

УДК 532.55:621.1.016

UDC 532.55:621.1.016

**ВЛИЯНИЕ ТЕПЛООБМЕНА С  
ОКРУЖАЮЩИМИ  
ПОРОДАМИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ  
ПАРАМЕТРЫ ПАРОВОДЯНОЙ СКВАЖИНЫ**

**INFLUENCE OF HEAT EXCHANGE BETWEEN  
SURROUNDING ROCK ON WELLHEAD  
EXPLOITATION PARAMETERS**

Шулюпин Александр Николаевич  
д.т.н., профессор

Shulyupin Alexandr Nikolaevich  
Dr. Sci.Tech., professor

Чермошентсева Алла Анатольевна  
к.т.н., доцент  
*Камчатский государственный технический уни-  
верситет, Россия*

Chermoshentseva Alla Anatolyevna  
Cand. Tech. Sci., Assistant professor  
*Kamchatka State Technological University, Russia*

На основе математического моделирования исследуется влияние теплообмена между пароводяной геотермальной скважиной и окружающими породами на ее эксплуатационные параметры. Теплообмен определяется с учетом двумерности (радиальная и вертикальная составляющие) распространения тепла в породах

Influence of heat exchange between steam-water geothermal well and surrounding rock on wellhead exploitation parameters is investigated by mathematical simulation. Heat exchange is determined take into consideration two-dimension (radial and vertical components) heat flow in rock

Ключевые слова: ТЕПЛООБМЕН,  
ПАРОВОДЯНАЯ ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ  
СКВАЖИНА, ОКРУЖАЮЩИЕ ПОРОДЫ

KEYWORDS: HEAT EXCHANGE, STEAM-  
WATER GEOTHERMAL WELL, SURROUNDING  
ROCK

**Введение**

На фоне глобального обострения проблем топливно-энергетического комплекса особую привлекательность приобретают альтернативные источники энергоресурсов, локальное использование которых уже сейчас оказывается экономически эффективным. Для некоторых районов Дальнего Востока России, использующих в основном привозное топливо, стратегически перспективным и практически эффективным является освоение геотермальных месторождений. При этом наибольшие перспективы связаны с освоением месторождений, теплоноситель которых находится в пароводяном состоянии [1].

Одним из основных источников информации при изучении геотермальных месторождений служат измерения расходных параметров, осуществляемые на устье разведочных и эксплуатационных скважин. Динамика устьевых параметров связана с динамикой параметров в геотермальном резервуаре, которая характеризует ресурсы месторождения. Однако для геотермальных скважин изменение параметров на устье неоднозначно харак-

теризует динамику параметров в резервуаре в связи с изменениями, имеющими место в стволе скважин. Даже для чисто водяных геотермальных скважин отмечались случаи, когда, вопреки представлениям традиционной гидрогеологии, при выпуске с постоянным устьевым давлением имело место существенное увеличение расхода на значительном временном интервале, связанное с уменьшением плотности воды вследствие увеличения ее температуры, вызванного снижением тепловых потерь энтальпии при прогреве окружающих скважину пород [2]. Но особо ярко указанная неоднозначность появляется для пароводяных скважин, где на прогрев накладываются сложные гидродинамические процессы при течении двухфазной смеси в стволе скважины.

В работе А. Палачио [3] показана необходимость учета теплообмена с окружающими породами при разработке модели течения в стволе пароводяной скважины, а в работе [4] отмечена важность учета данного явления при изучении ресурсов месторождения. Все существующие модели, позволяющие рассчитывать забойные параметры по устьевым измерениям, в лучшем случае учитывают тепловой поток в массиве окружающих пород только в радиальном направлении путем введения коэффициента нестационарного теплообмена. Вместе с тем, очевидно, что тепловой поток имеет и вертикальную составляющую, роль которой должна возрастать по мере прогрева массива окружающих скважину пород. Целью настоящей работы явилась оценка влияния теплообмена с окружающими породами на параметры пароводяных скважин с учетом наличия радиальной и вертикальной составляющих теплового потока.

### **Математическая модель**

Для достижения поставленной цели была разработана математическая модель течения теплоносителя в пароводяной скважине, учитывающая теплообмен с окружающими породами, причем тепловой поток в породах

имел как радиальную, так и вертикальную составляющую. Гидродинамическая часть была заимствована из модели WELL [5]. Принципиальные положения указанной модели таковы: течение в стволе скважины является квазистационарным, т.е. за время подъема теплоносителя от забоя до устья параметры течения меняются несущественно; поток в скважине одномерный и направлен вдоль вертикальной оси скважины; модель предполагает возможность наличия чисто водяного, чисто парового и пароводяного участков течения; в двухфазной области свойства теплоносителя описываются уравнениями состояния для чистой воды и водяного пара на линии насыщения; для пароводяного течения рассматривается два режима течения – с малым и большим паросодержанием; коэффициент трения зависит только от шероховатости внутреннего канала и диаметра скважины.

Для общей характеристики модели приведем уравнения неразрывности, движения и энергии при направлении оси  $z$  вверх (расчет ведется от забоя до устья):

$$\frac{dG}{dz} = 0, \quad (1)$$

$$-\frac{dp}{dz} = \rho g + \frac{2\tau_0}{R} + \rho v \frac{dv}{dz}, \quad (2)$$

$$-\frac{dh}{dz} = v \frac{dv}{dz} + g + \frac{dQ}{dz}, \quad (3)$$

где  $G$  – массовый расход теплоносителя,  $z$  – координата вдоль оси скважины,  $\rho$  – плотность теплоносителя,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\tau_0$  – касательное напряжение на стенках скважины,  $R$  – радиус скважины,  $v$  – скорость теплоносителя,  $h$  – удельная энтальпия теплоносителя,  $dQ$  – удельные тепловые потери в окружающие породы.

Модель WELL была разработана с ориентацией на скважины Паужетского геотермального месторождения (Камчатка), характеризующиеся невысокой энтальпией, и проверена на натурных экспериментах в соответствующих условиях [5]. В настоящей работе в указанную модель были вне-

сены изменения (использованы уравнения состояния для воды и водяного пара, действующие до давлений 110 бар [6]), что позволяет ее использование и для высокоэнтальпийных скважин. Последнее также было подтверждено сопоставлением с данными натуральных экспериментов.

Для учета тепловых потерь в радиальном и вертикальном направлениях решалась двумерная задача теплопроводности в массиве пород в цилиндрической системе координат

$$c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (5)$$

где  $T$  – температура,  $c$  – удельная теплоемкость,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $r$  и  $z$  – радиальная и вертикальная координаты, соответственно.

Зная, в результате решения (5), распределение температур в массиве пород по закону Фурье определялась плотность теплового потока на стенках скважины и собственно тепловые потери:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n}, \quad (6)$$

$$\frac{dQ}{dz} = \frac{D\pi q}{G}, \quad (7)$$

где  $q$  – плотность теплового потока,  $\frac{\partial T}{\partial n}$  – модуль температурного градиента,  $D$  – диаметр скважины.

### **Оценка влияния теплообмена на эксплуатационные параметры**

Главными параметрами, характеризующими работу пароводяной скважины, являются устьевые давление, массовый расход и удельная энтальпия теплоносителя. Указанные параметры зависят от многих факторов: условий фильтрации в резервуаре, температуры вмещающих пород, гидродинамических эффектов и т. д. Для того, чтобы выделить из множества факторов влияние теплообмена целесообразно принять параметры на забое скважины постоянными, и анализировать изменения во времени на устье,

которые будут связаны исключительно с теплообменом, т.к. только при определении тепловых потерь присутствует временной фактор.

Как отмечалось, в рассматриваемом случае массовый расход, согласно с условию квазистационарности, принимался неизменным по глубине скважины. Любые изменения массового расхода на устье скважины, характеризующиеся временами больше времени подъема теплоносителя от забоя до устья (порядка несколько секунд), будут адекватны изменениям на забое вне зависимости от теплообмена с породами. Т.е. при заданных условиях на забое тепловые потери не будут оказывать влияние на значение расхода на устье.

На рисунке 1 представлены графики зависимости устьевого давления от времени для типичной скважины Мутновского месторождения при различных расходах.

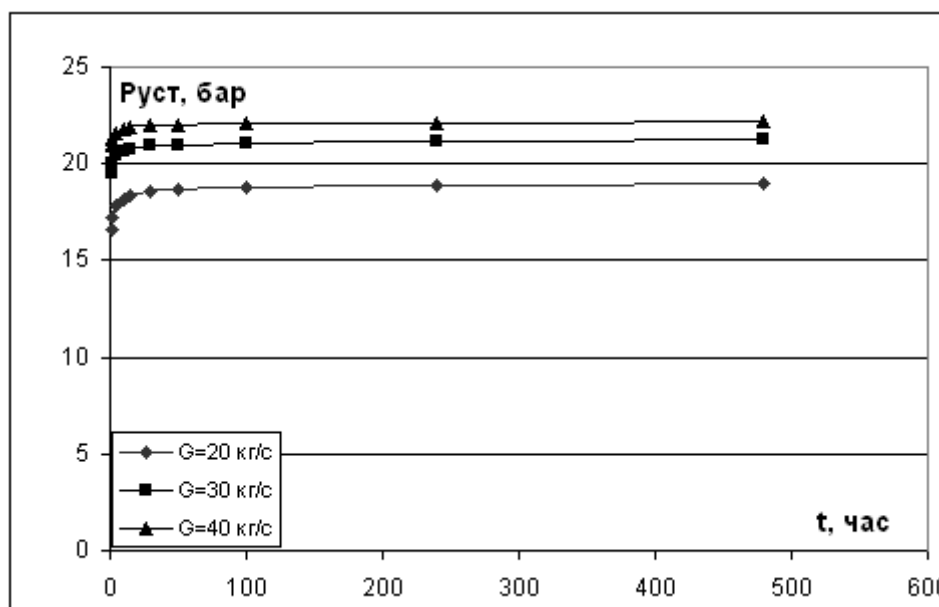


Рис.1. Зависимость устьевого давления от времени эксплуатации скважины.

Из графика видно, что после 100 часов эксплуатации происходит стабилизация устьевого давления. Причем стабилизация при больших расходах наступает раньше. Более подробно выход на стабилизацию для наименьшего расхода, из использованных в расчете, представлен на рисунке 2.

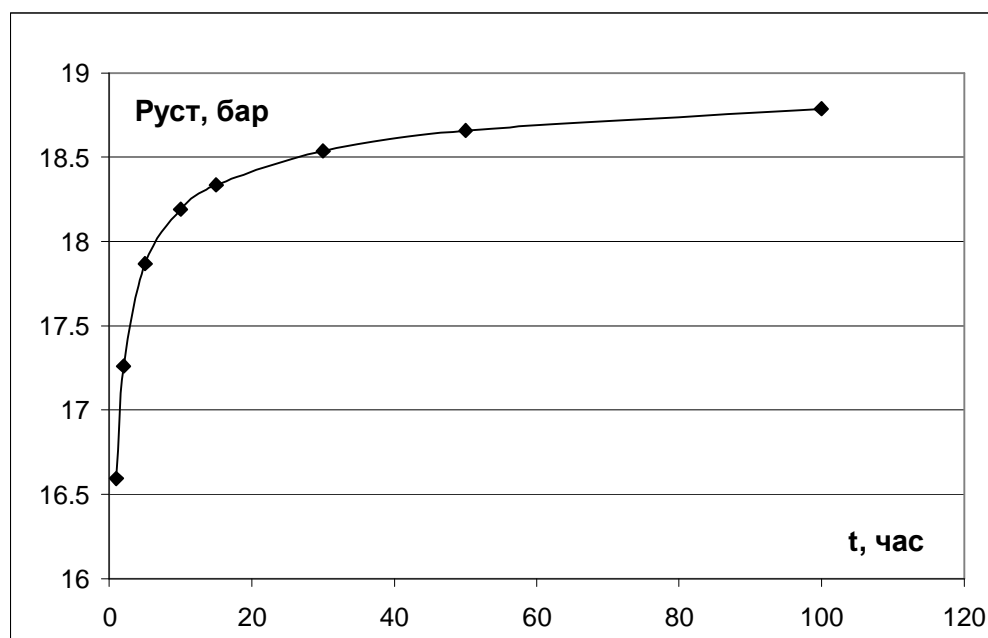


Рис 2. График зависимости устьевого давления от времени для расхода 20 кг/с.

Практически, измерение устьевого давления характеризуется значительными погрешностями, связанными с пульсациями, составляющими примерно 0.1 бар. Анализ графиков на рисунках 1 и 2 убеждает в том, что даже для расхода 20 кг/с можно говорить о стабилизации устьевого давления в пределах погрешности его определения через 2 суток с момента запуска скважины.

Влияние теплообмена скважины окружающими горными породами на энтальпии скважины на устье, наиболее ясно можно оценить из анализа изменения во времени разности энтальпий от забоя до устья. Графики изменения энтальпии в зависимости от времени эксплуатации скважины, полученные при разных расходах, приведены на рисунке 3.

Графики показывают, что стабилизация энтальпии происходит раньше при больших расходах. Ориентируясь на погрешность определения энтальпии около 4%, характерную для наиболее распространенного в мировой практике метода критического истечения и сепарации смеси [1] (метод Р. Джемса), можно сделать вывод, что для минимального расхода стабили-

зация энтальпии в пределах погрешности измерения (50 кДж/кг) происходит примерно через 2 суток.

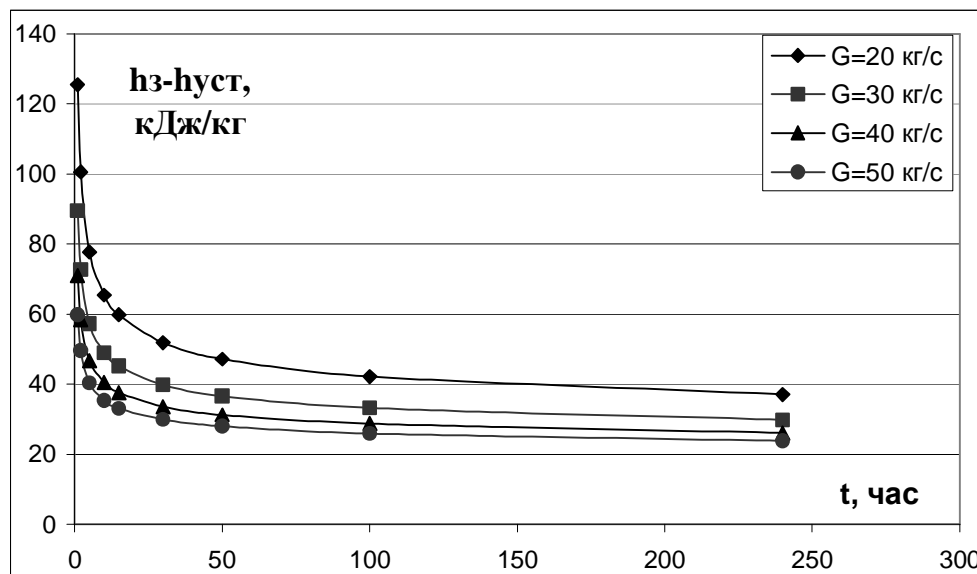


Рис.3. Изменение разности забойной и устьевой энтальпий от времени.

### Оценка влияния двумерности теплового потока

Основной особенностью разработанной модели является учет двумерности распространения тепла в породах. Для оценки актуальности учета вертикальной составляющей расчеты осуществлялись по двум вариантам: двумерного и только радиального потока тепла. Последний вариант достигался упрощением рассматриваемой модели, в котором для учета тепловых потерь использовался традиционный подход с введением коэффициента нестационарного теплообмена. В результате для соответствующей величины в уравнении (3) используется формула [5]

$$\frac{dQ}{dz} = \frac{\Delta T(z) 2\pi\lambda}{G \ln\left(1 + \sqrt{\frac{\pi a t}{R^2}}\right)}, \quad (4)$$

где  $\Delta T(z)$  – разность текущей температуры теплоносителя и его начальной температурой, равной температуре массива горных пород на бесконечной границе,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности окружающих пород,  $a$

– коэффициент температуропроводности окружающих пород,  $t$  – время с начала пуска скважины.

Фактически, упрощенный вариант являлся упомянутой моделью WELL с модифицированными для большего диапазона давлений уравнениями состояния. Расчет осуществлялся на примере типичной для Мутновского месторождения (Камчатка) скважины, имеющей глубину 1500 м, энтальпию и давление на забое 1260 кДж/кг и 90 бар.

В работе [4] уже были представлены результаты такого сравнения. Однако следует отметить, что в указанной работе выводы были сделаны на основании сравнения величин тепловых потерь только вблизи устья скважины, а для общих выводов необходимо сравнение суммарных потерь от забоя до устья.

На рисунке 4 приведен график зависимости отношения изменения энтальпии, определенной для двумерного теплового потока к изменению энтальпии, полученному для теплового потока только в радиальном направлении, от времени функционирования скважины при различных расходах.

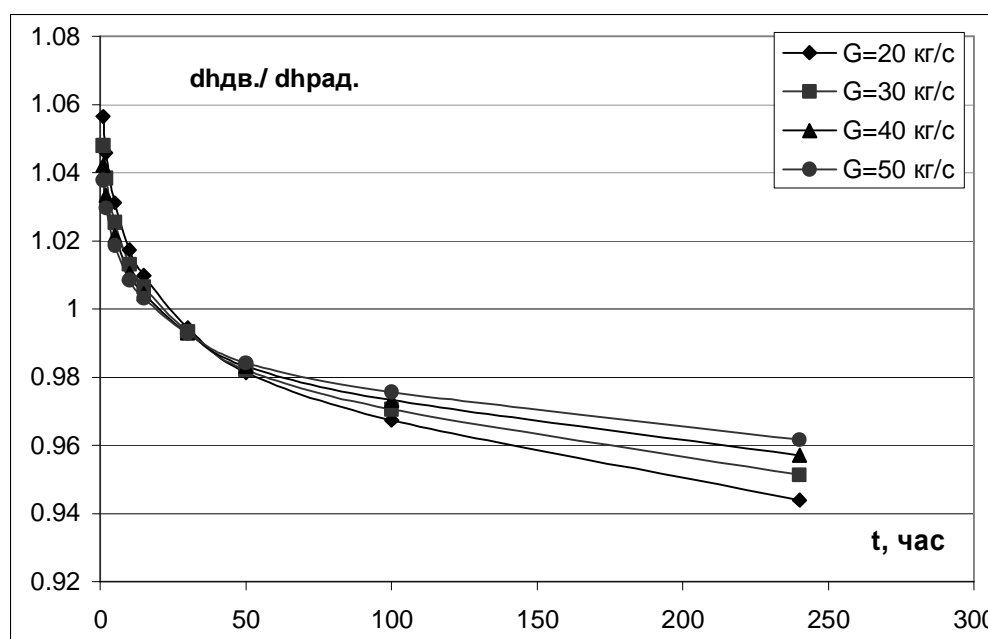


Рис.4. График зависимости от времени отношения потерь энтальпии для двумерного и только радиального потока тепла.



В первые часы работы скважины расчеты по обоим вариантам дают практически одинаковые результаты, но потери энтальпии для двумерного потока тепла несколько превышают потери для радиального. Затем, примерно через сутки (24 часа, рис.4), величина изменения энтальпии, определенного для теплового потока в радиальном направлении начинает давать завышенные результаты по сравнению с двумерным вариантом. Для погрешности определения энтальпии 4% расхождения между вариантами начинают играть заметную роль после 2 суток работы скважины.

Следует отметить, что вопреки ожиданиям для больших времен двумерные потери оказались меньше радиальных. Данный факт противоречит простым рассуждениям – наличие вертикальной составляющей обуславливает дополнительный поток тепла через поверхность земли. Однако подобный результат независимо был получен Т.Е. Созиновой [7], исследовавшей распространение тепла в массиве окружающих скважину пород. Следовательно можно предположить наличие погрешности в определении коэффициента нестационарного теплообмена, следовательно, неточности формулы (4).

Основной вывод сравнения вариантов – для учета тепловых потерь от скважины в окружающие горные породы для небольших интервалов времени (до 2 суток) можно ограничиться определением теплового потока только в радиальном направлении (формула (4)). Но для определения влияния тепловых потерь на изменение энтальпии в течение длительного времени, необходимо учитывать не только радиальную, но и вертикальную составляющую теплового потока, т.е. рассчитывать двумерный тепловой поток.

## **Выводы**

1. На примере типовой скважины Мутновского месторождения было установлено, что теплообмен скважины с окружающими породами оказы-

вает заметную роль на эксплуатационные параметры в течение первых 2 суток с момент запуска. После чего влияние становится меньше вариаций соответствующих параметров в пределах погрешности их измерений.

2. При расчете тепловых потерь на основе двумерной задачи теплопроводности в массиве окружающих скважину пород, расхождения с традиционным подходом, использующим коэффициент нестационарного теплообмена, начинают играть заметную роль после 2 суток с момента запуска скважины.

3. Сопоставление выводов 1 и 2 показывает, что для учета тепловых потерь в окружающие породы достаточно учитывать радиальный поток тепла с использованием подхода, основанного на введении коэффициента нестационарного теплообмена.

## Литература

1. Шулюпин А.Н. Пароводяные течения на геотермальных промыслах. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2004. 149 с.
2. Шулюпин А.Н. Определение фильтрационных параметров пласта по возмущающей скважине в условиях термолифта // Вулканологические исследования на Камчатке: Сборник научных работ; Институт вулканологии. Петропавловск-Камчатский, 1988. С. 129-132.
3. Palacio A. Effect of heat transfer on the performance of geothermal wells // Geothermics, 1990. Vol.19. № 4. P. 311-328.
4. Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А. Оценка влияния вертикальной составляющей теплового потока на потери энтальпии пароводяной скважины // Подземная гидросфера: Материалы Всероссийского совещания по подземным водам востока России. Иркутск: Изд-во ИрГУ, 2006. С. 309-312.
5. Шулюпин А.Н. Течение в геотермальной скважине: модель и эксперимент // Вулканология и сейсмология, 1991. № 4. С. 25-31.
6. Ривкин С.Л., Кремневская Е.А. Уравнения состояния воды и водяного пара для машинных расчетов процессов и оборудования электростанций // Теплоэнергетика, 1977. № 3. С. 69-73.
7. Созинова Т.Е. Разработка метода расчета и исследования теплового и термонапряженного состояния крепи геотермальных скважин: Автореферат дис... канд. тех. наук. Иваново, 1997. 24 с.