

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ОТДЕЛЕНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
ЭНЕРГИИ ИНСТИТУТА ПРОБЛЕМ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

На правах рукописи

Забарный Георгий Николаевич

МЕТОДЫ РАСЧЕТОВ ПРОЦЕССОВ ТЕШЛОПЕРЕНОСА
В СИСТЕМАХ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ГЕОТЕРМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ

Специальность: 05.14.08 – Преобразование возобновляемых
видов энергии и установки на их основе

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Киев – 1995

1. 311. 21
Диссертацией является ру
Работа выполнена в Инст
нальной Академии наук Украины
ститута "НИПИГеотерм".

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук, профессор
В. П. ЧЕРНЯК
- доктор геол. - мин. наук
В. Г. Осадчий
- доктор технических наук
И. В. Кавачков

Ведущая организация:

Открытое акционерное общество "Укранергопром".

11⁰⁰ Защита диссертации состоится "5" декабря 1995 г. в
часов на заседании специализированного ученого совета
Д. 01. 59. 01 в Отделении высокотемпературного преобразования энергии
Института проблем энергосбережения НАН Украины, по адресу:
252070, г. Киев-70, ул. Андреевская, 19, тел. 416-44-60.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Отделения вы-
сокотемпературного преобразования энергии Института проблем энер-
госбережения НАН Украины.

Автореферат разослан "3" ноября 1995 г.

Ученый секретарь
специализированного
ученого совета
кандидат технических наук

Т. В. СУРЖИК

716 33. 821
ЛНБ України ім. В. Стефаніка



00761607 (R)

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Изменившиеся в последнее время внешнеполитические и экономические условия поставили Украину перед необходимостью развития собственной энергетической базы, не связанной с внешними поставщиками энергоносителей. Составной частью этой базы может стать геотермальная теплоэлектроэнергетика, основой для развития которой являются имеющиеся на Украине ресурсы теплоэнергетических вод.

В настоящее время в соответствии с постановлением Кабинета Министров Украины N 7841/49 от 15.VI.1994 г. и Государственной энергетической программой начаты работы по промышленному освоению геотермальных ресурсов. При этом предполагается использовать экологически чистую интенсивную технологию извлечения природного теплоносителя, предусматривающую его возвратную закачку в пласт после отработки. Использование данной технологии позволит решить как проблему захоронения добываемого высокоминерализованного флюида, так и организовать восполнение упругой энергии пласта, запасов теплоносителя.

Безусловно, перспектива освоения геотермальной энергии зависит не от потребностей в тепле или электричестве в том или ином районе, а от наличия подготовленных для промышленного извлечения запасов теплоэнергетических вод. К сожалению, в настоящее время запасы теплоэнергетических теплоносителей на территории Украины изучены крайне слабо, что не позволяет в полной мере оценить возможные масштабы их использования. Более подготовленными для промышленной эксплуатации являются термальные воды с

температурой до 100°C . Их потенциальные эксплуатационные запасы до глубин 3500 метров разведаны и определены Комитетом по геологии и использованию недр Украины в количестве 27 303 тыс.м/сут, что позволяет обеспечить работу систем геотермального теплоснабжения суммарной мощностью 50 тыс.МВт. Указанные запасы подсчитаны по данным разведочного бурения в пределах территории Причерноморского (Одесская, Херсонская области, Республика Крым) и Закарпатского (Закарпатская область) артезианских бассейнов для условий фонтанной, насосной и циркуляционной технологий разработки.

Среди других регионов Украины, перспективных для добычи пригодных для теплоснабжения термальных вод, следует выделить Днепровско-Донецкую впадину (Черниговская, Полтавская, Харьковская, Донецкая области). Здесь при проходке нефтегазовых скважин глубиной до 4000 метров зафиксированы слабонапорные или безнапорные термоводоносные горизонты с температурами 80°C - 100°C и выше. Промышленная эксплуатация указанных горизонтов так же возможна с применением фонтанной, насосной и циркуляционной технологий.

Что же касается запасов, пригодных для выработки электроэнергии высокотемпературных теплоносителей, то их оценка в Украине практически не проведена. Вместе с тем, согласно полученным в результате опробования единичных скважин данным, геотермальные электроэнергетические установки могут быть построены в Закарпатской (площадь Залуж, на глубине 4200 метров зафиксирована температура 210°C), Харьковской (площади Изюм, Спиваковская, на глубине 3900 метров зафиксированы температуры 203°C и 198°C) областях и республике Крым (площади Тарханкутская и Керченская, на глубинах 4000 метров зафиксированы температуры свыше 200°C). Прогнозные оценки показывают, что на перечисленных площадях возможно строительство геотермальных электростанций суммарной установленной мощностью около 1000 МВт.

Освоение только упомянутых выше ресурсов термальных вод и парогидротерм позволит покрыть до 5% потребностей Украины в тепловой и электрической энергии, сократить импорт миллионов тонн органического топлива.

Для организации промышленного использования уже введенных запасов термальных вод необходимо наладить проектирование, строительство и эксплуатацию специальных геотермальных установок (см. рис. 1), состоящих из:

1. Системы добычных и поглощающих скважин, работающих в заданном режиме, обеспечивающей стабильную добычу природного теплоносителя из подземного проницаемого коллектора.

2. Наземного теплоиспользующего комплекса.

Если проектирование наземного теплоиспользующего комплекса геотермальных установок не имеет принципиальных трудностей и возможно на основе существующих методик расчетов тепломассообменных процессов, то проектирование систем извлечения геотермальной энергии (или систем разработки геотермальных месторождений) является новой технологической задачей, для решения которой необходимо создание соответствующих методов проектирования, основанных на расчетах процессов тепломассопереноса как в подземном проницаемом коллекторе, так и в самих геотермальных скважинах.

Цель и задачи исследования: Целью диссертационной работы являлись:

1. Теоретическое и экспериментальное изучение закономерностей тепломассообменных процессов, происходящих при движении теплоносителя в геотермальных коллекторах и скважинах, позволяющее построить пригодные для инженерных расчетов математические модели рассматриваемых процессов и определить выражения для межфазных потоков, замыкающие полученные модели.

2. Разработка на основе полученных математических моделей методов расчета технологических показателей установок для извлечения геотермальной энергии, использование которых даст возможность проводить вычисления без применения трудноопределяемых эмпирических коэффициентов.

3. Экспериментальная проверка созданных методов путем сравнения расчетных и измеренных на лабораторной модели коллектора и в действующих скважинах полей давлений и температур.

4. Экспериментальное определение необходимых для проектных расчетов коэффициентов теплоотдачи.

Достижение поставленной цели требовало решения следующих задач:

- разработать на основе теоретических исследований и экспериментального изучения закономерностей конвективного теплопереноса в гетерогенной проницаемой среде математическую модель процесса, обосновать пределы ее применения;

- получить пригодное для практики инженерных расчетов решение предложенной модели теплопереноса и дать рекомендации по использованию настоящего решения при расчетах технологических показателей геотермальных установок;

- экспериментально исследовать динамику изменения во времени и в пространстве температуры фильтрующейся жидкости и частиц пород, формирующих проницаемую среду. Провести сравнение полученных данных с результатами теоретических расчетов по предложенной методике;

- экспериментально определить необходимые для замыкания предложенной математической модели коэффициенты теплоотдачи для поверхности частиц гетерогенной среды;

- разработать на основе теоретических исследований и экспериментального изучения математическую модель течения теплоносителя в стволе геотермальной скважины, обосновать пределы ее применения;

- получить пригодное для инженерных расчетов решение предложенной математической модели течения в стволе геотермальной скважины и дать рекомендации по его применению в практике проектирования геотермальных установок;

- экспериментально исследовать динамику изменения глубины уровня парообразования в геотермальных скважинах в зависимости от температуры, давления и расхода теплоносителя на устье. Сравнить полученные данные с результатами теоретических расчетов по предложенной модели.

Методика исследований включала:

1. Анализ отечественной и зарубежной литературы по теме диссертации.

2. Теоретические работы, направленные на разработку и численное решение как существующих, так и вновь созданных математи-

ческих моделей тепломассопереноса в проницаемых средах, стволе геотермальных скважин.

3. Экспериментальные работы, направленные на изучение теплообмена при движении флюида в пористой среде и в вертикальных трубах.

4. Сравнительный анализ расчетных и фактических показателей систем извлечения для ряда геотермальных месторождений с целью оценки возможности использования предложенных методов в практике проектирования.

Экспериментальные исследования теплообмена при течении в гетерогенной проницаемой среде проводились на специально сконструированной и изготовленной лабораторной установке, которая отвечает основным требованиям физического моделирования и отражает условия фильтрации в подаваемых геотермальных коллекторах. Достоверность получаемой на этой установке информации подтверждалась данными тестовых испытаний и сравнением с аналогичными данными других исследователей.

Экспериментальные исследования процессов течения теплоносителя в стволе скважин выполнялись на действующих геотермальных скважинах Паужетского месторождения парогидротермы Камчатской области.

Научная новизна:

- Предложена подтвержденная экспериментальными данными новая математическая модель конвективного теплопереноса в слое шаров одинакового радиуса с регулярной укладкой, которая позволяет с единых позиций рассмотреть процессы, происходящие при движении жидкости в геотермальном коллекторе заданной структуры. В предложенной модели не содержится никаких сложноопределяемых эмпирических коэффициентов, затрудняющих ее широкое использование. В выведенных уравнениях фигурируют обычные теплофизические параметры и стандартно измеряемый коэффициент теплоотдачи. Полученная модель положена в основу новой методики расчета технологических параметров систем извлечения геотермальных установок.

- Теоретически доказано, что для большинства задач теплообмена в проницаемых породах, решаемых при проектировании систем извлечения геотермальной энергии, справедливо использование ли-

нейного закона фильтрации.

- Экспериментально изучена динамика изменения во времени и в пространстве температуры жидкости и частиц пористого коллектора регулярной структуры, в результате чего установлены основные закономерности изменения температурного поля, как в частицах, так и в жидкости, в зависимости от скорости фильтрации флюида и материала частиц.

- Экспериментально определены коэффициенты теплоотдачи для поверхности частиц геотермальной среды заданной структуры.

- На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований предложена новая методика расчета технологических параметров систем извлечения природного теплоносителя, позволяющая учесть при расчетах градиент температуры в частицах, на которых состоит подьемный коллектор.

- На основе существующих представлений сформулирована математическая модель вертикального двухфазного течения теплоносителя в стволе геотермальной скважины, учитывающая теплообмен между стволом скважины и окружающим ее горным массивом. Модель замкнута с помощью эмпирических зависимостей для истинного объемного паросодержания и касательных напряжений.

- Экспериментально изучен процесс течения теплоносителя в стволе геотермальной скважины, в результате чего установлен характер взаимосвязи между глубиной уровня парообразования и термогидродинамическими характеристиками потока на устье скважины.

- На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований предложена новая методика расчета термогидродинамических характеристик теплоносителя на устье геотермальной скважины, позволяющая учесть при расчетах теплообмен ствола скважины с окружающим горным массивом.

Практическая значимость. Предложенные в диссертационной работе методика расчета технологических параметров геотермальных установок, методика расчета термогидродинамических характеристик пароводяных скважин, а также данные экспериментальных исследова-

ний использованы при составлении проектов теплоэнергетических установок для Паратунского, Мутновского, Паужетского, Эссовского месторождений парогидротерм Камчатской области, Итурупского, Кунаширского месторождений Сахалинской области. Кроме того, перечисленные методики использованы при составлении технико-экономического обоснования перспектив использования геотермальных теплоэнергетических установок на территории Украины.

Достоверность научных положений и рекомендаций работы подтверждается сходимостью полученных результатов с данными экспериментальных исследований и данными, полученными при опытно-промышленных работах.

Автор защищает собранные в единый комплекс материалы научных исследований, которые могут быть использованы при создании техники и технологии геотермальной теплоэнергетики, а именно:

- математическую модель конвективного теплопереноса в коллекторе, сложенном частицами-шарами одинакового радиуса с заданной структурой;
- результаты теоретического исследования закономерностей неаотермической фильтрации в проницаемых средах;
- результаты экспериментальных исследований взаимовлияния гидродинамического и теплового поля при движении жидкости в коллекторе с заданной структурой;
- результаты экспериментального определения коэффициентов теплоотдачи от поверхности частиц проницаемого слоя к омывающей их жидкости;
- методику расчета технологических параметров систем интенсивного извлечения геотермального теплоносителя, используемого в теплоэнергетических установках;
- математическую модель двухфазного течения флюида в геотермальной скважине;
- результаты экспериментальных исследований закономерностей течения теплоносителя в стволе геотермальной скважины;
- методику расчета термогидродинамических характеристик потока на устье (забое) геотермальной скважины.

Апробация работы и публикация ее результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на конференциях и семинарах в Институте технической теплофизики НАН Украины (г. Киев, 1988 г.), Институте вулканологии ДВО АН России (г. Петропавловск-Камчатский, 1990 г.), Институте горного дела АН России (г. Хабаровск, 1992 г.), Институте "ВОДГЕО" (г. Москва, 1991 г.). По теме диссертации опубликована 31 печатная работа.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав и заключения, общим объемом 356 страниц машинописного текста, иллюстрирована 49 рисунками, содержит список использованной литературы из 137 названий.

Автор выражает благодарность за помощь и поддержку в проведении исследований доктору технических наук В. Я. Журавленко, кандидату технических наук А. В. Шурчкову, а также сотрудникам Камчатского комплексного отдела Института НИПИГеотерм Пашкевичу Р. И., Шулюпину А. Н., Кудряшову В. А.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность и целесообразность проведения исследований, направленных на создание методов расчета и проектирования геотермальных теплоэнергетических установок. Сформулированы цели и задачи исследований, научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе изложено современное состояние и перспективы освоения геотермальных ресурсов Украины. Показано, что в результате геолого-поисковых работ, проведенных на территории Украины, в ряде ее регионов с глубин до 4000 метров на поверхность могут быть выведены промышленно значимые запасы как низкопотенциальных гидротерм с температурами 60°C - 100°C, так и запасы высокопотенциальных парогидротерм с температурами свыше 100°C. Первоочередными для практического освоения признаны запасы геотермального флюида, обнаруженные в следующих районах:

1. Воляно-Подольский гидрогеотермический район. Термоводоносные горизонты выявлены в кембрийских, силурийских и девонских отложениях. Температура вод, выведенных с глубин до 3000 метров, достигает 80°C. Воды, в основном, слабонапорные, минерализация до 140 г/литр.

2. Днепровско-Донецкий гидрогеотермический район. Термальные воды выявлены в девонских и каменноугольных отложениях. Температура вод, выведенных с глубин около 4000 метров, превышает 100°C, воды напорные или слабонапорные, минерализация до 200 г/литр.

3. Причерноморский гидрогеотермический район. Термальные воды выявлены в осадочных отложениях кайнозойских, мезозойских и палеозойских пород. Температура вод, выведенных с глубин до 2500 метров, достигает 90°C и выше. Воды напорные или слабонапорные, минерализация до 10 г/литр.

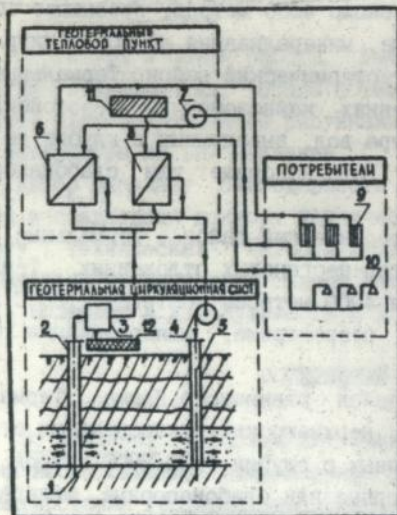
4. Закарпатский гидрогеотермический район. Термальные воды выявлены в трещиноватых палеоген-неогеновых отложениях. Температура вод, выведенных с глубин 4000 метров, достигает 130°C и выше. Воды слабонапорные или безнапорные, минерализация до 25 г/литр.

5. Гидрогеотермический район равнинного Крыма. Термальные воды выявлены в нижнемеловых, верхнекрских, палеоценовых отложениях. Температура вод, выведенных с глубин 1500-2000 метров, достигает 90°C и выше. Воды напорные или слабонапорные, минерализация до 30 г/литр.

Извлечение запасов геотермальных флюидов в вышеперечисленных районах планируется осуществить с помощью геотермальных тепловых установок, схема которых показана на рис. 1. Эффективность эксплуатации настоящих установок во многом зависит от стабильной работы системы добычи природного теплоносителя, состоящей из проницаемого теплосодержащего пласта и ряда вскрывающих его добычных и нагнетательных скважин. В этой связи при создании геотермальных тепловых установок одной из основных задач является проектирование системы добычи подаемого теплоносителя или, согласно существующей терминологии, проектирование системы разработки геотермального месторождения.

Под разработкой геотермального месторождения по аналогии с нефтяными и газовыми месторождениями понимается вывоз процесса движения к эксплуатационным скважинам теплоносителя, находящегося в продуктивном коллекторе, и управление его дальнейшим течением.

Схема установки геотермального теплоснабжения



- 1-проницаемый коллектор;
- 2-добычная скважина; 3-газо- и шламоотделитель;
- 4-нагнетательный насос;
- 5-нагнетательная скважина;
- 6-теплообменники отопительной системы; 7-сетевой насос;
- 8-теплообменники системы горячего водоснабжения;
- 9-отопительная система;
- 10-система горячего водоснабжения; 11-источник воды, пригодный по санитарным нормам для горячего водоснабжения; 12-система утилизации газов и шлама.

Рис. 1.

В настоящее время промышленная разработка геотермальных месторождений осуществляется двумя способами:

1. Самоналивом, за счет упругой энергии продуктивного коллектора и тепловой энергии выводимого теплоносителя (эффект термолифта).

2. С помощью методов интенсивного воздействия на пласт.

Технически более простым и, следовательно, наиболее распространенным является первый способ. Однако, он применим только

при разработке напорных термоводоносных горизонтов, имеющих достаточно высокое избыточное давление в пласте. Анализ гидрогеологических условий продуктивных геотермальных коллекторов Украины показал, что большинство этих коллекторов является либо слабонапорными, либо безнапорными. Поэтому для промышленной добычи геотермальных ресурсов Украины рекомендуется второй способ. Этот способ заключается в применении при добыче геотермального теплоносителя технических средств принудительного воздействия на продуктивный коллектор, таких, как погружные насосы, гаалифтные установки, системы возвратной закачки. В Украине опытная эксплуатация геотермального месторождения с применением методов интенсивного воздействия на пласт ведется на участке Янтарное, Новоселовской термоаномальной площади Республики Крым. Следует отметить, что предлагаемая к освоению интенсивная технология по сравнению с фонтанной технологией добычи позволяет:

1. Захоронять отработанные, содержащие вредные компоненты парогидротермы.
2. Поддерживать естественное пластовое давление и восполнять эксплуатационные запасы теплоносителя в разрабатываемом термоводоносном горизонте. Настоящее немаловажно, так как позволяет обеспечить охрану окружающей среды в районах эксплуатации геотермальных установок.

К сожалению, широкое практическое внедрение интенсивной технологии эксплуатации в настоящее время сдерживается уже на стадии проектирования, так как до сих пор не созданы надежные методы расчета динамики изменения в процессе добычи температуры, давления и расхода теплоносителя на устье действующих скважин, а также методы расчета динамики изменения во времени, температуры и давления в продуктивном пласте. Перечисленные параметры необходимы как для проектирования режимов работы наземного оборудования, так и для проектирования конструкции, схемы размещения, режимов эксплуатации и последовательности включения действующих скважин. Создание указанных методов расчетов и является предметом исследований настоящей диссертационной работы.

Во второй главе рассмотрены результаты теоретических и экс-

периментальных исследований процессов теплопереноса в геотермальных коллекторах, выполненных с целью создания инженерных методов расчета динамики изменения в процессе добычи пластовых температур и давлений. Показано, что в настоящее время моделирование процессов теплопереноса при фильтрации в геотермальных коллекторах осуществляется преимущественно на основе следующих двух подходов:

1. Концепции сплошной среды.
2. Структурного подхода.

При использовании первого подхода, реальная гетерогенная среда посредством процедуры осреднения сводится к совокупности взаимопроникающих сплошных сред. При этом изменяется масштаб описания системы от точечного к макроскопическому, что позволяет пользоваться при расчетах среднеобъемными величинами, измеряемыми существующими приборами. Концепция сплошной среды применительно к исследованию процессов тепломассопереноса в геотермальных коллекторах использовалась в работах О.А.Кремнева, А.В.Шурчкова, Ю.П.Морозова, Ю.Д.Дядькина, Э.И.Богуславского, Э.В.Чекалкина, В.Н.Николаевского, Р.И.Нигматулина, Ю.И.Лялько и других. Следует подчеркнуть, что имеющиеся математический аппарат и методы осреднения не позволяют пока с помощью концепции сплошных сред построить замкнутую математическую модель процесса. Поэтому в существующих работах замыкание выполняется в неявном виде с помощью привлечения дополнительных гипотез или соответствующих эмпирических коэффициентов. Последние являются весьма приближенными, так как при их определении практически невозможно выдержать условия подобия.

При использовании второго, то есть структурного подхода, построение математических моделей осуществляется заменой реальной гетерогенной среды какой-либо идеальной правильной структурой, состоящей из отдельных ячеек, и рассмотрение процесса в такой среде можно свести к задаче для одной ячейки. Причем для каждой из фаз такой ячейки решаются хорошо известные уравнения механики сплошных сред, а на границах фаз задаются условия сопряжения. Отметим, что структурный подход моделирования тепломассопереноса в геотермальных системах использован в исследованиях

Л. Г. Наказной, Е. С. Ромма, Р. И. Пашкевича, В. А. Кудряшова, Г. П. Иванцова, Е. Я. Любова и других.

Учитывая то, что, как показано в работах Э. А. Бабинца, Э. Э. Соболевского, Я. Н. Кашпура и Ю. С. Застежко, термальные воды на территории Украины мигрируют в осадочных, пористых коллекторах, сформировавшихся из частиц шаровидной формы, процесс теплопереноса схематизирован к процессу, происходящему в слое равновеликих шаров регулярной структуры с постоянными теплофизическими свойствами. Настоящая схематизация позволила при построении математической модели теплопереноса воспользоваться структурным подходом, сведя задачу неадиабатической фильтрации в геотермальном коллекторе к задаче для ячейки с единственной сферой. Тогда, для жидкости и шара в настоящей ячейке справедливы следующие классические уравнения теплопроводности:

$$c_x \left(\frac{\partial T_x}{\partial t} + \vec{v} \vec{\nabla} T_x \right) - \lambda_x \nabla^2 T_x = 0 \quad (1)$$

$$c_w \frac{\partial T_w}{\partial t} - \lambda_w \nabla^2 T_w = 0 \quad (2)$$

Наиболее точными и общими для настоящей задачи являются граничные условия IV рода:

$$\lambda_x \vec{\nabla} T_x \vec{n}_{x,w} = - \lambda_w \vec{\nabla} T_w \vec{n}_{w,x} \quad (3)$$

$$\vec{n}_{x,w} = - \vec{n}_{w,x} \quad (4)$$

$$T_x = T_w \quad (5)$$

где v - действительная скорость течения жидкости;

$\lambda_x; \lambda_w$ - коэффициенты теплопроводности жидкости и материала шара, соответственно;

$T_x; T_w$ - точечная (микроскопическая) температура жидкости и

шара;

$\vec{n}_{xw}, \vec{n}_{wy}$ - вектор внешней нормали к поверхности контакта жидкость-шар;

C_x, C_w - объемные теплоёмкости жидкости и материала шаров.

Непосредственное решение уравнений (1) - (5) весьма затруднительно, ввиду: 1. Отсутствия информации о профиле скорости движения жидкости. 2. Необходимости выполнения достаточно сложных расчетов, требующих огромного количества машинного времени.

Так как при расчетах технологических показателей системы извлечения геотермального флюида необходимо определить как в произвольно выбранном сечении, так и на выходе из слоя не точное (микроскопическое) значение температуры жидкости, а ее среднюю величину, пригодная для практического использования математическая модель получена путем осреднения существующими методами уравнения теплопроводности жидкости (1) по объему выбранной ячейки. В результате процедуры осреднения уравнения (1) с учетом уравнения (2) и граничных условий (3)-(5) получена следующая математическая модель течения теплоносителя в геотермальном коллекторе регулярной структуры:

$$\left. \begin{aligned} C_x n \frac{\partial \bar{T}_x}{\partial t} + C_x n v \frac{\partial \bar{T}_x}{\partial x} + \frac{4\lambda_w z_0^2}{\sqrt{V}} \iint_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\partial T_w}{\partial z} \sin \theta d\theta d\varphi = 0 \\ \lambda_w \iint_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\partial T_w}{\partial z} \sin \theta d\theta d\varphi = L^* S_{xw} (\bar{T}_{xw} - \bar{T}^s) \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} x = z_0(1+K) \\ K = 0, 1, \dots, n \\ z = z_0 \end{array} \quad (6)$$

$$\frac{\partial T_w}{\partial z} = 0; \quad z = z_0; \quad \varphi = \frac{\pi}{2}; \quad \theta = 0, \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

$$\frac{\partial T_w}{\partial \theta} = 0; \quad 0 < z < z_0; \quad \varphi = 0; \quad 0 < \theta < \frac{\pi}{2} \quad (9)$$

$$\frac{\partial T_w}{\partial \varphi} = 0; \quad 0 < z < z_0; \quad \theta = \frac{\pi}{2}; \quad 0 < \varphi < \pi \quad (10)$$

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} - a_w \left[\frac{1}{z^2} \frac{\partial}{\partial z} \left(z^2 \frac{\partial T_w}{\partial z} \right) + \frac{1}{z^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial T_w}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{z^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 T_w}{\partial \varphi^2} \right] = 0 \quad (11)$$

$$0 < z < z_0; \quad 0 < \varphi < \pi; \quad 0 < \theta < \frac{\pi}{2}$$

$$\bar{T}_r = \bar{T}_r(x; t) \quad (12)$$

$$T_w = T_w(\gamma, \theta, \varphi, x, t) \quad (13)$$

$$\bar{T}_w^s = \bar{T}_w^s(x, t) \quad (14)$$

$$\bar{T}_r = T_w = \bar{T}_w^s = T_{xH}; \quad t=0; \quad \forall x, \gamma, \theta, \varphi \quad (15)$$

$$\bar{T}_r = T_{xH}; \quad x=0; \quad \forall t \quad (16)$$

- где r - радиус шара-частички;
 S_{xw} - поверхность контакта жидкости с шаром внутри кубического объема;
 n - пористость;
 V - объем кубической ячейки;
 a_w - коэффициент температуропроводности материала шара;
 \bar{T}_w - средняя по поверхности контакта шар-жидкость температура шара;
 λ^* - эффективный коэффициент теплоотдачи, определяемый на опытной установке, моделирующей рассматриваемые условия теплообмена. Значок \forall означает "любой".

ЛНБ им. В. Стефанива
 АН України

При выводе модели (6) - (16) приняты следующие допущения:

1. Пренебрегается теплопроводностью в жидкости в направлении ее движения, а также теплопроводностью скелета породы вдоль направления фильтрации.

2. Положение центра объема осреднения выбирается таким образом, что выбранная ячейка включает каждый раз единственный шар, то есть $x = r_0 (1 + K)$, где $K = 0, 1, 2, \dots, n$.

Следует отметить, что в записанной модели изначально принята предпосылка о ламинарном характере течения теплоносителя в проницаемой среде. Однако, в реальных условиях под воздействием изменения температуры и, соответственно, теплофизических свойств флюида, закон течения может нарушаться. Причем, как показано С.Швецером, нарушение ламинарности течения происходит в основном за счет изменения вязкости флюида. Учитывая вышесказанное, для температурных условий геотермальных коллекторов Украины выполнено теоретическое исследование применимости ламинарного закона течения при математическом описании процессов теплопереноса. Это исследование заключалось в выводе путем осреднения по объему уравнения сохранения импульса установившегося потока сжимаемой ньютоновской жидкости, выражения для закона движения в проницаемой среде в явном виде учитывающего градиенты вязкости и температуры. Сравнение полученного выражения с известным уравнением Дарси показало, что в нем дополнительно присутствуют линейные и квадратичные члены по градиенту температуры. Степень влияния на скорость течения дополнительных членов определена с помощью анализа чисел вязкой неизотермичности потока. Расчеты этих чисел для диапазона изменения проницаемости коллектора от 30 мд до 100 мд, расстояния между нагнетательными и эксплуатационными скважинами от 100 до 1000 метров, разницы температур пласта и закачиваемой жидкости от 1°С до 100°С показали, что при математическом описании процессов теплопереноса, характерных для геотермических условий Украины, правомерно использовать линейный закон фильтрации.

Предложенная математическая модель (6)-(16) решена для случая одномерной фильтрации численными методами. Составленная про-

грамма позволяет рассчитать динамику изменения во времени: 1. Температурного поля в разрабатываемом геотермальном коллекторе. 2. Температуры теплоносителя на контуре отбора из добычных скважин. Кроме того, составленная программа позволяет рассчитать время эксплуатации добычных скважин в режиме постоянной температуры. Отметим, что динамика изменения температуры жидкости и пласта, а также момент времени начала охлаждения теплоносителя на контуре отбора являются, наряду с давлениями и расходами на устье действующих скважин, технологическими показателями системы извлечения. Расчеты этих показателей при составлении проекта геотермальной установки выполняются на базе исходных данных, определяемых при геологоразведочных работах. Опыт проектирования показывает, что часто при геологоразведочных работах измеряются не все требуемые для расчетов и проектирования исходные параметры. Такие важные параметры, как: коэффициент теплопроводности материала частиц пород, действительная скорость фильтрации флюида, размеры частиц измеряются весьма редко и выбираются интуитивно, исходя из имеющихся немногочисленных лабораторных измерений. В этой связи выполнена оценка влияния на результаты расчетов по предложенной программе отклонения вышеперечисленных исходных параметров. Эта оценка произведена путем вариантных расчетов для диапазона значений коэффициента теплопроводности пород от 4,1 Вт/м·град до 5,8 Вт/м·град, радиуса блоков-частиц от 1 м до 30 м, скорости фильтрации от 0,5 м/сут до 0,02 м/сут. Анализ расчетов показал, что время эксплуатации геотермальной теплоиспользующей установки в режиме постоянной температуры теплоносителя зависит от скорости фильтрации флюида и размера блоков или частиц пород. Следовательно, эти параметры должны выбираться для проектных расчетов как можно более точно, на основании результатов полевых измерений. Изменение же в указанном диапазоне теплопроводности пород не оказывает существенного влияния на результаты вычисления времени работы геотермальной установки в режиме постоянной температуры, и этот параметр может быть выбран на основании приближенных данных по существующим таблицам.

Процесс тепломассопереноса при движении жидкости в слое равновеликих шаров экспериментально исследован с помощью специ-

ально изготовленной лабораторной установки, блок-схема которой показана на рисунке 2.

Целью экспериментальных работ явилось: 1. Получить подтверждение достоверности расчетов, основанных на использовании разработанной математической модели(8)-(16). 2. Измерить значения используемых при вычислениях эффективных коэффициентов теплоотдачи.

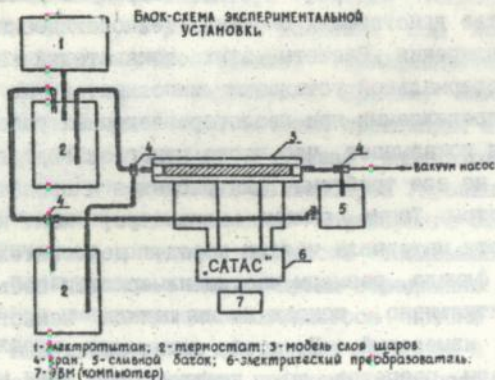


Рис. 2.

Сконструированная и изготовленная лабораторная установка представляла собой прямоугольный короб, в котором последовательно уложены имитирующие проницаемую пористую среду четвертинки шаров. Рабочая жидкость, двигаясь вдоль короба, омывала уложенные четвертинки шаров, охлаждая их. Происходящее при этом изменение температуры жидкости и четвертинок шаров фиксировалось с помощью датчиков-термопар, расположенных: как в жидкости (посередине между шарами и на поверхности шара), так и в четвертинках шаров (в центре, на половине радиуса и у поверхности шара). Выполнено 38 экспериментов, отличавшихся между собой скоростью течения жидкости (от 0,47 мм/сек до 7 мм/сек), и материалом, из которого изготовлены шары (туф, диорит, оргстекло). Для каждого эксперимента построены кривые изменения во времени температуры в жидкости и в разных точках четвертинок шаров. Аналогичные кривые построены

для условий каждого из опытов с использованием расчетных методов по предложенной модели. На рисунке 3 показано сравнение расчетных и экспериментальных кривых для нескольких опытов. Как видно из приведенных графиков, экспериментальные и расчетные данные имеют удовлетворительное совпадение, что подтверждает достоверность принятой концептуальной схемы и полученной математической модели. Отклонение расчетных и экспериментальных значений не превышает 10%.

СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО ИЗМЕРЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

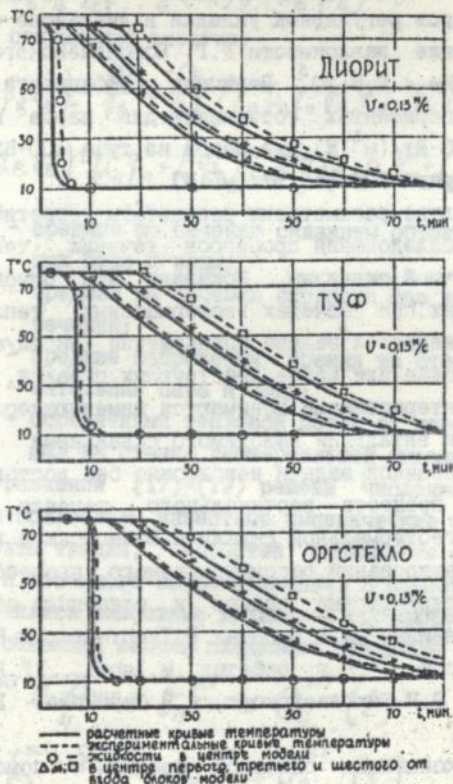


Рис. 3.

Используя созданную лабораторную установку, выполнено измерение средних по поверхности коэффициентов теплоотдачи для слоя шаров регулярной укладки в диапазоне изменения числа Рейнольдса $4 \cdot 10^2 < Re < 2 \cdot 10^5$. При обработке полученных экспериментальных данных и вычислении коэффициентов теплоотдачи использована известная методика, основанная на теории регулярного режима охлаждения. Выполнено сравнение измеренных в опытах величин коэффициента теплоотдачи с результатами вычислений по существующим критериальным зависимостям Р.Г. Богоявленского и А.Р. Чечёткина. Установлено, что для расчетов среднего по поверхности коэффициента теплоотдачи слоя шаров регулярной укладки в диапазоне $4 \cdot 10^2 < Re < 2 \cdot 10^3$ возможно применение зависимости Р.Г. Богоявленского, полученной им для $2 \cdot 10^4 < Re < 2,5 \cdot 10^5$. Величина коэффициента теплоотдачи, измеренная в экспериментах составляет: для шаров из оргстекла оргстекла 275-290 Вт/(м²·К), для шаров из туфа 400-650 Вт/(м²·К) для шаров из диорита 700-840 Вт/(м²·К).

В третьей главе рассмотрены результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов течения теплоносителя в стволе геотермальной скважины. Показано, что одной из важнейших задач, возникающих при расчетах геотермальных теплоэнергетических установок, является задача определения эксплуатационных характеристик на устье или забое действующих скважин. Под эксплуатационными характеристиками понимаются изменяющиеся во времени давление, расход и энтальпия выводимого скважинами теплоносителя.

Решение указанной задачи невозможно без достоверной математической модели процесса вертикального течения перегретого флюида в стволе геотермальной скважины. В настоящее время при математическом моделировании рассматриваемого процесса используется два подхода: структурный подход и концепция сплошной среды. Первый подход развивается в работах Н. Tachimori, А. Palacio-Perez, А.В. Штанина, второй - в работах М. Ishii, Р.И. Нигматулина, С.С. Кутателадзе, В.Н. Николаевского, А.В. Шурцова, В.А. Кудряшова, А.Н. Шульпина.

Используя концепцию сплошной среды, с помощью методов пространственного осреднения классических уравнений баланса импульса, массы, энергии получена следующая математическая модель

течения двухфазного теплоносителя в стволе геотермальной скважины, учитывающая теплообмен ствола скважины с окружающим горным массивом:

Уравнение сохранения массы (неразрывности)

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_n \rho_n + \alpha_B \rho_B) + \frac{\partial}{\partial z} (\alpha_n \rho_n v_n + \alpha_B \rho_B v_B) = 0 \quad (17)$$

Уравнение сохранения импульса (движения):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_n \rho_n v_n + \alpha_B \rho_B v_B) + \frac{\partial}{\partial z} (\alpha_n \rho_n v_n^2 + \alpha_B \rho_B v_B^2) + \frac{\partial P}{\partial z} + [\alpha_n \tilde{\tau}_n + \alpha_B \tilde{\tau}_B]_{ст} - g (\alpha_n \rho_n + \alpha_B \rho_B) = 0 \quad (18)$$

Уравнение сохранения энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_n \rho_n i_n + \alpha_B \rho_B i_B) - \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\alpha_n \rho_n i_n v_n + \alpha_B \rho_B i_B v_B) - \frac{\partial P}{\partial z} (\alpha_n v_n + \alpha_B v_B) - [\alpha_n q_n + \alpha_B q_B]_{ст} - g (\alpha_n \rho_n v_n + \alpha_B \rho_B v_B) = 0 \quad (19)$$

где α_n и α_B - средние по сечению скважины объемные концентрации пара и воды;

v_n и v_B - средние по сечению скорости фаз в направлении течения;

$\tilde{\tau}_n$ и $\tilde{\tau}_B$ - средние напряжения трения на стенке скважины;

i_n и i_B - энтальпии пара и воды;

q_n и q_B - осредненный тепловой поток от паровой и жидкой фаз на стенке геотермальной скважины.

Система уравнений (17)-(19) решена численными методами.

Для замыкания использованы известные эмпирические формулы вычисления коэффициента трения, скоростей скольжения фаз, касательных напряжений и объемного паросодержания. В качестве уравнений состояния применялись известные уравнения состояния для воды и пара. На устье скважины заданы следующие граничные условия:

$$Q_n^{уст} = \alpha_n \rho_n^{уст} \frac{\pi D_{уст}^2}{4} v_n^{уст} = Q_n^{уст}(t) \quad (20)$$

$$Q_B^{уст} = \alpha_B \rho_B^{уст} \frac{\pi D_{уст}^2}{4} v_B^{уст} = Q_B^{уст}(t) \quad (21)$$

$$\rho \Big|_{z=0} = \rho^{всг} = \text{const} \quad (22)$$

где D - диаметр скважины.

На стенке скважины задано условие равенства тепловых потоков от пара и жидкости к горному массиву:

$$\lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial z} = \alpha_n \lambda_n \frac{\partial \bar{T}_n}{\partial z} + \alpha_b \lambda_b \frac{\partial \bar{T}_b}{\partial z} \quad (23)$$

$$\bar{T}_n \Big|_{ct} = T_m \Big|_{ct}; \quad t > 0; \quad z = z_{св} \quad (24)$$

где T_n , T_b , T_m - температуры пара, жидкости и массива, осредненные по объёму. T_m определялась из решения следующей сопряженной задачи:

$$\frac{\partial T_m}{\partial t} = a_m \left(\frac{\partial^2 T_m}{\partial z^2} + \frac{1}{z} \frac{\partial T_m}{\partial z} + \frac{\partial^2 T_m}{\partial z^2} \right) \quad (25)$$

Условие на поверхности:

$$T_m = T_{пов}; \quad z = 0; \quad t > 0; \quad 0 < z < \infty \quad (26)$$

Условие на забое:

$$T_m = T_{пласт} = T_{пов} + \Gamma H; \quad t = 0; \quad 0 < z < \infty \quad (27)$$

Условие на бесконечно удаленной боковой границе массива пород:

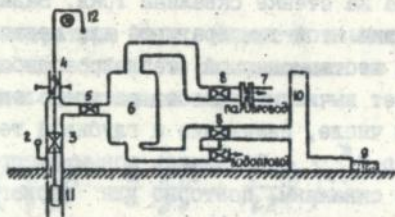
$$T_m = T_{пов} + \Gamma Z; \quad 0 < Z < H; \quad t > 0; \quad r \rightarrow \infty \quad (28)$$

Для реализации граничного условия на стенке скважины использован следующий прием: в момент времени t равный нулю, на стенке скважины задается распределение температуры по глубине, соответствующее невозмущенному тепловому полю массива непроницаемых пород и равное линейному геотермическому градиенту: $T_{скв} = T_0 + \Gamma Z$. На первом шаге по времени t выполняется численное интегрирование системы одномерных уравнений сохранения массы, движения и энергии для потоков флюида в стволе геотермальной скважины при значении теплового потока на стенке, соответствующем потоку тепла от невозмущенного теплового поля массива окружающих пород. Таким образом, в первом приближении определяется температура флюида, то есть температура на стенке скважины $T_{скв}$. Задаваясь в качестве граничного условия этой температурой для первого временного шага, решается задача нестационарной теплопроводности (25)-(28). Ее решение позволяет вычислить новое распределение температуры в массиве и, в том числе, изменение с глубиной температуры на стенке скважины $T_{пор} = T_{скв}^k$. Задаваясь новым распределением температуры по глубине скважины, повторно для первого (или любого последующего) временного шага решаются уравнения сохранения, но уже с новой величиной теплового потока (второе приближение). Описанная итерация на каждом временном шаге выполняется до тех пор, пока разница между расчетными значениями не достигнет заданной погрешности. После этого аналогичные вычисления выполняются на следующем временном шаге.

Достоверность предложенной математической модели и составленной на ее основе программы численных расчетов энтальпии и давления на устье или забое геотермальной скважины подтверждена путем сравнения результатов вычислений с данными, полученными при опытных работах на пароводяных скважинах Паужетского геотермального месторождения Камчатской области России. Эксперименты выполнялись на скважинах N 122, K-15, K-20. В качестве аппаратуры для исследований в стволе геотермальных скважин использована стандартная геофизическая станция АЗК-1500, дополнительно укомплектованная высокотемпературным кабелем и термометрами

ТС-300 (точность измерений $\pm 5^{\circ}\text{C}$). Давление на устье скважин измерялось манометрами типа МТ-160. Расход пара определялся с помощью стандартной диафрагмы, перепад давления на которой фиксировался с помощью V-образного ртутного дифманометра. Расход отсепарированной жидкости измерялся водосливным лотком. На рисунке 4 приведена схема расположения контрольно-измерительных приборов, задействованных в ходе экспериментов.

Схема оборудования скважин при экспериментальных работах.



- 1 Ствол скважины; 2 Манометр; 3 В. Задвижки;
4 Лубрикатор; II Скважинный прибор; 6 Сепаратор;
7 Диафрагма; 10 Глушитель; 9 Водосливной лоток;
12 Лебедка.

Рис. 4.

Методика проведения экспериментов принята следующей:

1. Остановка скважины с помощью устьевой задвижки.
2. Через верхнюю устьевую задвижку и лубрикатор 4 в скважину на геофизическом кабеле опускался зонд.
3. Закрывалась задвижка 5 и открывалась задвижка 3. Производился спуск зонда на геофизическом кабеле с помощью лебёдки 12 на забой скважины.
4. Скважина возбуждалась открытием задвижки 5. С помощью задвижек 8 регулировалась работа сепаратора в одном из заданных режимов.
5. После стабилизации всех устьевых параметров, считалось, что соблюдается заданный режим, и выполнялся подъем зонда до

уровня начала парообразования. При этом измерялось давление на устье, уровень воды в лотке 9, давление и перепад на диафрагме паропровода.

6. При достижении измерительным зондом уровня начала парообразования зонд опускался вниз. Задвижкой 8 регулировался следующий из запланированных режимов работы скважин. После стабилизации устьевых параметров начиналось новое измерение.

Систематизированные и обработанные экспериментальные данные в дальнейшем использовались для определения:

1. Фактической глубины уровня начала парообразования.

2. Энтальпии и массового расхода пароводяного потока, необходимых для теоретических расчетов глубины уровня начала парообразования по предложенной методике.

Фактическая глубина уровня начала парообразования определялась по реактому изгибу кривой резистивиметрии в скважине. Энтальпия пароводяного потока определялась на основании данных термометрии в непосредственной близости от уровня парообразования с использованием таблиц термодинамических свойств воды. Массовый расход теплоносителя рассчитывался по формуле:

$$Q = \frac{Q_{\text{в}}}{1 - x} \quad (29)$$

где Q - искомый расход пароводяной смеси;

$Q_{\text{в}}$ - расход воды после сепарации на водосливном лотке.

Учитывая то, что расход воды определялся путем замера на водосливном лотке при атмосферном давлении, массовое расходное паросодержание рассчитывалось по зависимости:

$$x = \frac{I - I_{\text{в}}}{r} \quad (30)$$

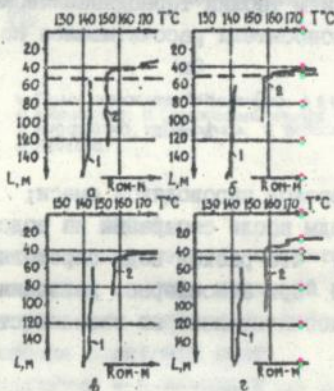
где I - энтальпия смеси, определяемая по термограмме;

$t_{ва}$ - энтальпия воды на линии насыщения при атмосферном давлении, определяемая по таблицам термодинамических свойств воды и водяного пара;

γ - теплота фазового перехода при атмосферном давлении, так же определяемая по таблицам термодинамических свойств воды и водяного пара.

Всего при экспериментальных исследованиях сделано 10 опытов: по четыре на скважинах К-15 и 122 и два на скважине К-20. На рисунке 5 показаны измеренные в опытах на скважине К-15 эпюры термометрии и резистивиметрии с указанием рассчитанного теоретически значения величины уровня парообразования.

Результаты термометрии и резистивиметрии по скважине К-15



1. Термометрия; 2. Резистивиметрия; а, б, в, г - первое, второе, третье и четвертое испытание соответственно.
 --- Расчетное значение величины уровня парообразования.

Рис. 5.

В таблице 1 приведены результаты расчетов и измерений в экспериментах глубины уровня парообразования в скважинах Паужетского месторождения парогидротерм.

Таблица 1.

Сравнение расчетной и измеренной при экспериментах величины глубины уровня начала парообразования

Номер скважины	Номер испытания	Глубина уровня начала парообразования, м		Относительная погрешность вычислений, %
		измерения	расчет	
К - 15	1	45	50	+ 11
	2	50	48	- 4
	3	49	51	+ 4
	4	36	47	- 31
К - 20	1	96	96	- 1
	2	109	127	+ 17
122	1	300	298	- 1
	2	290	287	- 1
	3	310	278	- 10
	4	300	268	- 11

Как видно из приведенной таблицы и рисунка 5, относительная погрешность расчетов уровня начала парообразования по предложенной методике не превышает 31%, что может служить подтверждением достоверности предложенной математической модели.

Путем вариантных расчетов исследовано влияние на точность

вычислений глубины уровня паробразования, изменения величины энтальпии теплоносителя и абсолютной шероховатости стенок скважин. Расчеты проводились для диапазона отклонения энтальпии от заданного значения на 21 кДж/кг. Абсолютная шероховатость стенок скважины изменялась от 0,1 мм до 2 мм. Результаты расчетов показали, что точность вычисления глубины уровня паробразования в геотермальной скважине существенно зависит от задаваемого на основании опытных измерений значения энтальпии теплоносителя и практически не зависит от значения абсолютной шероховатости обсадной колонны.

С помощью предложенной методики проанализирована интенсивность теплообменных процессов между скважиной и окружающим ее горным массивом. Установлено, что прогрев окружающих горных пород практически завершается при $Fo > 30 \cdot 10^5$; что для реальных конструкций геотермальных скважин соответствует 1,8 года. По окончании этого периода тепловой поток от скважины становится незначительным и не зависит от конструкции скважины, расхода и температуры теплоносителя.

В четвертой главе приведены результаты экономического анализа эффективности эксплуатации геотермальных установок, построенных для извлечения и использования ресурсов парогидротерм Украины и Камчатской области, Россия. Анализ выполнен с применением методик и программ расчетов, изложенных в диссертации. Сравнение расчетных технико-экономических показателей идентичных по теплопроизводительности геотермальных установок и установок, работающих на органическом топливе показало, что промышленное извлечение и использование для целей теплоснабжения геотермальных ресурсов Украины и Камчатской области залегающих на глубинах до 2500 метров экономически эффективно. Несмотря на то, что удельные приведенные затраты на создание геотермальных установок в 1,5 ... 2 раза превышают аналогичные затраты для топливных котелен, за счет более низкой себестоимости (себестоимость геотермальной теплоты в 2...3 раза ниже себестоимости теплоты, вырабатываемой топливными котельными) геотермальные установки имеют значительное экономическое

преимущество.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненных исследований позволили разработать методы расчета технологических показателей систем извлечения для геотермальных установок с возвратной закачкой отработанного теплоносителя. Основные выводы настоящей работы сводятся к следующему:

1. В области создания методов расчета тепломассопереноса в геотермальных коллекторах

1. Существующие в настоящее время два подхода моделирования тепломассопереноса в проницаемых средах (структурный и концепция сплошной среды) в равной степени имеют как свои недостатки, так и свою практическую ценность. В модели сплошной среды центральной остается проблема замыкания (модель замкнута только для квазистационарного случая) - общая проблема механики гетерогенных сред. Структурные же модели оказываются эффективными только в самых простых случаях. Использование их в практике инженерных расчетов требует значительных затрат машинного времени.

2. На основе структурного подхода методами объемного осреднения классических уравнений теплопроводности получена математически строгая постановка трехмерной нестационарной задачи теплопереноса в теплоизолированной гетерогенной среде, представляющей собой объем, заполненный шарами одинакового радиуса с регулярной кубической укладкой. В результате упрощения сформулированной задачи записана система уравнений, описывающая нестационарный теплоперенос при одновременной фильтрации в слое шаров одинакового радиуса с кубической укладкой без учета теплопроводности в жидкости и теплопроводности через контакты сфер.

3. Установлено, что для большинства задач теплообмена в проницаемых породах, решаемых при прогнозировании технологических показателей систем извлечения геотермального теплоносителя, справедливо допущение о постоянстве скорости фильтрации в породе и ламинарном характере течения флюида.

4. На основе разработанной математической модели предложено

на методика определения технологических показателей систем извлечения геотермальных установок. Используя данную методику, выполнен расчетный анализ влияния на технологические показатели систем извлечения коэффициента теплопроводности материала частиц пород, их размеров и действительной скорости фильтрации. В результате установлено, что действительная скорость фильтрации и размеры частиц пород существенно влияют на технологические показатели систем извлечения. Изменение теплопроводности материала частиц пород влияет на интенсивность теплообмена в системе жидкость-скелет породы, однако не оказывает влияния на время работы системы в режиме постоянной температуры.

Б. В результате экспериментального исследования динамики изменения во времени и в пространстве температуры жидкости, закачиваемой в слой частиц, имеющих отличную от жидкости температуру, установлено:

а) между гидродинамическими параметрами фильтрационного потока и температурным полем существует жесткая взаимосвязь, которая определяет необходимость совместного решения тепловой и гидродинамической задач.

б) характер изменения во времени температуры в частицах пород и в жидкости позволяет разделить процесс теплообмена между движущейся жидкостью и частицами на три периода: период отсутствия теплообмена, период интенсивного теплообмена и период слабого квазистационарного теплообмена.

в) среднеобъемная температура частиц, составляющих проницаемый слой, с момента начала охлаждения превышает температуру жидкости, что говорит о необходимости учета при математическом моделировании градиента температур в твердой фазе.

г) кривые изменения во времени температуры в жидкости и в твердой частице, полученные экспериментальным путем и в результате расчетов по предложенной математической модели, имеют удовлетворительное совпадение. Отклонение расчетных и опытных значений не превышает 10%, что позволяет рекомендовать предложенную математическую модель и составленную на её основе программу для расчетов технологических характеристик систем извлечения геотермальных установок.

6. Экспериментально определены значения коэффициентов теплоотдачи в слое шаров одинакового радиуса, регулярной укладки в диапазоне $4 \cdot 10^2 < Re < 2 \cdot 10^3$. Доказано, что полученная Р.Г.Вогояленским эмпирическая критериальная зависимость для определения коэффициентов теплоотдачи в слое шаров регулярной структуры пригодна для диапазона $4 \cdot 10^2 < Re < 2 \cdot 10^3$. Использование зависимости В.А.Чечеткина дает в указанном диапазоне ошибку в расчетах $\pm 60\%$.

II. В области создания методов расчета термогидродинамических характеристик пароводяных скважин

1. Установлено, что существующие представления о течении пароводяной смеси в вертикальных трубах могут быть приняты за основу при описании механизма работы геотермальных скважин в режиме парлифта.

2. На основе концепции сплошной среды и, используя классические уравнения, описывающие процессы тепломассопереноса, получена строгая математическая модель течения теплоносителя в стволе геотермальной скважины, записанная через микровеличины, и учитывающая теплообмен ствола скважины с окружающим ее горным массивом. Непосредственное использование для расчетов геотермальных установок полученной системы уравнений, описывающей процесс в локальных или микровеличинах, проблематично ввиду: а) трудностей записи начальных и граничных условий для локальных величин; б) невозможностью точно описать поведение межфазной границы (пар-вода) в реальном потоке, которое зависит от режима течения теплоносителя.

Для труб большого диаметра, каковыми являются геотермальные скважины, режимы течения мало исследованы. Но даже если бы были установлены закономерности поведения межфазных границ, численный расчет по предложенной модели был бы крайне технически сложен, потребовал бы мощной вычислительной техники и длительного времени счета. Полученная модель применена далее для вывода математической модели в среднеобъемных эффективных величинах, которые непосредственно измеряются существующими приборами.

3. Используя существующий математический аппарат, выполнено пространственное осреднение полученной для микровеличин математической модели. В результате записана постановка задачи течения

теплоносителя в стволе геотермальной скважины, в которой используются среднеобъемные величины. Задача замкнута с помощью известных эмпирических зависимостей для истинного объемного паросодержания и касательных напряжений.

4. Разработана методика определения термогидродинамических характеристик флюида на устье (забое) геотермальной скважины, учитывая теплообмен ствола скважины с окружающим горным массивом. Для проверки предложенной методики выполнено сравнение результатов вычислений с данными полевых измерений. Совпадение результатов удовлетворительное.

5. Установлено, что точность расчетов в первую очередь зависит от погрешности определения величины энтальпии, вкладываемой в расчет из опытов.

6. Оценка влияния шероховатости обсадных труб на результаты расчетов уровня парообразования показала, что при изменении шероховатости в 10 раз (от 0,1 до 1 мм) уровень начала парообразования изменяется в 1,33 раза.

7. Устойчивость численного расчета по составленной программе обеспечивается при шаге по глубине менее 1 метра. Рекомендуемый шаг разбивки по времени (в секундах) должен быть меньше 1000 шагов разбивки (в метрах) по координате Z, в противном случае возможна неустойчивость численного решения рассматриваемой задачи.

8. Установлено, что при расходе теплоносителя до 50 кг/сек и времени работы скважины более 1,8 года теплообмен между скважиной и окружающим массивом стабилизируется и практически перестает оказывать влияние на результаты расчетов.

III. Используя разработанные методики, рассчитаны технологические параметры систем извлечения для геотермальных установок, планируемых к строительству в равных гидрогеологических условиях. Используя эти параметры, определены ожидаемые технико-экономические характеристики геотермальных установок. Анализ этих характеристик показал целесообразность их строительства, а также их конкурентноспособность в сравнении с тепловыми установками, работающими на органическом топливе.

Результаты работы изложены в 31 публикации, из которых основными являются:

1. Шурчков А.В., Морозов Ю.П., Забарный Г.Н. "Исследование нестационарного теплопереноса при закачке теплоносителя в естественный пористый коллектор через систему правильно расположенных скважин". В сб. "Численные методы решения задач теплопереноса", ИТФ АН УССР, Киев, 1974 г., с. 19-20.

2. Забарный Г.Н., Кудряшев В.А., Гайдаров Г.М. "Математическая модель двухфазного течения теплоносителя в стволе геотермальной скважины", г.Петропавловск-Камчатский, 1992 г., 64 с.

3. Забарный Г.Н., Пашкевич Р.И. "Теоретическое исследование движения пароводяной смеси при неизотермической фильтрации в проницаемой среде". В сборнике "Геология и технология энергетических ресурсов Украины""Наукова думка", Киев, 1988 г., с. 33-45.

4. Забарный Г.Н., Шулюпин А.И., Гайдаров Г.М. "Определение фильтрационных параметров термоводоносных коллекторов по данным испытания пароводяных скважин".Препринт 89-1, г.Петропавловск-Камчатский, 1989 г., 59 с.

5. Забарный Г.Н., Гайдаров Г.М. "Роль геотермальной энергии в топливно-энергетическом комплексе Камчатской области".Препринт 89-2, Петропавловск-Камчатский, 1989 г., 153 с.

6. Забарный Г.Н., Кудряшев В.А., Гайдаров Г.М. "Механизм работы пароводяной скважины и методы его моделирования", г.Петропавловск-Камчатский, 1990 г., 49 с.

7. Забарный Г.Н., Бурганов А.В., Гайдаров Г.М. "Результаты поисковых работ на геотермальные ресурсы в г.Петропавловск-Камчатский", г.Петропавловск-Камчатский, 1990 г., 124 с.

8. Трусов В.П., Гайдаров Г.М., Забарный Г.Н. "Техника и технология геотермальной энергетики", г.Петропавловск-Камчатский, 1990 г., 139 с.

9. Забарный Г.Н., Гайдаров Г.М., Шунина Е.И. "Перспективы использования геотермальных ресурсов в топливно-энергетическом комплексе острова Парамушир (Сахалинская область)", г.Петропавловск-Камчатский, 1991 г., 80 с.

10. Шурчков А.В., Белодед В.Д., Забарный Г.Н., Гайдаров Г.М. "Возможности и перспективы геотермального теплоснабжения на территории Украины". г.Петропавловск-Камчатский, 1992 г., 53 с.

11. Забарный Г.Н., Пашкевич Р.И., Гайдаров Г.М. "Нестационар-

ный теплоперенос в слое шаров одинакового радиуса", г. Петропавловск-Камчатский, 1992 г., 44 с.

12. Забарный Г. Н., Пашкевич Р. И., Гайдаров Г. М. "Математические модели теплопереноса при фильтрации в теплоизолированных проницаемых средах", г. Петропавловск-Камчатский, 1992 г., 48 с.

13. Забарный Г. Н., Шунина Н. И., Гайдаров Г. М., Чалаев Д. Р. "Верхне-Паратунское месторождение термальных вод Камчатской области и его разработка", г. Петропавловск-Камчатский, 1992 г., 131 с.

14. Забарный Г. Н., Шурчков А. В., Ярис А. А., Горохов М. И., Магдалена Перес "Оценка эффективности комплексного использования геотермальной скважины N 1 месторождения Сан-Хасинто (Никарагуа)". Киев, 1994 г., 51 с.

Личный вклад. В трудах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежат: в [1 - 4], [6], [12] - постановка задачи, вывод основных соотношений и обобщение результатов. В [5], [7] - [11], [13], [14] - постановка задачи, основные идеи и обобщение результатов.



АНОТАЦІЯ

Забарний Г. М. Методи розрахунків процесів тепломасопереносу у системах видобування геотермальної енергії.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.14.08 - перетворення відновлюваних видів енергії і установки на їх основі. Відділення високотемпературного перетворення енергії Інституту проблем енергозбереження НАН України, Київ, 1995.

Захищається 31 наукова робота, в яких містяться результати наукових та експериментальних досліджень теплообміну під час руху теплоносія у геотермальному підземному пласті та геотермальній свердловині. Побудовані нові математичні моделі процесу теплопереносу у підземному колекторі та свердловині: з використанням цих моделей розроблено методику розрахунків технологічних показників геотермальних установок. Наведені результати експериментальних досліджень по визначенню емпіричних коефіцієнтів, необхідних для замкнення розроблених математичних моделей.

ANNOTATION

Zabarny G. N. The methods of calculation processes heat-mass transfer at the systems of extraction of geothermal energy.

Dissertation for seeking of doctor science degree on 05.14.08 - Transforming of renewable species of energy and installations on these base. Department of high-temperature transform energy of the Institute of Problems of Saving Energy of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 1995.

31 scientific works are submitted, which contain the results of scientific and experimental researches of heat transfer in geothermal stratum and wells. The creation of new mathematical models of heat transfer in geothermal stratum and wells. These mathematical models are used for creation of new calculation methods for technological indexes of geothermal plants. Conduct results of experimental researches and definition of empirical coefficients for bring up creation mathematical models.

Ключові слова: геотермальна установка, підземний колектор, геотермальна свердловина, математична модель, коефіцієнт тепловіддачі.

АННОТАЦИЯ

В работе описаны методы расчета тепловых потерь в системах теплообмена при передаче энергии от геотермальных источников к теплоносителю. Рассмотрены вопросы выбора оптимальных параметров теплообменника и теплоносителя. Приведены результаты расчетов для различных вариантов. Показано, что при оптимальном выборе параметров можно значительно снизить тепловые потери и повысить эффективность системы. Рассмотрены также вопросы выбора оптимальных параметров теплоносителя и теплообменника. Приведены результаты расчетов для различных вариантов. Показано, что при оптимальном выборе параметров можно значительно снизить тепловые потери и повысить эффективность системы.

ANNOTATION

Abstract: The methods of calculation of heat losses in the systems of extraction of geothermal energy. The choice of optimal parameters of the heat exchanger and the heat carrier is considered. The results of calculations for various options are given. It is shown that by optimal choice of parameters it is possible to significantly reduce heat losses and increase the efficiency of the system. The choice of optimal parameters of the heat carrier and the heat exchanger is also considered. The results of calculations for various options are given. It is shown that by optimal choice of parameters it is possible to significantly reduce heat losses and increase the efficiency of the system.

В работе описаны методы расчета тепловых потерь в системах теплообмена при передаче энергии от геотермальных источников к теплоносителю. Рассмотрены вопросы выбора оптимальных параметров теплообменника и теплоносителя. Приведены результаты расчетов для различных вариантов. Показано, что при оптимальном выборе параметров можно значительно снизить тепловые потери и повысить эффективность системы. Рассмотрены также вопросы выбора оптимальных параметров теплоносителя и теплообменника. Приведены результаты расчетов для различных вариантов. Показано, что при оптимальном выборе параметров можно значительно снизить тепловые потери и повысить эффективность системы.

Подписано к печати 28.10.1995 г. Формат 60x84/16
Бумага офсетная Усл.-печ. лист 2,0 Уч.-изд. лист 2,0
Тираж 100. Заказ 440.

Полиграф. уч-к Института электродинамики АН Украины,
252057, Киев-57, проспект Победы, 56.

447358

AB 33.521