

УДК 551.224

Т.К.ПИСКАЧЕВА

ОПРОБОВАНИЕ ПАРОВОДЯНЫХ СКВАЖИН И ЕГО МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Опробование скважин проводят для изучения начальных гидродинамических, термодинамических и гидрохимических параметров, прогноза возможных изменений их в условиях эксплуатации и получения исходной информации для подсчета эксплуатационных запасов термальных вод. Основным видом опробования скважин и продуктивных зон при разведке высокотемпературных геотермальных месторождений является проведение выпусков теплоносителя, поэтому изучение термогидродинамических процессов в скважине и коллекторе, сопровождающих этот вид работ, представляет собой весьма актуальную научную и практическую задачу. Ее актуальность обусловлена, прежде всего, недостаточной изученностью процессов фильтрации двухфазных смесей и движения их в скважинах. Вместе с тем в условиях применения гидравлического метода подсчета эксплуатационных запасов, получившего преимущественное распространение для высокотемпературных месторождений, от правильного понимания физической сущности термогидродинамических процессов, происходящих в скважинах и коллекторах, во многом зависит интерпретация и оценка результатов опытных и опытно-эксплуатационных выпусков, определяющих перспективность освоения этих типов геотермальных месторождений.

Пароводяная скважина и вскрытая ее продуктивная зона представляют собой единую гидравлическую систему, границами которой являются устье скважины и сечение зоны, проходящее через контур дренирования для данной скважины. Указанная система включает в себя две области, сопрягающиеся в прифилтровой зоне, движение теплоносителя в которых подчиняется различным закономерностям: область движения в скважине, где действует закон гидравлики, и область фильтрации в продуктивной зоне, описываемой законами гидродинамики. Специфической для пароводяных скважин особенностью является относительно низкое устьевое давление по сравнению с давлением насыщенного водяного пара для данной температуры, следствием чего является фазовый переход. При этом граница раздела сред пароводяная смесь — однофазная жидкость, являющаяся фронтом парообразования, в зависимости от соотношения между пропускной способностью скважины и проводимостью продуктивной зоны может залегать выше или ниже ее кровли, предопределяя наличие фазового перехода в стволе скважины или в зоне.

Забойное давление в пароводяной скважине можно выразить через глубину залегания уровня парообразования H_g и давление насыщенного пара на этом уровне $P_{нас}$:

$$P_{\text{заб}} = P_{\text{нас}} + \rho' g (H_c - H_c'), \quad (1)$$

где H_c - глубине скважины; ρ' - плотность воды; g - ускорение свободного падения.

Глубина парообразования, как будет показано ниже, является функцией расхода пароводяной смеси. Следовательно, в отличие от обычных артезианских скважин, давление на забое пароводяной скважины, с одной стороны, определяет величину депрессии на продуктивную зону, вызывающую приток в скважину, а с другой стороны, зависит от расхода, который может принять скважина. Очевидно, что устойчивый режим совместной работы скважины и продуктивной зоны должен соответствовать такому значению расхода G , которое одновременно удовлетворяет уравнению фильтрации в пласте и уравнению движения в скважине, т.е. отвечает точке пересечения характеристик пропускной способности скважины $G = f_1(P_{\text{заб}})$ и проводящей способности продуктивной зоны $G = f_2(P_{\text{заб}})$. К поиску этой общей точки двух характеристик и сводится, по существу, алгоритм решения задачи о совместной работе пароводяной скважины и продуктивной зоны.

Наиболее эффективным путем решения этой задачи представляется математическое моделирование термогидродинамических процессов на основе вычислительных экспериментов, позволяющих выявить закономерности термогидродинамики пароводяных смесей, учесть особенности термогидродинамических процессов в реальных условиях конкретной скважины и определить те или иные характеристики процесса.

Математическую модель процесса движения пароводяной смеси в скважине с учетом существующих исследований в области термогидродинамики пароводяных скважин [1-3, 4, 6] можно представить следующим образом. Будем считать, что пароводяная смесь в скважине находится в состоянии насыщения; в продукции скважины отсутствуют примеси каких-либо газов; скважина работает при установившемся дебите и изменяющемся давлении на забое, отвечающем условиям фильтрации в продуктивной зоне. Для снижения потребностей численных расчетов, ввиду сложности точного определения коэффициентов теплоотдачи, движение теплоносителя будем считать квазистационарным, т.е. будем рассматривать адиабатический режим течения пароводяной смеси. Тогда, принимая сплошную модель течения смеси, предусматривавшую осреднение по сечению и по времени расходных и термодинамических характеристик потока, уравнение движения можно записать в виде

$$-\frac{\partial p}{\partial z} = \rho_s' g (1 - \varphi) + \rho_s' g \varphi + \frac{2\tau_k}{R_0}, \quad (2)$$

где p - давление; φ - истинное паросодержание; τ_k - касательное напряжение; R_0 - радиус скважины; верхние индексы штрих и два штриха относятся соответственно к воде и пару, нижний индекс s означает, что параметр берется в состоянии насыщения.

Истинное паросодержание представляет собой долю сечения трубы, занятую паровой фазой, и может быть найдено по формуле, предложенной Л.С. Никлиным [5],

$$\psi = \frac{0,833 \beta}{1 + 0,202 (Fr)^{-0,5}}, \quad (3)$$

где β - объемное паросодержание,

$$\beta = \frac{\eta \rho'_s}{\rho_s'' + \eta (\rho'_s - \rho_s'')}; \quad (4)$$

η - степень сухости пара,

$$\eta = \frac{i_{см} - i'_s}{i_s'' - i'_s}; \quad (5)$$

$i_{см}$ - энтальпия смеси; Fr - критерий Фруда, $Fr = 2 \sigma_{см} / R_0 g$; $\sigma_{см}$ - скорость течения смеси,

$$\sigma_{см} = \frac{\sigma}{\pi R_0^2} \left(\frac{1-\eta}{\rho'_s} + \frac{\eta}{\rho_s''} \right),$$

Касательное напряжение в потоке смеси на стенке скважины выражается через ее расход с помощью зависимостей, соответствующих принятой модели течения смеси.

В работе [8] при построении математической модели пароводяной скважины предлагалось рассматривать два типа течений: пробковый (пузырьковый), в котором скорости фаз хотя и не равны, но одинаково направлены, и кольцевой, характеризующийся пульсирующим движением жидкости, находящейся в расположенной вдоль стенки скважины пленке, с преобладанием нисходящего течения и переносом жидкости вверх за счет волн возмущения. На основе анализа уравнений волнового движения пленки жидкости при кольцевом режиме течения смеси и с учетом экспериментальных данных А. Берглюа и М. См [2] получены условия перехода от пробкового режима к кольцевому в виде соотношений

$$V_* = \frac{Q' + Q''}{\pi R_0^2} \left(\frac{\rho'_s - \rho_s''}{g \sigma} \right)^{0,25} \left(\frac{\rho_s''}{\rho_s'} \right)^{0,5}; \quad (6)$$

$$V_{гр} = [0,82 - 0,0017 (\mu'_s / \mu_s'')^{0,6}] \cdot 10^{(5,3 + 115 \mu'_s / \mu_s'')(1-\phi)},$$

где V_* - безразмерная скорость течения смеси; $V_{гр}$ - безразмерная максимальная скорость пузырькового режима течения; Q - объемные расходы фаз; σ - поверхностное натяжение; μ - динамическая вязкость фаз.

При $V_* \leq V_{гр}$ режим можно характеризовать как пузырьковый, при $V_* > V_{гр}$ - как кольцевой.

Для пузырькового режима течения касательное напряжение на стенке трубы [7]

$$\tau_k = \frac{\xi_{см}}{8} \frac{G^2}{\pi R_0^2} \left[\frac{(1-\eta)^2}{(1-\phi) \rho_s'} + \frac{\eta^2}{\psi \rho_s''} \right], \quad (7)$$

где $\xi_{см}$ - коэффициент гидравлических сопротивлений смеси, полученный на основе обобщения экспериментальных данных,

$$\epsilon_{см} = \epsilon_0 \frac{1 - \psi}{1 - \beta};$$

ϵ_0 - коэффициент гидравлических сопротивлений смеси при однофазном движении,

$$\epsilon_0 = 0,067 \left(\frac{158}{Re_{см}} + \frac{2k_{ш}}{d} \right)^{0,2};$$

Re - критерий Рейнольдса для смеси,

$$Re_{см} = \frac{8}{\pi R_c} \left(\frac{G(1-\eta)}{\mu'_s} + \frac{G\eta}{\mu''_s} \right);$$

$k_{ш}$ - шероховатость трубы.

Для кольцевого режима течения

$$\tau_x = \frac{\epsilon_{см}}{8} \frac{G^2}{\pi R_0^2} \left(\frac{1-\eta}{1-\psi} \right)^2 \frac{1}{\rho'_s}, \quad (8)$$

где $\epsilon_{см} = \epsilon_0 \psi$.

При $Re \leq 1500$ - ламинарном режиме течения пленки жидкости - $\epsilon_0 = 64/Re$, $\psi = 0,95 - (0,22 - 0,055\Phi Re) \lg 1500/Re$; при $Re > 1500$ - турбулентном режиме течения - $\epsilon_0 = 0,3164/Re^{0,25}$, $\psi = 0,95$. Здесь

$$Re = \frac{8Q'\rho'_s}{\pi R_0 \mu'_s}, \quad \Phi = \frac{\psi(1-\psi)g\delta}{\pi^2 R_0^3}.$$

Задача (2)-(8) решается численно конечно-разностным методом. Значения давления на забое скважины находим из решения задачи фильтрации в продуктивной зоне при заданном расходе. Решая уравнение движения, получим распределение давлений по стволу скважины и давление на устье p_y . При этом энтропию смеси $i_{см}$ определяем по значениям давления и температуры на забое скважины. Если $i_{см} < i'_s$, степень сухости пара имеет отрицательное значение и в расчетах принимаем $\eta = 0$. По значению i , при котором произошла смена знака у η , фиксируется глубина парообразования H_g для данного значения расхода.

В результате решения задачи могут быть получены характеристика пропускной способности скважины $G = f_1(p_{заб})$, позволяющая установить условия совместной работы скважины с продуктивной зоной, и график производительности пароводяной скважины $G = f_2(p_y)$.

Для расчета проводимости продуктивной зоны в том случае, когда вскипание флюида происходит в стволе скважины, в зависимости от времени продвижения выпусков используются аналитические решения уравнений стационарной и нестационарной фильтрации, известные под названием формул Дюпюи и Тейлора соответственно.

При наличии фазового перехода в продуктивной зоне или в случае вскипания скважиной пароводяной смеси для получения характеристики проводимости продуктивной зоны необходимо решить систему уравнений неизотермической

фильтрации, построенную на основе законов сохранения массы, количества движения и энергии. Рассмотрим один из вариантов построения такой системы.

В проницаемой среде уравнение количества движения может быть заменено более простым уравнением Дарси, которое для фильтрации двухфазного флюида, состоящего из жидкости и пара в виде раздельных фаз или пароводной смеси, записывается для каждой фазы в отдельности:

$$\bar{v}' = - \frac{R' \rho' k}{\mu'} (\text{grad } p - \rho' \bar{g});$$

$$\bar{v}'' = - \frac{R'' \rho'' k}{\mu''} (\text{grad } p - \rho'' \bar{g}),$$

где \bar{v}' и \bar{v}'' - скорости соответственно жидкой и паровой фаз; k - проницаемость пласта.

Полные давления p в жидкой и паровой фазах полагаются равными, т.е. капиллярным давлением, связанным с поверхностным натяжением, пренебрегаем. Косвенно капиллярность учитывается введением относительных проницаемостей R' для жидкой фазы и R'' для пара. Для их определения используются формулы, полученные М.Сори [10]:

$$R' = \left(\frac{1 - \beta - \beta_{11}}{1 - \beta_{11} - \beta_{21}} \right)^4 \quad \text{при } 0,05 < \beta < 0,7;$$

$$R' = 1 \quad \text{при } \beta \leq 0,05;$$

$$R' = 0 \quad \text{при } \beta \geq 0,7;$$

$$R'' = 1 - R',$$

где β - объемное паросодержание, равное отношению объема пара к объему всей смеси; β_{11} - относительная доля иммобилизованной воды, $\beta_{11} = 0,3$;
 β_{21} - относительная доля иммобилизованного пара, $\beta_{21} = 0,05$.

Уравнение сохранения массы флюида имеет вид

$$\frac{\partial m \rho_f}{\partial \tau} = - \text{div } \bar{v}_f + S,$$

где m - пористость; S - массовый источник в единице объема; ρ_f - плотность флюида в коллекторе,

$$\rho_f = (1 - \beta) \rho' + \beta \rho'';$$

\bar{v}_f - массовая скорость флюида, $\bar{v}_f = \bar{v}' + \bar{v}''$.

Выразив изменение массы флюида в элементарном объеме во времени через изменение давления, перейдем уравнение сохранения массы флюида относительно давления:

$$\beta^* \frac{\partial p}{\partial \tau} = \text{div} \left[\frac{R' \rho' k}{\mu'} (\text{grad } p - \rho' \bar{g}) + \frac{R'' \rho'' k}{\mu''} (\text{grad } p - \rho'' \bar{g}) \right] + S, \quad (9)$$

где β^* - коэффициент, характеризующий упругие свойства среды и флюида,

$$\beta^* = m \frac{d\rho_f}{dp} + (1-m) \rho_f \alpha_s.$$

Применяя закон сохранения энергии к элементарному объему насыщенной пористой (трехфазной) среды, получим дифференциальное уравнение энергии в виде

$$\frac{\partial E}{\partial \tau} = \nabla (\lambda \nabla t) - \text{div} (\bar{v}_f E_f) + Q,$$

где Q - источник энергии в единице объема; λ - коэффициент теплопроводности насыщенной пористой среды,

$$\lambda = \lambda_0 (1-m) + m [(1-\beta) \lambda' + \beta \lambda''].$$

Внутреннюю энергию единицы объема насыщенной пористой среды можно представить суммой

$$E = m \rho_f E_f + (1-m) \rho_0 C_0 t,$$

где индексы f и 0 относятся к флюиду и породе, соответственно.

Выразив изменение температуры флюида через изменение его внутренней энергии и сделав ряд преобразований, окончательно уравнение энергии получим в виде

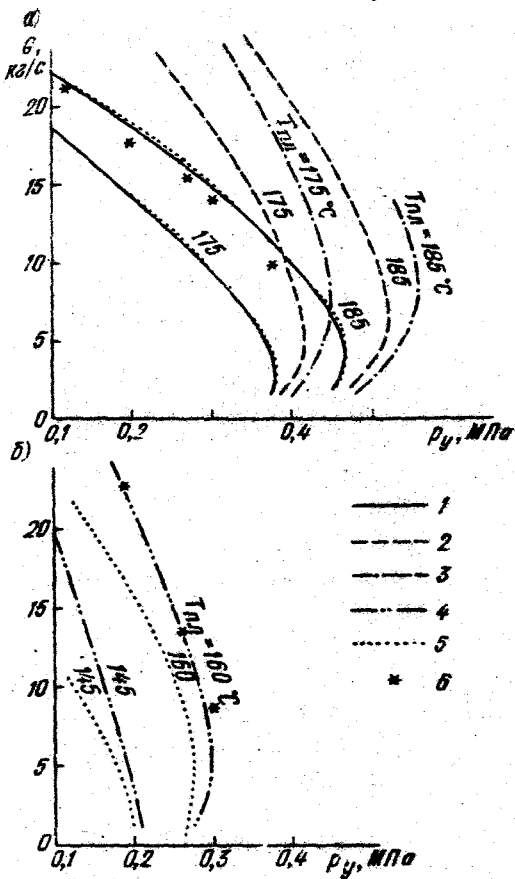
$$\left[m \rho_f + (1-m) \rho_0 C_0 \frac{dt}{dE_f} \right] \frac{\partial E_f}{\partial \tau} = \nabla \left(\lambda \frac{dt}{dE_f} \nabla E_f \right) - \bar{v}_f \text{grad} E_f + Q. \quad (10)$$

Объемное парсодержание β в результате падения давления в продуктивной зоне при выпуске пароводяной смеси может меняться от 0 до 1. Для его определения воспользуемся формулой (4). Степень сухости пара для давлений ниже критического найдем по формуле (5). Если $\eta < 0$, то полагаем $\eta = 0$, а свойства флюида считаем соответствующими свойствам воды. Если $\eta > 1$, то полагаем $\eta = 1$, а свойства флюида считаем соответствующими свойствам пара. При давлениях выше критического флюид может находиться только в однофазном состоянии: в виде воды или пара.

Система уравнений (9)-(10) решается численно конечно-разностным методом с использованием явно- неявных схем.

Данная система уравнений описывает как двухфазную, так и однофазную изотермическую упругую фильтрацию. Это позволяет с помощью данной системы, задавая начальные и граничные условия, найти поля давлений, скоростей и энергий, соответствующие заданным величинам притока к скважине или забойного давления, при всевозможных состояниях теплоносителя в продуктивной зоне (однофазная жидкость без изменения и с изменением фазового состояния, пароводяная смесь, пар).

Определяя зависимость величины притока от забойного давления $G = f(p_{заб})$, получим характеристику проводящей способности продуктивной зоны, которая вследствие изменения фильтрационного сопротивления под влиянием падения давления будет непрерывно меняться. Точку пересечения харак-



Сопоставление расчетной технологической характеристики скважин К-8 (а) и З-1 (б) с данными опытных выпусков
 1, 2, 3, 4 и 5 - для Kb , равных соответственно 1, 2, 3, 7 и 55 Д-м; 6 - опытные данные; P_y - давление на устье скважины

теристик пропускной способности скважины и проводящей способности пласта находим графо-аналитическим методом.

Для получения уравнений состояния, необходимых для решения уравнений фильтрации и движения, все физические и термодинамические характеристики воды и водяного пара как в однофазном состоянии, так и в состоянии насыщения определим аппроксимацией данных таблиц термодинамических свойств воды и водяного пара [9] для температур от 0 до $800^{\circ}C$ и давлений от 0,1 до 100 МПа.

Предлагаемая в статье математическая модель процесса опробования пароводяных скважин с помощью вычислительных экспериментов, проводимых для различных условий фильтрации и широкого диапазона гидродинамических и термических параметров коллектора, позволит более качественно интерпретировать данные опытных выпусков.

Для апробации разработанной модели движения пароводяной смеси в скважине был произведен расчет фильтрационных параметров

продуктивной зоны по наиболее детально изученным скважинам К-8 и З-1 Северного участка Паужетского месторождения (см. рисунок). При проведении расчетов интегральная величина проводимости Kb в зоне влияния возмущения и температура пласта $T_{пл}$ подбирались так, чтобы обеспечить наиболее близкую сходимость расчетной характеристики скважины с данными опытных выпусков. Хорошее соответствие получено для скважины К-8 при $Kb = 1$ Д-м и $T_{пл} = 185^{\circ}C$; для скважины З-1 при $Kb = 7$ Д-м и $T_{пл} = 160^{\circ}C$.

Выводы

Впервые получена численная модель для расчета взаимодействия продуктивной зоны с пароводяной скважиной в условиях двухфазной фильтрации в зоне. При соответствующей организации технологии опробования (опробование начинается с максимального расхода, обеспечивающего быстрый прогрев ствола скважины) эта модель может быть использована для решения целого ряда задач, например, проведения ориентировочных оценок фильтрационных свойств на стадиях поисков и предварительной разведки по данным одиночного выпуска, выполнения корректной оценки фильтрационных свойств на стадии детальной разведки по данным кустовых и групповых выпусков. Кроме того, она может быть использована для решения прогнозных задач при проведении опытно-эксплуатационного выпуска.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аверьев В.В. Особенности движения пароводяных скважин // Труды лаборатории вулканологии АН СССР. 1960. Вып. 18. 275 с.
2. Бергс Л., Сю М. Исследование режимов кипящей воды при высоком давлении // Достижения в области теплообмена. М.: Мир, 1970. С. 172-189.
3. Дрозин В.А. Физическая модель вулканического процесса. М.: Наука, 1980. 80 с.
4. Забарный Г.Н., Кудряшов В.А., Гайдаров Г.М. Механизм работы пароводяной скважины и методы его моделирования / Камчатский комплексный отдел ин-та ВНИПИГеотерм. Петропавловск-Камчатский, 1990. 98 с.
5. Исследование турбулентных течений двухфазных сред / Под ред. С.С.Кутателадзе. Новосибирск: Наука, 1978. 315 с.
6. Кирюкин А.В., Мальцева К.И. Анализ изменения параметров пароводяных скважин в процессе их эксплуатации // Вулканология и сейсмология. 1985. № 6. С. 38-42.
7. Мамаев В.А., Одишария Г.З., Кляпчук О.В. и др. Движение газожидкостных смесей в трубах. М.: Недра, 1978. 286 с.
8. Пискачова Т.Ю. Математическая модель самоизлива скважины в режиме парифта при проведении одиночных выпусков. Док. в ОЦНТИ ВИЭМС. 24.12.86, № 249-мг.
9. Ривкин С.Л., Александров А.А. Теплофизические свойства воды и водяного пара. М.: Энергия, 1980. 386 с.
10. O' Sullivan // W.E.R. 1981. Vol. 17. N 2. P. 390-396.