

УДК 551.233

ДРОЗНИН В. А.

## К ТЕОРИИ ДЕЙСТВИЯ ГЕЙЗЕРОВ

Обобщение теоретических представлений о действии гейзеров было выполнено Е. Т. Алленом и А. Л. Дейем [16]. Они пришли к выводу, что гейзерный режим может возникнуть, если в подземной системе каналов существует камера смещения, где холодная вода подогревается паром или горячей водой. Количественное выражение эта модель получила в работе [6].

Наличие гейзерного режима при работе пароводяных скважин позволило А. С. Нехорошеву [10] показать, что нет необходимости в камере смещения и в условии смещения холодных и горячих вод. Позже В. В. Аверьев [12], сравнив дебит пароводяных скважин, работающих в гейзерном и постоянном режиме, заключил, что причины гейзерного режима кроются в несоответствии между возможностями питания гейзера и несоизмеримо большим диаметром выходящего канала. Количественное выражение это условие получило в работах [2, 3].

Существуют четыре типа лабораторных моделей гейзерного процесса, в которых условие периодичности достигается за счет: 1) разницы изменения во времени поступающих в систему расходов холодной и горячей вод (модель смещения [7]); 2) наличия буферной камеры с паровой (газовой) шапкой [18, 3]; 3) особенностей выходного устройства [17]; 4) особенностей гидродинамики двухфазного потока (модель пароводяной скважины) [3, 4].

Все модели не требуют условий, которые не могли бы иметь место в природе. Построение общей теории не имеет смысла, если гейзеры работают по принципу моделей 2 и 3. В этом случае, как отмечается в работах [18, 19], режим каждого гейзера определялся бы индивидуальными особенностями строения системы питающих каналов.

Цель данной работы — выяснить возможность объяснения данных, полученных в результате гидрозондирования гейзеров Котегей и Принц Буратино на Камчатке [8, 14, 15, 20] с позиций общей количественной теории гейзера (модель 1 и 4).

## Модель со смешением

## Описание модели

Термальные источники, как правило, находятся в районах современной вулканической деятельности. Поэтому одной из первых была гипотеза, что их действие связано с нагревом инфильтрационных вод паром, отделившимся от магматического расплава [21]. Предложенную А. Г. Мержановым, А. С. Штейнбергом, Г. С. Штейнбергом [6, 7] модель гейзерного режима можно рассматривать как развивающую указанное положение.

Пусть на некоторой глубине  $h$  имеется камера объемом  $V_1$ , соединенная с поверхностью каналом объемом  $V_k$ . В камеру поступает холодная вода с расходом  $G_x$  и температурой  $T_x$ . Пусть расход горячей воды  $G_r$  постоянен, а расход холодной убывает в зависимости от уровня воды

в канале. Обозначим:  $V_0$  — объем воды, оставшейся в камере после предыдущего извержения;  $T_{к1}$  — ее температура;  $G_{x1}$  — расход холодной воды, поступающей в камеру до ее заполнения;  $G_{x2}$  — расход холодной воды при атмосферном давлении;  $T_{к2}$  — температура кипения воды при давлении в камере, когда канал полностью заполнен водой. Введем следующие обозначения: расход, поступающий в камеру до ее заполнения,  $G_1 = G_r + G_{x1}$ ; расход при полностью заполненном канале  $G_2 = G_r + G_{x2}$ ; значение равновесий температуры поступающей смеси при заполнении камеры

$$T_{p1} = \frac{G_r T_r + G_{x1} T_x}{G_1}$$

и при начале излива

$$T_{p2} = \frac{G_r T_r + G_{x2} T_x}{G_2}$$

При условии

$$T_{p1} < T_{к1} < T_{к2} < T_{p2} \quad (1)$$

авторы [6] получили следующее выражение для времени инкубации, т. е. времени от конца предыдущего извержения до начала следующего:

$$\tau_{инд} = \frac{\rho(V_1 - V_0)}{G_1} + \frac{\rho V_K}{G_1 - G_2} \ln \frac{G_1}{G_2} + \frac{\rho V_1}{G_2} \ln \frac{T_{p2} - T_2}{T_{p2} - T_{к2}} \quad (2)$$

Первое слагаемое в правой части соответствует времени заполнения свободного объема камеры; второе — времени, в течение которого заполняется канал, при этом температура воды в камере достигает значения  $T_2$ ; третье слагаемое соответствует времени, когда температура воды в камере повышается от  $T_2$  до  $T_{к2}$ .

Когда температура воды в камере достигает температуры кипения  $T_{к2}$  при имеющемся в камере давлении, начинается выброс из канала и камеры пароводяной смеси, т. е. извержение.

Давление в камере уменьшается почти до атмосферного в связи с образованием пара при закипании и из-за разгрузки канала. Оставшаяся в камере вода сначала охлаждается при смешении с поступающей в камеру водой, имеющей температуру  $T_{p1} < T_{к1}$ . В связи с тем что равновесная температура смеси, поступающей в камеру, увеличивается по мере заполнения канала, после заполнения камеры в ней начинается рост температуры воды, который продолжается и при изливе. При достижении температуры кипения  $T_{к2}$  процесс повторяется.

Теоретические положения были использованы при создании лабораторной модели гейзера [7], один из вариантов которой демонстрировался на ВДНХ<sup>1</sup>. Способ имитации гейзерного режима был защищен авторским свидетельством [9]. На основе разработанных количественных представлений о механизме работы гейзера А. Г. Мержанов, А. С. и Г. С. Штейнберги предложили способ активного воздействия на режим гейзера с целью определения его параметров [8, 14, 15], названный ими методом гидрозондирования<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> В этой модели был впервые предложен и реализован способ вакуумного моделирования термальных источников, позволяющий, в частности, на относительно небольших лабораторных моделях имитировать извержение гейзеров.

<sup>2</sup> Заполнение грифона кипящего источника холодной водой с целью определения энтальпии выносимой пароводяной смеси было предложено и выполнено в 1957 г. В. В. Аверьевым на источниках Парящий I и Парящий II (с. 33, 11). Уместно в этой связи подчеркнуть экологическую приемлемость метода гидрозондирования для исследования термальных источников.

Суть метода заключается в том, что после прекращения извержения в канал гейзера заливается определенный объем воды  $V_{\text{зал}}$  с заданной температурой  $T_{\text{зал}}$ . В результате на гейзерах Котегей и Принц Буратино [8, 14, 15, 20] зафиксировано изменение времени индукции при увеличении объема заливаемой воды тем большее, чем ниже температура заливаемой воды.

Однако при анализе данных гидрозондирования авторы не используют свою математическую модель. Условие начала извержения предлагается искать в виде критических параметров. Так, в работе [14] зависимость времени индукции от энтальпии заливаемой воды аппроксимировалась линейной зависимостью. Экстраполируя  $\tau_{\text{инд}} \rightarrow 0$  в зависимости  $\tau_{\text{инд}} = f(T_{\text{зал}})$  авторы находили расчетное критическое теплосодержание вливаемой воды, при котором извержение гейзера должно произойти сразу после залива. Было получено уравнение зависимости критического значения энтальпии от массы вливаемой воды. Из этой зависимости следует, что чем больше объем вливаемой воды, тем при меньшей энтальпии произойдет извержение сразу после залива. Этот вывод противоречит первоначальной математической модели [6]. Действительно, извержение должно начинаться при достижении температуры в камере, соответствующей давлению в ней, создаваемому водой в канале. Очевидно, чем больше объем вливаемой воды, тем выше давление в камере, тем при большей температуре начнется кипение. Следовательно, для достижения извержения сразу после залива воды из математической модели следует прямая зависимость: чем больше объем вливаемой воды, тем выше значение критической энтальпии.

В работе [14] отмечается, что полученную зависимость критического значения энтальпии заливаемой воды можно объяснить наличием пара в канале гейзера: «чем больше воды в системе, тем труднее выход из нее пара». К тому же авторы отмечают, что математическая модель создавалась для гейзеров, имеющих «цилиндрические» каналы, а все эксперименты по гидрозондированию проводились на естественных гейзерах. Суждения же о геометрических формах внутренних частей естественных гейзеров можно высказывать с большой осторожностью.

В работе [15] используется положение о том, что извержение гейзера начинается после того, как в системе аккумулируется некоторое критическое количество тепла. Величина критического значения тепла определялась из уравнения теплового баланса как разность между теплом, привнесенным в систему гейзера глубинным теплоносителем, теплом, поступившим с заливаемой водой, и теплом, ушедшим во время излива. При обоих подходах [14, 15] получены сходные оценки энтальпии глубинного теплоносителя порядка 165—185 ккал/г.

В процессе экспериментов авторами рассматриваемых работ впервые был получен также ряд других параметров, характеризующих гейзеры Котегей и Принц Буратино: пустотные объемы после извержения (180 л для обоих гейзеров); ход изменения температуры изливающейся воды; расход воды при изливе до начала кипения внутри системы (0,08 и 0,4 л/с); объем воды, выбрасываемой в ходе извержения (120 и 150 л соответственно).

Авторы работ [8, 14, 15, 20] отмечают, что гидрозондирование, осуществляемое через заданные промежутки времени после извержения, дает возможность определить изменение расхода питающей воды по мере заполнения гейзерной системы. Полагая сечение подводящего канала постоянным, расход воды, поступающей в гейзер, можно выразить в виде экспоненциальной зависимости

$$G = G_0 e^{-\frac{t}{t_0}}, \quad (3)$$

где  $t_0$  — гидравлическая постоянная.

По результатам эксперимента значение ее оказалось равным 6,7 и 14,3 мин для гейзеров Котегей и Принц Буратино соответственно.

#### Сопоставление теории и эксперимента

Авторы метода гидрозондирования не проинтерпретировали экспериментальные данные на основе предложенной ими математической модели. Поэтому получим выражения для изменения периода индукции гейзера при заливе в него определенного объема воды.

При малых объемах вливаемой воды, меньших свободного объема камеры, время заполнения камеры уменьшается на величину

$$\Delta t_1 = \frac{\rho V_{\text{зал}}}{G_1}. \quad (4)$$

Время заполнения канала остается тем же самым, а время излива, когда происходит разогрев воды в камере до температуры кипения, увеличивается.

Используя выражение для температуры  $T_2$  в камере, к моменту заполнения канала [13] получим, что она уменьшится за счет зондирования на величину:

$$\Delta T_2 = \Delta T_1 e^{-\frac{V_K}{V_1}} \quad (5)$$

и, следовательно, время излива увеличится на величину

$$\Delta t_2 = \frac{\rho V_1}{G_2} \ln \left( 1 + \frac{\Delta T_2}{T_{p_2} - T_2} \right). \quad (6)$$

При выполнении условия

$$\frac{\Delta T_2}{T_{p_2} - T_2} \ll 1 \quad (7)$$

увеличение времени излива можно приближенно выразить

$$\Delta t_2 = \frac{\rho V_{\text{зал}}}{G_2} \frac{T_{p_1} - T_{\text{зал}}}{T_{p_2} - T_2} e^{-\frac{V_K}{V_1}}. \quad (8)$$

Общее увеличение периода работы гейзера

$$\Delta t_{\text{инд}} = \Delta t_2 - \Delta t_1. \quad (9)$$

При полном зондировании температура в камере в момент зондирования

$$T_2 = \frac{V_0 T_{K_1} + (V_1 - V_0) T_{\text{зал}}}{V_1}, \quad (10)$$

а время индукции, совпадающее с временем излива, определяется формулой (2).

Из экспериментов [8] следует пропорциональность периода температуры вливаемой воды, что может быть при выполнении условия

$$\frac{T_{K_2} - T_2}{T_{p_2} - T_{K_2}} \ll 1, \quad (11)$$

при этом время индукции при полном зондировании определяется выражением

$$\tau_{\text{инд}} = \frac{\rho V_1}{G_2 (T_{p_2} - T_{K_2})} \left[ T_{K_2} - \frac{V_0}{V_1} T_{K_1} - \frac{V_1 - V_0}{V_1} T_{\text{зал}} \right]. \quad (12)$$

Определяя по [8] величины

$$\frac{d\tau_{\text{инд}}}{dT_{\text{зал}}} = -N; \quad \frac{N}{\tau_{\text{инд}}|_{T_{\text{зал}}=0}} = B,$$

получим

$$T_{\text{к}_2} = T_{\text{р}_2} - \frac{\rho(V_1 - V_0)}{G_2 N}, \quad (13)$$

$$\frac{V_0}{V_1} = \frac{1 - BT_{\text{к}_1}}{1 - BT_{\text{к}_2}}. \quad (14)$$

Свободный объем гейзера 180 л. Как полагают авторы [8], свободный объем камеры меньше:  $V_1 - V_0 = 30 - 40$  л. Расход на изливе  $G_2 = 0,08$  кг/с. Тогда из (13) следует, что  $T_{\text{к}_2}$  меньше  $T_{\text{р}_2}$  на  $18^\circ\text{C}$ . Для выполнения условия (11) температура в камере после залива должна быть практически равна температуре кипения вне зависимости от температуры заливаемой воды, что (как видно из (14)) может быть только при равенстве объема оставшейся воды объему камеры.

Таким образом, интерпретация результатов полного гидрозондирования гейзера Котегей с позиций математической модели со смещением приводит к тому, что процесс происходит практически при неизменной массе воды в камере и при практическом равенстве температур  $T_{\text{к}_1} \approx T_2 \approx T_{\text{к}_2}$ , т. е. наличие камеры не оказывает никакого влияния на периодичность гейзера. Возможно, что авторы [8, 14, 15, 20] пришли к такому заключению, так как полученное ими значение начального расхода, определяемое формулой (3), рассчитывается ими по заполнению всего свободного объема гейзера за время заполнения при нормальном режиме, т. е. в предположении, что свободный объем соответствует объему канала.

Фактические изменения времен заполнения системы, излива и полного периода при гидрозондировании оказались более сложными, чем можно было ожидать по математической модели.

По результатам гидрозондирования авторы [8] выделяют три области: а)  $0 < V_{\text{зал}} < 40$  л, продолжительность полного периода уменьшается за счет уменьшения времени заполнения и практически не зависит от температуры заливаемой воды; б)  $50 \text{ л} < V_{\text{зал}} < 80$  л, период близок к нормальному; в)  $80 \text{ л} < V_{\text{зал}} < 180$  л, период увеличивается пропорционально объему заливаемой воды и тем больше, чем ниже температура вливаемой воды.

Полагается, что область а) отражает наличие «колена» или небольшой камеры в верхней части системы гейзера. Область б) соответствует заполнению свободного объема камеры. Сокращение продолжительности полного периода в области б) при  $T_{\text{зал}} = 80^\circ$  и увеличение при  $T_{\text{зал}} = 20^\circ$  объясняется тем, что в нормальном режиме начальная равновесная температура лежит в интервале  $20^\circ < T_{\text{р}_1} < 80^\circ$ . Область в) соответствует заполнению канала.

В соответствии с математической моделью при любом объеме заливаемой воды должно наблюдаться уменьшение времени заполнения, однако последнее уменьшается в области а), увеличивается в б) и только в области в) начинает уменьшаться. Предположение о наличии колена вряд ли справедливо, так как оно не объясняет сложного характера зависимости времени заполнения системы от объема заливаемой воды.

Авторы [8, 14], следуя предложенной ими математической модели, полагают, что нагрев заливаемой воды осуществляется теплоносителем, не поясняя механизм быстрого перемешивания воды в канале. Как будет показано ниже, объем пара в канале незначителен и его конденсация не может существенно изменить температуру заливаемой в канал воды. Для оценки возможности эффективного свободноконвективного

перемешивания при турбулентном обмене в канале между питающей гейзер горячей водой и заливаемой холодной необходимо представление о геометрии канала.

Таким образом, на основании модели со смешением вод оказывается невозможно объяснить изменение периода гейзера при гидрозондировании.

### Модель для исследования режимов пароводяных скважин

#### Описание модели

Представления о модели механизма гейзерного режима источников существенным образом изменились, когда гейзерный режим был обнаружен на пароводяных скважинах. При реализации гейзерного режима на пароводяной скважине следовало отказаться от двух априорно принятых условий: смешения холодных и горячих вод и наличия камеры смешения. Причину гейзерного режима следовало искать в условиях простой по геометрии системы пласт — пароводяная скважина.

Следуя В. А. Архангельскому [1] (предложившему графоаналитический метод расчета системы пласт — скважина), были получены уравнения характеристик проводящих способностей.

Уравнение характеристики проводящей способности пласта — зависимость глубины начала парообразования от расхода поступающей в скважину воды и проводящих параметров пласта — выводится для установившегося течения из зависимости Дюпюи.

Уравнение характеристики проводящей способности пароводяной скважины — зависимость глубины начала парообразования от расхода поступающей в скважину термальной воды, ее энтальпии и геометрических параметров скважины — получено на основе теории течения двухфазных смесей [3].

Для решения системы уравнений характеристик проводящих способностей определяется зависимость расхода в скважине от величины давления на устье. График такой зависимости является характеристикой производительности скважины.

Характеристика проводящей способности скважины нелинейна, и при определенных соотношениях параметров пласта и скважины возможно получение двух режимов. Анализ неустойчивости работы системы пласт — скважина, выводящей газированную нефть, был проведен в работе [5]. Применительно к пароводяным скважинам на основе решения системы уравнений, соответствующего решению общей задачи гидродинамики для системы пласт — пароводяная скважина, было найдено условие для критического расхода. При расходах, меньших критического, скважина может работать в неустойчивом режиме; при больших — работает в постоянном режиме.

Этот результат качественно и количественно оказался совпадающим с установленной закономерностью, что скважины и источники, работающие в гейзерном и пульсирующем режиме, имеют меньший средний расход, чем постоянные источники и скважины, расположенные в том же районе.

Экспериментальная проверка полученного соотношения была осуществлена на лабораторной модели скважины [3]. Вода из термостата под действием разрежения, создаваемого форвакуумным насосом, всасывалась через стеклянную трубку, снабженную регулирующим вентилем. Для поддержания в приемной камере постоянного давления она снабжена проточным холодильником.

Температура воды в термостате и давление в приемной колбе выбирались так, чтобы кипение воды происходило в канале трубки. При расходах, меньших критического значения, в канале трубки наблюдалась следующая периодическая картина. После предыдущего извержения в канале остается вода, охлажденная в результате парообразова-

ния. А. С. Нехорошевым [10] предложено называть ее депарированной.

Столб депарированной воды оказывается достаточным, чтобы кипение засасываемой из термостата горячей воды не происходило. Уровень воды в канале постепенно повышается и достигает верхнего среза трубки. В результате начала излива давление на границе депарированной и горячей воды понижается. В трубке начинается кипение, приводящее к ее опорожнению. Расход во время извержения значительно превосходит расход поступающей воды. Извержение заканчивается выходом пара, оставляющем в трубке воду, из которой он образуется. Кипение прекращается, когда в трубке устанавливается достаточной высоты столб депарированной воды. Далее процесс повторяется.

Измерения температуры в канале модели и в канале пароводяной скважины, работающей в гейзерном режиме [3], дают основание полагать, что температурное распределение в столбе депарированной воды соответствует линии насыщения, а уровень начала парообразования в ходе извержения достигает максимально возможной глубины при энтальпии поступающей воды. В процессе проведения экспериментов на скважине Р—I Паужетского месторождения [3] был получен график извержения, подтверждающий экспоненциальный характер зависимости уровня от времени.

Из наблюдений за осаждением воды в канале лабораторной модели скважины [3] следует, что надо ожидать различия в графиках зависимости времен заполнения системы, полученной при вливании определенной порции сразу после извержения, от полученного при заполнении системы через определенный интервал времени после окончания извержения. Действительно, когда извержение прекращается, в канале гейзера еще происходит процесс осаждения депарированной воды. Поэтому заливаемый малый объем холодной воды усваивается гейзером в том смысле, что он успевает прогреться и способствует более быстрому образованию столба депарированной воды.

При увеличении объема вода, вливаемая сразу после извержения, зависает на паровой подушке выше столба депарированной воды или образует сотовую структуру с паровыми пузырями-снарядами. Это приводит к уменьшению начального значения расхода и как следствие к увеличению времени заполнения системы, несмотря на дополнительно залитый объем. При больших объемах вливаемой воды паровая подушка не успевает образовываться, задавливается, пар конденсируется в объеме залитой воды и наблюдается уменьшение времени заполнения системы.

Для оценки влияния пара на время заполнения канала рассмотрим упрощенную схему. Пусть в канал залит объем воды  $V_{\text{зал}}$ , перекрывающий объем пара  $V_{\text{п}}$ . Будем полагать, что начальный расход воды  $V = V_{\text{п}} + V_{\text{зал}}$ . Это значение расхода сохраняется до входа в канал объема воды, равного  $V_{\text{п}}$ , т. е. предполагается, что пар рассредоточен в объеме вливаемой воды, как бы увеличивая высоту столба жидкости, а затем замещается входящей в канал водой. После замещения пара на воду заполнение канала происходит в обычном режиме. Обозначим начальный расход  $G_0$ , гидравлическую постоянную  $t_0$  и расход на изливе  $G_{\text{изл}}$ . Тогда время заполнения канала

$$t = \frac{V_{\text{п}}}{G_0 - \frac{V}{t_0}} + t_0 \ln \frac{G - \frac{V}{V_0}}{G_{\text{изл}}} . \quad (15)$$

Используя данные по фактическому времени заполнения канала при различных объемах заливаемой воды, получим изменение количества перекрываемого пара (рис. 1), соответствующее наблюдаемому времени заполнения гейзера Котегей при частичном зондировании.

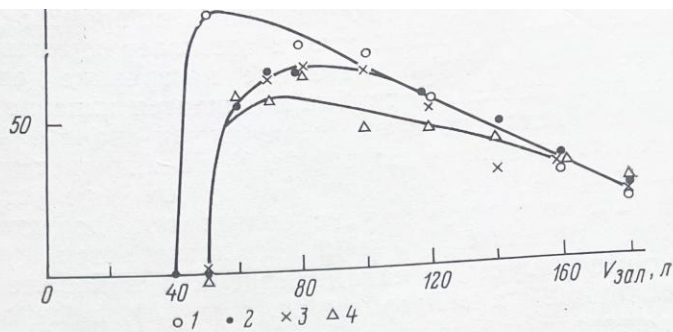


Рис. 1. Изменение количества пара  $V_{п}$  в канале гейзера Котегей, перекрываемого при гидрозондировании, в зависимости от объема  $V_{зал}$  и температуры заливаемой воды: 1—20°; 2—40°; 3—60°; 4—80° С

#### Сопоставление теории и эксперимента

С позиций модели восходящего течения нагрев заливаемой воды следует объяснять теплообменом со стенками канала. Извержение любого гейзера — это выброс пароводяной смеси, которая при выходе в атмосферу имеет температуру, соответствующую температуре кипения при атмосферном давлении, т. е. порядка 100° С. Температура кипения зависит от высоты над уровнем моря и для Долины Гейзеров, где высотные отметки изменяются от 350 до 800 м, при нормальном атмосферном давлении составляет 99—97° С. После извержения следует стадия парения, когда происходит осаждение в канале гейзера депарированной воды, имеющей температуру от 100° С до температуры питающих вод. Стенки канала гейзера в нормальном режиме прогреваются теплоносителем, имеющим температуры не ниже 100° С. Очевидно, что сам канал находится во вмещающей породе, температура которой ниже, и при импульсной подаче теплоносителя, особенно в тех случаях, когда извержения происходят редко, средняя по времени температура стенок канала может быть и ниже 100° С, по крайней мере в верхней части канала (например, стенки грифона). С другой стороны, существует ряд гейзеров, к которым относится и Котегей, в которых извержение происходит практически без разлива. Это значит, что поднимающаяся депарированная вода не претерпевает существенного охлаждения, т. е. стенки канала не успевают понизить свою температуру в то время, когда он свободен.

Таким образом, имеется достаточно оснований для рассмотрения влияния теплообмена между заливаемой в гейзер холодной водой и стенками канала.

Изменение периода гейзера при гидрозондировании характеризуется прямолинейной зависимостью от температуры заливаемой воды [8, 14, 20] и может быть описано следующими выражениями:

для гейзера Котегей

при $V_{зал}=180$ л	$t=(28,2-0,17 T_{зал})$ мин,
при $V_{зал}=120$ л	$t=(24,7-0,14 T_{зал})$ мин,
при $V_{зал}=100$ л	$t=(21,2-0,11 T_{зал})$ мин, (16а)
при $V_{зал}=50$ л	$t=(15,5-0,06 T_{зал})$ , мин

для гейзера Принц Буратино

при $V_{зал}=180$ л	$t=(34,0-0,233 T_{зал})$ мин,
при $V_{зал}=120$ л	$t=(25,2-0,157 T_{зал})$ мин, (16 б)
при $V_{зал}=80$ л	$t=(15,7-0,07 T_{зал})$ мин.



Охлаждение стенок канала определяется интенсивностью теплообмена, т. е. пропорционально разности значений температур стенки канала  $T_{K_0}$  и жидкости  $T_{зал}$  и продолжается пока заливаемая вода находится в канале. Таким образом, охлаждение пропорционально  $\alpha(T_{K_0} - T_{зал}) \cdot (V_{зал}/G)$ .

В результате поднимающаяся по каналу вслед за залитой вода охлаждается. Чтобы произошло извержение, необходимо определенное распределение температуры воды в канале — стенки канала должны сначала прогреться до естественного для данного гейзера значения. Тепловое воздействие со стороны горячей воды, имеющей температуру  $T_0$ , пропорционально  $\alpha(T_0 - T_{K_0})t$ . Сравнивая охлаждение за счет заливаемой холодной воды и прогрев за счет питающих гейзер вод, получим выражение для изменения периода гейзера при гидрозондировании

$$t \sim \frac{T_{K_0} - T_{зал}}{T_0 - T_{K_0}} \cdot \frac{V_{зал}}{G} \quad (17)$$

Угол наклона зависимости периода от температуры заливаемой воды пропорционален объему заливаемой воды; пропорционально объему должно изменяться время, соответствующее периоду при заливе воды с температурой  $T_{зал} = 0^\circ \text{C}$ .

Результат обработки опытных данных (16) представлен на рис. 2. Из зависимости (17) следует возможность определения температуры

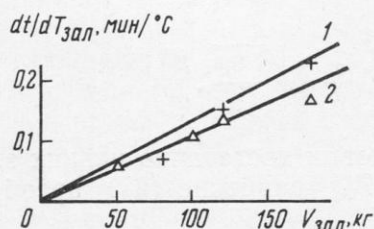
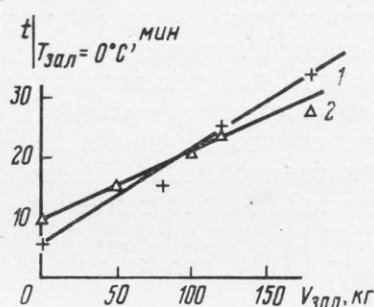


Рис. 2

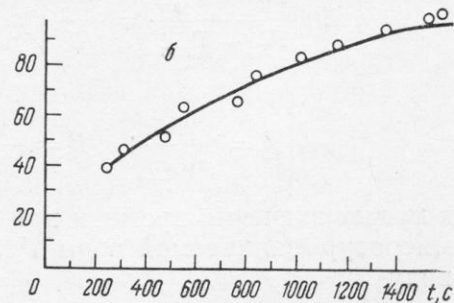
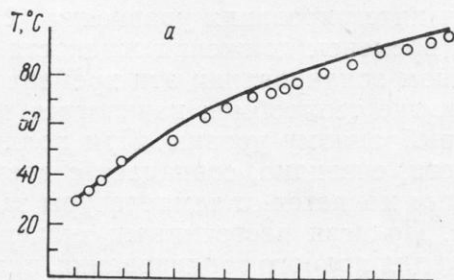


Рис. 3

Рис. 2. Обработка опытных данных по гидрозондированию гейзеров Принц Буратино (1) и Котегей (2) в соответствии с формулой (17)

Рис. 3. Изменение температуры изливаемой воды на гейзере Котегей после полного зондирования с температурой заливаемой воды: а —  $20^\circ \text{C}$ , б —  $40^\circ \text{C}$ . Линия построена в соответствии с расчетом по формуле (24); точки — экспериментальные значения

стенок канала и температуры питающих гейзеры вод по результатам гидрозондирования, однако фактическая точность невелика и составляет 30% для величины  $T_{K_0}$  и  $(T_0 - T_{K_0})$ .

Полученная зависимость (17) дает физическую интерпретацию характера изменения периода гейзера в результате гидрозондирования. Отметим, что точка пересечений линий, соответствующих различным

объемам заливаемой воды, должна соответствовать периоду в естественных условиях и характеризовать среднюю температуру стенок канала ( $117^\circ$  для Котегея и  $108^\circ$  для Принца Буратино).

Для малых времен изменения температуры стенки канала через начальную температуру стенки

$$T_K = T_{K_0} - \frac{2}{\lambda} \bar{q} \sqrt{\frac{\kappa_{\Pi} \tau}{\pi}}, \quad (18)$$

где  $\bar{q}$  — значение теплового потока среднее за время  $\tau$  протекания жидкости.

Из уравнения теплового изменения температуры жидкости  $dT_{ж}$  на расстоянии  $dX$  при ее подъеме к поверхности (ось против течения) связано соотношением

$$\pi r^2 \rho' c' \omega dT_{ж} = 2\pi r q dX. \quad (19)$$

Учитывая, что

$$\omega \frac{dT_{ж}}{dX} = \frac{dT_{ж}}{dt}, \quad (20)$$

получим

$$\frac{dT_{ж}}{T_{K_0} - T_{ж}} = \frac{2\alpha dt}{2\rho' c' \left[ 1 + \frac{2}{\lambda_{\Pi}} \alpha \frac{\bar{q}}{q} \sqrt{\frac{\kappa_{\Pi} \tau}{\pi}} \right]}. \quad (21)$$

Для интегрирования уравнения (21) необходимо найти соотношение между временем движения жидкости  $t$  и временем теплообмена  $\tau$ . При частичном зондировании эти времена не равны для тех верхних частей канала, где теплообмен начинается только с момента подъема жидкости к выбранному уровню. При полном зондировании время движения жидкости, очевидно, совпадает с временем теплообмена. Температура жидкости меняется от температуры заливаемой воды до температуры на изливе. Полагая постоянными значения физических свойств и величин  $r$ ,  $\alpha$ ,  $\bar{q}/q$  для полного зондирования, интегрируя (21), получим

$$\ln \frac{T_{K_0} - T_{зал}}{T_{K_0} - T_{изл}} = \frac{2A}{B} \left[ \sqrt{t} - \frac{1}{B} \ln(B \sqrt{t} + 1) \right], \quad (22)$$

где

$$A = \frac{2\alpha}{r\rho'c'}; \quad B = \frac{2}{\lambda_{\Pi}} \alpha \frac{\bar{q}}{q} \sqrt{\frac{\kappa_{\Pi}}{\pi}}.$$

Для малых значений времени при условии достаточно низких значений температур заливаемой воды  $T_{зал} \ll T_{K_0}$  уравнение (22) преобразуется к виду

$$T_{изл} - T_{зал} = AT_{K_0} t \quad (23)$$

или

$$A = \frac{1}{T_{K_0}} \cdot \frac{dT_{изл}}{dt}.$$

Определяя из опытных данных при гидрозондировании водой с  $T_{зал} = 20^\circ$  значение  $dT_{изл}/dt = 0,084^\circ \text{C}/\text{с}$ , получим значение коэффициента  $A = 0,84 \cdot 10^{-3} \text{с}^{-1}$ .

Приближение

$$\ln \frac{T_{K_0} - T_{зал}}{T_{K_0} - T_{изл}} = At \quad (24)$$

соответствует решению задачи в предположении постоянства температуры стенок канала. Обработка результатов измерения температуры по за-

зависимости (24) дает значение коэффициента  $A = 0,995 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  и температуры стенок канала  $T_{к_0} = 117,3^\circ \text{ С}$ . Почти полное совпадение (рис. 3) температуры на изливе (рассчитано по зависимости (24) и получено в эксперименте) скорее удивительно, чем показательно: форма канала неизвестна, температура стенок канала непостоянна, изменяется и коэффициент теплоотдачи. Кроме того, режим течения лежит в области, переходной от ламинарного к турбулентному режиму течения, для которой не существует достаточно надежных рекомендаций для расчета коэффициента теплоотдачи. Действительно, положив критерий Нуссельта равным предельному для круглой трубы при постоянной температуре стенки  $Nu = 3,66$ , исходя из выражения для коэффициента  $A$  (22), получим значение радиуса канала 2,3 см (температура воды  $T_{ж} = 50^\circ \text{ С}$ , температуропроводность  $\kappa_{п} = 15,7 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ ) или при расходе  $G = 0,1 \text{ л/с}$ , число Рейнольдса  $Re = 4900$ , соответствующее турбулентному режиму течения. Если число Нуссельта рассчитывать по зависимости [13]

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,4}, \quad (25)$$

рекомендуемой для турбулентного течения при  $10^4 < Re < 2 \cdot 10^5$  и  $0,7 < Pr < 150$ , то получим значение радиуса канала  $r = 5,2 \text{ см}$  и число Рейнольдса  $Re = 2200$ , практически равное критическому. Так как в канале движется пароводяная смесь, то, по-видимому, расчет по формуле для турбулентного режима даст более приемлемый результат.

#### Определение параметров пласта

Зная радиус канала, можно оценить энтальпию питающих вод, как это рекомендуется в работе [4]. Максимально низкое положение динамического уровня ( $l$ ) при величине свободного объема 180 л и радиусе канала 5 см составляет 22 м. Ему соответствует энтальпия питающих вод  $I = 130 \text{ ккал/кг}$ .

Полученное нами значение энтальпии отличается от предполагаемого в работах [4, 8, 15, 20]:  $I = 165—185 \text{ ккал/кг}$ . Различие существенно, так как количество образующегося при извержении пара различается в 2—3 раза. В пользу полученного нами значения отметим совпадение расчетной температуры стенки канала  $117^\circ \text{ С}$  со средним значением температуры в канале, которая может меняться от  $130$  до  $100^\circ \text{ С}$ .

Привлекаемая нами модель позволяет также объяснить величину объема воды 110—120 л, выбрасываемой при извержении. Этот объем складывается из объема воды, находящейся перед извержением в той части канала гейзера, которая опорожняется, и из объема воды, натекающей в канал во время извержения. Последний объем определяется максимальным расходом  $G_0 = 0,58 \text{ л/с}$  за время извержения 100 с и равен 53 л. Объем воды, находящийся перед извержением в опорожняемой части канала, определяется по значению расхода на изливе перед извержением  $G = 0,4 \text{ л/с}$ :

$$V = V_0 \left( \frac{G_0 - G}{G_0 - G_{изл}} \right), \quad (26)$$

и составляет 52 л. Это дает расчетное значение объема извергаемой воды 105 л, т. е. практически совпадающее с экспериментальным.

Для гейзера Котегей при вычисленном значении радиуса определяемые соотношениями

$$h_{ст} = \frac{l}{\frac{G_0}{G_{изл}} + 1}, \quad (27)$$

$$kM = G_{изл} / h_{ст},$$

значения пьезометрического уровня  $h_{ст} = 4 \text{ м}$  и коэффициента водопродности  $kM = 1,8 \text{ м}^2/\text{сут}$  представляются физически возможными.

## Заключение

1. На основании анализа данных по гидрозондированию гейзеров Котегей и Принц Буратино (Долина Гейзеров, Камчатка) показана неприменимость количественной теории гейзера, предложенной коллективом авторов Ш—М—Ш, для характеристики природных гейзеров: экспериментальные данные объясняются в рамках модели для исследования режимов работы пароводяных скважин.

2. Выявлена ошибочность определения и вычисления критических параметров гейзера: критического теплосодержания и критического объема.

3. Отмечается существенное влияние теплообмена со стенками канала на изменение периода гейзера при гидрозондировании.

4. Приведен пример расчета параметров продуктивного пласта: водопроводимости, пьезометрического уровня, энтальпии вод — для гейзера Котегей соответственно равных  $1,8 \text{ м}^2/\text{сут}$ ,  $+4 \text{ м}$ ,  $130 \text{ ккал/кг}$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Архангельский В. А. Движение газированных нефтей в системе скважина — пласт. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 92 с.
2. Дроздин В. А. Гидродинамика пароводяных скважин.— В кн.: Вулканизм и глубины Земли. М.: Наука, 1971, с. 262—265.
3. Дроздин В. А., Разина А. А. О природе гейзерного режима.— В кн.: Гидротерм. процесс в областях тектоно-магматической активности. М.: Наука, 1977, с. 96—103.
4. Дроздин В. А. Физика вулканического процесса. М.: Наука, 1980, с. 92.
5. Ентов В. М. О нестационарных процессах при фонтанировании скважин.— Изв. АН СССР. Сер. мех. и машиностроен., 1964, № 2.
6. Мержанов А. Г., Штейнберг Г. С., Штейнберг А. С. К теории гейзерного процесса.— Докл. АН СССР. Сер. геофиз., 1970, т. 149, № 2, с. 318—321.
7. Мержанов А. Г., Разина А. А., Штейнберг А. С., Штейнберг Г. С. Лабораторная модель гейзера.— Докл. АН СССР. Сер. геофиз., 1973, т. 211, № 3, с. 584—587.
8. Мержанов А. Г., Разина А. А., Фундаментский В. С., Штейнберг А. С., Штейнберг Г. С. Исследование гейзера методом гидрозондирования.— Бюл. вулканол. ст., 1973, № 49, с. 105, 111.
9. Мержанов А. Г., Штейнберг А. С., Штейнберг Г. С. Способ имитации работы природного гейзера. Авт. свид. № 461700.— Бюл. изобр., 1975, № 10.
10. Нехорошев А. С. К вопросу о теории действия гейзеров.— Докл. АН СССР, 1959, т. 127, № 5.
11. Паужетские горячие воды на Камчатке. М.: Наука, 1965. 208 с.
12. Сугробов В. М. (при участии Аверьева В. В.). Обводненность пород Паужетского месторождения и условия циркуляции высокотермальных вод.— В кн.: Паужетские горячие воды на Камчатке. М.: Наука, 1965, с. 49—63.
13. Теплотехнический справочник. М.: Энергия, 1975, т. 1, 744 с.; т. 2, 896 с.
14. Штейнберг Г. С., Штейнберг А. С., Мержанов А. Г., Разина А. А. Изучение критических параметров гейзера методом гидрозондирования.— Геол. и геофиз., 1976, № 11, с. 133—138.
15. Штейнберг Г. С. Определение теплоносителя в гейзерах методом гидрозондирования.— Докл. АН СССР, 1978, т. 241, № 3, с. 687—690.
16. Allen E. T., Day A. L. Hot springs of the Yellowstone National Park. Carnegie Inst. Washington, 1935. 525 p.
17. Anderson L. W., Anderegg J. W., Lawler J. E. Model geysers.— Amer. J. Sci., 1978, v. 278, № 5, p. 725—738.
18. Iwasaki I. Geochemical investigation of geysers in Japan.— Bull. Tokyo Inst. Technol., 1962, № 46, p. 1—60.
19. Lloyd E. F. The hot springs and hydrothermal eruptions of the Waiotapu geothermal area.— N. Z. J. Geol. Geophys., 1959, № 2, p. 76—141.
20. Steinberg G. S., Merzhanov A. G., Steinberg A. S. Hydrosounding as a method of study of the critical parameters of the geyser.— J. Volcanol. Geotherm. Res., 1973, № 3, p. 99—119.
21. White D. E. Some principles of geyser activity mainly from Steamboat Springs, Nevada.— Amer. J. Sci., 1967, v. 265, p. 641—684.