

УДК 532.593+532.529+532.528+532.787+550.3

## НАЧАЛЬНАЯ СТАДИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ МАГМЫ В ЩЕЛЕВОМ ВУЛКАНЕ ПРИ КОНЕЧНОЙ СКОРОСТИ РАСКРЫТИЯ ДИАФРАГМЫ

М. Н. Давыдов, В. К. Кедринский

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия  
E-mails: davydov@hydro.nsc.ru, kedr@hydro.nsc.ru

Представлены результаты численного анализа динамики сжатого магматического расплава в щелевом канале при постепенном раскрытии диафрагмы, а также результаты моделирования ее разрушения во времени. Используются математическая модель Иорданского — Когарко — ван Вингаардена двухфазной среды и модель, описывающая фазовые изменения, происходящие в газонасыщенной магме за фронтом формирующейся волны декомпрессии. Приведены результаты численного моделирования течения с учетом особенностей динамики давления в волне декомпрессии, компонент массовой скорости, объемной доли газовой фазы и вязкости.

Ключевые слова: щелевое вулканическое извержение, трещина, магматический расплав, декомпрессия, кавитация, вязкость.

DOI: 10.15372/PMTF20170612

**Введение.** Исследование вулканических извержений обусловлено, прежде всего, необходимостью определения степени потенциальной опасности конкретных вулканов. Особый интерес представляет изучение вулканов, извержения которых имеют разрушительный или взрывной характер. Механизм этих процессов определяется общим уменьшением давления при подъеме магмы в верхние горизонты коры или при разрушении диафрагмы, закрывающей канал вулкана с магмой, сжатой высоким давлением, и как следствие выделением растворенных веществ в виде пузырьков газа за фронтом волны декомпрессии, приводящей к росту пузырькового давления в магме. Превышение некоторого критического значения давления приводит к катастрофическим взрывным (или взрывным) извержениям, сопровождающимся выбросами большого количества пирокластического материала и газов.

Очевидно, что даже непрерывное наблюдение за активным вулканом не позволяет получить достаточно полную информацию о процессах, происходящих в канале вулкана при извержении. Можно лишь зафиксировать фазовые переходы (по результатам исследования образцов затвердевшей магмы) и разрушения изначально сплошного магматического потока (по результатам анализа структуры выброса). Поэтому построение моделей состояния магмы в канале вулкана и исследование различных режимов вулканических извержений методами механики многофазных сред для выяснения механизмов, определяющих тип и

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 15-05-03336-а).

© Давыдов М. Н., Кедринский В. К., 2017

характер извержения, а также для интерпретации данных полевых наблюдений является практически единственным способом исследования.

При теоретическом исследовании и экспериментальном моделировании взрывных вулканических извержений прежде всего необходимо выделить следующие проблемы: формирование на начальной стадии извержения трехфазного состояния магмы при ее взрывной декомпрессии в волне разгрузки [1]; эволюция структуры трехфазного потока при подъеме магмы по каналу вулкана [2]; разрушение вспененной и частично закристилизованной магмы (процесс фрагментации магмы и ее переход в газовзвесь); влияние фаз и возрастающей на несколько порядков вязкости магмы (в процессе ее дегазации и охлаждения) на структуру потока и динамику процесса извержения в целом [3, 4]. Все эти задачи чрезвычайно сложны для теоретического исследования и экспериментального моделирования, при этом каждая из них представляет собой отдельную научную проблему.

В настоящее время существует большое количество работ, посвященных моделированию процесса извержения вулкана в общей постановке [5]. Одной из первых работ по данной тематике является работа [6], в которой предложена модель течения, имеющего структуру, меняющуюся от гомогенной до структуры течения газовзвеси в результате уменьшения давления при подъеме магмы по каналу вулкана. Изменение структуры течения сопровождается нуклеацией и ростом в магме газовых пузырьков, их частичной коалесценцией, переходом кавитирующей магмы во “вспененное” состояние и ее быстрой фрагментацией. Во всех опубликованных позднее работах, посвященных моделированию взрывных вулканических извержений, используется данная концепция.

Различные модели течения магмы в канале вулкана в процессе как эксплозивного, так и экструзивного извержения (с возможной инверсией), а также модели фрагментации магмы предложены в работах [7, 8], в которых сделана попытка учесть все эффекты, сопровождающие данный процесс.

Несмотря на то что в одномерных постановках вулканические извержения изучены достаточно хорошо, остается большое количество вопросов, для получения ответов на которые требуется решение двумерных задач о течении. В частности, недостаточно изучена начальная стадия щелевого извержения с разрушением диафрагмы во времени. В результате разрушения диафрагмы за конечный промежуток времени в магме происходят интенсивные двумерные процессы кавитации и под поверхностью магмы формируются “вихревые” течения, что в значительной степени определяет структуру возникающего потока и соответственно характер извержения.

**Постановка задачи.** Рассматривается течение за фронтом волны декомпрессии в канале вулкана щелевого типа. В простейшем случае модель вулкана состоит из магматической камеры и канала вулкана, заполненных магматическим расплавом, находящимся под давлением. Верхняя граница магмы в канале представляет собой диафрагму, на начальной стадии разрушения которой запускается процесс формирования волны декомпрессии. Область моделирования представляет собой прямоугольник шириной  $X = 20$  м и высотой 150 м. На нижней границе поддерживается постоянное давление  $p_{ch} = 170$  МПа, на высоте  $H = 100$  м находится диафрагма, ниже которой расположен сжатый магматический расплав, а выше — атмосфера. В начальный момент времени диафрагма начинает раскрываться, что моделирует разрушение пробки вследствие развития трещины. Боковые границы области представляют собой твердые стенки, на которых ставится условие частичного проскальзывания (условие Навье) с эффективной длиной проскальзывания, зависящей от объемной доли газа. В силу симметрии задачи расчет проводился на половине области с соответствующим условием на плоскости симметрии.

Основная математическая модель процесса подробно изложена в [9]. В данной работе приводятся дополнительные предположения, принятые при моделировании развития тре-

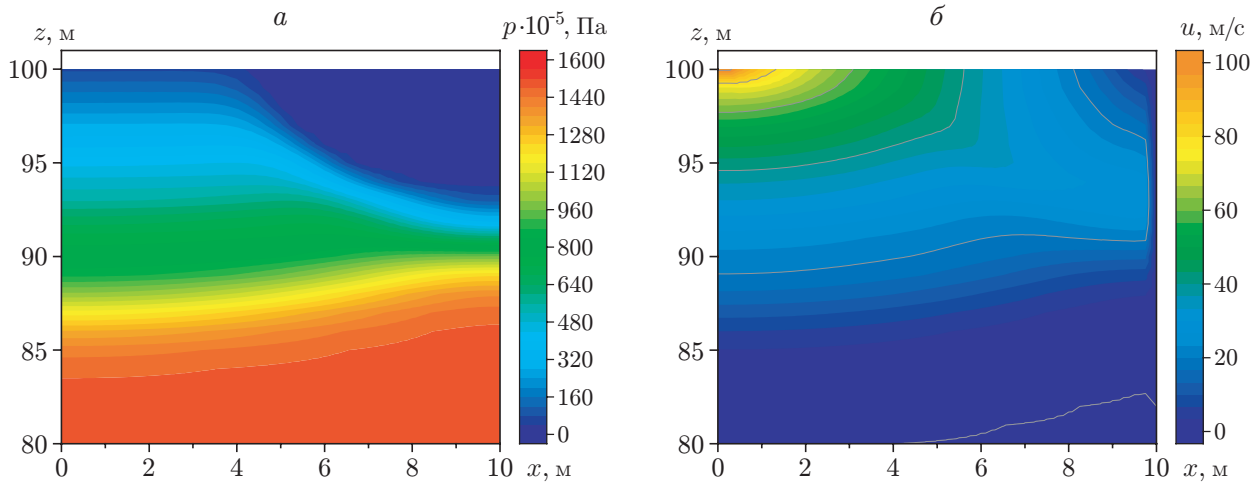


Рис. 1. Распределения давления (а) и вертикальной компоненты скорости (б) в момент времени  $t = 10$  мс

щины, соответствующей разрушению диафрагмы во времени. Предполагается, что трещина развивается с постоянной скоростью и за время  $T^*$  распространяется от центра щели до боковой стенки. За это время в направлении от плоскости симметрии ( $x = 0$ ) к боковой грани ( $x = X/2$ ) давление на границе постепенно заменяется на атмосферное  $p_0$ . В расчете полагалось  $T^* = 7$  мс, что соответствует времени распространения возмущения в моделируемой среде. Предполагалось, что в магматическом расплаве при уменьшении давления до критического значения происходит гетерогенная нуклеация газовых пузырьков, число центров нуклеации задавалось в диапазоне  $10^{12} \div 10^{16} \text{ м}^{-3}$ , что соответствует экспериментальным данным о наличии микропримесей в вулканических материалах [10].

**Результаты моделирования.** Рассмотрен процесс декомпрессии магматического расплава в канале в течение 70 мс, что соответствует времени прохождения волны от свободной поверхности до нижней границы канала. Число центров нуклеации составляло  $10^{12} \text{ м}^{-3}$ .

Картина течения вблизи свободной поверхности в момент времени  $t = 10$  мс представлена на рис. 1. К этому моменту вся верхняя граница становится свободной (диафрагма открывается полностью при  $t = 7$  мс). Вниз по каналу распространяется волна разрежения, фронт которой искривлен, в отличие от фронта волны, полученного в постановке, предложенной в работах [9, 11]. Возникают поперечные волны давления, что приводит к неравномерному распределению давления по высоте канала. Вертикальная компонента скорости имеет максимум на плоскости симметрии, где начинает уменьшаться давление.

Дегазация среды к моменту времени  $t = 10$  мс незначительная, поэтому на боковой границе течение отсутствует.

На рис. 2 показаны распределения давления, вязкости и компонент скорости на высоте  $z = 90$  м в моменты времени  $t = 10, 12, 14$  мс. Видно, что падение давления в слое сопровождается его колебаниями, распространяющимися от плоскости симметрии к боковой стенке и обратно. Данные волны давления оказывают влияние на форму профиля компонент скорости. Вертикальная компонента скорости в слое увеличивается и в эти моменты времени составляет  $20 \div 35$  м/с, формируется пограничный слой. Горизонтальная компонента скорости на порядок меньше вертикальной и под действием волн давления меняет знак. Колебания давления приводят к тому, что в разных слоях (на разной высоте канала) уменьшение давления до критического значения, при котором начинается нуклеация, может произойти как вблизи боковой стенки, так и вблизи плоскости симметрии.

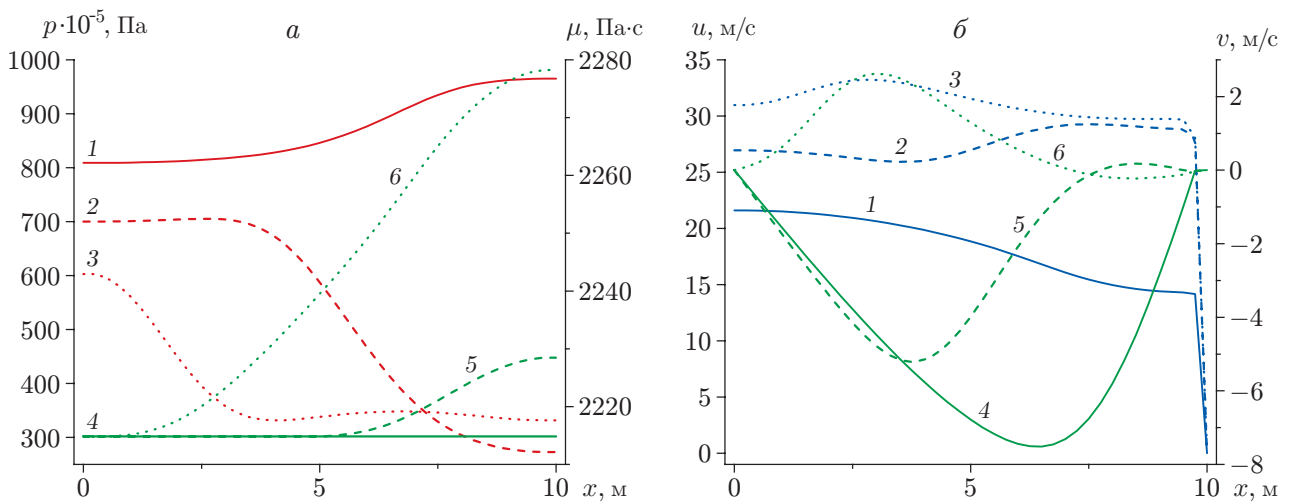


Рис. 2. Распределения параметров течения по координате  $x$  при  $z = 90$  м в различные моменты времени:  
 а — давление (1–3) и вязкость среды (4–6), б — вертикальная (1–3) и горизонтальная (4–6) компоненты скорости; 1, 4 —  $t = 10$  мс, 2, 5 —  $t = 12$  мс, 3, 6 —  $t = 14$  мс

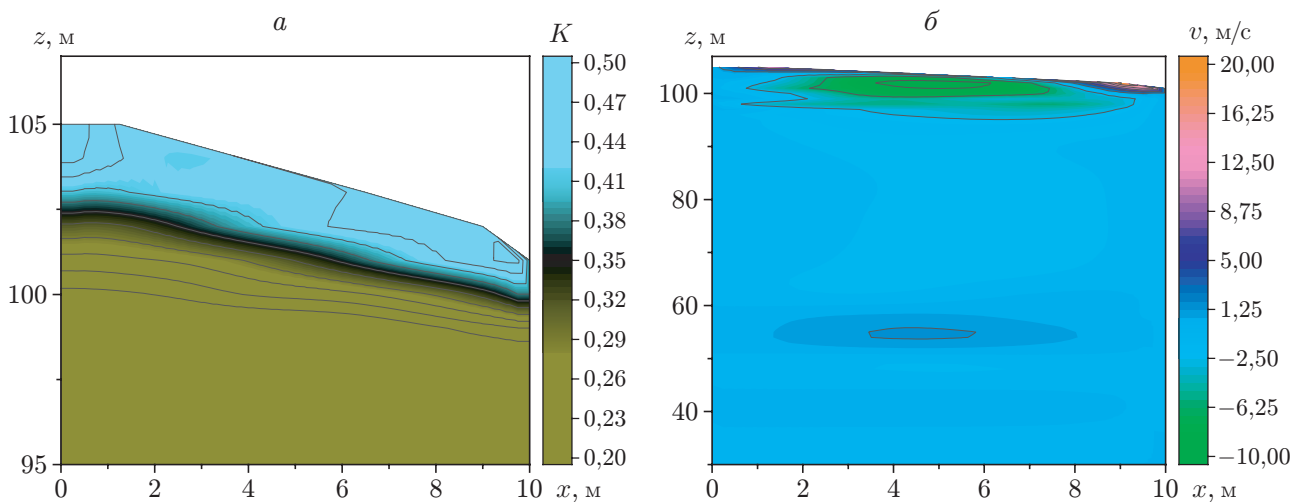


Рис. 3. Распределения объемной доли пузырьков (а) и горизонтальной компоненты скорости (б) в момент времени  $t = 40$  мс

В данном случае нуклеация начинается в окрестности боковой стенки и распространяется по направлению к плоскости симметрии. Нуклеация и происходящая затем диффузия растворенного газа из расплава в образовавшиеся пузырьки приводят к дегазации расплава и изменению его вязкости. Увеличение вязкости вблизи границы и возникающая волна вязкости хорошо видны на рис. 2, а.

Данные особенности обусловлены разрушением диафрагмы вдоль верхней границы с конечной скоростью и отсутствовали при решении задач в других постановках. В результате распределения вязкости, массовой доли растворенного газа и объемной доли газовой фазы в магматическом расплаве в горизонтальных сечениях канала становятся неравномерными.

На рис. 3–5 представлены распределения основных параметров при  $t = 40, 70$  мс. К моменту времени  $t = 40$  мс волна проходит больше половины расстояния (см. рис. 3). За ее

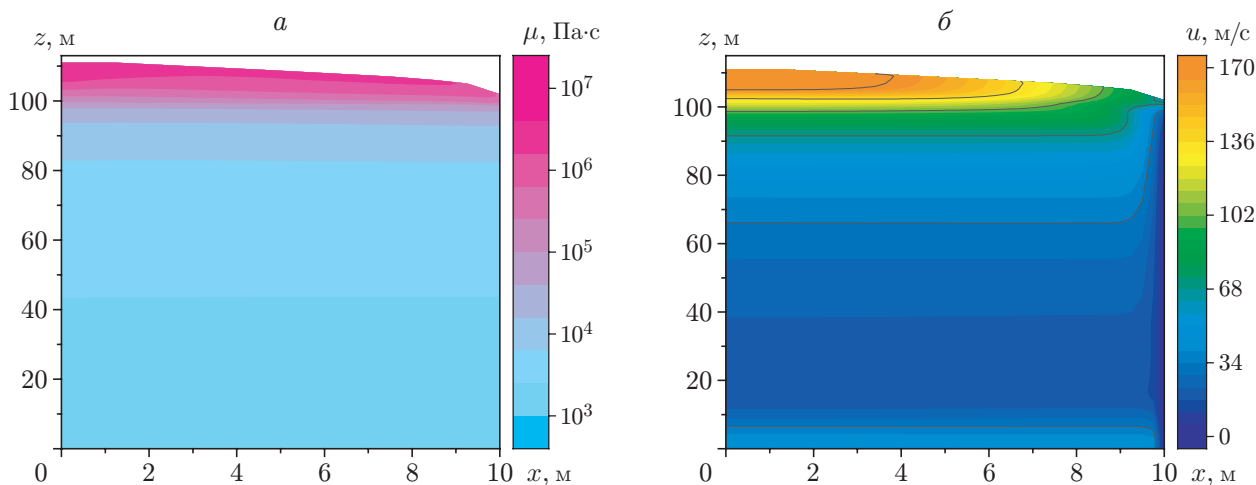


Рис. 4. Распределения вязкости (*а*) и вертикальной компоненты скорости (*б*) в момент времени  $t = 70$  мс

фронтом наблюдаются очаги повышенного и пониженного давления. Свободная поверхность сдвигается как в центре, где высота подъема составляет 5 м, так и вблизи границы. Распределение горизонтальной компоненты скорости свидетельствует о формировании в слое толщиной 50 м под свободной поверхностью вращательного течения, направленного к плоскости симметрии в верхней части слоя и в противоположном направлении на глубине  $z = 50 \div 60$  м. Анализ распределения объемной доли газа показывает, что под свободной поверхностью сформировался пузырьковый слой, в котором объемная доля газа составляет  $0,4 \div 0,5$ . Это приводит к появлению течения на твердой стенке в соответствии с условием проскальзывания.

К моменту времени  $t = 70$  мс вязкость увеличивается на несколько порядков: от начального значения  $\mu = 1,8 \cdot 10^3 \div 2,3 \cdot 10^3$  Па·с (в зависимости от глубины) до значения  $\mu = 10^7$  Па·с на свободной поверхности (см. рис. 4). К этому моменту вертикальная компонента скорости приобретает большой градиент ( $100 \div 170$  м/с) в верхнем слое кавитирующей магмы толщиной  $90 \div 110$  м (см. рис. 4, б).

На характер процесса извержения могут оказывать влияние различные параметры среды. На рис. 5 показано распределение горизонтальной компоненты скорости в верхней части расчетной области в момент окончания процесса декомпрессии столба магмы ( $t = 70$  мс) при различном количестве кавитационных зародышей. В случае когда число зародышей невелико ( $10^{12} \text{ м}^{-3}$ ), свободная поверхность имеет форму, близкую к наклонной прямой (см. рис. 5, а). Выделяется область с отрицательным значением горизонтальной составляющей скорости, что свидетельствует о формировании течения, направленного к плоскости симметрии.

В случае большого числа зародышей ( $10^{16} \text{ м}^{-3}$ ) объемная доля газа существенно увеличивается. Вследствие проскальзывания на боковой стенке форма свободной поверхности меняется, становясь куполообразной. При этом горизонтальная компонента скорости становится положительной, что свидетельствует о движении среды вдоль свободной границы к боковой стенке. Однако ниже этой границы возникает зона, в которой значения горизонтальной компоненты отрицательны. Значения этой компоненты скорости равны 10 и  $-10$  м/с соответственно. Можно сделать вывод о наличии своеобразной “вихревой” зоны, сформированной горизонтальной компонентой.

**Заключение.** Построена оригинальная двумерная физико-математическая модель целевого вулканического извержения, позволяющая исследовать динамику начального со-

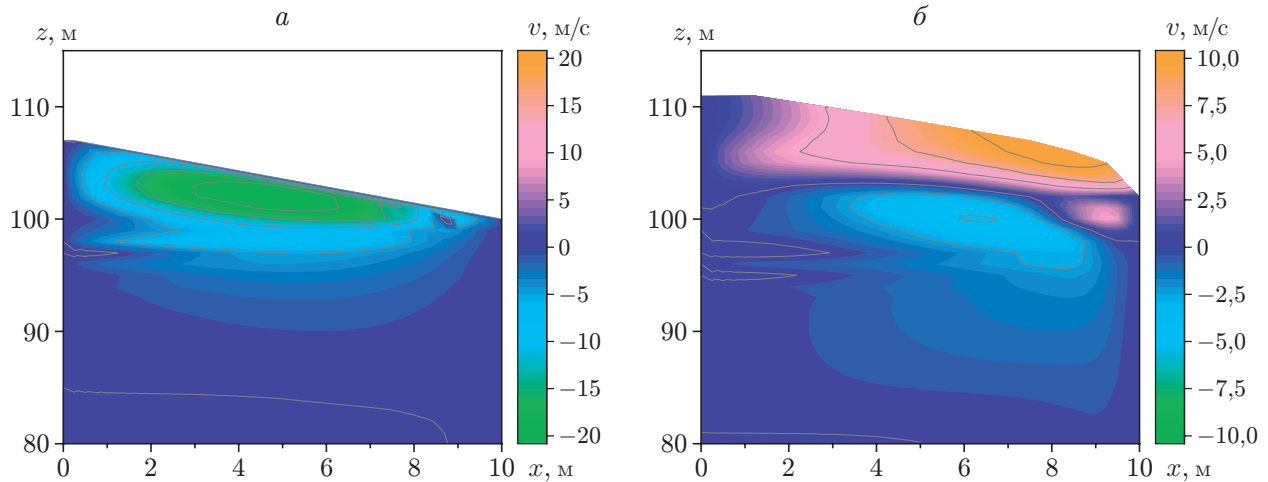


Рис. 5. Распределение горизонтальной компоненты скорости вблизи свободной поверхности в момент времени  $t = 70$  мс при различном числе кавитационных зародышей  $N$ :

$a$  —  $N = 10^{12} \text{ м}^{-3}$ ,  $b$  —  $N = 10^{16} \text{ м}^{-3}$

стояния магматического расплава с учетом раскрытия диафрагмы во времени. Показано, что в отличие от случая мгновенной декомпрессии расплава раскрытие диафрагмы во времени приводит к возникновению поперечных волн давления, обуславливающих неоднородное состояние среды за фронтом волны декомпрессии. К моменту времени  $t = 70$  мс вязкость на свободной поверхности увеличивается на несколько порядков (до значения  $\mu = 10^7$  Па·с) при первоначальном значении  $\mu = 1,8 \cdot 10^3 \div 2,3 \cdot 10^3$  Па·с. В плоскости симметрии и вблизи боковой стенки возникают отдельные области, в которых вязкость и объемная доля газа максимальны. Показано, что при малом числе зародышей возможно формирование в области симметрии вертикальной струи, при этом свободная поверхность имеет форму наклонной плоскости. При увеличении концентрации ядер нуклеации свободная поверхность принимает куполообразную форму, а распределение скорости подъема магматического расплава по каналу вулкана становится более равномерным. Наблюдается формирование “вихревого кольца” в результате последовательного взаимодействия различно направленных горизонтальных компонент скорости.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Давыдов М. Н., Кедринский В. К., Чернов А. А., Такаяма К. Зарождение и развитие кавитации в магме при динамической разгрузке // ПМТФ. 2005. Т. 46, № 2. С. 71–80.
2. Кедринский В. К., Давыдов М. Н., Чернов А. А., Такаяма К. Начальная стадия взрывного извержения вулканов: Динамика состояния магмы в волнах разгрузки // Докл. АН. 2006. Т. 407, № 2. С. 190–193.
3. Кедринский В. К. О газодинамических признаках взрывных извержений вулканов. 1. Гидродинамические аналоги предвзрывного состояния вулканов, динамика состояния трехфазной магмы в волнах декомпрессии // ПМТФ. 2008. Т. 49, № 6. С. 3–12.
4. Кедринский В. К. О газодинамических признаках взрывных извержений вулканов. 2. Модель гомогенно-гетерогенной нуклеации, особенности динамики разрушения кавитирующей магмы // ПМТФ. 2009. Т. 50, № 2. С. 167–177.
5. Gonnermann H. M., Manga M. The fluid mechanics inside a volcano // Annual Rev. Fluid Mech. 2007. V. 39, N 1. P. 321–356.

6. **Dobran F.** Nonequilibrium flow in volcanic conduits and application to the eruptions of Mt. St. Helens on May 18, 1980, and Vesuvius in AD 79 // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1992. V. 49, N 3. P. 285–311.
7. **Бармин А. А., Веденева Е. А., Мельник О. Е.** Неизотермическое течение сильновязкой магмы в канале вулкана с учетом влияния вязкой диссипации // *Изв. РАН. Механика жидкости и газа.* 2004. № 6. С. 21–32.
8. **Мельник О. Е., Бармин А. А., Спаркс С.** Беспокойная жизнь лавовых куполов // *Природа.* 2006. № 3. С. 46–55.
9. **Кедринский В. К., Давыдов М. Н., Пильник А. А., Чернов А. А.** Раскрытие системы трещин — к механизму цикличности бокового извержения вулкана Св. Елены в 1980 г. // *ПМТФ.* 2016. Т. 57, № 4. С. 3–15.
10. **Proussevitch A. A., Sahagian D. L.** Dynamics and energetics of bubble growth in magmas: Analytical formulation and numerical modeling // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103, N B8. P. 18223–18251.
11. **Давыдов М. Н., Кедринский В. К.** Динамика распределения основных параметров течения магматического расплава в щелевом сечении вулкана при мгновенной декомпрессии // *ПМТФ.* 2016. Т. 57, № 6. С. 29–32.

*Поступила в редакцию 13/Х 2017 г.*

---