

УДК 532.529:620.91

Пароводяное течение в геотермальной скважине

А.Н. Шулюпин¹, А.А. Чермошнцева²

¹*Институт горного дела ДВО РАН, Хабаровск*

²*КамчатГТУ, Петропавловск-Камчатский*

E-mail: ans714@mail.ru

Представлена математическая модель для расчета пароводяного течения в геотермальной скважине на участке питания. Модель предполагает изменение массового расхода смеси по длине канала. Приведены уравнения неразрывности, движения и энергии, учитывающие эффект изменяющейся массы потока, являющиеся основой модели, и ключевые зависимости. Модель реализована в виде компьютерной программы, предназначенной для расчета параметров вверх по потоку (вниз от верхней границы зоны питания). Применение модели для скважин Мутновского месторождения парогидротерм позволило выдвинуть предположение о гейзерном механизме возникновения недавно обнаруженных колебаний давления с периодом более десятка минут. Предложен способ предотвращения указанных колебаний.

Ключевые слова: пароводяное течение, скважина, питающая зона, термоводоносный комплекс, математическая модель, расход.

Введение

Использование глубинного тепла Земли является динамично и устойчиво развивающимся направлением мировой энергетики [1]. Геотермальная энергетика России представлена пятью ГеоЭС, три из которых расположены на Камчатке, две — на Курилах. Источником теплоносителя российских, как и большинства иностранных, ГеоЭС являются месторождения парогидротерм. Одна из ключевых задач при освоении таких месторождений заключается в расчете течения пароводяной смеси в добычных скважинах для определения параметров в геотермальном резервуаре и для прогноза эксплуатационных параметров скважин.

Обзор предлагаемых методов и моделей для расчета течений в пароводяных скважинах представлен в работе [2]. Все существующие рекомендации основаны на уравнениях, предполагающих неизменность массового расхода теплоносителя по длине канала течения. Следовательно, эти рекомендации корректны только до границы питающих зон, ниже которой имеет место изменение расхода.

В некоторых случаях, например, в наиболее популярной модели HOLA [3–5], учитывается дискретное изменение расхода от одной питающей зоны к другой, но сама гидродинамическая постановка задачи содержит положение о постоянстве расхода. Это не дает ответа на вопрос о том, как меняются параметры потока в самих зонах

питания, имеющих протяженность до сотен метров. Вместе с тем при течении с изменяющимся расходом имеют место эффекты, связанные с действием инерционных сил, вызываемых присоединением массы. Могут возникать аномально высокие градиенты давления, вызывающие быстрое снижение скоростей в потоке и дополнительный рост гравитационной составляющей.

Отечественная практика не предполагает отдельного испытания питающих зон, что вносит неопределенность расхода уже после верхней зоны питания. Но и в случае отдельного испытания, требующего применения сложного оборудования и являющегося непростой технической задачей, расходы зон определяются с большой погрешностью, между зонами возможны перетоки по затрубному пространству обсадной колонны. Это, а также возможность большой протяженности зон делает дискретный подход к описанию течений ниже верхней границы зон притоков, используемый в упомянутой модели HOIA, неэффективным.

В настоящей работе предложена математическая модель пароводяного течения в скважинах, предполагающая изменение массового расхода смеси по длине канала. Также рассмотрены теплофизические процессы в части скважины, расположенной ниже зон питания.

Математическая модель

Геотермальная скважина предназначена для вскрытия термоводоносного комплекса через толщу непроницаемых пород. Термоводоносный комплекс на геотермальных месторождениях Камчатки и Курил состоит из пород, характеризующихся проницаемостью трещинно-жильного типа. По мере бурения скважина пересекает от 1 до 7 питающих зон, толщиной от 1 до 300 м. Ствол скважины состоит из верхнего участка с непроницаемыми стенками, участка притоков и нижнего участка с непроницаемыми стенками (рис. 1). Предлагаемая математическая модель описывает течение на участке притоков. Этот участок состоит из труб, в стенке которых сделаны отверстия для поступления флюида из термоводоносного комплекса. В некоторых скважинах, пробуренных на стадии разведки месторождения и до сих пор находящихся в эксплуатации, данный участок полностью или частично представлен открытым стволом (без установки труб). У большинства скважин ниже рассматриваемого участка располагается

«глухой» участок, наличие которого вызвано либо отсутствием фильтрационных отверстий в обсадных трубах, либо отсутствием питающих зон, либо выходом из термоводоносного комплекса в область непроницаемых пород.

Предлагаемая модель создана на базе модели WELL-4 [2], используемой для расчета течений на участке 1 (рис. 1). Основные положения модели WELL-4:

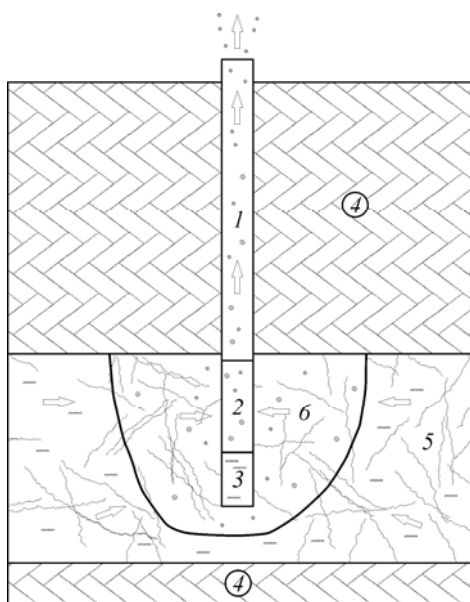


Рис. 1. Участки с различными условиями течения в пароводяной скважине и термоводоносном комплексе.

1 — верхний участок скважины с непроницаемыми стенками, 2 — участок питающих зон, 3 — нижний участок скважины с непроницаемыми стенками, 4 — непроницаемые породы, 5 — термоводоносный комплекс, 6 — область двухфазного течения в термоводоносном комплексе.

- течение квазистационарно (используются стационарные уравнения гидродинамики, со временем меняется тепловой поток на стенках, входящий в уравнение энергии);
- течение может быть как пароводяным, так и чисто водяным;
- базовые уравнения для двухфазного течения получены в рамках интегрального метода и двухскоростной модели;
- возможна реализация трех режимов двухфазного течения: с малым паросодержанием (структуры с непрерывной жидкой фазой), переходный и с большим паросодержанием (структуры с непрерывной газовой фазой).

В соответствие с изменившимися условиями новая модель основана на модифицированных уравнениях неразрывности, движения и энергии, учитывающих изменение массового расхода. Ориентируясь на отечественный подход, в настоящей работе дифференциация по зонам питания не рассматривается — питание скважины моделируется одной зоной, распространяющейся от верхней границы зон питания до их нижней границы. Не имея возможности конкретизировать функцию изменения расхода с глубиной, принято простейшее линейное изменение расхода. Таким образом, для уравнения неразрывности имеем

$$dG = (G/L)dz, \quad (1)$$

где G — массовый расход смеси, z — направленная вверх координата вдоль оси трубы, L — толщина зоны питания (длина участка 2).

Уравнение движения дополняется членом, отвечающим за изменение расхода смеси (последний член левой части):

$$\begin{aligned} \rho'' \varphi v'' dv'' + \rho'(1-\varphi)v' dv' + \frac{(v''-v')}{\pi R^2} G dx + \frac{(v''x + v'(1-x))}{\pi R^2} dG = \\ = -dp - \frac{2\tau}{R} dz - (\rho''\varphi + \rho'(1-\varphi))g dz, \end{aligned} \quad (2)$$

где ρ'' , ρ' — плотности пара и воды, φ — истинное объемное паросодержание, v'' и v' — скорости пара и воды, p — давление, R — радиус скважины, τ — касательное напряжение на стенке, g — модуль ускорения свободного падения.

Уравнение энергии в таком случае имеет дополнительную составляющую в изменении кинетической энергии (последний член левой части) и пренебрегает изменением удельной энергии за счет кондуктивного теплового потока на стенках:

$$dh + g dz + de + e dG/G = 0, \quad (3)$$

где h — удельная энтальпия смеси, e — удельная кинетическая энергия.

Остальные критерии и формулы новой модели идентичны модели WELL-4. Отметим ключевые моменты. Существование режима с непрерывной газовой фазой, ассоциирующегося с дисперсно-кольцевой структурой, требует выполнения двух условий: паросодержание должно быть достаточным для формирования ядра потока; скорость в ядре должна быть достаточной для удержания жидкой пленки на стенке. Формализация этих условий осуществляется соотношениями:

$$\beta > 0,8, \quad (4)$$

$$\rho'' w^2 / g(\rho' - \rho'') 2R > 1, \quad (5)$$

где β — объемное расходное паросодержание, w — приведенная скорость смеси, определяемая также как скорость, соответствующая гомогенной модели.

Переходным считается режим, в котором не достигнуты указанные условия, но скорость пара достигла критической скорости движения насыщенной воды, т.е. на структуру потока начинает влиять локальная критичность.

Принципиальным вопросом при описании газожидкостных течений является выбор формул, определяющих истинную скорость одной из фаз или коэффициент скольжения (отношение скоростей газа и жидкости) и касательное напряжение на стенке трубы. Для определения коэффициента скольжения при дисперсно-кольцевом течении используется формула З.Л. Миропольского [6], модифицированная с учетом стремления коэффициента скольжения к 1 при стремлении скоростей к критическим значениям:

$$s = 1 + \frac{13,5(1 - p/p^*)(1 - M^2)}{Fr^{5/12} Re^{1/6}}, \quad (6)$$

где s — коэффициент скольжения, p^* — давление в критической точке ($22,115 \cdot 10^6$ Па), Fr , Re и M — числа Фруда, Рейнольдса и Маха.

Для определения скорости пара при течении с малым паросодержанием используется хорошо известная формула [7], успешно применяемая для соответствующих структур:

$$v'' = 1,2w + 0,35\sqrt{2gR(1 - \rho''/\rho')}. \quad (7)$$

Скорость пара в переходном режиме определяется формулой [8]

$$v'' = w + v_c(1 - w/v_s), \quad (8)$$

где v_c — критическая скорость движения насыщенной воды, v_s — скорость пара, определяемая формулой (7).

Определение касательного напряжения для всех режимов осуществляется по формуле [8]

$$\tau = \lambda(\rho''v''^2 \varphi + \rho'v'^2(1 - \varphi))/8, \quad (9)$$

где λ — коэффициент трения.

Уравнения, соотношения и формулы (1)–(9), наряду с другими известными формулами, связывающими параметры газожидкостного течения в двухскоростной модели [8], составили новую математическую модель, описывающую течение с изменяющимся по направлению движения массовым расходом смеси, названную WELL-4G. Отметим, что в случае нелинейности изменения расхода с глубиной в питающей зоне вместо (1) можно ввести другую зависимость без изменения остальной части. Модель была реализована в компьютерной программе, предназначенной для расчета параметров вверх по потоку (вниз от верхней границы зоны питания). При этом использовалась та же схема, что и при реализации модели WELL-4 [2], за исключением небольшого изменения блока входных данных. В новой модели в качестве одной из исходных величин используется текущая удельная энтальпия смеси. В предшествующем случае в качестве вводимой исходной величины использовалась практически измеряемая удельная энтальпия заторможенного потока смеси, что требовало дополнительного блока для расчета текущей энтальпии на устье.

Разработанную модель логично использовать в комплексе с предшествующей моделью: от устья скважины до верхней границы зон питания (на участке 1, рис. 1) расчет осуществляется по модели WELL-4, ниже (на участке 2) — по модели WELL-4G. В качестве примера на рис. 2 представлены расчетные профили давления и температуры в работающих скважинах 24, 042 и 037 Мутновского месторождения парогидротерм, характеризующиеся различием термодинамических условий в зоне питания. Скважина 24 работает с устьевым давлением 7,9 бар, имеет расход 15,5 кг/с, энтальпию пароводяной смеси 1020 кДж/кг, глубину 1300 м, питание в интервале 1000–1300 м. Скважина 042 работает с устьевым давлением 8,4 бар, имеет расход 69,9 кг/с, энтальпию смеси 1200 кДж/кг, глубину 1860 м, питание в интервале 1355–1837 м. Скважина 037 работает

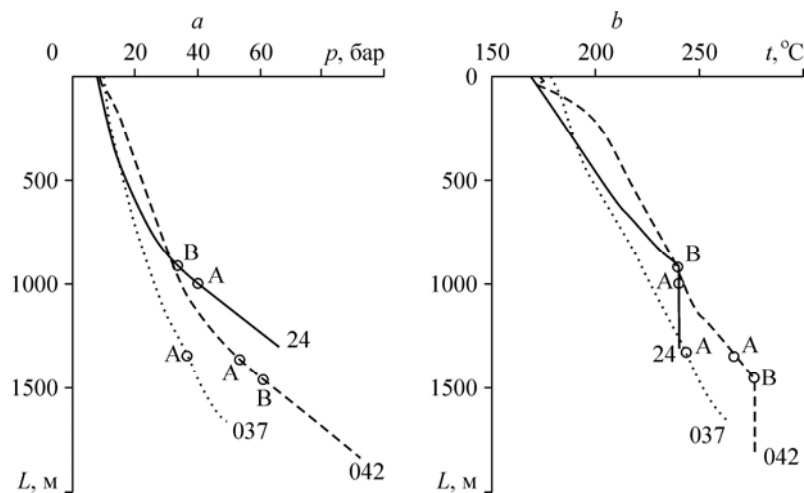


Рис. 2. Распределение давления и температуры по глубине в работающих скважинах 24, 042, 037.

Точка А соответствует верхней границе зоны питания (граница участков 1 и 2 на рис. 1), точка В соответствует переходу от однофазного течения к двухфазному.

с устьевым давлением 9,6 бар, имеет расход 21,5 кг/с, энтальпию смеси 1200 кДж/кг, глубину 1771 м, питание в интервале 1339–1669 м. В зоне питания перечисленных скважин теплоноситель находится в однофазном (24), двухфазном (037) состояниях, в скважине 042 имеются участки однофазного и двухфазного течения.

Определение профиля давления в стволе работающей скважины, вскрывающей питающую зону, и сопоставление их с данными исследований в стационарных условиях [9] позволит исследовать фильтрационные потоки в призабойной зоне, оказывающие существенное влияние на производительность скважин. Результаты этих исследований могут быть основой для разработки технологических решений по оптимизации режима эксплуатации скважин и вовлечению в эксплуатацию скважин, использование которых ранее считалось бесперспективным.

Теплофизические процессы в «глухом» участке

Пульсации параметров потока являются характерной особенностью газожидкостных, в том числе пароводяных, течений. Такие пульсации, имеющие период порядка секунды и амплитуду порядка десятых бара, легко наблюдать при измерении давления на устье пароводяных скважин. В конце 2013 г. на Мутновской ГеоЭС (Камчатка) было начато использование самопишущих манометров, которые показали наличие колебаний устьевого давления скважин с периодом от десятка минут до нескольких часов и амплитудой от десятых до единиц бара. Эти колебания, имеющие период, значительно превышающий время подъема теплоносителя от забоя до устья скважины, не укладываются в рамки традиционных представлений. Все добычные скважины ГеоЭС Камчатки работают в режиме парлифта, в статическом состоянии уровень воды в открытой скважине находится ниже земной поверхности, и повышение давления может привести к самозадавливанию скважины и выводу ее из эксплуатации. Поэтому важно знать причины возникновения колебаний для того, чтобы разработать способы их предотвращения.

Расчеты по моделям WELL-4 и WELL-4G для скважин Мутновского месторождения показали, что в большинстве случаев на всем протяжении участков 1 и 2 (рис. 1) теплоноситель находится в двухфазном состоянии. Термоводоносный комплекс данного месторождения содержит воду в однофазном состоянии, т.е. схема потоков соответствует изображенной на рис. 1. Работа скважины вызывает депрессию в призабойной области, вызывая там кипение (область б). Температура пароводяной смеси в стволе скважины

ниже температуры воды и окружающих пород в термоводоносном комплексе. В нижней части участка 2 скорость потока невысока, что способствует осаждению «холодной» воды в «глухом» участке 3. Вода в заполненном водой «глухом» участке получает тепло от окружающих пород. Температура пород поддерживается восходящими кондуктивными потоками тепла и конвекцией флюида в термоводоносном комплексе. Температура воды, испытывающей гидростатическое давление, может существенно превысить температуру в верхней части участка 3, определяемую давлением и температурой пароводяной смеси в нижней части участка 2. Начало кипения в «глухом» участке запустит механизм парлифта и приведет к извержению вскипающей массы в ствол скважины. Таким образом, внутри скважины имеются предпосылки для возникновения нестационарных процессов, характерных для гейзеров [10]. Заметим, что протяженность участка 3 в некоторых скважинах Мутновского месторождения превосходит 100 м, а разность температур в его верхней части и в термоводоносном комплексе может достигать десятков градусов, поэтому возможно извержение большой массы воды. Например, в скважине 037 протяженность «глухого» участка составляет 102 м при внутреннем диаметре обсадных труб 0,15 м, расчетная температура в нижней части участка 2 — 262 °С, измеренная температура на забое скважины в статическом состоянии, характеризующая температуру термоводоносного комплекса — 300 °С.

Разгрузка «глухого» участка осуществляется не в открытое пространство, а в ствол скважины, окруженный проницаемыми породами. Поэтому интенсивность извержения будет меньше по сравнению с традиционным гейзером. Более того, после извержения будет иметь место приращение расхода за счет массы, полученной питающей зоной в процессе извержения. За счет этого и возможного демпфирующего эффекта в процессе течения на устье скважины отклик извержения будет не столь резким, как в традиционном гейзере.

Колебания параметров потока, связанные с рассмотренным механизмом, легко могут быть предотвращены путем ликвидации «глухого» участка. Технологически данное мероприятие не должно вызывать затруднений — достаточно засыпать скважину необходимым количеством плотного вещества или залить ее соответствующим объемом цементного раствора, но проще и надежнее ликвидацию «глухого» участка осуществлять на этапе строительства скважин.

Задача ликвидации колебаний давления является наиболее важной для Паужетской ГеоЭС (Камчатка). Технология сбора теплоносителя для этой станции чувствительна к снижению устьевых давлений в скважинах. При падении давления на устье магистральный трубопровод может «задавить» скважину. В результате ГеоЭС теряет пар не только от «задавленной» скважины, но и частично из магистрального трубопровода, пар из которого поступает в скважинный сепаратор и сбрасывается через водяную линию, идущую на слив. Такие случаи неоднократно отмечались на практике. Увеличение со временем числа скважин с двухфазной зоной питания на Паужетском месторождении парогидротерм [11] указывает на необходимость целенаправленного изучения, в том числе с использованием предложенной модели, процессов, протекающих ниже верхней границы зон питания.

Выводы

1. Для расчета пароводяного течения на участке 2 (рис. 1) предложена математическая модель WELL-4G.
2. Участок питания добычных скважин Мутновского месторождения на всем протяжении заполнен пароводяной смесью.
4. Внутри скважины имеются предпосылки к возникновению нестационарных процессов, обусловленных извержением вскипающей воды из участка 3 (рис. 1), по механизму гейзера.
5. Для предотвращения колебаний параметров смеси в скважинах, вызванных извержением воды из участка 3 (рис. 1), достаточно ликвидировать данный участок.

Список литературы

1. Bertani R. Geothermal power generation in the World 2010–2014. Update report // Proc. WGC 2015. Melbourne, Australia, 2015. No. 01001. 19 p.
2. Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А. О расчете пароводяного течения в геотермальной скважине // Журнал технической физики. 2013. Т. 83, № 8. С. 14–19.
3. Björnsson G. A multy-feedzone geothermal wellbore simulator // Lawrence Berkeley Laboratory. Report LBL-23546, 1987. 117 p.
4. Кирюхин А.В., Асаулова Н.П., Манухин Ю.Ф., Рычка Т.В., Сугробов В.М. Использование численного моделирования для оценки эксплуатационных запасов месторождений парогидротерм (на примере Паужетского геотермального месторождения) // Вулканология и сейсмология. 2010. № 1. С. 56–76.
5. Elmi D., Axelsson G. Application of a transient wellbore simulator to wells HE-06 and YE-20 in the Hellisheidi geothermal system, SW-Island // Proc. 34-th Workshop on Geotherm. Reserv. Engin. Stanford University, 2009. SGP-TR-187.
6. Кутепов Ф.М., Стерман Л.С., Стюшин Н.Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. М.: Высшая школа, 1986. 448 с.
7. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент / Под ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. М.: Энергоатомиздат, 1988. 560 с.
8. Шулюпин А.Н. Вопросы гидравлики пароводяной смеси при освоении геотермальных месторождений. Владивосток: Дальнаука, 2011. 262 с.
9. Мальцева К.И. Формирование профиля давления в геотермальном резервуаре на примере Мутновского месторождения парогидротерм // Вулканология и сейсмология. 2012. № 1. С. 56–64.
10. Дроздин В.А. Физическая модель вулканического процесса. М.: Наука, 1980. 92 с.
11. Шулюпин А.Н., Чермошенцева А.А. Оценка изменения условий в термоводоносном комплексе Паужетского месторождения парогидротерм // Известия вузов. Горный журнал. 2014. № 4. С. 82–88.

*Статья поступила в редакцию 1 августа 2014 г.,
после доработки — 5 сентября 2014 г.*