

## **Новый подход к физическому моделированию периодического действия гейзеров** *Белусов А.Б., Белоусова М.Г.*

### **New approach to physical modeling of periodic activity of geysers**

*Belousov A.B., Belousova M.G.*

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский;*

*e-mail: [belousov@mail.ru](mailto:belousov@mail.ru)*

Предложен новый подход к физическому моделированию гейзерного процесса, в котором для создания двухфазного модельного флюида вместо нагрева и кипения воды предлагается применить механическое смешение воды и воздуха. Водно-воздушная смесь подвергается гравитационной сепарации в баке, который воспроизводит деятельность в подземной полости согласно гипотезе Маккензи.

#### **Введение**

Несмотря на длительную историю изучения гейзеров (более 200 лет в мире и 80 лет на Камчатке в России), механизм периодических извержений гейзеров до сих пор является предметом дискуссии. Главным препятствием в понимании механизма периодического действия гейзеров является недостаток данных о строении их подводящих каналов, расположенных под поверхностью земли, а также о процессах, протекающих в них (каналы заполнены паром и горячей водой и труднодоступны для прямых наблюдений и измерений). В связи с этим, одним из немногих методов исследования гейзеров служит физическое моделирование их деятельности.

Авторами предложен новый подход к физическому моделированию гейзерного процесса, при котором для создания двухфазного модельного флюида, вместо нагрева и кипения воды, предлагается применить механическое смешение воды и воздуха, что сильно упростит и удешевит процесс моделирования.

Водно-воздушная смесь будет подвергаться сепарации на газ/воду в установке, воспроизводящей гейзерную питающую систему типа Маккензи [7] с резервуаром, моделирующим подземный резервуар «bubble trap» или «ловушку для пузырей» (гидрозатвор). Предложенная установка для физического моделирования гейзерного процесса позволит определить реально работающий механизм, обеспечивающий периодический режим извержений гейзеров, и выявить факторы, которые этим режимом управляют.

#### **Физическое моделирование гейзерного режима**

Всего в мире в разное время было создано около десяти установок для физического моделирования гейзерного процесса [1, 3, 6]. Основным процессом, моделировавшим периодическую (гейзерную) деятельность всех этих установок являлся процесс нагрева и кипения воды или другой модельной жидкости. При этом, работа большей части созданных установок тестировала теорию гейзерного процесса Бунсена [5], т.е. была основана на представлении, что извержения гейзеров вызываются резким вскипанием перегретой воды, заполняющей подводящий канал гейзера. Значительно реже тестировали идею Маккензи [7] о наличии в подводящей системе гейзеров подземной полости, заполненной кипящей водой и паром (рис. 1).

В 2006-2008 гг. для исследования строения подводящих систем гейзеров Долины Гейзеров (Камчатка) была применена специальная подводная термостатированная видеосистема [4], которая позволяла наблюдать строение подводящих систем гейзеров и происходящие в них процессы. Видеонаблюдения показали, что гейзеры устроены и действуют в соответствии с представлениями Маккензи. Эта работа активизировала исследования гейзеров по всему миру. Подземные полости, заполненные паром и водой, с применением разных методов были найдены у гейзеров Йеллоустоуна, Исландии и Чили.

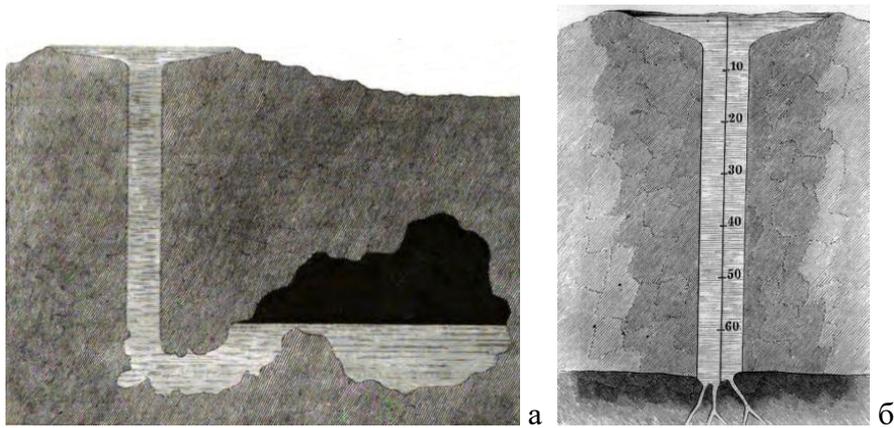


Рис. 1. Два основных типа подводящих систем гейзерных моделей: а – тип «ловушка для пузырей», предложенная Маккензи [7]; б – тип «длинный вертикальный канал», предложенный Бунсеном [5].

Нечаев [2] предложил физико-математическое объяснение деятельности гейзеров с подводящей системой типа Маккензи, которое показало, что гейзеры возникают при декомпрессии гидростатически связанных полостей газа (пара) и жидкости (воды), находящихся в динамическом равновесии друг с другом. Колебательное/периодическое истечение пара и воды из такой системы обусловлено принципиально разными физическими свойствами жидкостей и газов. Эта работа показала, что кипение воды в системе гейзера, в основном, необходимо только для создания притока двухфазного флюида (пар/вода), а подземная полость («ловушка для пузырей», в английской терминологии «bubble trap») необходима для сепарации двухфазной смеси и создания двух гидродинамически связанных (и гидростатически уравновешенных) объемов жидкости и газа. Эти знания дают основание предположить, что гейзер может периодически действовать при декомпрессии динамически связанных и гидростатически уравновешенных объемов любой жидкости и любого газа.

Полученные данные позволили выработать новый подход к физическому моделированию деятельности гейзеров. В рамках этого подхода вскипающая вода может быть заменена двухфазной жидкостью, созданной простым механическим смешением воды и какого-либо газа (например, воздуха). Такая замена сильно упрощает (и удешевляет) процесс моделирования, а также делает его безопасным для экспериментатора.

### **Новая экспериментальная установка по моделированию работы гейзеров**

Предлагается создать экспериментальную установку (рис. 2), моделирующую работу гейзера и имеющую подводящую систему, которая будет основана на идее «ловушки для пузырей» [7]. Установка будет состоять из большого металлического бака объемом около 200 литров с окнами (для наблюдения за процессом), в который через трубу будет закачиваться двухфазная жидкость (вода+воздух). В баке 2-фазная жидкость будет расслаиваться: вода займет нижнюю часть бака, а воздух – верхнюю. Воздух, по мере накопления, будет вытеснять воду из бака через трубу в форме сифона, имитирующую выводящий канал гейзера. Когда уровень границы вода/воздух опустится до уровня выходного отверстия бака, произойдет совместное извержение воды и воздуха, которое будет иметь периодический (гейзерный) режим.

Для регистрации процессов внутри и снаружи бака будут использоваться камера покадровой съемки и логгер температуры и давления. Работы по моделированию предлагается проводить на одном из стационаров Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Предварительное моделирование (неопубликованные данные Белоусова А.Б.) показало, что на такой установке реалистично воспроизводятся все основные фазы гейзерного режима (заполнение канала, излив, фонтанирование и снова

заполнение канала). С помощью физического моделирования будет изучено, как изменения геометрических параметров установки будут влиять на режим периодических извержений.

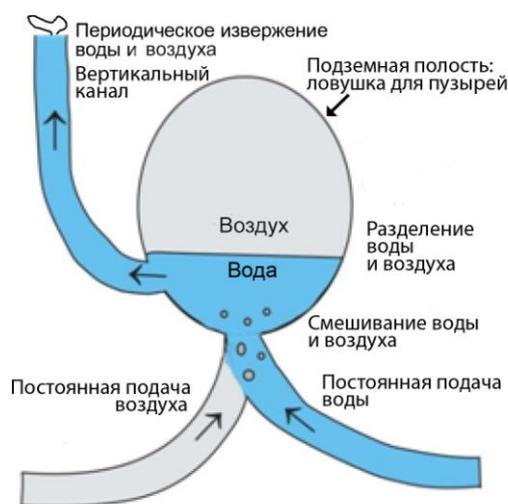


Рис. 2. Экспериментальная установка, основанная на идее «ловушки для пузырей».

### Заключение

Новый подход к физическому моделированию деятельности гейзеров без использования нагрева и кипения модельной жидкости упростит и удешевит моделирование, что даст возможность получить новые фундаментальные знания о гейзерном процессе. Эти знания будут востребованы для прогнозирования деятельности вулканов и гейзеров, при разработке месторождений подземного пара, а также при проектировании промышленных установок, в которых используется циркуляция газожидкостных смесей (например, буровых скважин, подземных хранилищ углеводородов, систем охлаждения атомных реакторов и др.).

Создание новой экспериментальной установки по физическому моделированию гейзерного процесса поддержана грантом РФФ № 23-27-00318.

### Список литературы

1. Мержанов А.Г., Штейнберг А.С., Штейнберг Г.С. К теории гейзерного процесса // Доклады Академии наук. 1970. № 194. Вып. 2. С. 318-321.
2. Нечаев А.М. О механизме извержения гейзера // Труды Кроноцкого государственного природного биосферного заповедника. 2012. Вып. 2. С. 135-143.
3. Adelstein E., Tran A., Munoz-Saez C. et al. Geysir preplay and eruption in a laboratory model with a bubble trap // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2014. V. 285. P. 129-135. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.08.005>
4. Belousov A., Belousova M., Nechayev A. Video observations inside conduits of erupting geysers in Kamchatka, Russia, and their geological framework: implications for the geysir mechanism // Geology. 2013. V. 41. P. 387-390. <https://doi.org/10.1130/G33366.1>
5. Bunsen R.W. Physikalische Beobachtungen uber die hauptsachlichsten Geysir Islands // Annalen der Physik und Chemie. 1847. V. 83. P. 159-170.
6. Hurwitz S., Manga M. The fascinating and complex dynamics of geysir eruptions // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2017. V. 45. P. 31-59.
7. Mackenzie G.S. Travels in the Island of Iceland // Edinburgh, Allam and Company. 1811. 27 p.