

УДК 550.3

ГЕОФИЗИКА

А. Г. МЕРЖАНОВ, А. А. РАЗИНА, А. С. ШТЕЙНБЕРГ,
Г. С. ШТЕЙНБЕРГ

ЛАБОРАТОРНАЯ МОДЕЛЬ ГЕЙЗЕРА

(Представлено академиком Н. Н. Семеновым 6 X 1972)

В работе авторов (¹) предпринята попытка построения теории гейзерного процесса. В настоящей заметке описывается лабораторная модель гейзера, созданная для экспериментальной проверки предложенной теории, и приводятся результаты первых экспериментов.

На рис. 1 изображена упрощенная схема установки, состоящей из резервуара с нагревателем, в который непрерывно подается холодная вода,

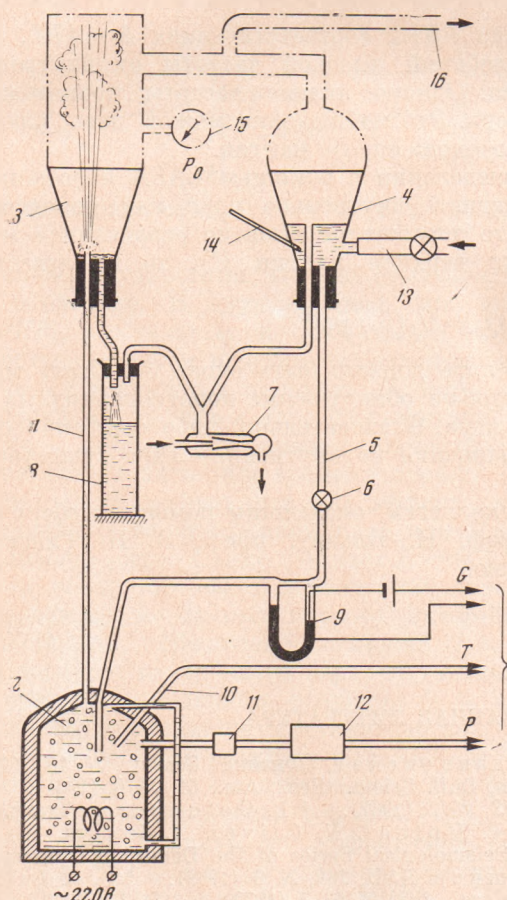


Рис. 1. Схема модели гейзера: 1 — вертикальный канал; 2 — гейзерная камера; 3 — грифон; 4 — питающий резервуар; 5, 6 — тракт и вентиль подвода холодной воды; 7 — воздушный эжекторный вакуумный насос; 8 — мерная колба; 9 — ртутный дифманометр; 10 — термopара; 11 — датчик давления; 12 — электронный усилитель; 13 — ввод дегазированной холодной воды; 14 — ртутный термометр; 15 — образцовый мановакуумметр; 16 — выход к форвакуумному насосу повышенной производительности; 17 — на вход многооточечно электронного потенциометра

и вертикального канала. Поступающая в резервуар (гейзерную камеру) вода нагревается до температур более высоких, чем температура кипения на верхнем конце канала. Извержение гейзера происходит, когда создаются условия для быстрого выделения энергии перегрева.

Отметим некоторые наиболее существенные стороны лабораторного моделирования гейзерного процесса.

1. Для того, чтобы извержение носило характер взрыва, что свойственно большинству естественных гейзеров, энергия перегрева воды

$$W = \rho V c (T'_k - T_k) = \rho V c \frac{R T'_k T_k}{L} \ln \left(1 + \frac{\rho g h}{P_0} \right)$$

должна быть достаточно велика. Здесь T'_k (°K) — температура кипения воды в канале при давлении $P = P_0 + \rho g h$; T_k (°K) — температура кипения воды на верхнем конце канала при давлении P_0 , V — объем камеры; h — длина канала; ρ и c — плотность и теплоемкость воды соответственно; L — скрытая теплота парообразования; R — универсальная газовая постоянная; g — ускорение силы тяжести.

В естественных условиях величина W велика за счет больших h или V . В лабораторных условиях большую энергию перегрева можно получить только путем уменьшения P_0 . Поэтому важным элементом экспериментальной установки является вакуумная система, позволяющая работать при малых значениях «атмосферного» давления P_0 . Вакуумирование осуществляется путем откачки воздуха из герметичных колб, имитирующих все основные узлы гейзерной системы.

Отметим, что «вакуумное» моделирование является весьма перспективным при изучении некоторых явлений, протекающих в земной коре. В частности, использование вакуума позволяет моделировать дегазацию нефти при изучении процессов, сопровождающих ее подъем в апикальные участки структур или движение по скважине.

2. Важной особенностью гейзерного процесса является саморегулируемое уменьшение расхода холодной воды по мере заполнения гейзерной системы. Наиболее простой способ осуществления этого — использование принципа сообщающихся сосудов. Одним сосудом является гейзерная камера с каналом, другим — источник холодной воды, который снабжен устройством, обеспечивающим постоянство уровня воды во времени. В этом случае

$$G(x) = a(x) \cdot \rho g (x_{yp} - x),$$

где $G(x)$ — расход холодной воды, x — координата уровня воды в гейзерной системе (камере и канале), x_{yp} — координата уровня воды в верхнем сосуде обеспечивается установкой сливной трубки, через которую сбрасывается вода.

Расход воды уменьшается от значения $G(0)$ при заполнении камеры до $G(h)$ при заполненном канале. Постоянство уровня воды в верхнем сосуде обеспечивается установкой сливной трубки, через которую сбрасываются излишки воды.

3. Механизм нагрева воды принципиального значения в гейзерных процессах не имеет. В качестве источника тепла в работе ⁽¹⁾ рассматривался подвод перегретого пара (или воды). В лабораторной модели для этих целей более удобно использовать введенный в камеру электроподогреватель постоянной мощности.

4. Возможность влияния выхода растворенных в воде газов на развитие извержения гейзера отмечена Бартом ⁽²⁾. В холодной воде, питающей лабораторную модель, может содержаться значительное количество растворенных газов. При перегреве происходит дегазация, искажающая характер гейзерного процесса. Поэтому в конструкцию установки введено устройство для предварительной дегазации воды, состоящее из кипяtilьника, системы холодильников и вакуумированного газоотборника.

5. Преимущество модели по сравнению с естественным гейзером заключается в том, что на модели легко измеряются все основные величины, характеризующие гейзерный процесс. В данной модели проводились измерения температуры (в двух точках по высоте камеры, в четырех точках по длине канала на входе и сливе), давления (в гейзерной и «атмосферной» камерах), расхода воды (на входе и сливе).

Температура в камере, канале и на сливе измерялась медь-константановыми термопарами с регистрацией на потенциометре ЭПР-19МЗ, температура холодной воды измерялась ртутным термометром. Давление в гейзерной камере измерялось индукционным датчиком ДД-10 с мембраной толщиной 150 μ . Давление в «атмосферной» камере фиксировалось образцовым вакуумметром. Расход поступающей в камеру холодной воды измерялся ртутным дифманометром, в узком колене которого устанавливалась платиновая нить, через которую пропусклся постоянный ток. При изменении расхода ртути шунтировала сопротивление нити. Падение напряжения на непогруженной в ртуть части проволоки регистрировалось на диаграмме потенциометра ЭПН-09. Расход сливаемой и извергаемой воды определялся по количеству жидкости в мерном цилиндре, установленном на сливе.

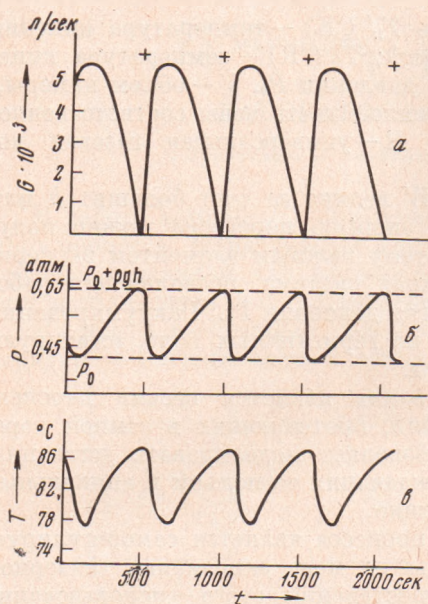


Рис. 2. Диаграммы изменения параметров процесса в модели гейзера: а — подвод холодной воды в гейзерную камеру; б — давление в гейзерной камере; в — температура в гейзерной камере. Крестиками отмечены моменты извержений

«Атмосферная» и верхняя камеры, а также промежуточные водо- и газоотборники изготовлены из термостойкого стекла. Прозрачные части установки позволяют наблюдать процессы парообразования, заполнения и разгрузки гейзерной системы.

На описанной установке проведены исследования гейзерных режимов при различных значениях мощности нагревателя, расхода холодной воды и «атмосферного» давления. В качестве примера на рис. 2 приведены зависимости $P_{\text{кам}}(t)$, $G(t)$ и $T_{\text{кам}}(t)$, полученные при $q = 300$ кал/сек, $G(0) = 5,5 \cdot 10^{-3}$ л/сек, $P_0 = 305$ мм рт. ст. Временные характеристики процесса в этом режиме следующие: время заполнения камеры $t_2 = 182 \pm 15$ сек., время заполнения канала $t_1 = 275 \pm 15$ сек., время слива $t_3 = 32 \pm 2$ сек., время извержения $t_4 = 18 \pm 2$ сек.

После извержения опорожняется канал и часть камеры. В камере находится большое количество пара, который конденсируется в процессе поступления холодной воды. Камера заполняется с постоянным расходом $G(0)$ при постоянном давлении P_0 . Заполнение канала характеризуется монотонным ростом давления до величины $P_0 + \rho gh$ и уменьшением расхода поступающей воды. Начало парообразования, появление паровых пузырей в канале приводит к уменьшению давления в камере и соответственно к увеличению расхода холодной воды.

В стадии прогрева давление и температура в камере продолжают расти. Как показали первые эксперименты (рис. 2), температура при этом может заметно превосходить расчетную температуру кипения при соответствующем давлении, т. е. жидкость является метастабильной ⁽³⁾. При

достижении необходимого перегрева (разность температур в камере и на сливе) начинается извержение. Во время извержения давление в камере падает до «атмосферного», расход холодной воды увеличивается до $G(0)$. Далее процесс повторяется с удовлетворительной воспроизводимостью; расхождение по основным характеристикам не превышает 3–8%.

Созданная лабораторная модель гейзера позволяет при широком варьировании параметров детально изучить основные особенности процессов и экспериментально проверить выводы теории.

Филиал Института химической физики
Академии наук СССР
Черноголовка Моск. обл.

Поступило
6 X 1972

Институт вулканологии
Дальневосточного научного центра
Академии наук СССР
Петропавловск-Камчатский

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ А. Г. Мержанов, А. С. Штейнберг, Г. С. Штейнберг, ДАН, 194, № 2 (1970). ² T. W. Barth, Volcanic Geology Hot Springs and Geysers of Iceland, 1950.
³ В. Н. Скрипов, Метастабильная жидкость, «Наука», 1972.