

Знамировский В.Н. Ртутная и ассоциирующая с ней минерализация на юге Сибирской платформы. — Сов. геология, 1966, № 12.  
 Зорин Ю.А. Новейшая структура и изостазия Байкальской рифтовой зоны и сопредельных территорий. М., "Наука", 1968.  
 Косыгин Ю.А., Ваньян А.Л., Соловьев В.А., Харин Е.П. Новые данные о глубинном строении Прибайкалья. — Докл. АН СССР, 1963, т. 151, № 5.

В.А. Дрознин, А.А. Разина

Институт вулканологии ДВНЦ АН СССР

### О ПРИРОДЕ ГЕЙЗЕРНОГО РЕЖИМА

Гейзеры — это пароводяные источники периодического действия. Практический интерес к исследованию природы и механизма гейзеров вызван необходимостью преобразования режима пароводяных скважин из гейзерного в постоянный, так как по условиям эксплуатации скважины, работающие в гейзерном режиме, не используются.

Теоретически следует ожидать, что гейзеры несут большую, чем постоянные источники, информацию о глубинных условиях, так как характеризуются большим числом параметров.

Наконец, свойство периодичности извержений обуславливает интерес к гейзерам как к естественным моделям периодичности вулканических извержений (Асланян, 1959; Iwasaki, 1962; Дрознин, 1971).

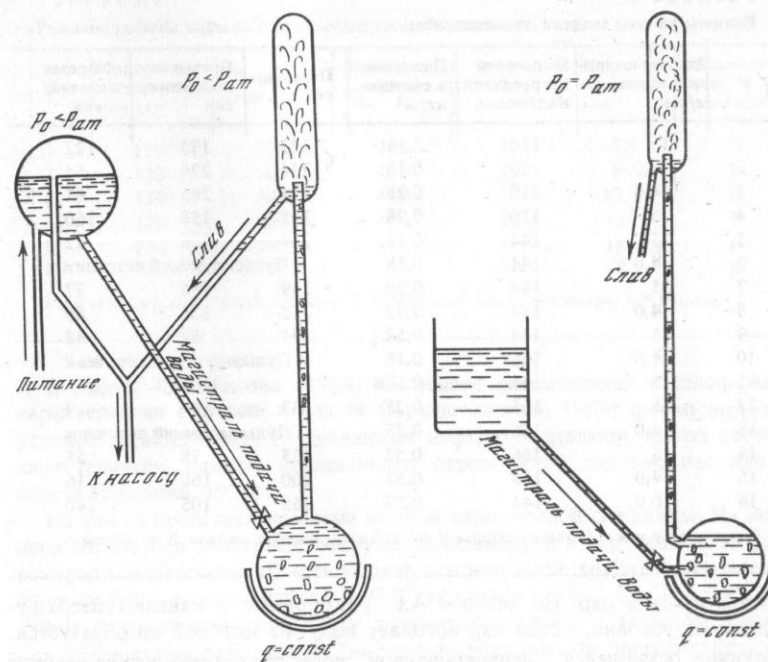
Рассмотрим основные представления о гейзерном процессе.

Подавляющее большинство работ, посвященных предположениям о механизме работы гейзеров, основано на принципе смешения двух потоков различного теплосодержания (White, 1967, Rinehart, 1970; Мержанов и др., 1970). Такой подход является следствием предположения о том, что возникновение пароводяных источников происходит в результате смешения эндогенного пара и инфильтрационной воды непосредственно в зоне питания источников. Анализ данных по термометрии скважин, пробуренных в пределах геотермальных систем, показал, что в продуктивных пластах происходит напорная фильтрация воды, а не пара. Однако принцип смешения наиболее просто объясняет периодичность работы гейзера.

На рис. 1 приведена схема модели гейзерного процесса, основанной на принципе смешения (Мержанов и др., 1973). Модель состоит из канала, в нижней части которого, условно называемой камерой, осуществляется нагрев "холодной" воды, поступающей в камеру из питающего сосуда. Повышение температуры в камере достигается (Мержанов и др., 1970) путем подвода "горячей" воды с постоянным расходом; подогрев в модели осуществляется источником постоянной мощности. Давление в системе поддерживается ниже атмосферного, что позволяет работать с водой, имеющей температуру меньше 100°C.

Цикличность работы данной модели выглядит следующим образом.

1. **З а п о л н е н и е с и с т е м ы.** После очередного извержения канал и часть камеры свободны от воды. Оставшаяся вода имеет  $T_{кип}$  соответствующую давлению внешней среды  $P_0$ . Под действием гидро-



Р и с. 1. Схема модели со смешением

Р и с. 2. Схема модели с аккумуляющей пар емкостью

статического напора холодная вода из питающего сосуда поступает в камеру, охлаждая ее и прекращая в ней кипение. Заполнение канала происходит с уменьшением расхода вследствие падения гидростатического напора (по принципу сообщающихся сосудов).

2. **С л и в.** Достигнув выходного среза канала, вода начинает сливаться; подогрев камеры продолжается и ведет к закипанию воды в системе.

3. **И з в е р ж е н и е.** При достижении в камере температуры воды, равной температуре кипения, при соответствующем давлении в камере происходит образование пара. Пузыри пара, прорываясь в канал, выталкивают из него часть воды, способствуя падению давления в камере, что ведет к объемному вскипанию всей массы перегретой воды и самоускоряющемуся процессу разгрузки. Извержение заканчивается после опорожнения канала и части камеры. Далее процесс повторяется.

Изменение режимов производится варьированием мощности нагревателя, расхода "холодной" воды, величины давления в системе (табл. 1).

В работе (Нехорошев, 1959) обращается внимание на то, что принцип смешения не следует понимать только как смешение двух потоков. При парообразовании в результате понижения давления вся вода не может

Таблица 1

Режимы работы модели со смещением

№	Расход холодной воды, г/сек	Мощность нагревателя, кал/сек	Давление в системе, кг/м <sup>2</sup>	Период, сек	Время заполнения, сек	Время слива, сек
1	15	110	0,18	322	175	122
2	4,0	110	0,18	324	274	54
3	4,0	110	0,28	295	205	64
4	15	110	0,28	345	158	160
5	15	144	0,18	264	226	12
6	4,0	144	0,18	Пульсирующий источник		
7	15	144	0,28	249	186	37
8	4,0	144	0,52	243	136	80
9	15	144	0,52	194	82	88
10	4,0	166	0,18	Пульсирующий источник		
11	15	166	0,18	То же		
12	15	166	0,25	183	150	9
13	4,0	166	0,25	Пульсирующий источник		
14	15	166	0,52	155	78	55
15	4,0	166	0,52	200	160	16
16	10,0	144	0,28	365	105	240

Примечание: Объем камеры  $V = 2200 \text{ см}^3$ , высота канала  $h = 180 \text{ см}$ .

превратиться в пар. По мнению А.С. Нехорошева, в канале гейзера существуют условия, когда пар обгоняет воду, из которой он образуется. Влияния оставшейся "депарированной" воды достаточно, чтобы вызвать задержку поступления пароводяной смеси на поверхность. Нетрудно показать, что для рассмотренных моделей период между извержениями может быть определен как время прогрева воды в камере до температуры кипения при мгновенно заполненной системе.

Другим направлением (Iwasaki, 1962) в объяснении периодичности гейзеров является предположение об особой геометрии подземной системы, существовании аккумулялирующих пар емкостей.

Схема модели (рис. 2) с использованием аккумулялирующей емкости выглядит следующим образом.

После извержения канал и часть камеры свободны от воды. Оставшаяся вода имеет температуру  $T_{\text{кип}} = 100^\circ\text{C}$ . Холодная вода поступает из питающего сосуда в камеру, охлаждая ее и прекращая в ней кипение. Часть камеры и канала заполняется соответственно положению уровня в питающем сосуде. В процессе прогрева испарение происходит со свободной поверхности в камере в паровую подушку. Рост массы пара в ней ведет к увеличению ее объема и вытеснению части воды в канал. Канал заполняется, далее следует стадия слива. Когда паровые пузыри прорываются в канал, вследствие уменьшения статического давления идет быстрая самопроизвольная разгрузка камеры. После стадии испарения цикл повторяется.

Изменение режимов (табл. 2) производилось варьированием мощности нагревателя и расхода питающей воды, а так же геометрии системы.

Таблица 2

Режимы работы модели с аккумулялирующей емкостью

№	Мощность нагревателя, кал/сек	Период, сек	Время заполнения, сек	Время слива, сек	Диаметр канала, мм	Положение камеры
1	130	561	463	19	7,5	I
2	130	560	469	19	8	I
3	130	504	410	17	10	II
4	130	580	482	22	12	I
5	130	589	491	19	18	II
6	130	708	596	21	28	II

Примечание: Объем камеры  $V = 2600 \text{ см}^3$ , высота камеры  $h = 165 \text{ см}$ .

В работе В.Н. Ентова (1964) на основе рассмотрения стационарных характеристик скважин и пласта (Архангельский, 1958) формулируется условие периодичности газированных нефтяных скважин. Метод расчета характеристик канала, заполненного пароводяной смесью, изложен в работе (Дрознин, 1971).

На рис. 3 представлена схема модели пароводяной скважины. Из нижнего сосуда под действием вакуума, создаваемого в верхней колбе форвакуумным насосом, по стеклянной вертикальной трубке засасывается горячая вода с температурой  $T^\circ\text{C}$ . Стеклянная трубка сообщается с сосудом посредством вакуумного резинового шланга с зажимом, позволяющим регулировать расход. Для стабилизации режима, нарушаемого разогревом колбы в процессе работы модели, в ней смонтирован спиральный холодильник с проточной холодной водой. Давление, создаваемое в колбе форвакуумным насосом, соответствует упругости водяных паров при температуре холодильника и моделирует атмосферное давление природных условий. Температурой воды в сосуде моделируется температура вод в пласте. Сопротивление на зажиме соответствует сопротивлению пласта. Различие сопротивлений заключается в том, что в пласте расход пропорционален перепаду давлений, на сужении же квадрат расхода пропорционален величине перепада давлений. Кроме того, пласт обладает некоторой упругостью, учитываемой коэффициентом пьезопроводности. Предполагается, что поправка на разницу сопротивлений пласта от сопротивления на сужении может быть введена аналитически.

При соблюдении условия возникновения гейзерного режима, когда расход меньше оптимального  $Q < Q_{\text{опт}} = 0,8D^{2/5} \text{ г/сек}$ , наблюдается следующая схема процесса.

После извержения верхняя часть трубки полностью опорожняется, в средней части находится охлажденная при парообразовании депарированная вода, в нижней — засасываемая из сосуда горячая вода. Оказывается, что на уровне горячей воды давление меньше давления насыщения, и в части нижнего столба идет парообразование. Пузырьки пара поднимаются по столбу депарированной воды, прогревая ее и, прорываясь к поверхности, образуют в верхней части трубки зону свободного течения пара.



Р и с. 3. Схема модели пароводяной скважины

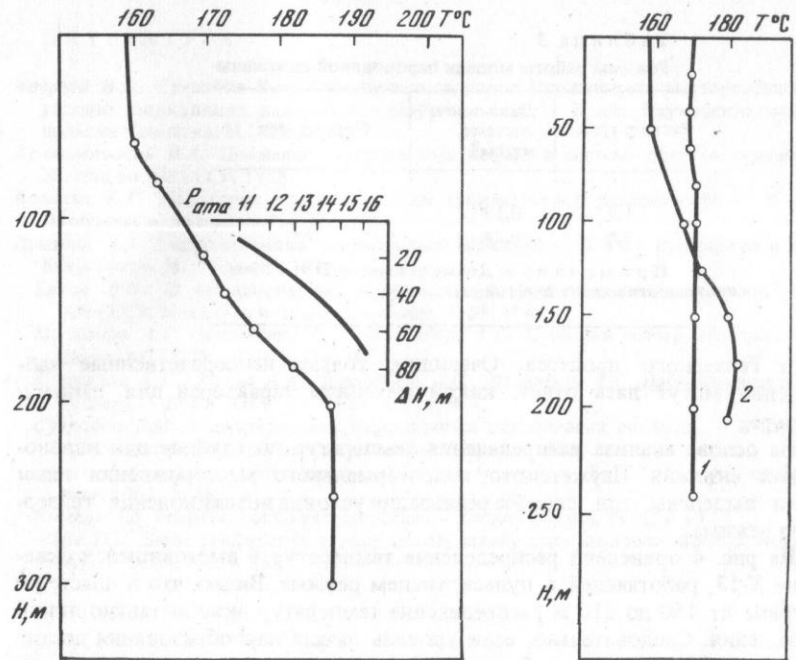
Уровень воды в трубке непрерывно повышается. В зависимости от величины расхода можно получить стадию излива, следовательно, разное давление и в конце концов стадию извержения. На модели можно получить извержение и без слива, при этом уровень воды находится ниже верхнего среза трубки, а средняя зона депарированной воды постепенно исчезает, прогреваемая восходящими пузырьками пара. Наконец, несмотря на существование в верхней части трубки столба жидкости, все еще поглощающей пар, в некотором слое пузырьков скапливается так много, что образуется паровая пробка-снаряд, которая быстро поднимается вверх, интенсивно перемешивая воду и увлекая с собой часть горячей воды. Один из снарядов прорывается к поверхности, затем свободно расширяется и выталкивает из трубки часть воды, создавая обычно наблюдаемый на многих гейзерах

характерный предварительный всплеск. На некоторое время процесс замирает, так как на уровне максимального паронасыщения где образовался снаряд, температура уменьшилась, а сброс давления не являлся достаточным, но уже через небольшой промежуток времени из-за конвективных токов и продолжающегося прогрева восходящими пузырьками пара вновь возникает снаряд пара, который выталкивает часть воды из трубки. Количество центров снарядообразования резко возрастает, из трубки изливается верхняя часть воды, уже насыщенная пузырьками пара. Во внутренней части трубы интенсивное движение снарядов, догоняющих друг друга, приводит к опорожнению трубы, причем в верхней части возникает пенообразный режим. В то же время начинается опускное движение депарированной воды, сопровождающееся характерными шелчками.

Период между извержениями зависит от расхода и степени перегрева (разницы температур холодильника и горячей воды). Модель была испытана на режимах, приведенных в табл. 3.

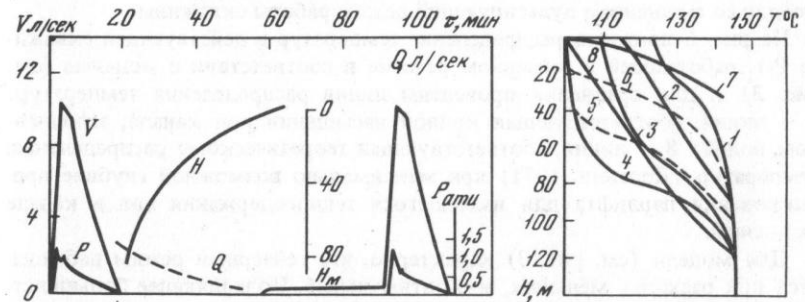
Во всех рассмотренных моделях четко выделяются основные стадии гейзерного процесса: извержение, парение, слив; более того, при изменении параметров можно получить на каждой модели все типы пароводяных источников — постоянный, пульсирующий, гейзерный, парящий.

И. Ивасаки (Iwasaki, 1962) придерживается мнения, что каждый гейзер обладает своими определенными особенностями геометрии канала или условиями питания, т.е. предполагается равновероятность любой мо-



Р и с. 4. Распределение температур в скважине К-13

Р и с. 5. Распределение температур в скважине РЭ-2



Р и с. 6. Распределение температур и изменение расхода, давления, теплосодержания и уровня воды во времени на скважине Р-1

1-1'; 2-6'; 3-12'; 4-18'; 5-24'; 6-40'; 7-Л<sub>H</sub>; 8-H<sub>p</sub> (Т)

Таблица 3

Режимы работы модели пароводяной скважины

Расход, г/сек	Давление в системе, кг/см <sup>2</sup>	Период, сек
1,9	0,19	134
2,5	0,28	57

Примечание: Диаметр канала  $D = 12$  мм, высота канала  $h = 160$  см.

дели гейзерного процесса. Очевидно, только непосредственные наблюдения могут дать ответ, какой механизм характерен для данного гейзера.

На основе анализа распределения температур по глубине для пароводяных скважин Паужетского гидротермального месторождения нами были выделены три способа реализации условия возникновения гейзерного режима.

На рис. 4 приведено распределение температур в выстоявшейся скважине К-13, работающей в пульсирующем режиме. Видно, что в пласте на глубине от 150 до 210 м распределение температур эквидистантно линии насыщения. Следовательно, если уровень начала парообразования достиг отметки 150 м, то парообразование должно начаться и на глубине до 210 м, т.е. должен произойти выброс пароводяной смеси.

На скважине РЭ-2 (рис. 5) на основе замера температуры, произведенного в закрытой скважине сразу после прекращения работы, следуя В.М. Сугророву (1965), можно говорить о наличии высокотемпературного пропластка на глубине 150–200 м, обуславливающего аналогично модели со смещением пульсирующий режим работы скважины.

На рис. 6 показано распределение температур в действующей скважине Р-1, работающей в гейзерном режиме в соответствии с моделью (см. рис. 3) и для сравнения проведены линии распределения температур: 7 – линия, соответствующая кривой насыщения при канале, заполненном водой; 8 – линия, соответствующая теоретическому распределению температур (Дрознин, 1971) при максимально возможной глубине проникновения парлифта для имеющегося теплосодержания вод в канале скважины.

Для модели (см. рис. 3) характерно, что гейзерный режим наблюдается при расходах меньших, чем оптимальный. Подавляющее большинство пульсирующих и гейзерных скважин Паужетского месторождения действительно имеет расход (Аверьев, Сугроров, 1965), меньший оптимального. Это условие характерно и для пароводяных источников.

Таким образом, можно предположить, что для Паужетского месторождения более распространены гейзеры с механизмом, обусловленным гидродинамическими особенностями двухфазной смеси.

## ЛИТЕРАТУРА

- Аверьев В.В., Сугроров В.М. Обводненность пород Паужетского месторождения и условия циркуляции высокотемпературных вод. – В кн.: Паужетские горячие воды на Камчатке. М., "Наука", 1965.
- Архангельский В.А. Движение газированных нефтей в системе пласт – скважина. М., Изд-во АН СССР, 1958.
- Асланян А.Г. Некоторые вопросы теории вулканической деятельности. – В кн.: Проблемы вулканизма. Ереван, 1959.
- Дрознин В.А. Гидродинамика пароводяных скважин. – В кн.: Вулканизм и геобины земли. М., "Наука", 1971.
- Ентов В.Н. О нестационарных процессах при фонтанировании скважин. – Изв. АН СССР. Механика и машиностроение, 1964, № 5.
- Мержанов А.Г., Штейнберг А.С., Штейнберг Г.С. К теории гейзерного процесса. – Докл. АН СССР, 1970, т. 194, № 2.
- Мержанов А.Г., Разина А.А., Штейнберг А.С., Штейнберг Г.С. Лабораторная модель гейзера. – Докл. АН СССР, 1973, т. 211, № 3.
- Сугроров В.М. Характеристика пароводяных разведочных скважин. – В кн.: Паужетские горячие воды на Камчатке. М., "Наука", 1965.
- Iwasaki I. Geochemical investigation of Geysers in Japan. – Bull. Tokyo Inst. of Technology, 1962, N 46.
- Rinehart J.S. Prediction of Geyser eruptions. – Tectonophysics, 1970, v. 10.
- White D.E. Some principles of geysers activity mainly from Steamboat Springs, Nevada. – Am. J. Sci., 1967, v. 265.