

УДК 532.593+532.529+532.528+532.787+550.3

ОБ ОДНОЙ МОДЕЛИ ЦИКЛИЧНОСТИ ВЫБРОСОВ МАГМЫ ПРИ ВЗРЫВНЫХ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЯХ

В. К. Кедринский

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

Методом гидродинамических ударных труб выполнено экспериментальное моделирование динамики структуры кавитирующего потока магмы за фронтом волны декомпрессии. Показано, что при определенном режиме ударно-волнового нагружения в исследуемом образце жидкости может сформироваться дискретная система интенсивно кавитирующих зон с чередованием низкой и высокой плотностей газовой фазы. На основе результатов численного анализа процесса формирования (в потоке кавитирующей магмы) аномальной зоны со скачками характеристик потока, как минимум на порядок превышающими значения этих характеристик вне зоны, предложена модель мгновенного превращения кавитирующей магмы в аномальной зоне в газокапельную систему, ее извержения и образования свободной поверхности на границе раздела. Численный анализ показал, что в окрестности этой свободной поверхности оставшейся в канале (после извержения) части потока достаточно быстро восстанавливаются характерная волновая структура и аномальная зона насыщения, в которой вновь формируются указанные скачки характеристик потока.

Ключевые слова: волна декомпрессии, диффузия, зона насыщения, вязкость, нуклеация, концентрация газовой фазы, микросталлиты.

Введение. Изучение цикличности выбросов магмы — одно из направлений в области фундаментальных исследований механизмов, определяющих взрывной характер извержений ряда вулканических систем, входящих в классификацию А. Лакро. Анализ результатов исследований этого явления посвящены, в частности, работы [1–4], в которых описаны возможные физические модели, основанные на известных гидродинамических особенностях многофазных течений (формирование снарядного режима, влияние пограничного слоя, эффекты прилипания или проскальзывания на стенке канала). Рассматривались также динамика состояния канала (эпизодические обрушения, сопровождающиеся образованием пробок) и упругие свойства системы вулканическая камера — канал. Во всех моделях, описывающих указанные режимы, требуются “особые” условия, реализацию которых вследствие отсутствия данных о состоянии каналов и камер вулканов, имеющих гигантские размеры, часто невозможно обосновать.

Наиболее понятными казались открытые вулканические системы, в которых динамика состояния магмы в поле силы тяжести по мере ее движения вверх по каналу представляется в виде логической последовательности процессов нуклеации и неограниченного развития кавитации (пузырьки только расширяются), переводящего среду в состояние типа пены с последующим разрушением ее структуры [5, 6]. На первый взгляд указанные процессы

Работа выполнена в рамках Проекта Президиума РАН № 2.6 и при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 12-01-00134а).

должны завершаться непрерывным извержением, а не циклическими выбросами магмы, как это происходит в действительности.

Примером системы такого типа является вулкан Эребус (Erebus) — открытая вулканическая система взрывного типа (strombolian eruption согласно классификации А. Лакро) с озером лавы на дне кратера и выбросами, имеющими циклический характер. Такое противоречие можно было бы объяснить пульсациями пузырьковых зон в кавитирующей магме, которые в моделях [5, 6] не учитываются. Однако анализ результатов экспериментальных исследований динамики десятков извержений этого вулкана в зоне выхода магмы, проведенных с использованием системы радаров и эффекта Доплера, показал, что газовые пузырьки не осциллируют перед взрывом [7]. Это означает, что осцилляционная модель периодичности выбросов неприменима к системам, аналогичным вулкану Эребус. Модели, объясняющей это противоречие, до сих пор не существует.

Анализ результатов указанных и аналогичных исследований и их сравнение с природными процессами позволяют предположить, что механизм, инициирующий процесс циклическости выбросов, обусловлен возможностью формирования в интенсивно кавитирующем потоке дискретных структур как физической основы циклическости еще в канале вулкана.

Экспериментальное моделирование динамики структуры потока магмы.

Эксперименты проводились на гидродинамической ударной трубке при динамическом режиме нагружения исследуемого образца жидкости с использованием импульсной рентгеновской диагностики [8], которая позволяет с помощью трех рентгеновских аппаратов с длительностью вспышки 70 нс (время экспозиции кадров), запускаемых с заданными временными задержками регистрации, получать трехкадровую развертку процесса. Заметим, что нагружение исследуемого образца ударной волной (УВ), инициируемой при ударе по

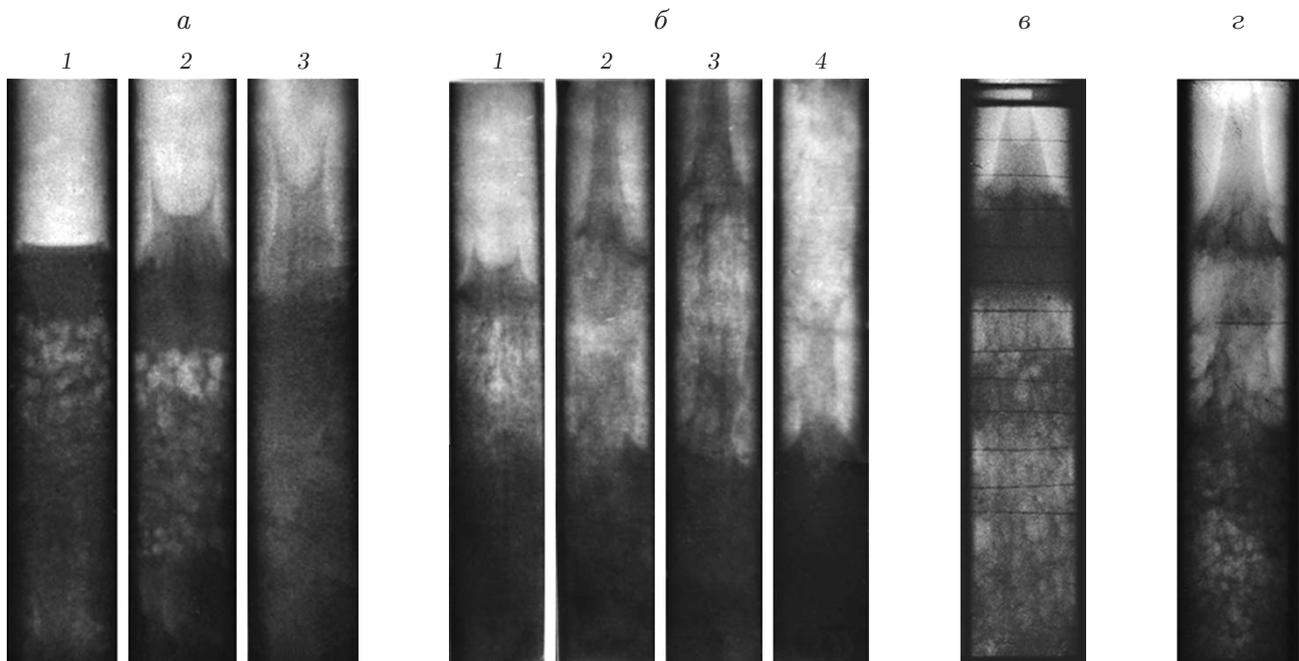


Рис. 1. Динамика зоны кавитационного разрушения:

a — зона кавитационного разрушения и ее восстановление ($P_{sw} = 5$ МПа, $\tau_{sw} = 60$ мкс): 1 — $t = 1$ мс, 2 — $t = 3$ мс, 3 — $t = 5$ мс; *б* — зона кавитационного разрушения с извержением потока ($P_{sw} = 17$ МПа, $\tau_{sw} = 30$ мкс): 1 — $t = 1$ мс, 2 — $t = 3$ мс, 3 — $t = 5$ мс, 4 — $t = 9$ мс; *в*, *г* — разрушение кавитационных зон с дискретным характером структуры (два режима нагружения, $\tau_{sw} = 150$ мкс)

верхней диафрагме поршня, разогнанного до заданной скорости в вакуумированном канале, в динамическом режиме моделирует предвзрывное состояние сжатой магмы. Волна разрежения, распространяющаяся по сжатому образцу после отражения УВ от его свободной поверхности, моделирует процесс декомпрессии.

Эксперименты показали, что при достаточно интенсивном ударно-волновом нагружении в образцах вблизи свободной поверхности наблюдается развитие зон с практически неограниченным ростом кавитационных пузырьков, которое завершается их разрушением (рис. 1, *a–г*). Однако в зависимости от параметров нагружения (амплитуды P_{sw} и длительности положительной фазы τ_{sw} ударной волны) разрушенная зона либо закрывается (см. рис. 1, *a*), либо извергается в виде облака газ — капли (см. рис. 1, *б*). При этом, как следует из экспериментов (см. рис. 1, *б*), у оставшейся части потока, по сути, формируется новая свободная поверхность.

Используемые в данной постановке параметры нагружения можно определить как нижнюю ($P_{sw} = 5$ МПа) и верхнюю ($P_{sw} = 17$ МПа) границы зоны перехода к процессу разрушения образца с извержением газок капельного потока. Отметим еще одну особенность в структуре потока, характерную для нижней границы перехода: зона разрушения кавитирующего слоя формируется в глубине образца.

Возможность формирования в потоке структур в виде интенсивно кавитирующих зон с чередованием низкой и высокой плотностей газовой фазы (см. рис. 1, *в, г*), которые можно интерпретировать как дискретные структуры, была обнаружена в серии экспериментов практически в том же диапазоне амплитуд, но с существенно большими длительностями УВ ($\tau_{sw} \approx 150$ мкс), инициирующих кавитационный процесс. Фотографии на рис. 1, *в, г* получены с задержкой 3 мс с момента отражения УВ от свободной поверхности образца. Заметим, что сравнение отмеченных выше особенностей структур потока с разрушающимися зонами кавитации, характерных для режимов нагружения с $\tau_{sw} = 60, 30$ мкс (см. рис. 1, *a, б*), и структур потока, инициированных ударными волнами с длительностью положительной фазы $\tau_{sw} = 150$ мкс (см. рис. 1, *в, г*), позволяет, несмотря на дискретность последних, сделать вывод об их адекватности. Интересна аналогия полученной дискретной структуры со структурой, обнаруженной при экспериментальном исследовании поверхностных эффектов при малоуглубленных подводных взрывах — формирование структуры кавитирующих потоков в виде “откольных” слоев [9].

Роль аномальной зоны в динамике разрушения потока магмы. Численное моделирование динамики состояния предварительно сжатой тяжелой насыщенной газом магмы проводится в рамках физико-математической модели на основе системы законов сохранения для средних давления, массовой скорости и плотности. Модель дополнена системой кинетических уравнений, учитывающих физические процессы, происходящие в сжатой магме при ее взрывной декомпрессии в результате извержения вулкана [7].

В ранее проведенных исследованиях отмечено, что микрокристаллиты, насыщающие магму, в волнах декомпрессии могут стать ядрами кавитации, за счет чего плотность насыщения N_b последних существенно увеличивается. Численные исследования структуры потока, выполненные в рамках этой физической модели, показали, что увеличение плотности зародышей кавитации даже на 1–2 порядка (относительно, например, значения $N_b = 10^{10} \text{ м}^{-3}$, полученного в рамках модели гомогенной нуклеации) приводит к формированию в потоке зон насыщения с аномально большими значениями параметров потока, как минимум на порядок превышающими их значения вне этой зоны. В расчетах полагалось, что первоначальная высота столба расплава магмы равна 1 км, начальное давление в магме — 170 МПа, массовая концентрация растворенного газа — 5,7 %. Процесс начинался в момент распада произвольного разрыва на верхней границе — мгновенного образования свободной поверхности.

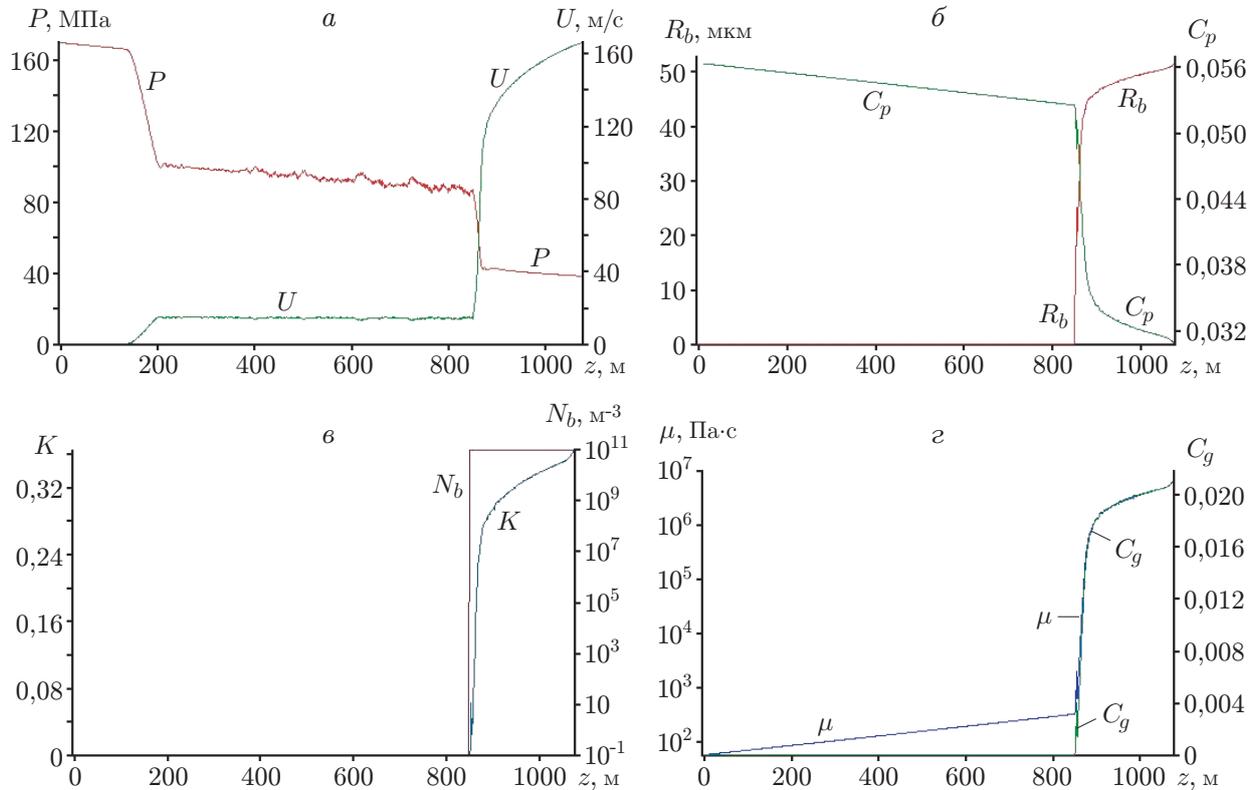


Рис. 2. Распределение основных параметров состояния магмы P , U (а), R_b , C_p (б), K , N_b (в), μ , C_g (г) в момент $t = 0,53$ с, предшествующий образованию разрыва потока и “взрыву” пузырьков в аномальной зоне

На рис. 2 для фиксированного момента времени $t = 0,53$ с представлены распределения основных характеристик течения: давления P в волне декомпрессии; массовой скорости U ; концентрации газа C_p , растворенного в расплаве магмы; среднего радиуса пузырька R_b ; концентрации газа в кавитационных пузырьках C_g ; плотности зародышей кавитации в зоне насыщения N_b (скачок плотности определяет границу аномальной зоны); объемной концентрации газа в зоне насыщения K ; вязкости расплава μ . Ось z — ось симметрии вертикального вулканического канала. Из рис. 2 следует, что зона насыщения с аномальными параметрами находится в окрестности свободной поверхности кавитирующего столба магмы и при $t = 0,53$ с занимает в канале область, нижняя граница которой находится на уровне приблизительно на 250 м ниже свободной поверхности столба магмы.

Заметим, что реальные процессы с выбросом магмы должны сопровождаться образованием разрывов в некоторой зоне потока. Появление аномальных зон дает основание предположить, что именно на границе с ними возможно образование разрывов. Рассматривается следующая модель цикличности.

Предположим, что в момент $t = 0,53$ с аномальная зона полностью сформирована. В один из следующих ближайших моментов времени t^* непосредственно перед границей скачка массовой скорости в аномальной зоне задается разрыв. В рассматриваемой численной модели для создания разрыва в заданной области расчетная схема была соответствующим образом модифицирована. Считаем, что в этот момент (выбран момент времени $t^* = 0,54$ с) в аномальной зоне кавитационные пузырьки, давление в которых достигает нескольких сотен атмосфер, мгновенно “взрываются”. В результате интенсивно кавитирующая аномальная зона мгновенно переходит в состояние газ — капли, а граница раз-

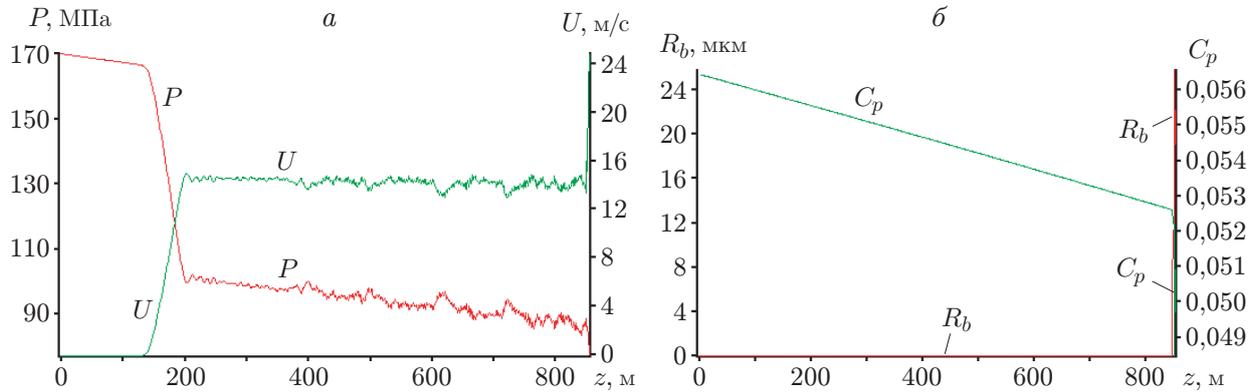


Рис. 3. Распределение основных параметров состояния магмы P , U (а), R_b , C_p (б) в момент $t^* = 0,54$ с образования свободной поверхности у оставшейся в канале части столба магмы в результате первого разрыва потока

рыва мгновенно становится свободной поверхностью оставшегося в канале столба магмы (рис. 3).

Из результатов расчета следует, что в окрестности образовавшейся свободной поверхности $z \approx 850$ м (см. рис. 3) непосредственно после разрыва массовая скорость не превышает значения $U = 24$ м/с, потери газа в расплаве пока незначительны: $\Delta C_p = 0,0035$. Заметим, что к этому моменту времени фронт волны декомпрессии еще не достиг границы системы канал — вулканическая камера, в которой поддерживается постоянное давление $P = 170$ МПа. К моменту $t = 0,81$ с (рис. 4) волновая картина в вулканической системе существенно изменяется: в результате отражения от указанной выше границы волна декомпрессии трансформируется в волну сжатия с соответствующим профилем массовой скорости. Эта волна распространяется навстречу фронту аномальной зоны насыщения, нижняя граница которой к указанному моменту времени находится на 150 м ниже свободной поверхности столба расплава. Максимальное значение массовой скорости немного превышает 170 м/с, однако экстремальные значения остальных параметров в зоне оказались близкими к значениям, достигнутым к моменту времени $t = 0,53$ с перед первым разрывом потока: аномальная зона восстанавливается и система вновь готовится к “извержению”.

Дальнейший анализ развития процесса необходим для выяснения возможности сохранения механизма цикличности “извержения” при изменении структуры волнового поля (см. рис. 4,а), а также возможности формирования и динамического изменения системы уединенных зон насыщения в области между фронтом движущейся волны сжатия и аномальной зоной (см. рис. 4,б–г) и их вероятного взаимодействия. Заметим, что для системы уединенных зон характерны тот же диапазон значений плотности насыщения зародышами N_b , что и в аномальной зоне, и скачки указанных выше основных параметров потока (см. рис. 4,б–г).

Дальнейшее развитие процесса в канале представлено на рис. 5, 6.

На рис. 5,а видно, что к моменту времени $t = 1$ с при $z \leq 600$ м в волне сжатия сохраняется среднее давление $P \approx 170$ МПа. К моменту времени $t = 1,1$ с фронт волны сжатия уже отразился от границы аномальной зоны как от среды с существенно меньшей плотностью (рис. 5,б), а нижняя граница самой зоны находится на уровне приблизительно на 250 м ниже свободной поверхности столба магмы. Второй разрыв (“взрыв” пузырьков в аномальной зоне, ее переход в газокапельное состояние и извержение) формируется в момент $t \gtrsim 1,1$ с также перед фронтом аномальной зоны в сечении $z \approx 700$ м (см. рис. 5,б).

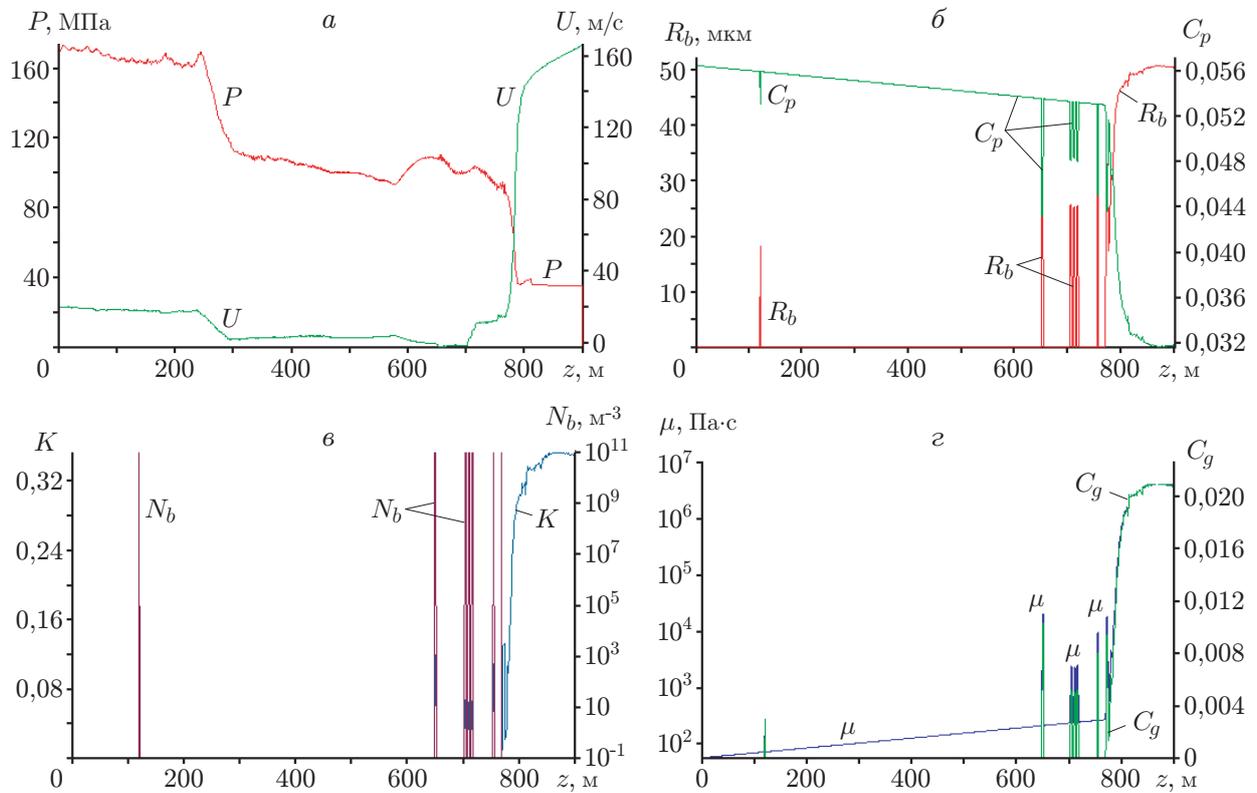


Рис. 4. Образование дискретной системы уединенных зон насыщения и распределение основных параметров состояния магмы P , U (а), R_b , C_p (б), K , N_b (в), μ , C_g (г) в момент времени $t = 0,81$ с после образования разрыва потока

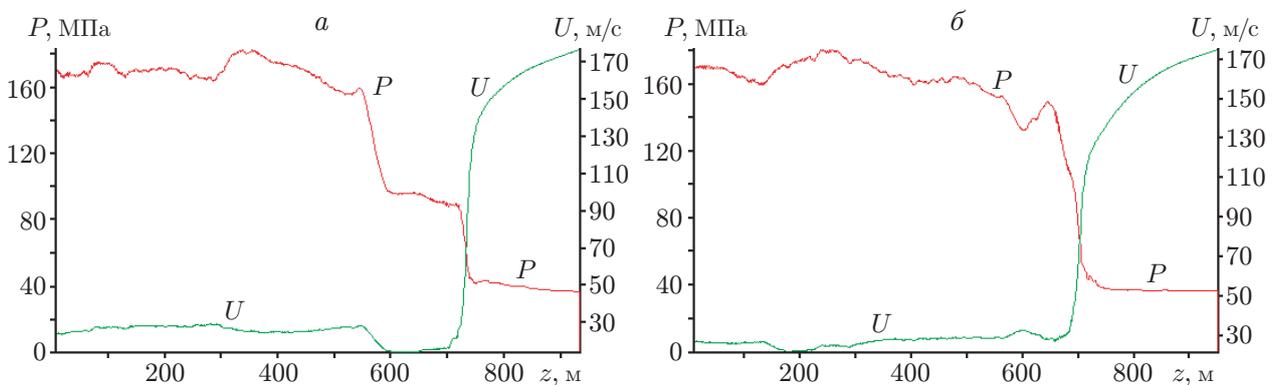


Рис. 5. Поля давления и массовой скорости до (а) и после (б) взаимодействия волны сжатия с аномальной зоной:
а — $t = 1$ с, б — $t = 1,1$ с

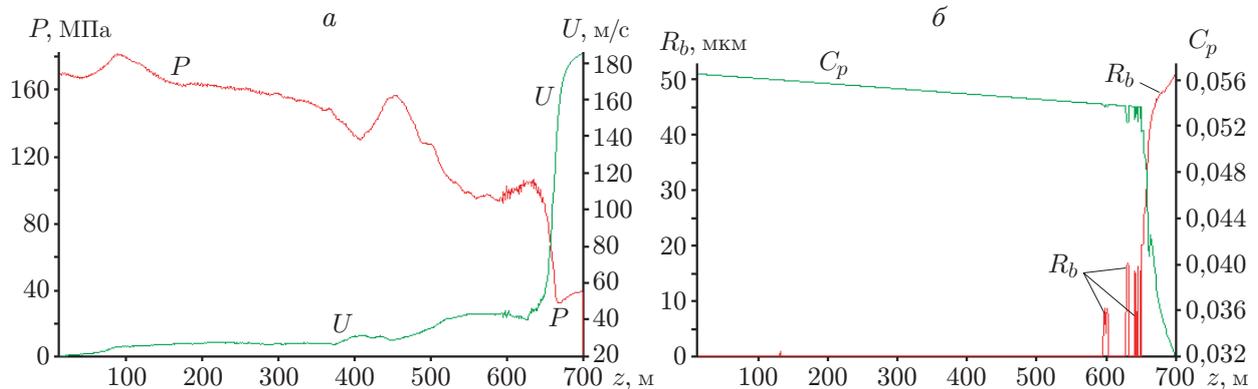


Рис. 6. Распределение основных параметров состояния магмы P , U (а), R_b , C_p (б) в момент $t = 1,2$ с:

а — формирование волны декомпрессии; а, б — восстановление аномальной зоны

Интересна завершающая стадия восстановления очередной предвзрывной структуры потока. Сравнение распределений давления и массовой скорости в моменты времени $t = 1,11$ с и $t = 1,12$ с показывает, что в течение 10 мс массовая скорость образовавшейся свободной поверхности резко увеличивается до значения $U > 180$ м/с, при этом продолжает формироваться фронт волны декомпрессии, распространяющейся вниз по каналу вулкана. Численный анализ показал, что в течение следующих 80 мс (см. рис. 6,а) практически заканчивается формирование волны декомпрессии, восстанавливается и начинает увеличиваться аномальная зона. При этом резко возрастают интенсивность потери газа расплавом и диффузия газа в кавитационные пузырьки (ср. распределения параметров $C_p(z)$ и $R_b(z)$ на рис. 4, 6,б). Процесс приобретает циклический характер.

Закключение. Согласно результатам проведенных экспериментальных исследований при определенном режиме ударно-волнового нагружения в исследуемом образце жидкости может сформироваться дискретная система интенсивно кавитирующих зон с чередованием низкой и высокой плотностей газовой фазы, что может обуславливать цикличность процессов выбросов магмы при взрывных вулканических извержениях.

На основе результатов численного анализа создана модель циклических выбросов магмы. Согласно этой модели формирование аномальной зоны со скачком массовой скорости в потоке заканчивается мгновенным образованием разрыва в зоне скачка, одновременным “взрывным” превращением аномальной зоны в проницаемую газокпельную систему (с последующим ее извержением), а границы разрыва — в свободную поверхность. Расчет динамики состояния оставшегося в канале столба магматического расплава показал, что после очередного выброса в окрестности образовавшейся свободной поверхности происходит восстановление характерной структуры потока и его аномальной зоны со скачками характеристик. Таким образом, механизм цикличности определяется, регулируется и запускается кавитационным процессом и особенностями состояния расплава.

Автор выражает благодарность М. Н. Давыдову за модификацию расчетной схемы, позволившую расширить возможности численного анализа исследуемого процесса, а также А. Н. Скулкину и Б. С. Ефремову за существенную помощь при проведении экспериментальных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Gonnermann Н. М., Manga М.** The fluid mechanics inside a volcano // Annu. Rev. Fluid Mech. 2007. V. 39. P. 321–356.

2. **Denlinger R. P., Hobitt R. P.** Cyclic eruptive behavior of silicic volcanoes // *Geology*. 1999. V. 27. P. 459–462.
3. **Barmin A., Melnic O., Sparks S.** Periodic behavior in lava dome eruptions // *Earth. Planet. Sci. Lett.* 2002. V. 199. P. 173–184.
4. **Кедринский В. К., Давыдов М. Н.** Динамика структуры погранслоя в канале вулкана при взрывном характере извержения // *Докл. АН*. 2010. Т. 431, № 5. С. 625–629.
5. **Woods A. W.** The dynamics of explosive volcanic eruptions // *Rev. Geophys.* 1995. V. 33, N 4. P. 495–530.
6. **Dobran F.** Non-equilibrium flow in volcanic conduits and application of the eruption of Mt. St. Helens on May 18 1980 and Vesuvius in Ad. 79 // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 1992. V. 49. P. 285–311.
7. **Gerst A., Horst M., Kyle P. R., Voege M.** The first second of a strombolian eruption: velocity observations at Erebus volcano, Antarctica // *EOS Trans. Amer. Geophys. Union*. 2006. V. 87, N 52. Fall Meet. Suppl. Abstr. V31G-04.
8. **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.
9. **Кедринский В. К.** Гидродинамика взрыва: эксперимент и модели. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000.
10. **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.

Поступила в редакцию 26/XI 2012 г.
