта.

Согласно новым представлениям, трубопровод является фактором стабилизации режима работы скважины. Условие устойчивости для трубопровода можно представить в виде

$$\frac{\partial \Delta p}{\partial G} > 0, \quad (3)$$

где Δp – внутренний перепад давления в трубопроводе.

Левую часть данного условия далее определяем как индекс устойчивости.

В третьей главе представлены методы гидравлического расчета трубопроводов пароводяной смеси, а также предложена новая модель. Методика расчета геотермального трубопровода на сегодняшний день известна, однако задача выполнить конкретный расчет является довольно сложной ввиду зависимости расхода транспортируемой смеси от устьевого давления, выступающего в качестве неизвестного. Поэтому гидравлический расчет системы транспортировки пароводяной смеси сводится к двум задачам: расчету течения в традиционном смысле и нахождению решения для системы скважина – трубопровод. Также одним из главных вопросов является определение условий беспульсационной транспортировки теплоносителя. За основу решения второй задачи изначально было предложено взять метод последовательных приближений, который, как выяснилось в результате практического применения, имеет ограничения. Поэтому вместо него был предложен графический метод, который был модифицирован в метод использования обобщенной характеристики системы скважина – трубопровод.

Расчет первых трубопроводов, транспортирующих пароводяную смесь на Мутновском месторождении, был произведен с помощью программы MODEL по методу последовательного приближения (с последовательным уточнением расходных параметров). Математическая модель, лежащая в основе этой программы, не предполагает расчет гравитационной составляющей перепада давления, которая является принципиальной для встречающегося в практике типа неустойчивости. Кроме того, модель рассчитана на узкий диапазон скоростей, что не отвечает современным вызовам. С учетом этих факторов была разработана новая математическая модель (SWIP-S), устойчивость течения в которой определяется ранее упомянутым индексом устойчивости. Составляющая на гравитацию учитывается в соответствии с указанной формулой

$$dp_g = -\rho g \sin \theta dL, \quad (4)$$

где θ – угол наклона оси трубы относительно горизонтальной плоскости; g – модуль ускорения свободного падения; dL – длина элемента; ρ – плотность смеси, определяемая выражением

$$\rho = \rho_g \alpha + \rho_l (1 - \alpha), \quad (5)$$

где ρ_l – плотность воды; ρ_g – плотность пара; α – истинное объемное газосодержание (в рассматриваемом случае паросодержание – отношение объема пара к общему объему рассматриваемого элемента).

Ввиду отсутствия экспериментальных данных и обоснованных эмпирических формул для определения истинного объемного паросодержания в условиях транспортировки геотермального теплоносителя, важно выбрать прежде всего подход к его определению. Существует несколько подходов к определению истинного объемного паросодержания, в частности, и газосодержания, в общем. Наиболее теоретически корректным считается подход на основе модели дрейфа, согласно которому усредненная по сечению скорость газовой фазы определяется формулой

$$v_g = C_0 w + v_d, \quad (6)$$

где C_0 – параметр распределения; w – скорость смеси, соответствующая гомогенной модели; v_d – скорость дрейфа.

Скорость дрейфа характеризует действительную разность скоростей фаз, а параметр распределения учитывает неравномерность распределения фаз в неравномерном поле скоростей, которая в результате усреднения по сечению приводит к отличию скоростей фаз даже в случае равенства их действительных локальных значений. Истинное объемное паросодержание определяется через скорость пара известным выражением, вытекающим из дефиниций входящих в него величин,

$$\alpha = w_g / v_g, \quad (7)$$

где w_g – приведенная скорость пара, определяемая как отношение объемного расхода газа к общей площади сечения трубы; v_g – скорость пара.

Для полностью гомогенного потока (равенство не только скоростей фаз, но и отсутствие изменения параметров по сечению потока) параметр распределения равен 1. Отклонение от указанного значения в реальном потоке будет определяться отклонением от гомогенной модели. На неравномерность распределения фаз по сечению канала влияют несколько факторов. Во-первых, прямое действие гравитации, связанное с отклонением от вертикальной оси, стремящееся концентрировать более тяжелую фазу в нижней части сечения канала. Во-вторых, косвенное действие гравитации, связанное с отклонением от горизонтальной оси, вызывающее отличие скоростей фаз, в результате чего дискретные элементы, находясь в неравномерном поле несущей фазы испытывают неравномерное лобовое сопротивление, вызывающее смещение в сторону меньшей разности скоростей (например, в восходящем дисперсном потоке капли жидкости прижимаются к стенкам канала). В-третьих, гидродинамические силы, стремящиеся придать газовой фазе большую скорость за счет меньшей вязкости и инерции, что сопряжено с действием ранее упомянутого механизма. Таким образом, для параметра распределения в простейшем виде имеем

$$C_0 = 1 + k_1 \sin \theta + k_2 \cos \theta + k_3, \quad (8)$$

где k_1 , k_2 и k_3 – некие коэффициенты.

Скорость дрейфа определяется влиянием двух факторов: гравитация, стремящаяся придать жидкой фазе дополнительную скорость, относительно газа, по направлению вниз; гидродинамические силы, стремящиеся придать газовой фазе большую скорость за счет меньшей вязкости и инерции. Считая второй

фактор пропорциональным приведенной скорости смеси, для скорости дрейфа имеем

$$v_d = k_4 w + v_s \sin \theta, \quad (9)$$

где k_4 – некий коэффициент; v_s – скорость дрейфа, обусловленная гравитацией, для вертикального потока, м/с.

Подставляя (8) и (9) в (6), получаем

$$v_g = Cw + v_s \sin \theta, \quad (10)$$

где C – параметр структуры (расширенный за счет гидродинамической части скорости дрейфа параметр распределения).

Эта формула предполагает отрицательное значение скорости дрейфа в нисходящих потоках. Возникает возможность нереальных значений для скорости пара при малой приведенной скорости смеси. Чтобы исключить такую возможность, для нисходящих потоков предлагается использовать аналогичную формулу, но определяющую скорость воды

$$v_l = Kw - v_s \sin \theta, \quad (11)$$

где K – аналог параметра структуры, определяемый как

$$K = 1 + k_5(1 + \sin \theta + \cos \theta), \quad (12)$$

где k_5 – коэффициент структуры нисходящего потока.

Необходимые коэффициенты в формулах по модифицированной модели можно определять с учетом необходимости равенства результатов расчета по основной и модифицированной модели в случае горизонтального течения.

Экспериментальных данных для качественной верификации модели крайне мало. В то же время имеется богатый опыт применения программы MODEL по расчету трубопроводов на Мутновском и Паужетском месторождениях (Камчатка, Россия). Тот факт, что ни одной рекламации по поводу расхождения расчетных и практических данных не поступало, позволяет использовать программу MODEL, в типовых условиях ее применения, для верификации новой модели.

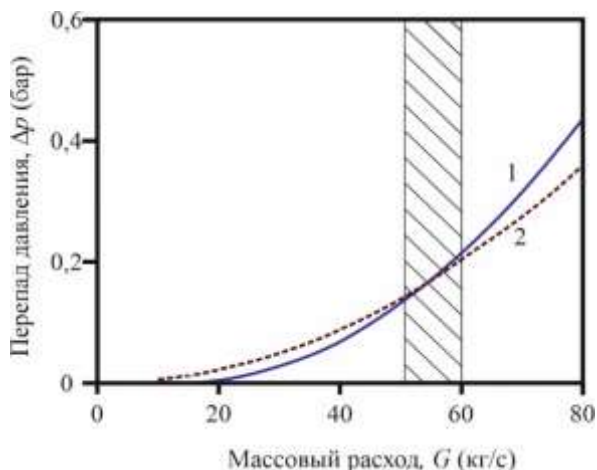
Программа MODEL предполагает расчет перепада давления по значению параметров в одной узловой точке и приемлема для коротких труб. Длинные трубы необходимо разбивать на короткие расчетные участки. Гидравлический расчет ориентирован на дисперсно-кольцевой режим течения. Для выбора диаметра трубопровода используется условие

$$D \leq 0,278 Q^{0,4}, \quad (13)$$

где Q – объемный расход смеси, м³/с.

Типовые условия практического использования программы MODEL: горизонтальная труба, внутренний диаметр 0,4 м, энтальпия смеси 1200 кДж/кг, давление на устье 7,5 бар, приведенная скорость 25–30 м/с (для указанных условий соответствует расходу 50–60 кг/с). Поскольку программа MODEL не учитывает гравитационную компоненту, а местные сопротивления определяются также как в новой модели, верификация осуществлялась для горизонтальной трубы без наличия местных сопротивлений. Длина трубы принималась 100 м. Расчетные

перепады давления представлены на рис. 2. В номинальном диапазоне расходов имеет место хорошее согласование.



1 – расчет по программе MODEL; 2 – расчет по предложенной модели.

Рис. 2 – Расчетные перепады давления

Для верификации новой модели в условиях наклонных труб использовались данные по трубопроводу от скважины Гео-1 на Мутновском месторождении. Этот трубопровод имеет самый большой перепад высот из действующих в настоящее время трубопроводов пароводяной смеси на Камчатке. Данные по трубопроводу: длина 1050 м, перепад высот от начала к концу 110 м, внутренний диаметр 0,406 м, суммарный коэффициент местных сопротивлений 8. Для верификации использовались данные, полученные на два момента времени: 16.09.2011 г. и 11.09.2019 г. Параметры на входе в трубопровод (устье скважины) и результаты расчетов приведены в табл. 1.

Табл. 1 – Параметры на входе в трубопровод (устье скважины) и результаты расчетов

Дата	Массовый расход, G , кг/с	Энтальпия, кДж/кг	Устьевое давление, p_2 , бар	Расчетный перепад давления, Δp , бар	Опытный перепад давления, Δp , бар
16.09.2011	65	1221	11,3	1,52	1,5
11.09.2019	65	1121	8,9	1,76	1,8

При расчете суммарного перепада давления трубопровод разбивался на 7 равных участков. Погрешность определения тестового перепада давления оценивается $\pm 0,2$ бар. Несмотря на введение в модель приблизительных значений

для некоторых коэффициентов, таблица показывает хорошее согласование расчетных и измеренных перепадов давления.

Таким образом, предложенная модель в типовых условиях транспортировки пароводяной геотермальной смеси хорошо согласуется с расчетом по программе MODEL, которая в указанных условиях хорошо согласуется с опытными данными. Для нетиповых условий (значительный угол наклона трубопровода, низкие скорости потока) предпочтительнее выглядит новая модель.

Четвертая глава посвящена исследованию влияния характеристик трубопроводов пароводяной смеси на устойчивость режима работы системы добычи и транспортировки геотермального флюида. Рассмотрены такие факторы, как наклон и диаметр трубопровода, рельеф трассы, местные сопротивления, а также на основании проведенных исследований даны рекомендации по расчету систем транспортировки пароводяной смеси и их проектированию с учетом обеспечения устойчивой эксплуатации.

Для характеристики устойчивости течения в предложенной модели рассчитывается индекс, находящийся в левой части условия (3).

$$a = \frac{\partial \Delta p}{\partial G}, \quad (14)$$

Отрицательное значение этого индекса указывает на наличие условий для развития гравитационной неустойчивости.

Исследование влияния наклона осуществлялось для типовых условий транспортировки пароводяной смеси на Мутновском месторождении. Результаты расчета для восходящего и нисходящего потоков представлены на рис. 3 и рис. 4. На рисунках видно, что неустойчивость имеет место не только в восходящих, но и в нисходящих потоках.

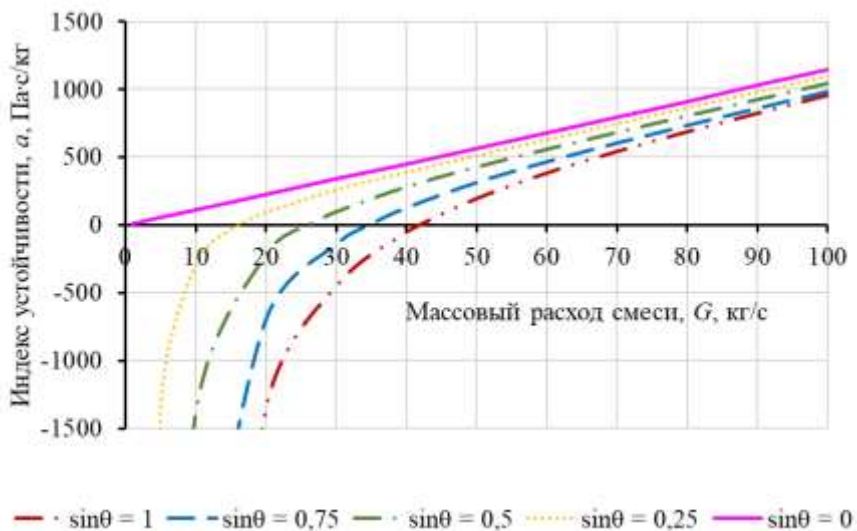


Рис. 3 – Индекс устойчивости для восходящего потока

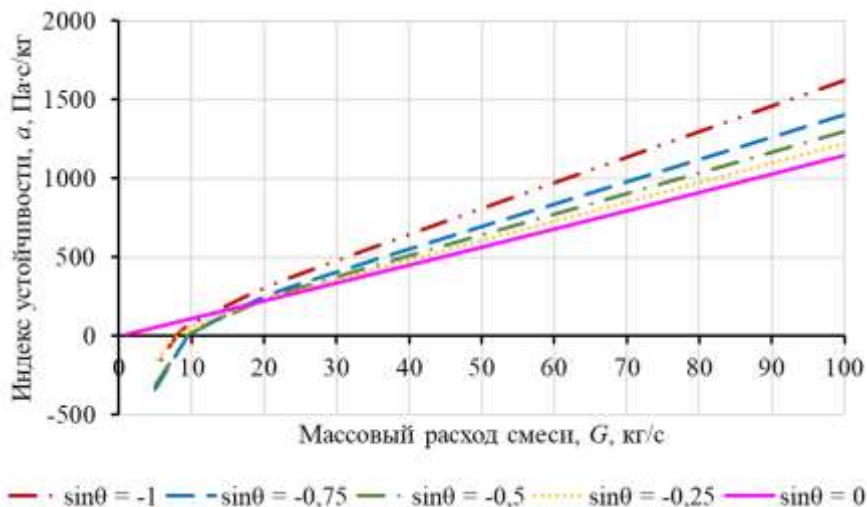
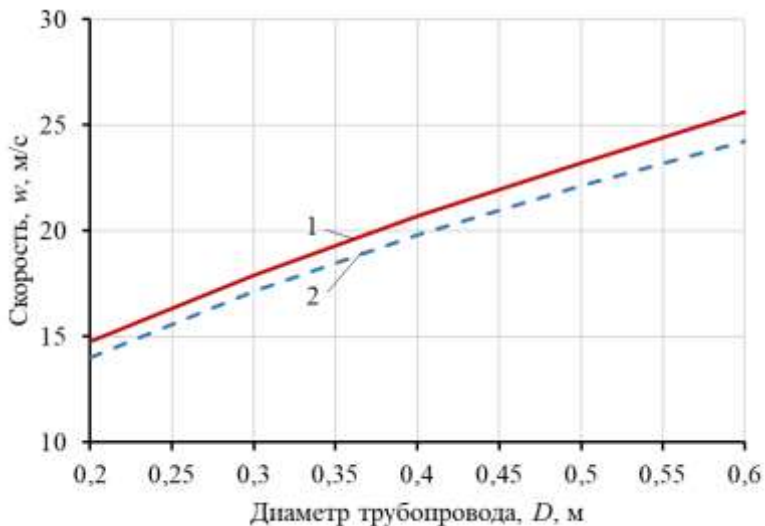


Рис. 4 – Индекс устойчивости для нисходящего потока

Диаметр трубопровода является ключевым параметром, от которого зависит устойчивости трубопровода заданных расходных параметрах пароводяной смеси. При проектировании трубопроводов необходимо осуществлять подбор диаметра труб с тем, чтобы скорости транспортировки обеспечивали устойчивость потока. Ранее, при использовании программы MODEL, диаметр труб выбирался в соответствии с жестким критерием (13), не зависящим от наклона труб. Как отмечалось, данный критерий согласуется в теоретическим индексом устойчивости для вертикального восходящего потока. Критерий (13) можно представить в виде

$$w > 31,4\sqrt{D}. \quad (15)$$

На рис. 5 представлена зависимость минимально допустимой приведенной скорости смеси от диаметра, определенная с помощью предложенной модели с использованием условия (3) для вертикального восходящего потока, а также расчет в соответствии с условием (15). Как видно на рисунке, с увеличением диаметра трубы необходимая для обеспечения устойчивости скорость потока возрастает. При этом наблюдаются незначительные расхождения графиков, соответствующих условиям (3) и (15).



1 – расчет по условию (3) с помощью предложенной модели для вертикального восходящего потока, 2 – расчет согласно (15)

Рис. 5 – Зависимость предельно допустимой скорости для обеспечения устойчивого течения от диаметра трубы

Применительно к реальным трубопроводам на перепад давления и индекс устойчивости может оказывать влияние особенность рельефа трассы. Например, из точки А в точку В, имеющую превышение H над точкой А, трасса может пройти по двум вариантам, как показано на рис. 6: сначала по наклонному, затем по горизонтальному участку (вариант 1, рис. 6); сначала по горизонтальному затем по наклонному участку (вариант 2, рис. 6). Кроме того, при одинаковой общей длине трубопровода (L) возможна различная протяженность наклонного (L_1) и горизонтального (L_2) участков.

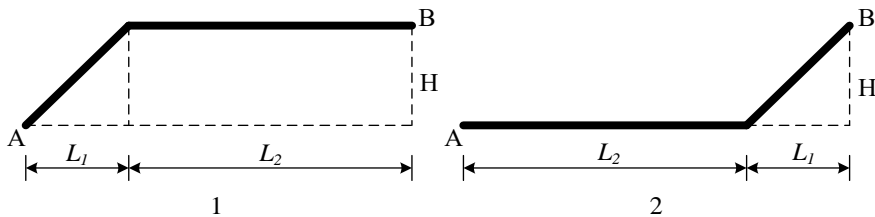


Рис. 6 – Варианты (1 и 2) рельефа трассы трубопровода от точки А до точки В, имеющей превышение H

Для рассматриваемого трубопровода с наличием вертикального участка общий индекс устойчивости становится отрицательным при расходах 17,54 и 17,63 кг/с для первого и второго вариантов, соответственно. То есть в первый вариант в отношении устойчивости выглядит предпочтительнее – в нем работа может быть устойчивой при расходах, менее 17,63 кг/с, когда во втором варианте будет иметь место неустойчивость. Следовательно, если наличие вертикальных участков при строительстве трубопроводов неизбежно, лучше их иметь в начале трубопровода. При этом следует иметь в виду, что, учитывая возможность развития неустойчивости в стволе скважины, благоприятные условия для которой необходимы прежде всего на устье, и непосредственно вблизи устья скважины, наличие таких участков следует избегать. Таким образом, наиболее рационально иметь крутые восходящие потоки не в конце и не в начале (близи устья) трубопроводов, а в их средней части.

Для исследования влияния местных сопротивлений на индекс устойчивости был выбран трубопровод с характеристиками, которые могут считаться типовыми для Мутновского месторождения. Протяженность трубопровода 1000 м с равномерным увеличением высотных отметок и общим перепадом высот 100 м. Учитывая, что для горизонтальных и нисходящих потоков проблема устойчивости не столь актуальна, для более наглядного примера был выбран трубопровод с восходящим потоком и перепадом высот, близким к максимально имеющему место на Мутновском месторождении.

При расчетах трубопровод был разбит на 4 равных участка по 250 м с перепадом высот по 25 м. Суммарный коэффициент местных сопротивлений был принят равным 10. Рассматривалось 4 варианта, с размещением всех местных сопротивлений на первом (от начала) втором, третьем и четвертом участках. Возможность устойчивой работы трубопровода оценивалась по значению суммарного индекса устойчивости. Результаты расчета приведены в табл. 2 и представлены в графическом виде на рис. 7. Номер графика на рис. 7 соответствует номеру участка расположения местных сопротивлений.

В качестве параметра, характеризующего устойчивость течения, принят индекс, определяемый по (14). Положительное значение данного индекса указывает на устойчивость течения, отрицательное – на неустойчивость.

Табл. 2 – Расчет параметров трубопровода при различном расположении местных сопротивлений

Вариант	Показатель	Участок 1	Участок 2	Участок 3	Участок 4	Суммарное значение
1	Коэффициент местных сопротивлений	10	0	0	0	10
	Перепад давления, (Δp , бар)	0,898	0,448	0,468	0,494	2,308
	Индекс устойчивости, (a , Па·с/кг)	3540,6	1311,7	1432,2	1581,6	7866,2

Продолжение табл. 2

Вариант	Показатель	Участок 1	Участок 2	Участок 3	Участок 4	Суммарное значение
2	Коэффициент местных сопротивлений	0	10	0	0	10
	Перепад давления, (Δp , бар)	0,418	0,952	0,469	0,495	2,334
	Индекс устойчивости, (a , Па·с/кг)	1118,7	3829,5	1439,0	1590,2	7977,4
3	Коэффициент местных сопротивлений	0	0	10	0	10
	Перепад давления, (Δp , бар)	0,418	0,431	1,017	0,497	2,362
	Индекс устойчивости, (a , Па·с/кг)	1118,7	1201,7	4176,9	1599,5	8096,8
4	Коэффициент местных сопротивлений	0	0	0	10	10
	Перепад давления, (Δp , бар)	0,418	0,431	0,446	1,098	2,393
	Индекс устойчивости, (a , Па·с/кг)	1118,7	1201,7	1299,6	4605,8	8225,8

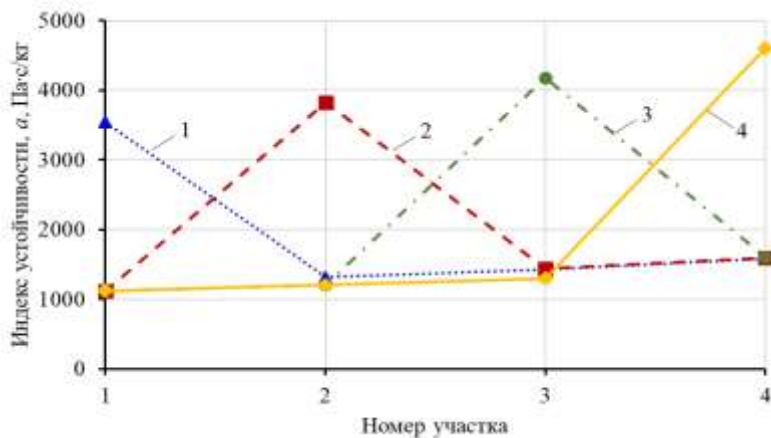


Рис. 7 – Зависимость индекса устойчивости по участкам от места расположения местных сопротивлений

Было выявлено незначительное (по абсолютным значениям) влияние расположения местных сопротивлений по трассе трубопровода на суммарный индекс устойчивости, при этом, чем ближе к устью скважины сосредоточены местные сопротивления, тем меньше значение индекса.

В то же время, максимальная его локальная величина будет именно на участке, где сосредоточены местные сопротивления. При возникновении неустойчивости в скважине, повышенная устойчивость именно на первом участке будет наилучшим образом способствовать подавлению ее развития. Следовательно, учитывая малое влияние места расположения местных сопротивлений на устойчивость течения в трубопроводе в целом, вариант расположения сопротивлений на первом участке для работы системы скважина – трубопровод представляется предпочтительным.

Кроме того, ещё один важный показатель для оценки устойчивой работы системы скважина-трубопровод – перепад давления. Снижение перепада давления в трубопроводе снижает устьевое давление в скважине, что способствует увеличению ее расхода и положительно влияет на устойчивость режима работы как скважины, так и трубопровода. Учитывая, что общий перепад давления на трубопроводе имеет наименьшую величину при расположении местных сопротивлений на первом участке, для рассмотренного случая подъема смеси вверх по рельефу такой вариант размещения местных сопротивлений выглядит предпочтительным.

Основываясь на полученных результатах и предполагая снижение расхода теплоносителя в процессе эксплуатации, в целях обеспечения устойчивости режима работы трубопроводов можно сформулировать следующие практические рекомендации:

1) при строительстве трубопроводов для транспортировки смеси целесообразно избегать наличия участков со значительными углами наклона восходящих потоков;

2) если наличие таких участков неизбежно, и имеется возможность выбрать места их расположения, то лучше размещать их в средней части трубопровода;

3) при гидравлическом расчете трубопровода участки со значительными углами наклона следует рассчитывать отдельно (расчет индекса устойчивости с введением общего, равномерного уклона для всего трубопровода может давать неверные результаты);

4) в случае высокого риска возникновения неустойчивости у устья скважины, например, при низких расходах геотермального флюида, рекомендовано располагать местные сопротивления в начале трассы;

5) для уменьшения перепада давления в трубопроводе, осуществляющем подъем смеси вверх по рельефу, что имело место в рассмотренном примере, рекомендуется также располагать местные сопротивления в начале трассы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей диссертационной работе научно обоснованы меры по повышению устойчивости режима парлифтной добычи геотермального флюида на основе создания условий, препятствующих развитию неустойчивости течения при двухфазной (пар и вода) транспортировке добытого теплоносителя от скважины к потребителю.

В результате проведенных работ можно выделить следующие основные выводы:

1. Современные тенденции в освоении геотермальных ресурсов указывают на повышение актуальности вопросов, связанных со снижением затрат и рисков при получении геотермальной энергии, в том числе при разработке представляющих наибольший практический и исследовательский интерес высокопотенциальных месторождений с эксплуатацией добычных скважин в режиме парлифта.

2. Подъемная способность парлифта существенно зависит от энтальпии флюида. Например, для типовой скважины Паужетского месторождения охлаждение пластового флюида на 1°C эквивалентно снижению пластового давления на 1 бар. С учетом этого, планируя использование нагнетания для поддержания пластового давления необходимо учитывать риск снижения энтальпии флюида, что может привести к выходу добычных скважин из эксплуатации.

3. Важным аспектом при разработке адекватной, отвечающей современным вызовам математической модели, предназначенной для расчета пароводяного течения в трубопроводах на геотермальных месторождениях, является учет гравитационной составляющей. Ранее в мировой практике при подобных расчетах составляющая перепада давления на гравитацию, определяемая плотностью смеси, зависящей от истинного объемного паросодержания, как правило, не учитывалась.

4. При определении истинного объемного паросодержания в математической модели пароводяного течения в трубопроводах на геотермальных месторождениях целесообразно использовать «модель дрейфа» для восходящих потоков, а для нисходящих потоков – ее модификацию, определяющую скорость не газовой, а жидкой фазы. При этом необходимые коэффициенты в формулах по модифицированной модели можно определять с учетом необходимости равенства результатов расчета по основной и модифицированной модели в случае горизонтального течения.

5. Планируя строительство трубопровода для транспортировки пароводяной смеси на геотермальных месторождениях следует избегать наличия участков восходящих потоков с большим углом наклона, а если наличие таких участков неизбежно, рационально иметь их в средней части трубопровода. При этом для условий, характерных для Мутновского геотермального месторождения, где схема двухфазной транспортировки реализуется как основная, рекомендуется выбирать диаметр труб, обеспечивающий транспортировку смеси со скоростями выше 20,7 м/с.

6. С целью повышения устойчивости режима парлифтной добычи геотермального флюида необходимые для функционирования трубопровода пароводяной смеси местные сопротивления, особенно в случае подъема смеси вверх по рельефу, целесообразно размещать в начале трубопровода.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Shulyupin A.N., Varlamova N.N. Transportation of steam-water mixture during development of steam-water fields // E3S Web of Conferences, «VII International Scientific Conference “Problems of Complex Development of Georesources». 2018. № 01008. 6 p.

2. Шулюпин А.Н., Чермошентцева А.А., Варламова Н.Н. Новые вызовы при освоении месторождений парогидротерм с транспортировкой пароводяной смеси // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 2. С. 43–49.

3. Shulyupin A.N., Chermoshentseva A.A., Varlamova N.N. Numerical study of the stability of the steam-water flow in pipelines of geothermal gathering system // CEUR Workshop Proceedings (Information Technologies and High-Performance Computing). 2019. № 2426. P. 103–109. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2426/paper15.pdf>.

4. Шулюпин А.Н., Варламова Н.Н. Современные тенденции в освоении геотермальных ресурсов // Георесурсы. 2020. Т. 22. № 4. С. 113–122.

5. Shulyupin A.A., Chermoshentseva A.A., Varlamova N.N. A new program for the hydraulic calculation of steam-water mixture pipelines in geothermal fields // E3S Web of Conferences, «8th International Scientific Conference "Problems of Complex Development of Georesources", PCDG 2020». 2020. № 04004. 7 p.

6. Шулюпин А.Н., Варламова Н.Н. Определение истинного объемного паросодержания при гидравлическом расчете трубопроводов пароводяной геотермальной смеси // Теплоэнергетика. 2021. № 5. С. 72–77.

7. Васянович Ю.А., Шулюпин А.Н., Варламова Н.Н. Оценка предельного пластового давления для парлифтной добычи флюида на Мутновском геотермальном месторождении // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. S30. С. 25–32.

8. Шулюпин А. Н., Чермошентцева А.А., Варламова Н.Н. Влияние геометрии трассы трубопровода на устойчивость пароводяного течения при эксплуатации ГеоЭС // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2020. Т. 32. № 3. С. 143–153.

9. Варламова Н.Н., Шулюпин А.Н. Влияние расположения местных сопротивлений на устойчивость транспортировки пароводяной смеси при освоении геотермальных ресурсов // Альтернативная энергетика и экология. 2021. № 25–27. С. 57–63.

Свидетельства на программы для ЭВМ:

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019612396. WELL-4z / Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А., Варламова Н.Н., рег. 19.02.2019.

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020660438. SWIP-S / Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А., Чернев И.И., Варламова Н.Н., рег. 03.09.2020.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022619598. SWIP-L / Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А., Чернев И.И., Варламова Н.Н.; рег. 24.05.2022.

Статьи в прочих изданиях:

13. Варламова Н.Н. Проблемы неустойчивой работы скважины при парлифтной добыче геотермального флюида // Проблемы недропользования. 2019. № 2 (21). С. 178–181.

14. Варламова Н.Н. Вопросы устойчивой работы системы добычи и транспортировки пароводяной смеси при освоении месторождений парогидротерм // Молодые ученые – Хабаровскому краю. Материалы XXI краевого конкурса молодых ученых и аспирантов. – Хабаровск, 2019. С. 50–55.

15. Варламова Н.Н. Исследование влияния наклона трубопровода на гравитационную устойчивость течения двухфазного геотермального флюида // Молодые ученые – Хабаровскому краю: материалы XXII краевого конкурса молодых ученых и аспирантов. – Хабаровск, 2020. С. 62–65.

16. Варламова Н. Н. Исследование влияния угла наклона трубопровода на устойчивость пароводяного течения при освоении геотермальных месторождений // Проблемы недропользования. 2021. № 1 (28). С. 57–62.

17. Shulyupin A.N., Chermoshentseva A.A., Varlamova N.N. Simulators for steam-water flow in geothermal wells and pipelines // Proceedings World Geothermal Congress 2020+1, Reykjavik, Iceland. 2021. № 33028. 4 p.