

В. В. А В Е Р Ь Е В

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ПАРОВОДЯНЫХ СКВАЖИН**ВВЕДЕНИЕ**

В последние годы в ряде стран получило широкое развитие использование подземных горячих вод и паров для выработки электроэнергии. Пионером в этой области выступила Италия, где на базе выведенных скважинами перегретых вод и паров уже давно действуют мощные электростанции. Работы в этом направлении ведутся также в Новой Зеландии, Японии. В Советском Союзе работы по использованию подземного тепла в энергетических целях были начаты в 1957 г. на Южной Камчатке, на Паужетских термальных источниках.

На многих месторождениях, в том числе и на Паужетском месторождении в СССР, продукция геотермических скважин представлена пароводяной смесью, однако опыт буровых работ и расчеты убедительно свидетельствуют о том, что на глубине скважины вскрывают не пар, а горячую воду, находящуюся под значительным давлением. Поэтому к изучению таких скважин и всего месторождения в целом необходимо подходить с общих гидрогеологических позиций, используя хорошо разработанную теорию динамики подземных вод.

Зарубежные исследователи, насколько можно судить по опубликованным работам, в частности по сводке Грэнджа (Grange L. I., 1955), остерегаются применять к геотермическим скважинам принятые в гидрогеологии характеристики и методы анализа. Причина этого кроется, по-видимому, в крайне своеобразной динамике пароводяных скважин, которая влечет за собой выбор методики опробования, обычно не применяемой при прочих гидрогеологических изысканиях.

По нашему мнению, весьма существенные специфические особенности пароводяных скважин лишь затрудняют гидрогеологический подход к ним, но не исключают его. Учет этих особенностей открывает доступ к правильной интерпретации данных, получаемых при опробовании. В настоящей статье высказывается ряд соображений, касающихся динамики пароводяных скважин, которые сложились в результате изучения зарубежных материалов и на основании опыта, полученного при опробовании первой глубокой скважины на Паужетских термальных источниках.

ГЛУБИНА ПАРООБРАЗОВАНИЯ В СКВАЖИНЕ

Особенности динамики пароводяных скважин обуславливаются тем, что они вскрывают на глубине напорную воду с температурой значительно выше 100° . В результате продукция скважин на выходе представлена двухфазной средой (вода + насыщенный пар), причем по мере подъема пароводяной смеси по стволу скважины количество пара прогрессивно нарастает. Соответственно с этим, при приближении к устью

скважины возрастает скорость пароводяной смеси, часто достигая на выходе нескольких сотен метров в секунду, хотя расход скважины в весовом выражении может быть сравнительно небольшим. Глубина образования паровой фазы определяется двумя главными факторами: температурой воды, вскрытой скважиной, и давлением, под которым находится вода во время фонтанирования скважины.

В том случае, когда на устье скважины монтируются всякого рода измерительные устройства или делаются эксплуатационные отводы, — создаются дополнительные сопротивления, что вызывает смещение глубины образования паровой фазы и, следовательно, изменение дебита скважины. Поэтому крайне необходимо представлять процессы, происходящие в скважине, в количественном выражении.

К сожалению, в имеющихся теплотехнических руководствах и справочниках отсутствуют данные о параметрах пароводяной смеси, в связи с чем пришлось проделать предварительную вычислительную работу¹.

На графике (рис. 1) представлены кривые удельных объемов пароводяной смеси $V = f(P)$ и паросодержания в весовых процентах $x = f(P)$, отражающие изменение указанных величин в возможном диапазоне давлений при заданных теплосодержаниях. На этом же графике представлена группа кривых $p = f(H)$, характеризующих рост гидростатического давления столба пароводяной смеси.

В основу расчета кривых нами были положены следующие соображения. Если скважина непрерывно извергает пароводяную смесь с теплосодержанием I ккал/кг, то при давлении 1 атм и 100° , т. е. на выходе из скважины, содержание пара можно определить из следующего уравнения:

$$I = X \cdot 639 + (1 - X) \cdot 100, \quad (1)$$

где X — количество пара в 1 кг пароводяной смеси;

$1 - X$ — количество воды в 1 кг пароводяной смеси;

639 — теплосодержание 1 кг пара при $p = 1$ атм и 100° ;

100 — теплосодержание 1 кг воды при тех же условиях.

Найденное количество пара занимает объем, равный $\frac{X}{\gamma''}$, где γ'' — удельный вес пара при $p = 1$ ата. Вода, при тех же условиях, занимает объем $\frac{1 - X}{\gamma'}$, где γ' — удельный вес воды. Отсюда находим удельный объем пароводяной смеси (V), равный $\frac{X}{\gamma''} + \frac{1 - X}{\gamma'}$, и ее удельный вес (γ), равный $\frac{1}{V}$. (Нами для упрощения расчетов не учитывается газонасыщенность воды, влияние которой на величину удельных весов и объемов особенно велико в начале парообразования).

Зная удельный вес пароводяной смеси, рассчитываем высоту ее столба (H), оказывающего давление 0,1 ата. (Величина 0,1 ата выбрана для удобства пользования теплотехническими таблицами). После этого вновь возвращаемся к уравнению (1), подставляя в него теплосодержание воды и пара уже при давлении 1,1 ата и соответствующей температуре насыщенного пара. При этом получаем, по сравнению с первым расчетом, несколько меньший процент пара, несколько больший удельный вес смеси и, как следствие, меньшую высоту столба, повышающего давление еще на 0,1 ата. Продолжая таким порядком расчет, в конце концов приходим к гидростатическому давлению, равному упругости насыщенного пара при данной температуре, т. е. к таким условиям, когда парообразование заканчивается.

¹ Вычислительные работы производились А. А. Гавронским, В. Г. Ренне и В. В. Дьячковым.

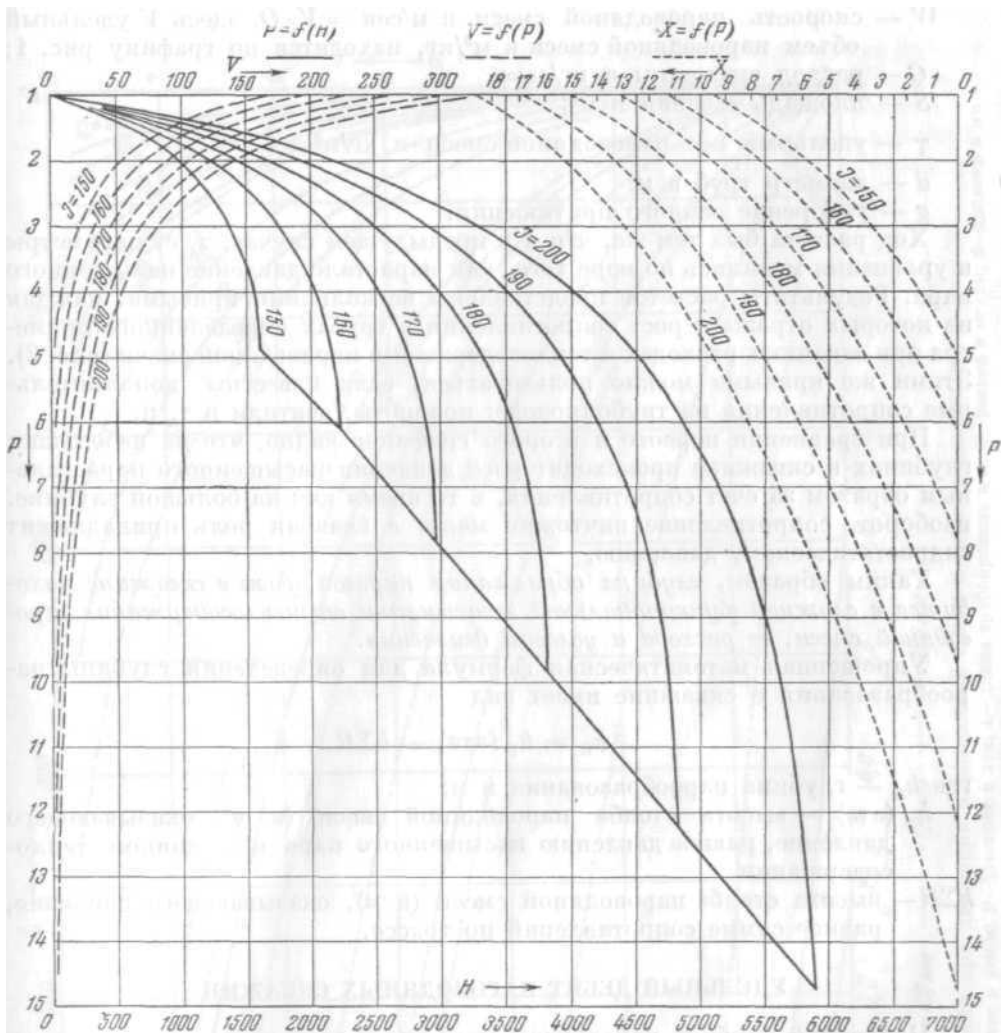


Рис. 1. График для определения параметров пароводяной смеси.

P — давление в ата, V — удельный объем в л/кг, X — паросодержание в весовых %, H — высота столба пароводяной смеси в м, оказывающего гидростатическое давление, равное давлению насыщенного пара, I — теплосодержание в ккал/кг

В действительности глубина парообразования контролируется не только весом вышележащего столба пароводяной смеси, но также и динамическими сопротивлениями, возникающими при ее движении по стволу скважины. Для оценки возникающих сопротивлений мы воспользовались существующей формулой (для горизонтального трубопровода), считая для упрощения, что по трубе идет очень влажный пар с большим удельным весом:

$$R = \frac{\lambda \cdot W^2 \cdot \gamma}{2g \cdot d},$$

где R — удельное сопротивление в $1 \text{ ата} \cdot 10^4$ на 1 м длины;

λ — коэффициент гидравлического трения = 0,03 (рекомендация теплотехнических справочников для расчетов сопротивлений в паропроводе);

W — скорость пароводяной смеси в м/сек = $V \cdot Q$, здесь V удельный объем пароводяной смеси в м³/кг, находится по графику рис. 1;
 Q — расход скважины в кг/сек;
 S — площадь сечения в м²;
 γ — удельный вес пароводяной смеси в кг/м³ = $\frac{1}{V}$;
 d — диаметр труб в м;
 g — ускорение земного притяжения.

Ход расчета был тем же, что и в предыдущем случае, т. е. параметры в уравнении менялись по мере того, как нарастало давление насыщенного пара. Результаты расчетов представлены несколькими кривыми, каждая из которых отражает рост сопротивления в трубах определенного диаметра при заданных расходах и теплосодержании пароводяной смеси (рис. 2). Этими же кривыми можно пользоваться, если известны дополнительные сопротивления на трубопроводе: повороты, вентили и т. п.

При сравнении первого и второго графиков видно, что на небольших глубинах в скважине происходит рост давления насыщенного пара главным образом за счет сопротивления, в то время как на большой глубине, наоборот, сопротивление ничтожно мало, а главная роль принадлежит гидростатическому давлению.

Таким образом, *глубина образования паровой фазы в скважине находится в сложной функциональной зависимости от теплосодержания пароводяной смеси, ее расхода и условий движения.*

Упрощенная математическая формула для определения глубины парообразования в скважине имеет вид

$$h_{\text{п}} = h_{\text{р}}(\text{ата}) - h\Sigma R,$$

где $h_{\text{п}}$ — глубина парообразования в м;

$h_{\text{р}}(\text{ата})$ — высота столба пароводяной смеси (в м), оказывающего давление, равное давлению насыщенного пара при данном теплосодержании,

$h\Sigma R$ — высота столба пароводяной смеси (в м), оказывающего давление, равное сумме сопротивлений по трассе.

УДЕЛЬНЫЙ ДЕБИТ ПАРОВОДЯНЫХ СКВАЖИН

Найденной глубине парообразования в скважине всегда соответствует строго определенное давление, а именно — давление насыщенного пара при имеющейся температуре. Благодаря этому обстоятельству, можно произвести оценку гидродинамического состояния скважины. В самом деле, если на некоторой глубине существует давление, которое превосходит по своей величине давление столба воды от данного уровня до устья скважины, то происходит как бы частичное «закупоривание» скважины паром, и она дает меньшую продукцию, чем можно ожидать по гидрогеологическим данным. Такое явление характерно для скважин небольшого диаметра, вскрывающих мощные притоки высокотемпературных вод. В других скважинах, наоборот, глубина парообразования столь велика, что давление насыщенного пара оказывается значительно меньше давления столба воды от этого уровня до устья скважины. В таком случае имеет место эффект парлифта, и продукцию скважины можно рассматривать как результат откачки ее паром.

В пароводяных скважинах нет четко выраженного динамического уровня, как это наблюдается в обычных артезианских скважинах, откачиваемых насосами. Однако откачку паром можно сравнить с явлением естественного газлифта и с откачкой воды из скважин компрессором. Реальность существования динамического уровня при откачках

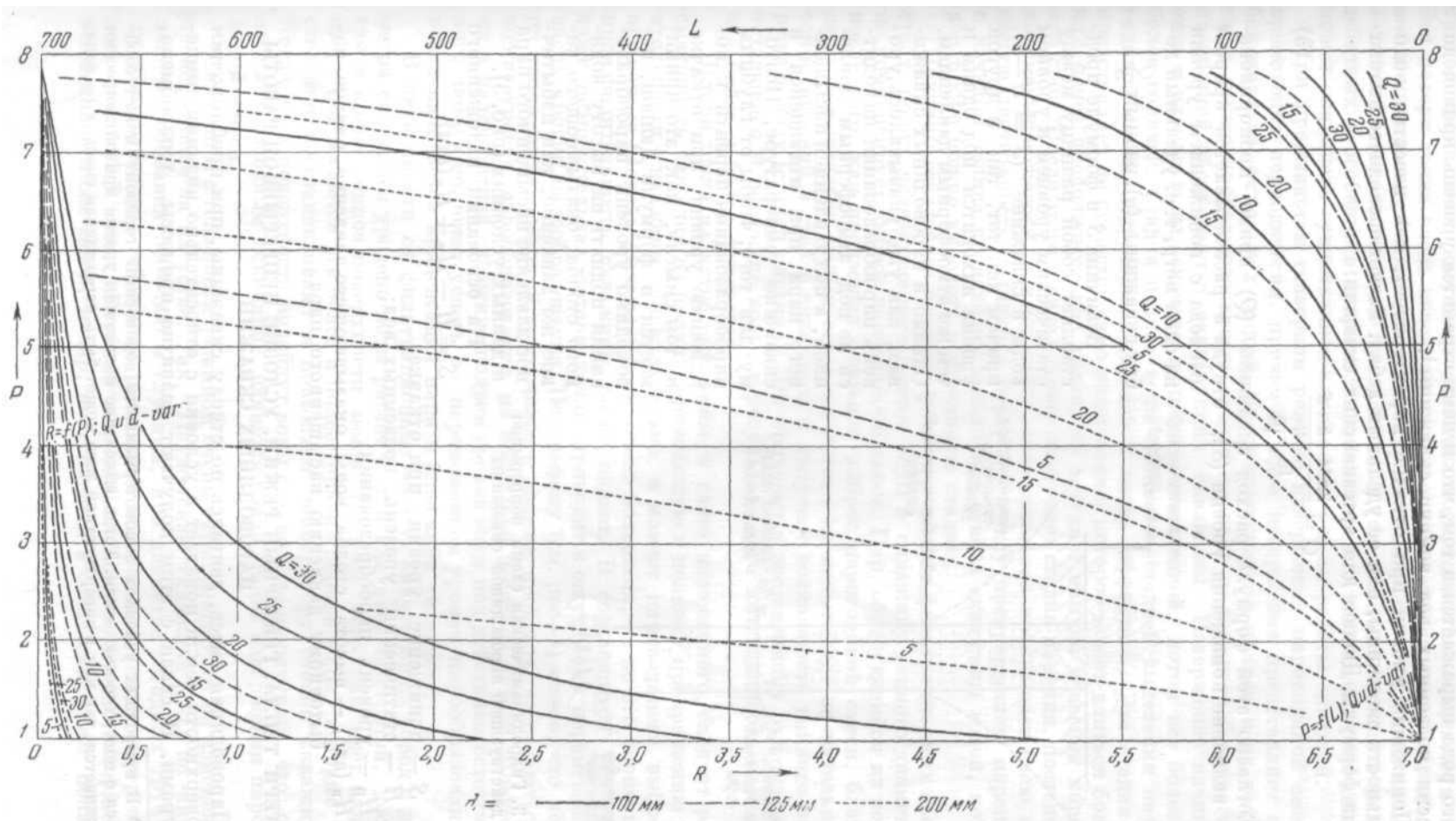


Рис. 2. График для определения сопротивлений при движении пароводяной смеси в горизонтальном трубопроводе.

I —теплосодержание смеси 170ккал/кг; R —удельное сопротивление в атм/м; P —давление в атм; L —длина трубопровода в м; Q —расход в кг/сек; d —диаметр в мм

такого рода выражается в том, что к нему стремится уровень кривой депрессии подземных вод вокруг скважины¹.

Понижение уровня при откачке характеризует, как известно, водообильность скважины, или ее удельный дебит. Расчет последнего вытекает из формулы Дюпюи для артезианских скважин:

$$Q = \frac{2\pi M \cdot k \cdot S}{\ln \frac{R}{r}} \quad (3)$$

Согласно этой формуле расход скважины (Q) прямо пропорционален величине понижения уровня (S), откуда и рассчитывается прирост

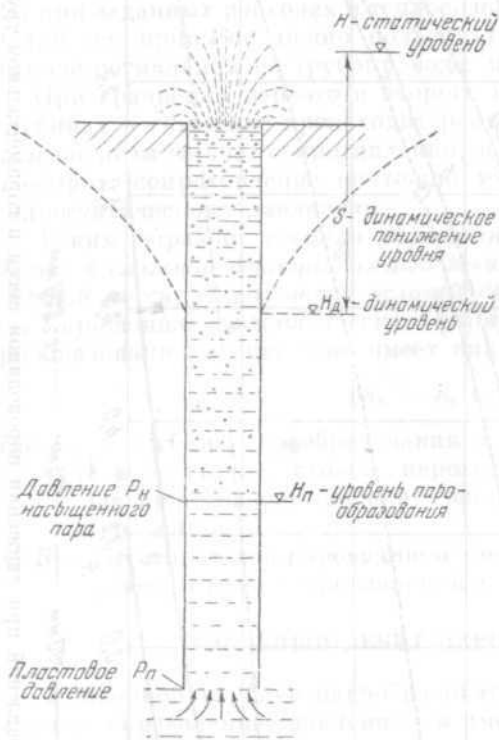


Рис. 3. Гидродинамическая схема непрерывно действующей пароводяной скважины

расхода с понижением уровня на один метр, т. е. удельный дебит скважины (q), равный Q/S .

Величина S в формуле представляет собой разницу между статическим уровнем и уровнем воды в скважине ($S = H - h$), причем как тот, так и другой уровни находятся под одним и тем же атмосферным давлением. Однако в пароводяных скважинах, как уже указывалось, уровень парообразования находится не под атмосферным давлением, а под давлением насыщенного пара при имеющейся в скважине температуре. Поэтому для того, чтобы от глубины парообразования перейти к понижению уровня при откачке в том смысле, как это принимается в формуле Дюпюи, необходимо уровень парообразования поднять на высоту водяного столба, оказывающего такое же давление, как избыточное давление насыщенного пара в данных условиях (рис. 3).

На основании изложенного

$$S = H - H_n + H_b \text{ (ата)},$$

где S — понижение уровня при откачке;

H — статический уровень подземных вод;

H_n — уровень парообразования;

H_b (ата) — высота столба воды, оказывающего давление, равное избыточному давлению насыщенного пара.

ПОТЕРИ ТЕПЛА. ГЕЙЗЕРНЫЙ РЕЖИМ. УСЛОВИЕ НЕПРЕРЫВНОЙ РАБОТЫ ПАРОВОДЯНЫХ СКВАЖИН

Пароводяная смесь, двигаясь по стволу скважины, при приближении к поверхности земли попадает в условия с относительно низкими температурами. В связи с этим получают развитие процессы теплообмена,

В природных условиях высокотермальный водоносный горизонт может сообщаться с поверхностью земли. Тогда выяснение положения уровня кривой депрессии усложняется, так как в поверхностной зоне может быть пароводяная смесь, а не вода.

приводящие к некоторому снижению теплосодержания пароводяной смеси. Эти потери тепла очень невелики — как показывают расчеты, они обычно не превышают 1 ккал/сек, и поэтому на скважинах с большой производительностью охлаждение практически не сказывается. Однако в малодобитных и особенно в прерывисто действующих скважинах отток тепла может оказывать существенное влияние на режим работы скважин.

При прерывистом гейзерном режиме извержения пароводяной смеси происходят периодически, причем каждое извержение представляет собой цикл из нескольких стадий. Продолжительность циклов и их частота, а также продолжительность стадий зависят от конкретной гидрогеологической обстановки и конструкции скважины. Извержение начинается с излива воды, сначала немного охлажденной, потом все более и более горячей. Стадия излива воды сменяется стадией выделения пароводяной смеси, бурно нарастающей и очень эффективной. Эта стадия и представляет по существу само извержение, которое может длиться более или менее продолжительное время, но затухает обычно в весьма короткий срок. После этого в ряде случаев наступает стадия парения, постепенно уменьшающегося, и в конечном счете скважина прекращает свою видимую деятельность. Однако в перерыве между прекращением парения и началом излива происходит заполнение ствола скважины водой, которое также можно выделить в отдельную стадию.

Причины гейзерного режима кроются в низких фильтрационных свойствах пород, вследствие чего приток воды в скважину данного диаметра не компенсирует выброс пароводяной смеси. Пар, образующийся из воды после того, как произошел основной выброс пароводяной смеси, благодаря относительно малым его количествам не испытывает значительных сопротивлений в стволе скважины и получает возможность намного опережать воду (стадия парения). Это приводит к постепенному охлаждению оставшейся в скважине воды, в результате чего интенсивность парения все более и более снижается.

Потери тепла на устье скважины, в свете изложенного, следует рассматривать как одну из причин, приводящую к полному прекращению деятельности скважины. Действительно, в момент пароводяного выброса временные расходы бывают обычно очень большими, но по его окончании производительность скважины резко падает. В создавшихся условиях даже незначительная потеря тепла приводит к ощутимому перемещению вверх уровня парообразования. По графику (см. рис. 1) видно, что потери тепла, выражающиеся всего навсего долями процента, вызывают смещение уровня парообразования на несколько десятков метров. Поскольку в малодобитной скважине подъем уровня воды под действием естественного напора не может успеть за перемещением уровня парообразования, в ней начинается конденсация пара и скважина «глохнет».

В зависимости от фильтрационных свойств окружающих пород и диаметра скважины уровень воды растет с той или иной быстротой, достигая в конце концов поверхности земли. По мере того как идет излив, вверх поднимаются все более и более горячие порции воды, которые постепенно восстанавливают и повышают температуру стенок скважины. Когда же к поверхности подойдут воды с такой температурой, что окажется возможным вскипание, начнется новая стадия извержения пароводяной смеси.

Скважины с гейзерным режимом очень чутко реагируют на изменения, происходящие на их устье. Так, Паужетская скважина (Р-1) на интервале опробования 300—500 м глубины, при диаметре обсадных труб 8", характеризовалась гейзерным режимом с перерывами между извержениями около 1,5 суток. Глубина парообразования во время извержения накопилась ниже забоя, и пар, поступавший в ствол скважины обладал

такими большими скоростями, что его энергии хватало на то, чтобы выносить из скважины обломки пород весом в несколько десятков граммов. Однако стоило извержение скважины направить через боковой отвод, т. е. ввести на устье относительно небольшое дополнительное сопротивление, как извержение становилось менее эффективным, а промежуток между ними сокращался до одних суток, что было связано с повышением уровня парообразования.

Многodeбитные пароводяные скважины, как уже указывалось, не реагируют на незначительные потери тепла. Расчеты показывают, что при средних диаметрах, принятых в бурении (4—8"), постоянно действующие скважины должны обладать очень большой производительностью. Цифры, которые приводятся в сводке Грэнджа (Grange, 1955), подтверждают это положение: новозеландские скважины с постоянным режимом характеризуются расходами пароводяной смеси, измеряемыми десятками килограммов в секунду.

Если при выработанном постоянном режиме на устье скважины ввести какое-либо дополнительное сопротивление, например, прикрыть задвижку или подключить длинный трубопровод, уровень парообразования, так же, как и в случае тепловых потерь, займет более высокое положение. В связи с этим скважина сразу же уменьшит, а может и вообще временно прекратить свою деятельность. Это почти аналогично тому случаю, как если бы при откачке обычной артезианской скважины штанговым насосом «на-храпок» насос неожиданно был бы поднят на несколько метров вверх; естественно, что откачка должна была бы временно прекратиться. В пароводяной скважине, проходимой в водообильных породах, подъем уровня воды произойдет за малый промежуток времени, и она быстро приспособится к создавшимся условиям, приобретя вновь стабильный режим, только с несколько меньшим дебитом. Если же водообильность пород невелика, то повышение уровня откачки повлечет за собой длительную перестройку режима скважины.

Подобное положение создалось, в частности, на Паужетском месторождении при опробовании скважины Р—1 на интервале 120—196 м. При проведении этого опробования скважина имела гейзерный режим, но стадия ее активного действия была продолжительной — несколько часов. В эту стадию скважина извергла около 10 кг/сек пароводяной смеси с теплосодержанием в среднем 170 ккал/кг. Расчеты показывают, что при имевшемся диаметре — 12" — глубина парообразования и уровень откачки располагались ниже забоя скважины. (Точно определить уровень откачки в этом случае, к сожалению, нельзя, так как пока остается неизвестным расчет сопротивления движению пароводяной смеси в породах.)

Когда во время опробования делались попытки подключить к скважине сепарационную установку для того, чтобы произвести замеры расхода, скважина немедленно «глохла». При подключении сепаратора на устье скважины фиксировалось давление до 4,5—5,5 ата, отражавшее сопротивление участка трассы от устья скважины до выхода пара из сепаратора. При температуре 170° упругость насыщенного пара составляет 7,8 ата. Как следует из графика (рис. 1), рост давления от 5,5 до 7,8 ата при соответствующем теплосодержании (170 ккал/кг) происходит на протяжении 130 м (сопротивление стенок скважины в 12" можно в расчет не принимать, так как оно при данном расходе очень мало (рис. 2). Таким образом, глубина парообразования при подключении сепаратора перемещалась в призабойную часть скважины, а уровень откачки оказывался на глубине около 60 м. В связи с резким повышением уровня откачки скважина сразу же снижала свою деятельность. Поскольку удельный дебит скважины был очень мал —

менее 0,05 кг/сек, а диаметр большой, подъем уровня воды шел медленно и скважина прекращала работать.

Разобранные примеры свидетельствуют о том, что как потери тепла, так и ввод дополнительных сопротивлений (трубопроводы, измерительные устройства и пр.) вызывают один и тот же результат — уменьшение глубины парообразования в скважине. При этом, если скорость перемещения уровня парообразования оказывается больше, чем скорость подъема уровня воды, то в работе скважины наступает перерыв. Отсюда вытекает основное условие непрерывной работы пароводяных скважин, которое можно сформулировать следующим образом: *для непрерывной работы пароводяной скважины необходимо, чтобы скорость подъема воды в ней превышала скорость перемещения уровня парообразования.*

НЕКОТОРЫЕ ПРАКТИЧЕСКИЕ ВЫВОДЫ

Выдвинутые положения позволяют решить ряд практических задач, возникающих при разведке высокотемпературных вод. В частности, пользуясь изложенной выше методикой расчетов, можно подойти к выбору рациональных эксплуатационных колонн в пароводяных скважинах. Во время разведочного бурения, в обстановке, когда еще неизвестна водообильность пород и параметры пароводяной смеси, конструкция скважин, естественно, будет часто не соответствовать оптимальной. Так, диаметр обсадных колонн может быть либо очень большим, что будет приводить к прерывистому режиму, либо, наоборот, слишком малым, что повлечет за собой некоторое искусственное снижение производительности скважины.

Однако, после гидрогеологического опробования, по получении данных об удельном дебите скважины и теплосодержании пароводяной смеси, расчет эксплуатационной колонны становится делом реальным. Зная удельный дебит скважины и ее глубину, можно задать понижение уровня воды, обеспечивающее определенную производительность скважины, и соответственно подобрать колонну труб нужного диаметра.

В ряде случаев, если это необходимо, скважину с гейзерным режимом можно перевести на режим непрерывный, подобрав для этого эксплуатационную колонну малого диаметра. В частности это может быть достигнуто в прерывисто действующей скважине Р-1 на Паужетском месторождении. По достижении глубины 196 м при диаметре 12", скважина характеризовалась среднесуточным расходом пароводяной смеси 6 кг/сек, но имела резко выраженный гейзерный режим. Расчеты показывают, что в имевшихся условиях непрерывный режим мог быть достигнут, если бы в скважину была спущена 3—4-дюймовая эксплуатационная колонна труб.

Последний вопрос, который мы считаем нужным затронуть, — вопрос о возможностях заложения пароводяных скважин на высоких отметках. Как известно, обычные артезианские скважины могут давать самоизлив только тогда, если их устье находится ниже статического уровня подземных вод. В противном случае они вынуждены эксплуатироваться с помощью откачек. Это порождает стремление бурить скважины в наиболее пониженных местах, что естественно, суживает возможности эксплуатации подземных вод. Однако в геотермических скважинах, выводящих пароводяную смесь, высота столба последней всегда намного больше столба воды, оказывающего идентичное давление. Разница в высоте будет, очевидно, тем значительнее, чем выше температура вскрытых скважиной вод.

¹ В настоящее время этот прогноз подтвердился: пробуренная рядом со скважиной Р-1 колонковая скважина диаметром 4 дюйма работает непрерывно.

Отсюда следует, что *геотермические скважины можно закладывать значительно выше статического уровня термальных вод, и в то же время рассчитывать на самопроизвольное извержение пароводяной смеси*. Последнее обстоятельство значительно увеличивает перспективы разведки и эксплуатации месторождений высокотемпературных подземных вод.

ЛИТЕРАТУРА

- К а й е н с к и й Г. Н. Основы динамики подземных вод., ч. II. М.— Л., 1935.
Л е в и н Р. Е. Теплотехника. М., 1951.
М а р г у л о в а Т. Х. Методы получения чистого пара. М.— Л., 1955.
G a n g e L. I. Geothermal steam for Power in New Zealand. Wellington, 1955.
M a z z o n i A. The Steam Vents of Tuscany and the Larderello Plant. Bologna, 1954.