

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕПЛОФИЗИКИ

На правах рукописи

ШУРЧКОВ Анатолий Васильевич

ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ  
СИСТЕМАХ И ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ

Специальность 05.14.04 - Промышленная теплоэнергетика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук

*Смирнов*

Киев 1995

Диссертация является рукописью  
Работа выполнена в Институте технической теплофизики  
Национальной Академии наук Украины

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук,  
член-корреспондент Академии  
естественных наук Российской  
федераций, профессор

БОГУСЛАВСКИЙ  
ЭМИЛЬ ИОСИФОВИЧ

Доктор технических наук,  
профессор

ДРАГАНОВ  
БОРИС ХАРЛАМПЬЕВИЧ

Доктор технических наук

НОСАЧ  
ВИЛЬЯМ ГРИГОРЬЕВИЧ

Ведущая организация: Институт проблем моделирования в энергетике  
НАН Украины

Защита диссертации состоится " 6 " 02 1996 г.  
в \_\_\_\_\_ часов на заседании специализированного ученого совета  
Д 50.04.02 в Институте технической теплофизики НАН Украины по  
адресу: 252057, г. Киев-57, ул. Желябова, 2-а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института  
технической теплофизики НАН Украины.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1995 г.

Ученый секретарь  
специализированного  
ученого совета  
доктор технических наук

*Урвад*

Ф.А.КРИВОШЕЙ

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00755358 (X)

3  
АВ - 33.837  
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Постоянно усиливающиеся кризисные явления в энергетическом комплексе Украины являются одним из главных факторов, создающих напряженность в сфере материального производства и социальной сфере. Эта напряженность обусловлена, с одной стороны, острой нехваткой топлива, а, с другой стороны, необходимостью принятия безотлагательных мер по защите окружающей среды от вредного воздействия топливно-энергетического комплекса.

Энергетика Украины в настоящее время базируется на использовании органического топлива и атомной энергии. Современная ресурсная база топливных и атомной отраслей не позволяет дальнейшего увеличения их мощности. В сложившихся условиях одним из эффективных путей преодоления кризиса в энергетике является вовлечение в топливно-энергетический баланс новых первичных источников энергии, не оказывающих вредного воздействия на окружающую среду. Такими энергоносителями могут быть нетрадиционные источники энергии - геотермальная, солнечная, ветровая и др.

На территории Украины весьма значительны возможности использования геотермальной энергии. Геотермальные месторождения, перспективные для освоения, известны в Закарпатской, Харьковской, Полтавской, Одесской, Львовской, Ивано-Франковской областях и в Крыму. Одной из основных причин медленного развития геотермальной энергетики является отсутствие эффективной технологии извлечения теплоты, аккумулированной глубинными слоями Земли. Анализ результатов проведенных исследований и современного состояния разработки геотермальных месторождений показывает, что перспективным направлением развития технологии извлечения глубинной теплоты Земли следует считать создание геотермальных циркуляционных систем.

Цель работы - разработка научных основ интенсивной технологии извлечения и использования геотермальной энергии, освоение технологии в промышленных условиях, апробация расчетных зависимостей и методов проектирования геотермальных установок на действующих объектах, оценка перспектив развития геотермальной энергетики Украины.

В соответствии с этими целями ставятся следующие задачи исследований:

ЛНБ им. В. Стефанька  
АН України

1. Аналитические исследования термогидродинамических процессов при движении теплоносителя в подземных проницаемых слоях, формулирование математических моделей этих процессов и получение зависимостей для расчета полей давлений и температур.

2. Экспериментальные исследования процессов теплопереноса на физических моделях подземных коллекторов и лабораторных моделях геотермальных циркуляционных систем, уточнение физических концепций и получение замыкающих соотношений для математических моделей, сравнение аналитических решений с экспериментальными данными.

3. Аналитическое исследование термогидродинамических процессов в геотермальных скважинах.

4. Термодинамический анализ процессов преобразования геотермальной энергии в работу или теплоту, оценка энергетической эффективности преобразователей, сравнительный анализ тепловых схем геотермальных установок.

5. Проведение исследований и испытаний на действующих геотермальных установках и апробация расчетных зависимостей и методов проектирования.

6. Разработка методических основ автоматизированного проектирования на персональных компьютерах геотермальных энергоустановок и систем разработки месторождений.

7. Оценка экономической эффективности использования геотермальной энергии и перспектив развития геотермальной энергетики Украины.

Научная новизна. Проблема извлечения и использования глубокой теплоты Земли складывается в новое самостоятельное научно-техническое направление современной энергетики. Научные и инженерно-технические проблемы и задачи этого направления находятся на стыке геологии, геотермии, гидрогеологии, теплофизики и теплоэнергетики – это комплексные проблемы.

На защиту выносятся следующие новые научные результаты:

– физические концепции и теория процессов теплопереноса при движении жидкости в подземных проницаемых слоях с учетом реальной структуры твердого скелета коллектора, размеров и формы твердых частиц; общие и частные математические модели термогидродинамических процессов в геотермальных циркуляционных системах;

- аналитические решения для расчета нестационарных температур частиц скелета проницаемого слоя, окружающего горного массива и движущейся жидкости в гранулярных коллекторах при жестком режиме фильтрации; аналитическое решение для расчета пароводяных скважин;

- результаты экспериментального изучения: 1/ процессов теплопереноса на физических моделях гранулярного и трещиноватого коллекторов; 2/ теплопереноса в циркуляционных системах с различными схемами расположения скважин на экспериментальной модели геотермальной системы; 3/ гидродинамических характеристик геотермальных циркуляционных систем на целевой модели;

- результаты термодинамического анализа процессов преобразования геотермальной энергии в работу и теплоту, теорию идеальных преобразователей, критерии эффективности реальных преобразователей на основе эксергетического метода, результаты сравнительной оценки энергетических показателей технологических схем геотермальных установок;

- результаты испытаний, проведенных на опытно-промышленных и промышленных установках и эксплуатируемых месторождениях; энергетические и экономические показатели геотермальных установок;

- методические основы автоматизированного проектирования геотермальных технологических комплексов с учетом совместной эксплуатации месторождения и энергоустановок.

#### Практическая ценность.

1. Освоена в промышленных условиях интенсивная экологически чистая технология использования геотермальной энергии путем создания циркуляционных систем, что позволяет осуществить крупномасштабное использование нового первичного источника энергии в топливно-энергетическом комплексе Украины.

2. Определены эффективные направления использования геотермальной энергии в различных отраслях экономики, разработаны методики расчета тепловых схем энергоустановок, их оптимизации и проектирования.

3. Выполнены разработки и промышленные испытания основного и вспомогательного оборудования геотермальных тепловых пунктов для систем теплоснабжения, разработаны рекомендации и регламенты по режимам их эксплуатации.

4. Создан компьютерный банк данных и экспертная система "Геотермальные ресурсы Украины" / первая версия /.

### Внедрение результатов исследований.

1. Разработаны и созданы в Крыму геотермальные циркуляционные системы для целей теплоснабжения суммарной мощностью 19 МВт.
2. Разработана и находится в стадии строительства установка геотермального теплоснабжения г. Закарпатской области.
3. Разработана и представлена в правительство программа "Экологически чистая геотермальная энергетика Украины".

Апробация работы и публикации. Результаты исследований и основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных симпозиумах, научных конференциях, семинарах более 20 раз. В материалах диссертации опубликовано 80 печатных работ.

### 1. Интенсивная технология извлечения геотермальной энергии

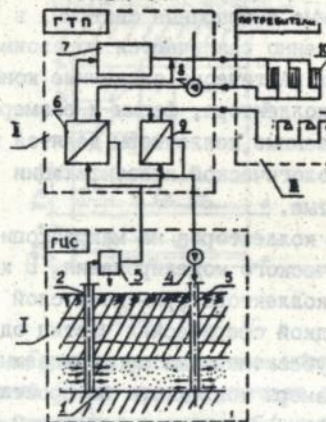
Главными недостатками применяемой фонтанной технологии являются малая тепловая производительность скважин, постепенное снижение дебита из-за падения пластового давления, необходимость захоронения охлажденного теплоносителя. Указанных недостатков не имеет циркуляционная технология извлечения теплоты глубинных слоев Земли. Для реализации этой технологии необходимо создавать геотермальные циркуляционные системы / ГЦС /. В ГЦС осуществляется принудительное движение теплоносителя в контуре: подъемные скважины-теплоиспользующая установка-нагнетательные скважины-подземный проницаемый слой / коллектор /. Закачка в коллектор охлажденного теплоносителя позволяет поддерживать постоянным пластовое давление и обеспечивает возможность регулирования дебита подъемных скважин. При эксплуатации ГЦС извлекается полностью не только теплота жидкого природного теплоносителя, а также частично и теплота, аккумулированная глубинными горными породами, и таким образом, реализуется интенсивная технология извлечения геотермальной энергии.

Технологическая схема энергоустановок с ГЦС состоит из двух частей: геотермального промысла и преобразователя геотермальной энергии / рис. 1 /. Это сложная многокомпонентная система.

В основе работы этой системы лежат процессы движения, теплообмена и термодинамические процессы изменения параметров состояния потока теплоносителя в подземном коллекторе, скважинах и

элементах преобразователя энергии или теплоиспользующей установки. Эффективность термогидродинамических процессов во всех указанных элементах определяет эффективность энергоустановки и ее экономические показатели.

Технологическая схема системы теплоснабжения с ГЦС



Г-геотермальный промысел /ГЦС/;  
П-геотермальный тепловой пункт;  
Ш-потребители теплоты.

1-подземный коллектор; 2-подъемная скважина; 3-газо-и шламоотделитель; 4-нагнетательный насос; 5-нагнетательная скважина; 6-теплообменники отопительной системы; 7-дискový котел; 8-сетевой насос; 9-теплообменник системы горячего водоснабжения.

Рис. 1.

Для разработки научных основ расчета, оптимизации и проектирования геотермальных установок необходимо провести детальное изучение термогидродинамических процессов в подземных проницаемых слоях, скважинах и процессов преобразования и использования геотермальной энергии на основе системного подхода с учетом совместного функционирования ГЦС и энергоустановок. Результаты исследований указанных процессов излагаются ниже.

## 2. Анализ параметров водонасыщенных подземных коллекторов и выбор их расчетных моделей

Геотермальные циркуляционные системы могут создаваться на базе природных или искусственно созданных подземных проницаемых слоев. В качестве природных коллекторов могут использоваться слои, заполненные термальной водой или паром, а также выработанные месторождения нефти и газа.

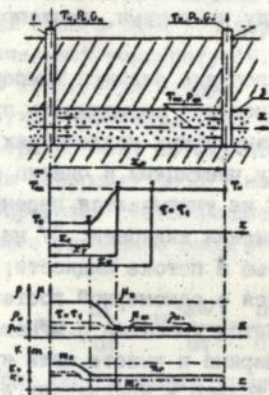
При создании ГЦС подземные коллекторы, по существу, выступают природными теплообменниками и изучение их под этим углом зрения

имеет ряд принципиальных особенностей. На первый план выдвигаются те свойства коллекторов, которые определяют механизм и интенсивность термогидродинамических процессов, структура сложения, размер и форма частиц твердого скелета, свойства частиц, мощность коллектора. Реальные подземные проницаемые слои представляют собой хаотически организованные многокомпонентные дисперсные системы, в которых отдельные макрочастицы существенно различаются по своим размерам, форме и свойствам и образуют хаотически сложенные конгломераты. В зависимости от структуры коллектора, формы и размеров частиц, составляющих твердый скелет, подземные коллекторы делятся на два типа: гранулярные и блочные. В геологической классификации им соответствуют пористые и трещиноватые.

Для описания структуры подземных коллекторов на макроскопическом уровне применим метод геометрического моделирования. В качестве идеальной модели гранулярного коллектора принимаем слой постоянной мощности с регулярной укладкой сферических частиц одного размера, рас оложенный между полубесконечными непроницаемыми массивами. Поперечные и продольные размеры коллектора по простиранию значительно превосходят его мощность. В качестве идеальной модели блочного коллектора принимается слой постоянной мощности, состоящий из прослоек горной породы одинаковой толщины и разделенных вертикальными щелевыми качалами одинакового раскрытия; сверху и снизу к слою примыкают непроницаемые массивы горных пород.

### 3. Основные физические концепции термогидродинамических процессов в подземных коллекторах

При закачке в подземный коллектор холодной жидкости в нем происходит постоянное изменение полей температуры и давления. В призабойной зоне нагнетательных скважин образуется охлажденная зона, размеры которой постоянно увеличиваются. В этой зоне происходит изменение фильтрационных свойств коллектора и свойств жидкости. По протяженности фильтрационного потока образуются четыре зоны с различными параметрами фильтрационного потока. Границы раздела зон можно интерпретировать следующим образом /рис.2/: 1 - гидравлический фронт /  $X_H$  /; 2 - температурный фронт /  $X_T$  /; 3 - фронт изменения структурных характеристик коллектора /  $X_K$  /.



- 1-нагнетательная галерея;  
2-подъемная галерея;  
3-коллектор.

Рис. 2.

Границы раздела зон постоянно перемещаются, при этом температурный фронт всегда отстает от гидродинамического. Между гидродинамическими параметрами фильтрационного потока и температурным полем в коллекторе существует жесткая взаимосвязь. И, следовательно, задача неизотермической фильтрации должна ставиться как совмещенная термогидродинамическая задача.

При выводе уравнений гидродинамики в подземных проницаемых слоях обычно рассматривают канальную модель коллектора и решают внутреннюю задачу; процесс теплопереноса при фильтрации следует рассматривать как внешнюю задачу, и модель обтекания ансамбля частиц представляется более естественной. При этом наиболее правильной является модель струйного обтекания.

Действительная скорость движения теплоносителя в ГЦС мала / не превышает 20...30 м/год / и значение числа Рейнольдса обычно меньше единицы /  $Re \leq 1,0$  /. В этих случаях для описания течения жидкости можно использовать теорию фильтрации, основанную на законе Дарси.

При движении жидкости в подземном коллекторе действуют следующие механизмы теплопереноса: конвекция / вынужденная и естественная / в потоке фильтрующейся жидкости, конвективный теплообмен на границах частица-жидкость и горный массив-жидкость, теплопро-

водность в объеме частиц, теплопроводность в полубесконечном горном массиве, контактный теплообмен между частицами, теплопроводность в потоке жидкости.

На основании результатов анализа порядка величин температурных градиентов и тепловых потоков установлена возможность принятия ряда упрощающих допущений: 1/ в гранулярных коллекторах не учитывается контактный теплообмен между частицами и частиц с горным массивом; 2/ в блочных коллекторах не учитывается перенос тепла теплопроводностью в направлении движения жидкости; 3/ не учитывается перенос тепла теплопроводностью в потоке жидкости; 4/ задача охлаждения горного массива решается в одномерной постановке; 5/ в коллекторах блочного типа принимается гипотеза о мгновенном выравнивании температуры жидкости по ширине и высоте щели и теплоприток от горного массива учитывается только в уравнениях для твердого скелета.

При выводе уравнения энергии для фильтрационного потока возникают методические трудности, связанные с разрывностью и неопределенностью полей температур в твердом скелете и жидкости, скорости и давления, а также с необходимостью представления поверхностных взаимодействий в форме массовых сил.

Твердый скелет коллектора можно представить в виде непрерывной во всем объеме периодической структуры, в которой положение центров сферических частиц является строго определенным / заданным /. В этом случае температурное поле скелета является детерминированным не только в центрах всех частиц, а также и в окрестностях этих центров / в объеме сфер радиусом  $R_{\text{ш}} = r_1 /$  /. При кубической укладке, например, частицы располагаются строгими рядами и нормирование протяженности коллектора размером частиц определяет нумерацию рядов. При этом нестационарное поле температур в частицах будет функцией радиуса  $\rho_{\text{ш}}$  и координаты / номера / ряда, в котором расположена частица. Фильтрующаяся жидкость занимает все свободное пространство между частицами. В сечениях между рядами частиц жидкую среду можно считать сплошной. Температура жидкости строго определяется только в этих сечениях, в других точках порового пространства рассчитать температуру жидкости практически не удается.

Примем допущение, что в сечениях между рядами частиц /  $X = nd$ , / происходит мгновенное выравнивание температур жид-

кости по мощности и ширине коллектора. Из этого следует, что все частицы одного ряда / поперечного / омываются жидкостью с одинаковой начальной температурой. Следовательно, в качестве расчетной ячейки коллектора следует выбирать элемент длиной, кратной диаметру частиц; например, один ряд частиц. На этом участке коллектора к фильтрационному потоку подводится некоторое количество теплоты, а поток совершает работу на преодоление сил трения.

Определив составляющие теплопритока к жидкости, получаем следующее уравнение энергии для горизонтального фильтрационного потока:

$$\text{mp}_x \left( \frac{dt_x}{dt} + W \frac{dw}{dt} \right) = \frac{\alpha}{d_r} (t_r - t_x) + \frac{\alpha}{h} (t_n - t_x) + \frac{\lambda_x}{d_r} \frac{\partial^2 t_x}{\partial x^2}$$

Если не учитывать изменение кинетической энергии потока, влияние изменения давления на энтальпию, а также перенос тепла теплопроводностью в жидкости, получаем следующее уравнение теплопереноса в гранулятном коллекторе:

$$\text{mp}_x c_x \frac{\partial t_x}{\partial t} = \frac{\alpha_r}{d_r} (t_r - t_x) + \frac{\alpha}{h} (t_n - t_x) - W \frac{\partial t_x}{\partial x}$$

Термогидродинамическая задача неизотермической фильтрации в коллекторах блочного типа представляет собой внутреннюю тепловую и гидродинамическую задачу при движении жидкости в целевом канале и уравнение теплопереноса записывается в следующей форме:

$$c_x \frac{\partial t_x}{\partial t} = \lambda_r \frac{\partial^2 t_r}{\partial y^2} - W \frac{\partial t_x}{\partial x}$$

Таким образом, при постановке задачи неизотермической фильтрации в подземном коллекторе принимаются следующие предпосылки:

1. Гидродинамическая задача ставится как плановая / одномерная по оси X или двумерная по осям X и Y / фильтрация несжимаемой жидкости в горизонтальном пласте с переменной / во времени и по протяженности пласта / гидропроводностью.
2. Теплоперенос в подстилающем и покрывающем горных массивах рассматривается как одномерная задача теплопроводности / по оси z /.
3. Процесс охлаждения твердого скелета рассматривается как внутренняя задача нестационарной теплопроводности в каждой отдельной частице при обтекании ее жидкостью.
4. Теплоперенос фильтрационным потоком рассматривается как внешняя задача конвективного теплообмена при обтекании теплоноси-

телем частиц твердого скелета, а также подстилающего и покрывающего горных массивов.

#### 4. Основы теории термгидродинамических процессов в геотермальных циркуляционных системах

Математическая модель термгидродинамических процессов в ГЦС, описывающая нестационарные поля температур, давлений, скоростей и свойств теплоносителя, представляет собой совокупность уравнений:

$$\frac{\partial(\rho m)}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x} \left( -\frac{\rho K}{\mu(t_x)} \frac{\partial P}{\partial x} \right) = 0$$

$$m c_x \frac{\partial t_x}{\partial \tau} + c_x W_0 \frac{\partial t_x}{\partial x} = -\lambda_1 F_1 \frac{\partial t_r}{\partial y} \Big|_{y=r}$$

$$\frac{\partial t_r}{\partial \tau} = a_r \left( \frac{\partial^2 t_r}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t_r}{\partial x^2} \right)$$

$$W = -\frac{K}{\mu(t_x)} \frac{\partial P}{\partial x}$$

$$\mu = \frac{\mu_0}{1 + a_\mu t_x}; \quad \rho = \rho_0 [1 + \beta_x (P - P_0)]$$

$$m = m_0 + \beta_{ix} (P - P_0)$$

$$\tau = 0: t_x = t_r = t_n; \quad P(x, \tau) = P_{\text{нав}}$$

$$\tau > 0: \frac{\partial t_r}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial t_r}{\partial x} \Big|_{x=L} = \frac{\partial t_r}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0$$

$$t_r(x, \ell, \tau) = t_x(x, \tau)$$

$$t_x(0, \tau) = t_0; \quad t_x(1, \tau) = t_n$$

$$P(0, \tau) = P_0; \quad P(1, \tau) = P_{\text{кв}}$$

При плоско-параллельной схеме фильтрации в гранулярном коллекторе математическая модель неадиабатической фильтрации записывается в следующей форме / жесткий режим фильтрации /:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( -\frac{K}{\mu(t_w)} \frac{\partial P}{\partial x} \right) = 0 \quad 0 \leq x \leq x_0$$

$$\frac{\partial t_r}{\partial \tau} = \frac{\lambda_r}{(c\rho)_r} \left( \frac{\partial^2 t_r}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial t_r}{\partial r} \right) \quad 0 \leq r \leq r_0$$

$$m c_w \frac{\partial t_w}{\partial \tau} + c_w W \frac{\partial t_w}{\partial x} = \alpha F_1(t_r|_{r=r_0} - t_w) + \lambda_w F_2 \frac{\partial t_w}{\partial z} \Big|_{z=h} \quad 0 < x \leq \frac{W}{m} \tau$$

$$\frac{\partial t_w}{\partial \tau} = \frac{\lambda_w}{(c\rho)_w} \frac{\partial^2 t_w}{\partial z^2} \quad 0 \leq x \leq \frac{W}{m} \tau$$

$$h \leq |z| < \infty$$

$$-\lambda_r \frac{\partial t_r}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = \alpha(t_{oi} - t_w), \quad \frac{\partial t_r}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0$$

$$t_w|_{z=h} = t_w$$

$$\mu = \mu_0 / (1 + a_\mu t_w)$$

$$\alpha = \frac{2\lambda_w}{d}$$

$$\tau = 0: \quad t_w(x, \tau) = t_r(x, \tau) = t_w(x, z, \tau) = t_i$$

$$P(x, \tau) = P_{oi}$$

$$\tau > 0: \quad t_w(0, \tau) = t_0 = \text{const}$$

$$t_w(x, \tau) = t_w(x, \tau) = t_r(x, \tau) = t_{oi} \quad \text{при } x > \frac{W}{m} \tau$$

$$\frac{\partial t_w}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0$$

$$P(0, \tau) = P_o = \text{const}$$

или

$$P(x_p, \tau) = P_e = \text{const}$$

$$\frac{K}{\mu(t_w)} \frac{dP}{dx} \Big|_{x=x_p} = \frac{V}{bh} = \text{const}$$

$$\frac{K}{\mu(t_0)} \frac{dP}{dx} \Big|_{x=x_p} = \frac{V}{bh} = \text{const}$$

Приведенные математические модели представляют собой точные формулировки задачи неизотермической фильтрации / в рамках принятой физической концепции /. Из них можно получить ряд частных приближенных математических моделей.

1. Если частицы скелета коллектора имеют малые размеры или высокую теплопроводность, то их внутреннее термическое сопротивление можно не учитывать и задачу их охлаждения рассматривать безградиентной.

2. При высокой интенсивности теплообмена между жидкостью и частицами твердого скелета можно принять условие мгновенного выравнивания температуры поверхности частиц и жидкости.

3. В мелкозернистых коллекторах ( $\alpha \rightarrow \infty, \lambda, \lambda/\Gamma_0 \rightarrow \infty$ ) можно пренебречь внутренним и внешним термическим сопротивлением частиц и считать, что происходит мгновенное выравнивание температур жидкости и твердого скелета коллектора.

4. С увеличением мощности коллектора влияние теплопритока от окружающего коллектор горного массива на температуру фильтрационного потока уменьшается, и, следовательно, при определенной величине мощности проникаемого слоя в тепловом балансе потока можно не учитывать поступление теплоты от горного массива.

Аналитическое решение задачи жесткой неизотермической фильтрации в гранулярном коллекторе в точной постановке имеет следующий вид:

$$\Delta P_c = P - P_w = Q_2 \int_x^* \frac{dx}{1 + a_\mu t_\mu(x)}$$

или

$$\Delta P_c = P_c - P = Q_2 \int_x^* \frac{dx}{1 + a_\mu t_\mu(x)}$$

$$\text{где } Q_2 = \frac{Q \mu_0}{S K_0}; \quad a_\mu = 0,07518 \gamma_{\text{гид}}$$

$$T_w = \begin{cases} \frac{1}{2} - \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \exp[-P(u)\Gamma_1\xi - \frac{u}{2} \sqrt{\frac{K_1}{F_0^*}} K_{q, \xi}] \sin [K_1 (H_0 - \xi) \frac{u^2}{2}] - \\ - R(u)\Gamma_1\xi - \frac{u}{2} \sqrt{\frac{K_1}{F_0^*}} K_{q, \xi} \Big] \frac{du}{u}, & H_0 > \xi \\ 1 & H_0 \leq \xi \end{cases}$$

$$T_x = \begin{cases} \frac{1}{2} - \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \exp[-P(u)\Gamma_1\xi - \frac{u}{2} \sqrt{\frac{K_1}{F_0^*}} (K_{q, \xi} - \bar{z} + 1)] \sin [K_1 (H_0 - \xi) \frac{u^2}{2}] - \\ - R(u)\Gamma_1\xi - \frac{u}{2} \sqrt{\frac{K_1}{F_0^*}} (K_{q, \xi} - \bar{z} + 1) \Big] \frac{du}{u}, & H_0 > \xi \\ 1 & H_0 \leq \xi \end{cases}$$

$$T_c = \begin{cases} T_w - \frac{(1 - T_w)}{2} \sum_{n=1}^{\infty} A_n \Phi_n(\rho) (1 + \exp(-u_n^2 F_0^* (H_0 - \xi))), & H_0 > \xi \\ 1 & H_0 \leq \xi \end{cases}$$

Частные случаи:

$$1. K_{*} \neq 0 \quad (\alpha \rightarrow \infty, \lambda_1/r_0 \rightarrow \infty)$$

$$T_m = \begin{cases} \operatorname{erf} \frac{K_* \xi}{2\sqrt{F_0^* [H_0 - (1 + K_*) \xi]}}, & H_0 > (1 + K_*) \xi \\ 1 & H_0 \leq (1 + K_*) \xi \end{cases}$$

$$T_r = \begin{cases} \operatorname{erf} \frac{K_* \xi + \bar{z} - 1}{2\sqrt{F_0^* [H_0 - (1 + K_*) \xi]}}, & H_0 > (1 + K_*) \xi \\ 1 & H_0 \leq (1 + K_*) \xi \end{cases}$$

$$2. K_* = 0 \quad (0 < \alpha < \infty, 0 < \lambda_1/r_0 < \infty)$$

$$T_m = \begin{cases} 1 - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\delta(H_0 - \xi)}{\eta}} \left\{ \operatorname{erf}[\sqrt{\delta(H_0 - \xi)}] - \sqrt{\eta} + \operatorname{erf} \sqrt{\eta} \right\}, & H_0 > \xi \\ 1 & H_0 \leq \xi \end{cases}$$

$$T_r = \begin{cases} T_m - (1 - T_m) \sum_{n=1}^{\infty} \Lambda_n \Phi_n(\rho) [1 + \exp(-\mu_n^2 F_0^* (H_0 - \xi))], & H_0 > \xi \\ 1 & H_0 \leq \xi \end{cases}$$

где

$$\delta = \delta F_0^* \frac{B_1}{2 + B_1} \quad \eta = 2K_* \frac{B_1}{2 + B_1}$$

Математическая модель упругой фильтрации для блочного коллектора содержит нелинейные дифференциальные уравнения второго порядка и ее решение удастся получить только численными методами. Алгоритм решения предусматривает предварительную линеаризацию уравнений гидродинамики и энергии для фильтрационного потока с последующим решением линейной краевой задачи численно-аналитическим методом. Линейные краевые задачи решаются в конечно-разностной постановке. Разработанный алгоритм реализован в виде программы на ПЭМ.

Выражения для  
в таблице I.

$K_1, \Gamma, P(u), R(u), A_n, \Phi_n(\beta)$

даны

Таблица I.

Схема	$\Gamma_i$	$K_c$	$P(u)$	$R(u)$	$A_n$	$\Phi_n(\beta)$	$\mu_n$
$0 < d < \infty$ $0 < \frac{\lambda_u}{r_0} < \infty$	$K_{q,u}$	$\Gamma_{0,u}^*$	$\frac{[(c-1)^2 + \mathcal{D}^2] / B_i + (c-1)}{[(c-1) / B_i + 1]^2 + (\mathcal{D} / B_i)^2}$	$\frac{\mathcal{D}}{[(c-1) / B_i + 1]^2 + (\mathcal{D} / B_i)^2}$	$\frac{(-1)^{n+1} 2 B_i \sqrt{M_n^2 + B_i^2 - 1}}{M_n^2 + B_i^2 - 1}$	$\frac{\sin(\mu_n \beta)}{\mu_n \beta}$	корни уравнения $\operatorname{tg} \mu = \frac{\mu}{B_i - 1}$
$\frac{\lambda_u}{r_0} \rightarrow \infty$	$K_A K_c$	1	$\frac{u^2}{u^2 + 1}$	$\frac{2K_1 u^2}{4K_1^2 - u^2}$	-	-	-
$d \rightarrow \infty$	$K_{q,u}$	$\Gamma_{0,u}^*$	$c-1$	$\mathcal{D}$	$2(-1)^{n+1}$	$\frac{\sin(\mu_n \beta)}{\mu_n \beta}$	$\mu_n \beta$
$d \rightarrow \infty$ $\frac{\lambda_u}{r_0} \rightarrow \infty$	$K_c$	1	0	$\frac{u^2}{2}$	0	0	-

### 5. Экспериментальное исследование нестационарного теплопереноса в подаваемых коллекторах

Экспериментальное изучение нестационарных термогидродинамических процессов при движении жидкости в проницаемых коллекторах проведено на моделях коллекторов гранулярного и блочного типа.

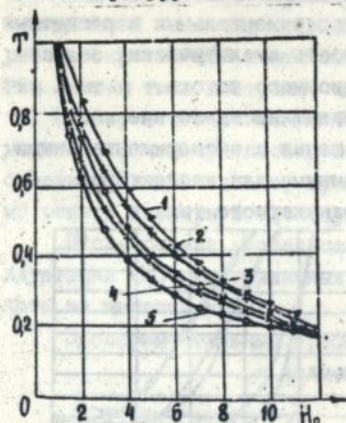
Модель блочного / трещиноватого / коллектора представляла собой щелевой канал постоянного раскрытия  $2\delta = 1$  мм, образованный между блоками из оргстекла размерами:  $x_p = 650$  мм,  $2h = 360$  мм,  $2l = 100$  мм. Гранулярный коллектор моделировался слоем шаров одного размера из оргстекла  $d_s = 20$  мм; из оргстекла изготавливались и блоки, моделирующие окружающий горный массив. На экспериментальных моделях исследованы динамика изменения температур фильтрационного потока и твердого скелета коллектора, закономерности изменения

локальных и интегральных величин тепловыделения от частиц и горного массива, а также влияние скорости фильтрации на температурные поля в коллекторе.

На рис. 3, 4 приведены экспериментальные графики изменения температуры фильтрационного потока и величины тепловыделений от скелета для коллектора блочного / трещиноватого / типа.

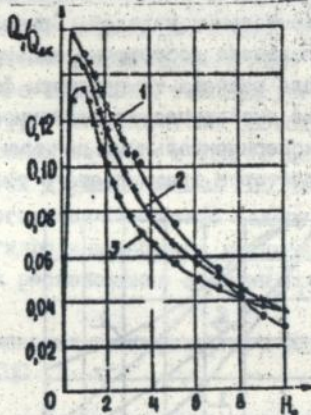
Экспериментальные данные по влиянию скорости фильтрации на температуру потока

Экспериментальные графики изменения тепловыделения блоков твердого скелета



Скорость потока, см/с:  
1-0,5; 2-1,0; 3-1,25;  
4-1,7; 5-2,7.

Рис. 3.

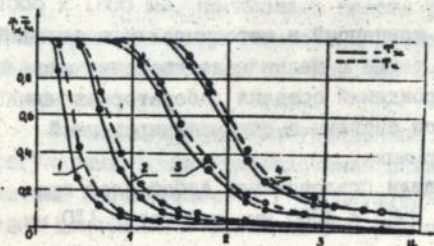


Скорость потока, см/с:  
1-0,57; 2-1,0; 3-2,0.

Рис. 4.

На рис. 5 приведены экспериментальные данные для гранулярного коллектора.

Экспериментальные графики изменения температуры частиц и жидкости



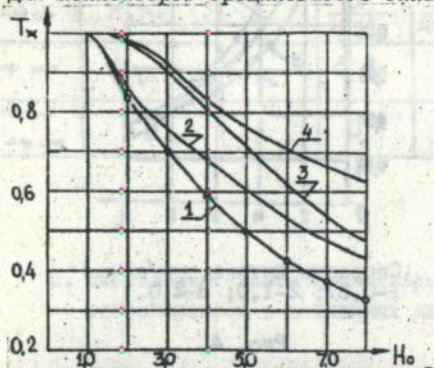
$W = 1,5$  м/час;  
1- $x = 0,12$ ; 2- $x = 0,35$ ;  
3- $x = 0,68$ ; 4- $x = 0,89$ .

Рис. 5

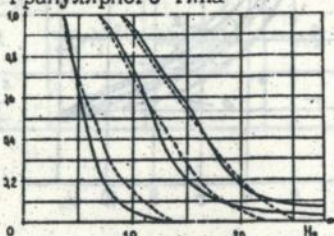
Полученная в экспериментах динамика изменения температурного поля в коллекторе адекватна теоретическим представлениям. Экспериментальные данные подтверждают формирование в коллекторе описанных ранее четырех зон изменения температуры по протяженности коллектора. Качественная картина динамики изменения температур для коллекторов гранулярного и блочного типа, полученная в экспериментах, одинакова.

На рис. 6, 7 представлены результаты расчетного анализа полей температур, выполненные по аналитическим зависимостям для экспериментальных моделей. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показало достаточно высокую точность аналитических зависимостей для расчета температуры фильтрационного потока.

Сравнение аналитических зависимостей с экспериментальными данными для коллекторов трещиноватого типа



Сравнение аналитического решения с экспериментальными данными для коллекторов гранулярного типа



Скорость теплоносителя:

$$W = 0,14 \cdot 10^{-4} \text{ м/с;}$$

--- экспериментальные данные;  
— расчетные данные.

Рис. 7.

Скорость теплоносителя  $W = 4,9 \cdot 10^{-3}$  м/с; 1-экспериментальные данные; 2-формула 1; 3-формула Ромма; 4-формула Лаврье.

Рис. 6.

Для проверки теоретических концепций и методических положений расчета и проектирования ГЦС, а также с целью моделирования систем разработки конкретных месторождений создана лабораторная модель геотермальной циркуляционной системы с автоматизированной системой сбора и обработки информации.

Проницаемый коллектор в модели представляет собой слой гранитной крошки размерами в плане  $3000 \times 3000$  мм, мощностью  $110$  мм,

средний размер частиц 4 мм. В коллекторе расположено 25 скважин, что позволяет реализовать различные гидравлические схемы ГЦС. На модели ГЦС проведено исследование 10 вариантов гидравлических схем. Динамика изменения температурного поля в коллекторе в процессе эксплуатации ГЦС качественно совпадает с теоретическими представлениями / рис. 8/.

При исследовании двухскважинных ГЦС / источник-сток / установлена зависимость характера изменения температуры теплоносителя в подъемной скважине от геометрических параметров схемы. При прорыве по кратчайшей ленте тока в скважину охлажденной воды по другим лентам тока поступает еще вода с начальной температурой пласта. В силу этого снижение температуры теплоносителя происходит медленнее, чем при плоско-параллельном течении с тем же дебитом скважин. Следовательно, при расчетах двухскважинных ГЦС необходимо решать двумерную плановую термогидродинамическую задачу.

Исследование нестационарных гидродинамических режимов эксплуатации ГЦС при различных схемах расположения скважин проводилось на щелевой модели.

Экспериментальные графики изменения температурного поля в коллекторе ГЦС



плоско-параллельное движение,  
расход теплоносителя  
 $4,4 \cdot 10^{-2}$  кг/с.

Рис. 8.

Модель проницаемого коллектора представляет собой калиброванный щелевой канал раскрытием 2 мм прямоугольной формы размерами 1585 x 1385 мм, на площади пласта расположено 30 скважин. Для моделирования упругоэластических свойств пласта установлено 56 пьезометрических трубок. Рабочей жидкостью в модели является глицерин.

Нестационарные фильтрационные течения исследованы на трех регулярных схемах расположения скважин: четырехточечной, пятиточечной и семиточечной / нагнетательной во всех схемах являлась одна центральная скважина / и рядной схеме. В экспериментах изучалась динамика изменения во времени площади / объема / коллектора,

охваченной активной циркуляцией теплоносителя, динамика выхода на квазиустановившийся режим фильтрации, определены основные гидродинамические параметры ГЦС. До момента прорыва закачиваемой жидкости в подъемные скважины происходит интенсивное увеличение площади активной циркуляции, а затем этот рост замедляется и в определенный момент площадь активной циркуляции достигает стабильной величины.

В таблице 2 приведены экспериментальные значения коэффициента использования площади / об'ема / коллектора  $K_s = S_n / S_r$ .

Таблица 2.

$K_s$ / Схема	4-х точечная	5-ти точечная	7-ми точечная
Наибольшая величина в момент прорыва закачиваемой жидкости	0,86	0,71	0,67
	0,61	0,48	0,32

Для рядных схем расположения скважин получены равные значения  $K_s$  для момента прорыва и его максимальная величина 0,55...0,6.

Наиболее эффективное использование площади и объема коллектора достигается при четырехточечной схеме расположения скважин /  $K_s = 0,86$  /. При этой схеме наблюдается и наиболее длительный период работы в режиме постоянной температуры теплоносителя в подъемных скважинах.

#### 6. Аналитическое исследование термогидродинамических процессов в геотермальных скважинах

При подъеме теплоносителя по скважине происходит изменение потенциальной, кинетической и внутренней энергии потока. Из-за наличия потерь тепла в окружающий горный массив происходит охлаждение потока, а за счет превращения работы трения в тепло происходит повышение теплосодержания потока.

В паровых скважинах работа, затрачиваемая на изменение кинетической и потенциальной энергии потока, на преодоление сил трения о стенки скважины, а также работа на проталкивание потока совершается только за счет работы расширения пара.

Для случая изэнтропического течения получены аналитические решения для определения давления и удельного объема по глубине скважины.

При эксплуатации геотермальных скважин, продуцирующих высоко-температурные термальные воды, движение теплоносителя происходит за счет разности пластового давления и давления на устье скважины. В том случае, когда давление в скважине меньше давления насыщения при пластовой температуре, в скважине происходит вскипание жидкости. По глубине скважины формируются два участка: на первом - ниже по течению от точки вскипания движется однородная жидкость, выше движется пароводяная смесь. Распределение давлений в потоке однофазной жидкости можно считать линейным, выше точки вскипания линейный характер распределения давлений нарушается.

Математическая модель термогидродинамических процессов при течении в скважине перегретой жидкости включает уравнение движения

$$dP = g\rho_{\text{см}} dz + \frac{\xi' \rho_{\text{см}} W_{\text{см}}^2}{2d_{\text{ск}}} dz + \frac{G}{\pi d_{\text{ск}}^2} \left[ A \left( \frac{D}{\rho''} + \frac{1-D}{\rho'} \right) - \frac{1-D}{(1-\varphi)\rho'} \right] dD$$

и дополнительные соотношения

$$\rho_{\text{см}} = (1-\varphi)\rho' + \varphi\rho''$$

$$\varphi = \frac{D\rho'}{[D\rho' + (1-D)\rho'']A}$$

$$W_{\text{см}} = \frac{G}{\pi d_{\text{ск}}^2 \rho_{\text{см}}}$$

$$D = \frac{c_{\text{ж}}}{3,55} \ln \frac{2651,3 - 20,2p^{0,25}}{2651,3 - 20,2p_{\text{н}}^{0,25}}$$

$$\rho' = 1055 - 5,33p^{0,25}$$

$$\rho'' = 0,15 - 0,499 \cdot 10^{-3} p$$

При выводе математической модели процесс течения и парообразования считается адиабатическим и термодинамически равновесным, принята гомогенная модель структуры двухфазного потока, принятые зависимости для  $T_{\text{ж}}(p)$ ,  $\rho'(p)$ ,  $\rho''(p)$  справедливы в диапазоне температур  $T_{\text{ж}} = 373 \dots 523 \text{ K}$ .

Решение полученной системы уравнений приводится к интегральному соотношению для определения длины участка, на котором срабатывает заданный перепад давления /  $P|_{z=0} = P_1$  /:

$$H = \int_{p_1}^{p_2} \frac{1 + \frac{C^2}{F^2} \Lambda \left( \frac{y}{\rho''} + \frac{1-y}{\rho'} \right) - \frac{1-y}{1-\varphi} \frac{1}{\rho'} \frac{1.41c_m}{\rho^{0.75} (2651,34 - 20,06\sqrt{\rho})}}{\xi Q^2 + 2d_{ex} F^2 \rho_{ex}} dp$$

На основе полученных решений разработаны методики расчета и проектирования паровых и водяных геотермальных скважин.

### 7. Термодинамический анализ процессов преобразования и использования геотермальной энергии

Геотермальными скважинами на поверхность выводится установившийся поток теплоносителя с температурой и давлением, отличающимися от параметров окружающей среды /  $T_c > T_0$ ,  $P_c > P_0$ /. Термодинамическая система, состоящая из скважин и окружающей среды, обладает работоспособностью; полезная работа в такой системе будет производиться в процессе изменения параметров потока теплоносителя и перевода его в состояние равновесия с окружающей средой.

Возможны следующие направления использования геотермальной энергии: 1/ для производства теплоты; 2/ для производства механической работы и электроэнергии; 3/ для производства холода; 4/ комплексное использование для одновременного производства электроэнергии, теплоты и холода. Технические средства, обеспечивающие превращение потока геотермального теплоносителя в другие виды энергии и ее полезное использование, назовем преобразователями геотермальной энергии.

Максимально возможное количество полезной работы, которое может быть произведено потоком геотермального теплоносителя, равняется его эксергии:

$$E_1 = G \left[ (i_1 - i_{ex}) + \frac{w^2}{2} - T_0 (s_1 - s_0) \right] = L_{max}$$

где  $G$  - расход теплоносителя;

$i_1, s_1$  - начальные значения энтальпии и энтропии потока теплоносителя;

$w$  - скорость потока;

$i_0, s_0$  - энтальпия и энтропия потока при параметрах окружающей среды;

$T_0$  - абсолютное значение температуры окружающей среды.

В реальных преобразователях геотермальной энергии всегда имеет место потеря работоспособности, вызываемая внутренней и внешней необратимостью термодинамических процессов изменения параметров состояния потока геотермального теплоносителя. С учетом этого эксергетический баланс для преобразователей геотермальной энергии можно записать следующим образом:

1/ производство полезной работы / электроэнергии /

$$E_1 = L_n + \Delta E_{\text{пот}}$$

2/ производство теплоты / холода /

$$E_1 = \Delta E_{t,i} + \Delta E_{\text{пот}}$$

3/ производство работы, теплоты и холода

$$E_1 = L_n + \Delta E_t + \Delta E_x + \Delta E_{\text{пот}}$$

где  $L_n$  - полезная работа;  
 $\Delta E_t$  - эксергия произведенной теплоты;  
 $\Delta E_x$  - эксергия произведенного холода;  
 $\Delta E_{\text{пот}}$  - суммарные потери эксергии.

Для всех типов преобразователей израсходованной эксергией будет начальная эксергия потока теплоносителя. Следовательно, критерием термодинамического совершенства преобразователя является отношение полезно использованной эксергии к начальной эксергии потока геотермального теплоносителя. Это отношение называется эксергетическим, к.п.д. В общем виде эксергетический к.п.д. любого типа преобразователя равен

$$\eta_{\text{ex}} = 1 - \frac{\Delta E_{\text{пот}}}{E_1},$$

где  $\Delta E_{\text{пот}}$  - суммарные потери эксергии во всех элементах термодинамической системы: скважина-преобразователь-окружающая среда.

Важным практическим показателем преобразователей геотермальной энергии является величина удельного расхода геотермального теплоносителя на единицу полученной полезной работы  $g_0 = G/L_n$ .

Эффективность традиционных теплосиловых установок характеризуется термическим к.п.д. и общим коэффициентом полезного действия. Для преобразователей геотермальной энергии эти к.п.д. можно определить следующим образом: термический к.п.д.  $\eta_t = \frac{L_n}{G(i_1 - i_2)}$   
 общий к.п.д.  $\eta_0 = L_n/G i_1$

Для сравнительной оценки эффективности преобразователей раз-

личного типа введем понятие образцового преобразователя геотермальной энергии. Образцом является преобразователь, обеспечивающий получение максимально возможного количества полезной работы или теплоты / холода /. Необходимым условием этого является отсутствие внешней и внутренней необратимости всех термодинамических процессов, происходящих в преобразователе. Это возможно, если будут выполняться три следующих условия: 1/ в системе не должно быть потерь давления, связанных с трением; 2/ все процессы теплообмена должны происходить при нулевой разности температур; 3/ в системе не должно быть рассеяния энергии в окружающую среду. Следовательно, в образцовом преобразователе происходят обратимые процессы снижения температуры и давления потока геотермального теплоносителя до параметров окружающей среды.

Образцовый преобразователь геотермальной энергии в работу / электроэнергию / представляет собой нециклическое устройство, обеспечивающее перевод потока геотермального теплоносителя в равновесие с окружающей средой в результате двух обратимых процессов адиабатного расширения и изотермического охлаждения и производящее максимально возможное количество полезной работы. Данная конфигурация термодинамических процессов в образцовом преобразователе не зависит ни от фазового состояния, ни от начальных параметров потока геотермального теплоносителя. На рис. 9 приведены диаграммы изменения параметров потока теплоносителя в образцовом преобразователе для трех случаев начального состояния: перегретая вода, пароводяная смесь, перегретый пар.

Диаграммы изменения параметров рабочего тела в образцовом преобразователе



Рис. 9

Суммарное количество полезной работы, произведенной в обратимых адиабатном и изотермическом процессах равно:

$$L_n = L_{1-2} = G (L_{1-2} + L_{2-0}) =$$

$$= G (i_1 - i_0) - T_n (S_1 - S_0) = E_1$$

Эксергетический к.п.д.

образцового преобразователя геотермальной энергии в работу равен единице:

$$\eta_{\text{эк}} = L_n / E_1 = 1$$

Образцовым преобразователем геотермальной энергии в теплоту является теплообменный аппарат, обеспечивающий охлаждение потока геотермального теплоносителя до температуры окружающей среды в обратимом изобарном процессе без трения и передачу всей теплоты вторичному теплоносителю.

Диаграмма изменения параметров потока геотермального теплоносителя приведена на рис. 10.

Количество теплоты, выделяемое при изобарном процессе равно

$$Q_1 = G (i_1 - i_0)$$

Эксергия этого количества теплоты равна  $E_q = G \left[ (i_1 - i_0) - T_0 \Delta S_1 \right]$ , т.е. равна начальной эксергии геотермального теплоносителя. Следовательно, количество произведенной геотермальной энергии в теплоту идеально преобразователя равно максимально возможному.

Эксергетический к.п.д. рассмотренного процесса отвода теплоты от потока геотермального теплоносителя равен единице:

$$\eta_{\text{экс}} = \Delta E_q / E_1 = 1$$

В случае, когда скважины выводят на поверхность поток насыщенного пара, образцовый преобразователь имеет две ступени: вначале в конденсаторе происходит конденсация пара при температуре  $T_1$ , а затем охлаждение конденсата в теплообменнике до температуры  $T_0$ . При использовании природного перегретого пара преобразователь имеет три ступени охлаждения.

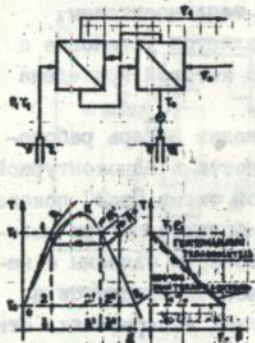


Рис. 10.

При использовании природного перегретого пара преобразователь имеет три ступени охлаждения.

Реальные процессы течения, расширения и теплообмена в энергетических установках являются несобратимыми. Необратимость процессов изменения параметров состояния потока геотермального теплоносителя обуславливает потерю его работоспособности и приводит к снижению КПД преобразователей. При анализе реальных процессов и тепловых схем геотермальных установок важно определить источники наибольших потерь работоспособности.

Наиболее близкими по своим показателям к образцовым преобразователям являются энергоустановки для использования природного

пара. Для производства полезной работы в этом случае используются традиционные паровые турбины. Эксергетический к.п.д. реального преобразователя из-за наличия необратимых потерь в турбине и конденсаторе становится меньше единицы. Необратимые потери эксергии вызываются наличием трения в турбине и конденсацией пара при температуре выше температуры окружающей среды.

Гораздо больше необратимых потерь эксергии возникает при использовании для производства электроэнергии перегретой термальной воды.

Главной задачей является разработка технических устройств, обеспечивающих повышение эффективности реальных преобразователей и приближение их к образцовому. В диссертационной работе исследуются три типа преобразователей: 1/ установки с многоступенчатым адиабатным испарением термальной воды; 2/ установки "полного потока"; 3/ установки с низкокипящим вторичным теплоносителем.

Наиболее простым техническим решением является установка с адиабатным испарителем термальной воды, схема которой приведена на рис. II.

Преобразователь геотермальной энергии с адиабатным испарителем

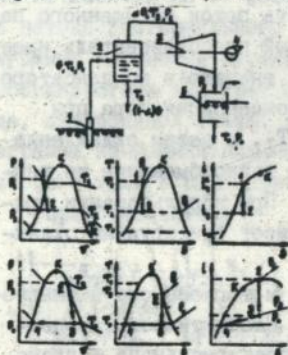


Рис. II.

Анализ потерь работоспособности в одноконтурной тепловой схеме ГеозС показал, что наибольшие потери работоспособности связаны с необратимостью процессов в адиабатных испарителях. Эти потери значительно сокращаются в установках многоступенчатого испарения, когда частично охлажденная в первой ступени термальная вода поступает в испаритель второй ступени и т.д., а образующийся в каждой ступени

пар подается в отдельные отсеки турбоустановки. Эксергетический КПД многоступенчатого испарителя всегда меньше единицы и равен:

$$\eta_{\text{max}} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \left[ \frac{(i - i_0) - T_0 (S_i - S_0)}{(i_1 - i_0) - T_0 (S_1 - S_0)} \right]$$

где  $\alpha_i$  - количество пара, образующегося в каждой ступени, выраженное в долях от единицы расхода термальной воды;  
 $i_i$  - энтальпия образующегося пара.

В установках "полного потока" основными элементами являются сопла Лавыля и турбина. Разогнанный в сопле до больших скоростей поток геотермального теплоносителя подается на лопатки ковшовой турбины, где сбрасывается кинетическая энергия. Эти установки отличаются чрезвычайной простотой и надежностью. Основная трудность - создание сопел и турбин с малыми гидравлическими потерями. В преобразователях с низкокипящим вторичным теплоносителем источником наибольших потерь работоспособности являются теплообменные аппараты, в которых происходит передача теплоты от термальной воды к рабочему телу циклической установки. Схема установки приведена на рис. 12.

Схема двухконтурного преобразователя геотермальной энергии

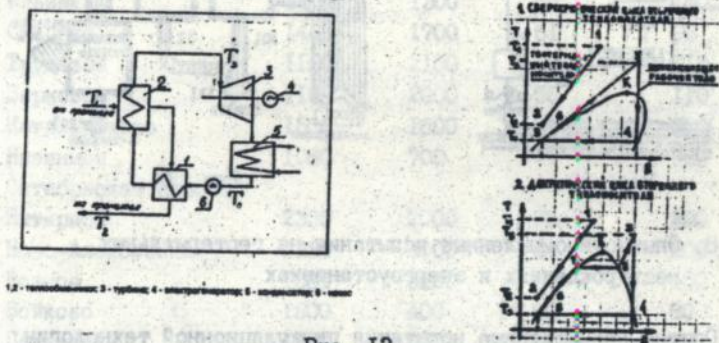


Рис. 12.

В диссертации приведены результаты анализа эффективности преобразователей с низкокипящими вторичными рабочими телами, а также результаты сравнения различных типов преобразователей геотермальной энергии в работу.

В реальных преобразователях геотермальной энергии в теплоту потери эксергии вызываются наличием разности температур потоков теплоносителей в теплообменных аппаратах. В связи с этим большой практический интерес представляют преобразователи с контактными теплообменными аппаратами, в которых возможно уменьшить разность температур теплоносителей. В диссертационной работе исследован режим работы реальных преобразователей.

Наиболее эффективное использование эксергии и теплоты потока геотермального теплоносителя достигается при комплексном использовании его для одновременного производства электроэнергии, холода и теплоты. Схема установки приведена на рис. 13 и рис. 14 приведен тепловой баланс установки. Комплексное использование геотермальной энергии позволяет весьма существенно повысить коэффициент использования теплоты / в 2 ... 2,5 раза /.

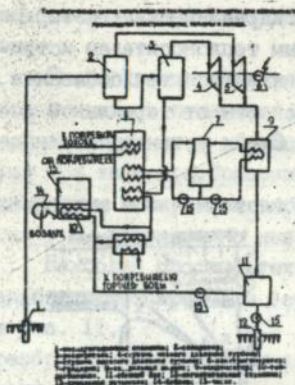


Рис. 13.

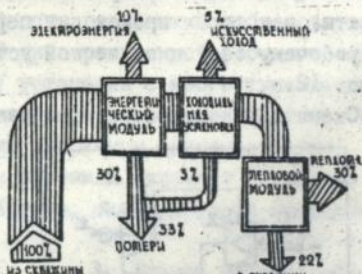


Рис. 14.

## 8. Опытно-промышленные испытания на геотермальных месторождениях и энергоустановках

Опытно-промышленные испытания циркуляционной технологии извлечения геотермальной энергии были проведены в Крыму, где в пос. Ильинка в 1983 г. был создан модуль ГЭС.

Основываясь на результатах испытаний опытной ГЭС в пос. Ильинка, была создана промышленная геотермальная циркуляционная система для целей теплоснабжения жилого поселка, которая эксплуатируется более 10 лет.

В последующее в Крыму были пробурены скважины и созданы ГЭС на трех площадях: Новоселковской, Октябрьской и Северо-Сивашинской. Основные характеристики ГЭС приведены в таблице 3.

Результаты проведенных испытаний в Крыму позволили выявить ряд общих закономерностей изменения технологических показателей работы ГЭС, а также выявили и ряд особенностей, обусловленных

различием гидрогеологических условий различных площадей. На всех объектах установлено, что при заданном режиме эксплуатации достаточно быстро стабилизируются величина расхода теплоносителя и динамическое давление на устье подъемных скважин. Фактические данные, иллюстрирующие характер изменения дебита, динамического давления на устье подъемной скважины и давления нагнетания охлажденного теплоносителя на ГЦС в п. Сизовка и п. Ново-Алексеевка / площади Новоселковская и Октябрьская /, приведены на рис. 15.

Таблица 3.

## Характеристики модулей ГЦС в Крыму

№ п/п	Площадь, поселок	Глубина скважины, м	Дебит скважины, м <sup>3</sup> /сут	Температура воды, °С	Мощность коллектора
Новоселковская площадь					
1.	Ильинка	1200	1300	57	100
2.	Сизовка	1400	1700	61	93
3.	Трудовое	1160	2100	53	110
4.	Зерновое	1100	2000	50	110
5.	Котельниково	1500	1600	65	100
6.	Низинное	1060	700	47	100
Октябрьская площадь					
7.	Янтарное	2300	2000	85	200
8.	Ново-Алексеевка	1360	4000	54	200
9.	Ровное	1569	3200	62	150
10.	Войково	1500	400	69	80
11.	Пятихатки	1300	1000	51	80
Северо-Сивашская площадь					
12.	Медведевка	1500	1100	67	80

Проведенные наблюдения на семи объектах в Крыму показали, что первоначальный рост давления нагнетания является внутренним свойством коллектора и связан с его упругоэластическими свойствами.

Проведенные в Крыму многолетние испытания подтвердили эффективность циркуляционной технологии, ее экологическую чистоту и стабильность эксплуатации геотермальных месторождений.

## Результаты испытаний ГЭС

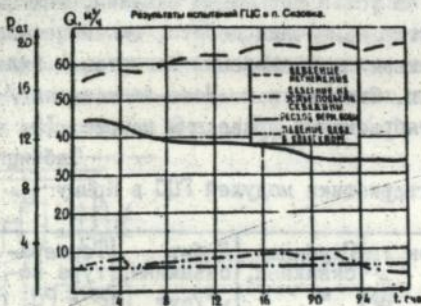


Рис. 15.

Технология создания ГЭС в настоящее время является освоенной в промышленных масштабах для извлечения геотермальной энергии с глубины до 3000 м и при температурах теплоносителей до 120...130°C.

На базе ГЭС в Крыму были созданы и прошли испытания геотермальные тепловые пункты для теплоснабжения потребителей. Испытаны технологические схемы и оборудование для использования термальных вод с различной начальной температурой: от 56°C до 85°C; минерализация изменялась от 2 г/л до 32 г/л.

Результаты обобщения полученных фактических данных приведены на рис. 16. Здесь показаны зависимость от начальной температуры эксергетического к.п.д. установок и доли геотермального источника в годовом отпуске теплоты.

Энергетические показатели геотермальных тепловых пунктов

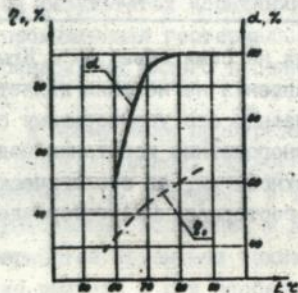


Рис. 16.

На рис. 17, 18 приведены диаграммы годового теплового баланса и потоков эксергии геотермального теплоносителя, построенные по фактическим данным эксплуатации ГТП в п. Ильинка.

Годовой тепловой баланс СГТ

Баланс эксергии потока геотермального теплоносителя

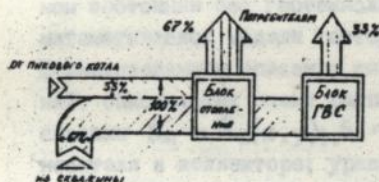


Рис. 17.

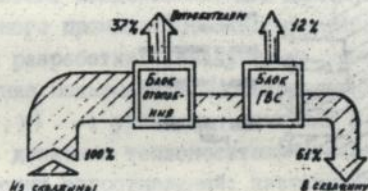


Рис. 18.

Анализ полученных фактических данных свидетельствует об эффективности систем геотермального теплоснабжения. Даже при температурах термальной воды 55...60°C возможно обеспечить более 60% годового отпуска теплоты за счет геотермального источника и сократить расход топлива. Достигнутые эксергетические к.п.д. установок незначительно отличаются от теоретически достижимых.

Полевые испытания пароводяных скважин, а также испытания геотермальной электростанции проведены на объектах Камчатки.

Сравнение аналитических зависимостей для расчета пароводяных скважин с фактическими данными по Паужетскому и Мутновскому месторождениям показали их хорошую сходимость.

Комплексные испытания Паужетской геотермальной электростанции и обобщение результатов ее многолетней эксплуатации позволили определить энергетические характеристики основного и вспомогательно-го оборудования и выполнить анализ эффективности тепловой схемы и отдельных ее элементов.

На рис. 19 приведена диаграмма потоков эксергии в тепловой схеме Паужетской ГеоТЭС, которая наглядно показывает источники наибольших потерь работоспособности. Это испаритель-сепаратор, турбина и паропроводы.

### Диаграмма потоков эксергии в тепловой схеме Лаужетской ГеоТЭС

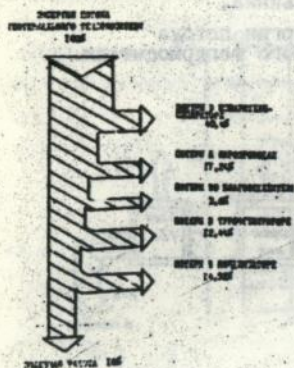


Рис. 19.

## 9. Математическое моделирование и оптимизация геотермальных энергоустановок

При проектировании геотермальных энергоустановок необходимо разработать два функциональных комплекса: геотермальный промысел / ГПС / и теплоэнергетическую установку / ТЭУ /.

Для моделирования геотермальных месторождений используются жесткие модели, описывающие детерминированные процессы. Адекватность математической модели природному объекту устанавливается сравнением расчетного распределения / пространственного и временного / температур и давлений с данными фактических намерений на месторождении.

Математическая модель геотермального месторождения включает следующие элементы: 1/ описание пространственной структуры, геометрии и границ месторождения  $\Gamma = \Gamma(X, Y, z)$ , проницаемых коллекторов  $\Gamma_k = \Gamma_k(X, Y, z)$  и характерных геологических комплексов  $\Gamma_s = \Gamma_s(X, Y, z)$ ; 2/ совокупность уравнений массопереноса и теплопереноса в коллекторах и окружающих их горных массивах, а также уравнений теплового и водного питания на границах; 3/ совокупность уравнений состояния и функциональных зависимостей для свойств теплоносителя и горных пород вида  $C_1 = C_1(T, \rho)$ .

$\Phi_i = \Phi_i(X, Y, z, T, P)$ ; 4/ зависимости, описывающие начальное состояние системы в заданный момент  $\tau_0$  вида:

$$T_i(X, Y, z, \tau_0) = T_0(X, Y, z); P(X, Y, z, \tau_0) = P_0(X, Y, z),$$

$W(X, Y, z, \tau_0) = W_0(X, Y, z)$  выражение функции цели.

Рассмотренная модель описывает месторождение в его естественном состоянии без геотехнологического воздействия. Для составления математической модели геотермального промысла необходимо добавить формализованное описание системы разработки: совокупность уравнений, описывающих схему расположения подъемных и нагнетательных скважин  $S_{ni} = S_{ni}(x, y)$ ;  $S_{ni} = S_{ni}(x, y)$ ; уравнение движения теплоносителя в коллекторе; уравнение движения теплоносителя в скважинах и зависимости для гидравлических сопротивлений; зависимости, описывающие режимы работы подъемных и нагнетательных скважин; совокупность неравенств, описывающих технические и технологические ограничения вида

$$G_n \leq G; \tau_{\text{пред}} \leq \tau_p; d_a \leq d_{\text{max}}; T_{\text{min}} \leq T(\tau_p)$$

Математическая модель поверхностной геотермальной энергоустановки включает следующие элементы: схему связей по всем энергоносителям в форме графа технологической схемы матриц соединений; совокупность балансовых уравнений / эксергетического, материального, уравнения движения / для всех агрегатов технологической схемы вида  $\Phi(x, y(x), x_k) = 0$ ; совокупность технических характеристик для всех агрегатов вида  $F_{\text{не}} = F(x, y(x))$ ; совокупность неравенств, описывающих технические ограничения на независимые /  $X$  / и зависимые /  $Y$  / параметры и технические характеристики вида  $X_{\text{min}} \leq X \leq X_{\text{max}}$   $Y_{\text{min}} \leq Y(x) \leq Y_{\text{max}}$ , а также функцию вида  $Z = Z(x, y(x), x_k, x_{\text{ен}})$ .

Задача оптимизации технико-экономических показателей ГЭС и ГЭУ сводится к нахождению минимумов функций удельных приведенных затрат / функций цели /  $Z_{\text{ГЭС}}$  и  $Z_{\text{ГЭУ}}$ . Нахождение условий абсолютного оптимума возможно только при комплексной технико-экономической оптимизации всей технологической схемы с учетом совместного функционирования промысла и энергоустановки.

Разработанные математические модели геотермальных месторождений и энергоустановок явились основой для разработки информационной системы "Геотермальные ресурсы Украины". Первая версия этой системы реализована на базе сети персональных компьютеров.

Информационная система состоит из трех подсистем, банка данных, базы знаний, экспертной системы. Архитектура этой системы приведена на рис. 20.

Информационная система "Геотермальные ресурсы Украины"

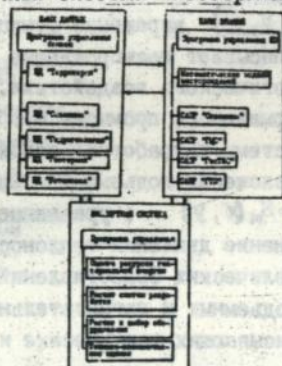


Рис. 20.

#### 10. Реализация результатов исследований термогидродинамических процессов в геотермальных системах и энергоустановках

Результаты проведенных исследований позволили решить следующие практические задачи: 1/ разработать, создать, испытать и сдать МК типового геотермального теплового пункта / акт и протокол приемки МК дан в приложении /; 2/ разработать "Технические условия на геотермальные циркуляционные системы на естественных коллекторах" и "Требования к подготовке термальной воды для обратной закачки в продуктивный пласт"; 3/ выполнить анализ экономической эффективности использования геотермальной энергии на основе фактических показателей действующих установок; 4/ выполнить оценку перспектив использования геотермальной энергии в различных отраслях хозяйства; 5/ разработать программу развития геотермальной энергетики Украины; 6/ разработать, создать и сдать в эксплуатацию системы геотермального теплоснабжения суммарной мощностью 19,5 МВт, что обеспечивает ежегодную экономию топлива в количестве 10000 т.у.т.

В качестве типового оборудования для широкомасштабного внедрения разработан блочно-модульный геотермальный тепловой пункт, предназначенный для использования термальных вод с температурой от 60°C до 95°C. На этот тепловой пункт разработана проектно-

конструкторская документация и согласовано серийное изготовление на заводах Украины.

В таблице 4 приведены для сравнения экономические показатели геотермального теплового пункта и топливных котельных / на мазуте и угле /.

Таблица 4.

Технико-экономические показатели систем теплоснабжения

№ п/п	Показатели	Геотермальный тепловой пункт	Газомазутная котельная	Твердотопливная котельная
1.	Годовое количество отпущенной теплоты, МВт ч/год	19200	19200	19200
2.	Себестоимость отпущенной теплоты, млн.крб/МВт ч / долл.США/кВт ч/	0,44 /0,004/	1,84 /0,016/	1,72 /0,015/
3.	Удельные капиталовложения, млн.крб/МВт /тыс.долл.США/МВт	22000 /100/	401,5 /3,4/	244 /2,1/
4.	Удельные приведенные затраты, млн.крб/МВт ч / долл.США/кВт ч/	1,13 /0,01/	1,85 /0,016/	1,72 /0,015/

Анализ данных табл. 4 показывает, что системы геотермального теплоснабжения требуют значительно больших капиталовложений по сравнению с котельными. Однако, ежегодные затраты на эксплуатацию геотермальных источников значительно ниже, что существенно снижает себестоимость отпускаемой теплоты. Это обстоятельство предопределяет высокую рентабельность геотермальных источников по сравнению с установками на органическом топливе.

О коммерческой эффективности развития геотермальной энергетики в условиях рыночной экономики свидетельствуют результаты анализа и оценок, выполненных по методике Международного центра промышленных исследований "ЮНИДО".

Бизнес-планы геотермальных проектов показывают возможность получения прибыли выше заданного фактора дисконта.

Полученные научные и практические результаты, а также кризисное состояние энергетики Украины, позволяют выдвинуть концепцию ускоренного развития геотермальной энергетики, как альтернативного энергоисточника.

С учетом предложенной концепции разработана программа "Экологически чистая геотермальная энергетика Украины", которая включена в Национальную программу Украины "Энергоресурсы". Программой предусматривается введение в топливно-энергетический комплекс к 2010 г. дополнительных мощностей: систем геотермального теплоснабжения - 2000 МВт и геотермальных электростанций - 1000 МВт. В результате выполнения программы годовой объем экономии топлива в 2005 г. составит 2 млн.т.у.т. и в 2010 г. достигнет 6 млн.т.у.т.

### З а к л ю ч е н и е

В работе впервые выполнены исследования процессов движения, теплообмена и изменения термодинамических параметров состояния установившегося потока геотермального теплоносителя во всех элементах технологической схемы: подземном коллекторе, скважинах и теплоэнергетической установке. Установлено, что расчет и оптимизацию геотермальных энергоустановок следует проводить с учетом взаимодействия промысла и теплоиспользующей установки.

Совокупность проведенных исследований позволили создать научные основы интенсивной технологии извлечения и использования глубинной теплоты недр, разработать методики для расчета и оптимизации геотермальных энергоустановок и систем разработки месторождений и апробировать их по результатам многолетних наблюдений в промышленных условиях.

Главным практическим результатом работы является промышленное освоение технологии ГЦС и ее внедрение.

В работе получены следующие новые научные результаты:

1. Составлена общая математическая модель термогидродинамических процессов при нагнетании в подземный коллектор холодного теплоносителя / ГЦС /, основанная на применении дифференциальной формы записи закона теплопереноса в непрерывной фазе / жидкости / и интегральной величины тепловыделений от частиц твердого скелета; при этом в гранулярных коллекторах гидродинамика потока и процесс теплообмена рассматривается как внешняя задача при обтекании частиц сферической формы; в коллекторах блочного типа / трещиноватых / процесс теплопереноса рассматривается как внутренняя задача при течении жидкости в узком щелевом канале. Получены приближенные

математические модели термогидродинамических процессов для частных случаев теплообмена и структурных характеристик коллекторов.

2. Для жесткого режима фильтраций получено фундаментальное аналитическое решение для нестационарных полей температур и давлений в коллекторах гранулярного и трещиноватого типа. На основе этого решения получены приближенные решения для частных случаев теплообмена: безградиентное охлаждение частиц твердого скелета; теплообмен при больших скоростях фильтрации; теплообмен в мелкозернистых коллекторах; теплообмен в коллекторах большой мощности.

3. Результаты экспериментальных исследований на моделях коллекторов подтвердили правильность физической концепции термогидродинамических процессов в подземных пластах, позволили получить замыкающие соотношения для математических моделей и оценить точность аналитических решений.

4. На основе результатов экспериментальных исследований на лабораторной модели ГЦС установлены основные закономерности и получены количественные оценки влияния гидрогеотермических условий месторождений, схем систем разработки и режимов их эксплуатации на технологические и технико-экономические показатели ГЦС. Установлено, что наблюдается три периода изменения температуры теплоносителя в подъемных скважинах: период постоянной температуры, равной начальной температуре коллектора; период падающей температуры и период квазиустановившейся температуры.

5. Эффективность извлечения теплоты недр в значительной степени зависит от гидродинамической схемы ГЦС. Критерием рациональности гидродинамических схем системы разработки может служить коэффициент использования объема / площади / коллектора. Экспериментальные исследования показали, что наибольшая величина этого коэффициента не превышает 0,6. Установлено, что наилучшие показатели обеспечивает четырехточечная схема расположения скважин.

6. Составлены математические модели термогидродинамических процессов в паровых и паро-водяных скважинах с использованием замыкающих экспериментальных соотношений для гомогенной структуры потока. Получены аналитические решения для изэнтропического и адиабатического течения. Составлены программы для расчета. Сопоставление результатов расчетов с данными натуральных наблюдений на месторождениях показали их хорошую сходимость.

7. Впервые на основе эксергетического метода выполнен детальный анализ преобразования и использования геотермальной энергии. Введено понятие образцового / идеального / преобразователя для сравнительной оценки тепловых схем энергоустановок. Эксергетический КПД такого преобразователя равен единице.

Эксергетический КПД реальных преобразователей может достигать 0,3...0,7. Наиболее высокую термодинамическую эффективность обеспечивают схемы комплексного использования геотермальных теплоносителей для производства электроэнергии, холода и теплоты.

8. Установлено, что при использовании теплоносителей с различной температурой для получения электроэнергии следует выбирать оптимальный тип преобразователя: при температуре 550 К - преобразователь с тремя ступенями адиабатного расширения; при температуре 430...550 К - двухконтурный преобразователь с использованием  $\text{H}$ -пентана; при температуре 350...420 К - преобразователь с  $\text{H}$ -бутаном.

9. Для нескольких конкретных месторождений составлены замкнутые математические модели с использованием данных многолетних наблюдений на месторождениях и испытаний энергоустановок, разработаны алгоритмы и программы, обеспечивающие оптимизацию тепловых схем, термодинамических параметров и технико-экономических показателей, что позволит контролировать эффективность эксплуатации промысла, обеспечить наилучшие технико-экономические показатели геотермальных энергоустановок.

10. Внедрение установок геотермального теплоснабжения в Крыму и их многолетняя эксплуатация позволили апробировать проектные, конструкторские и технологические решения, обеспечивающие их высокую надежность и экономическую эффективность.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах автора:

1. Аронова Н.Н., Шурчков А.В., Морозов Е.П., Приходько А.М. Сравнение аналитических решений и экспериментальных данных по теплопереносу в подземных коллекторах // Геотехнологические аспекты геотермальной энергетики. - Махачкала, 1984. - С. 116-122.

2. Забарный Г.Н., Шурчков А.В., Ярис А.А., Горохов М.И., Магдалена Перес-Лопес - "Оценка эффективности комплексного использования геотермальной скважины № 1 месторождения Сан-Хасинто / Никарагуа/. - Киев, 94 - 53 стр. Препринт.

3. Кремнев О.А., Журавленко В.Я., Шурчков А.В. К вопросу освоения тепла глубинных горных пород // Изучение и использование глубинного тепла Земли. - М. : Наука, 1973. - С. 25-34.
4. Кремнев О.А., Шурчков А.В. Принципиальные тепловые схемы получения электроэнергии и их термодинамический анализ // Вопросы использования тепла Земли для производства электроэнергии. - М., 1976. - С. 40-59.
5. Кремнев О.А., Шурчков А.В., Аронова Н.Н. Процессы теплопереноса при движении жидкости через подземные коллекторы // Изучение и использование геотермальных ресурсов в вулканических областях. - М. : Наука, 1979.
6. Кремнев О.А., Шурчков А.В., Аронова Н.Н., Козлов Е.М. Нестационарный теплообмен при движении жидкости через подземный проницаемый слой // Тепломассообмен. - Минск, 1976. Т. 5. - С. 177-186.
7. Шурчков А.В., Белодед В.Д. Интенсивные технологии извлечения и использования геотермальной энергии // Материалы Международного научного форума "Энергетические проблемы XXI века: современные подходы к решению проблем завтрашнего дня". - М., 1976.
8. Шурчков А.В., Крупевич Т.Г. Автономная система геотермального теплоснабжения жилого поселка // Геотермальный бюллетень. - 1993. - Вып. 7-8. - С. 39-41.
9. Шурчков А.В., Крупевич Т.Г. Геотермальное теплоснабжение при вентиляции сельскохозяйственных объектов // Современные проблемы вентиляции и экологической безопасности промышленных и сельскохозяйственных зданий. - Санкт-Петербург, 1992. - С. 201-204.
10. Авторское свидетельство № 1604395, кл. В 01 01 Д 19/00, от 8.07.90 г.
11. Авторское свидетельство № 1657896, кл. 24 3/08, от 22.02.91 г.
12. Авторское свидетельство № 1638489, кл. 24 3/08, от 1.12.90 г.
13. Авторское свидетельство № 1361388, кл. 04 1/18, от 22.08.87 г.
14. Авторское свидетельство № 1244467, кл. 28 Д 15/00 от 15.03.86г.
15. Авторское свидетельство № 1408069, кл. 01 К 21/04 от 8.03.88г.

#### ANNOTATION

Shurchkov A.V. Thermohydrodynamical processes in the geothermal systems and power installations.

Dissertation for seeking of doctor science degree on 05.14.04 - Industrial heat energetics. Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 1995.

80 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.

#### АННОТАЦІЯ

Шурчков А.В. Термогідродинамічні процеси в геотермальних системах і енергоустановках.

Дисертація на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.04 - промышленная теплоэнергетика. Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, 1995.

Захищається 80 наукових робіт, в яких містяться результати наукових і експериментальних досліджень теплообміну при русі теплоносія в геотермальній подаємій пласті і геотермальній скважині. Побудовані нові математичні моделі процесу теплопереказу в подаємій колекторі і скважині. С використанням цих моделей розроблена методика розрахунків технологічних показників геотермальних установок. Приведені результати експериментальних досліджень по визначенню емпіричних коефіцієнтів, необхідних для замкнення розроблених математичних моделей.

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

Подписано к печати 04.12.1995г. Формат 60x84/16  
Бумага офсетная Усл.-печ.лист, 2,0. Уч.-изд. лист 2,0.  
Тираж 100, Заказ 506.

---

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

ABSTRACT

Marchuk A.V. Hydrogeological processes in the geothermal system and power installations.

Dissertation for awarding of Doctor Science degree on 05.14.64. Industrial heat energetics. Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 1965.

30 scientific works are submitted, which contain the results of scientific and engineering researches of heat transfer in geothermal systems and wells. The creation of new mathematical models of heat transfer in geothermal systems and wells. These mathematical models are used for creation of new designs of geothermal systems. The results of geothermal systems and wells are presented. The results of mathematical models are presented.

ABSTRACT

Marchuk A.V. Hydrogeological processes in the geothermal system and power installations.

Dissertation for awarding of Doctor Science degree on 05.14.64. Industrial heat energetics. Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 1965.

30 scientific works are submitted, which contain the results of scientific and engineering researches of heat transfer in geothermal systems and wells. The creation of new mathematical models of heat transfer in geothermal systems and wells. These mathematical models are used for creation of new designs of geothermal systems. The results of geothermal systems and wells are presented. The results of mathematical models are presented.

As 33.837

453039

AB 33.831

**AB 33.831**

RECEIVED