

## ВЗРЫВНОЕ ИЗВЕРЖЕНИЕ ВУЛКАНОВ: НЕКОТОРЫЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ

В. К. Кедринский, А. И. Макаров, С. В. Стебновский, К. Такама\*

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

\*Международный институт исследований ударных волн университета Тохоку, 980-8577 Сендай, Япония

Приведены результаты экспериментальных исследований динамики структуры жидких образцов в интервале изменения вязкости  $0.001 \div 2.6$  Па·с при их разрушении в результате динамической декомпрессии. Исследование процесса разрушения жидких смесей, а также жидкостей, насыщенных углекислым газом, показало, что практически во всем указанном диапазоне значений вязкости развитие процесса разрушения идет по комбинационному механизму: развитие пузырьковой кавитации, формирование системы крупных пузырьковых кластеров и газовых снарядов в них в результате коалесценции пузырьков. При этом структура течения заметно меняется: развивается разрывное течение с расслоением потока по вертикали, делением на струи при их последующем разрушении на капли. Обсуждается вероятность наличия кристаллических кластеров в магме и их влияние на структуру течения типа «кавитирующая магма — кристаллические кластеры».

Ключевые слова: вулканы, магма, аналоги магмы, взрывное извержение, кавитация, кристаллизация, разрушение.

### ВВЕДЕНИЕ

Исследование процессов взрывного вулканического извержения направлено в основном на изучение состояния кремниевой магмы при внезапной декомпрессии, влияния ее фрагментации на структуру течения, исследование реологии расплавов и начальной стадии взрывного извержения, определяемой кинетикой формирования фаз интенсивного «вскипания» (образование кавитационных зародышей и кристаллизация расплава). Проблема моделирования динамики состояния магмы осложняется, в частности, тем, что в такой системе процесс выделения газа из расплава сопровождается увеличением его вязкости на несколько порядков.

Считается, что в период между извержениями в канале вулкана сохраняется дегазированная магма, которая при охлаждении частично кристаллизуется и трансформируется в трехфазную систему «низкоплавкая жидкая

магма — пузырьковая фаза — кристаллическая фаза». Этот период вулканической деятельности еще мало изучен, хотя именно с ним связывают подготовительную стадию начала очередного извержения. Заметим, что согласно [1] кристаллическая фаза в магматическом расплаве возникает еще в процессе его всплытия в виде гигантских «капель» с глубины порядка 100 км в верхней мантии до ее границы с нижней корой, где формируется так называемая нижнекорковая магматическая камера (глубина около 30 км). Магма достаточно горячая, чтобы расплавить окружающие базальтовые породы. Обогащенная кремнием магма из нижней камеры поднимается в область верхней коры, формируя конduit, своеобразный многокилометровый канал, и на глубине  $7 \div 8$  км формирует верхнюю магматическую камеру. Плавление окружающей породы приводит к потере магмой тепла и ее кристаллизации. Гидростатическое давление на этой глубине заметно меньше, что приводит к нуклеации магмы за счет растворенной воды и повышению в ней давления. Считается, что если это давление достигает критического значения, начинается извержение. При этом богатая кремнием магма оказывается холоднее обедненной и до 10 порядков более вязкой, а ее извержение носит типично взрывной характер [1].

В работе [2] отмечается, что постанов-

---

К. Takayama

International Shock Wave Institute (ISWI) Tohoku University, Aoba, Sendai, 980-8577 Japan.

Работа выполнена при финансовой поддержке Международного фонда INTAS (проект 01-0106), Российского фонда фундаментальных исследований (номер проекта 03-01-00274), Интеграционного проекта 22 СО РАН, в рамках программы «Ведущие научные школы» (грант НШ-2073.2003.1).

ки лабораторных экспериментов по моделированию динамики вулканических потоков и, в частности, экспериментов на ударных трубах являются важным компонентом исследований. Практически далека от понимания и детальная динамика дезинтеграции жидкой фазы (процесс ее фрагментизации). В настоящее время основное внимание уделяется механизму кавитационного разрушения, детальный анализ которого для воды исследован в экспериментах с гидродинамическими ударными трубами с использованием импульсной рентгеновской техники и прецизионной диагностики процесса разрушения как инверсии двухфазного состояния жидкости — перехода системы от кавитирующего состояния к газокапельному [3].

Несколько необычная модель механизма и структуры извержения предложена в [4]. Ее идея состоит в предположении, что состояние магмы в верхних слоях вулканического канала представляется в виде закристаллизовавшейся пенной структуры с относительно большим давлением (много больше атмосферного) в пузырях и, очевидно, в пространстве над магмой — под «пробкой», закрывающей канал. Предполагается, что после разрушения пробки распространяющаяся сверху вниз волна декомпрессии «взрывает» кристаллическую пену: хрупкие стенки пузырей разрушаются, образуется движущаяся вниз по закристаллизованной магме волна фрагментизации, а вертикально вверх устремляется поток осколков [5]. Понятно, что такая модель исключает наличие жидкой фазы и возможность «кавитационного взрыва» — образование плотных, быстро расширяющихся пузырьковых кластеров внутри жидкого объема [6].

С другой стороны, и в кавитационной модели фрагментизации жидкой среды пренебрегается кристаллическая фаза, на базе которой формируются магматические «снаряды», наблюдаемые в потоке в некоторых типах извержений. В связи с этим следует отметить работу [7], в которой выполнен анализ комбинационной модели «дегазация — кристаллизация» с оценками характерных параметров микронеоднородностей, возникающих при декомпрессии на стадии стеклования как элемента реального состояния магмы, определяющего структуру потока. Конечно, на порядки отличающиеся характерные времена формирования фаз, казалось бы, должны исключать одновременное появление фаз в потоке в процессе извержения

и дезинтеграции. Попытка объединения этих фазовых эффектов в одном масштабе времени (в масштабе характерных времен извержения), конечно, не реальна, если предположить, что начала фазовых переходов совпадают. Однако отличающиеся по времени на многие порядки этапы «подготовки» вулкана к извержению и предложенные в [1] соображения относительно изначальной сильной кристаллизации расплава дают основание высказать идею о «формировании в основном» кристаллических кластеров (и/или зон стеклования) в жидкой магме в интервале между извержениями.

Это состояние можно определить как метастабильное, с неоднородным распределением кристаллической фазы, по крайней мере в части магмы в верхних слоях канала вулкана. Заметим, что такому метастабильному состоянию вполне могут способствовать и периоды, о которых говорят, что вулкан «курит». Это, по сути, квазистатическая декомпрессия, в процессе которой вполне вероятно образование упомянутых кластеров. Внезапная декомпрессия, являющаяся причиной взрывного характера извержения, как известно, приводит к интенсивной нуклеации магмы. А при наличии в ней кристаллических кластеров этот процесс протекает прежде всего в окрестности межфазных границ [8]. Таким образом, поток магмы при извержении может включать кристаллические (стекловидные) кластеры с внутренними кавитационными зонами [7], окруженные плотными кавитирующими слоями жидкой магмы.

В работе предпринята попытка моделирования упомянутых процессов на примере динамики структуры потока в канале и разрушающейся капли жидкости различной вязкости при быстрой декомпрессии. Влияние кристаллических кластеров на структуру течения моделировалось включением взвешенных твердых несмачиваемых частиц в исследуемых образцах жидкости.

#### **ДИНАМИКА СТРУКТУРЫ ВЫБРОСА ПРИ ЭКСПЛОЗИВНОМ (ВЗРЫВНОМ) И ЭКСТРУЗИЙНОМ (НИЗКОСКОРОСТНОМ) ИЗВЕРЖЕНИЯХ**

Экспериментальное исследование влияния вязкости гидродинамических аналогов магмы (М-жидкостей) на структуру течения проводилось по схеме гидродинамической ударной трубы (рис. 1, а) с исследуемой жидкостью в камере высокого давления, отделенной клапаном

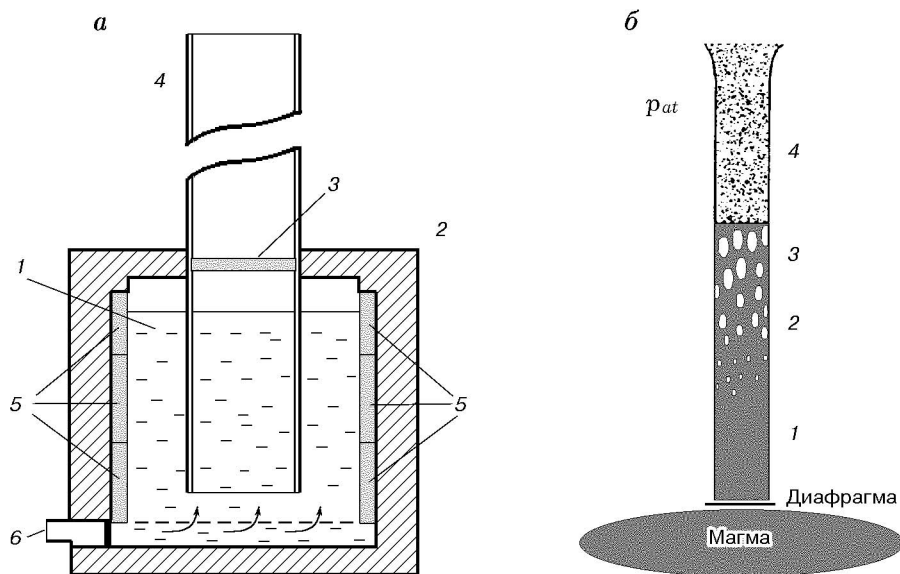


Рис. 1. Камера-термостат высокого давления (а) и схема извержения, предложенная в [9] (б):

а: 1 — жидкость, 2 — камера высокого давления, 3 — клапан, 4 — рабочий канал, 5 — термоэлементы, 6 — ввод; б: 1 — однородный поток, 2 — нуклеация и формирование кавитационной зоны, 3 — структура типа пены, 4 — газовзвесь

от рабочего канала с атмосферным давлением. Камера представляла собой термостат. С помощью термоэлементов жидкость поддерживалась при заданной температуре. Через ввод под давлением 0.5 МПа жидкость насыщалась углекислым газом. Между крышкой камеры и свободной поверхностью жидкости находился газ, давлением которого при открытии клапана жидкость выталкивалась в канал. При этом в результате резкого падения давления в потоке моделировался процесс дегазации магмы и развития в потоке пузырьковой кавитации, что позволяло исследовать динамику структуры извержения.

В результате описанных процессов в установке реализовывалась модель схемы извержения (рис. 1, б), предложенная в [9], которая практически полностью соответствует постановкам, известному механизму и структуре разрушения обычной жидкости при ее динамическом нагружении [3]: вследствие разрушения пробки застывшей магмы (диафрагма) магма начинает движение вверх по каналу. При этом из-за падения давления в магме формируется несколько зон состояния: поток остается однородным лишь вблизи устья канала, далее вверх по потоку наблюдается нуклеация и формируется кавитационная зона, которая в процессе диффузии растворенного газа в пузырь-

ки трансформируется в структуру типа пены. Предполагается, что в результате разрушения пены должен реализоваться процесс инверсии двухфазного состояния — переход от кавитирующей жидкости к состоянию типа газовзвеси.

Установка (см. рис. 1, а) включает схему оптической регистрации процесса извержения, которая состоит из системы задержек и оптической импульсной подсветки структуры потока с экспозицией порядка 1 мкс, что позволяет получать мгновенные фотокадры структуры в различные моменты времени и строить покадровую развертку процесса.

На рис. 2 представлена характерная динамика структуры извержения вязких жидкостей двух типов. Общий вид извержения жидкости с вязкостью  $\nu \approx 0.2$  Па·с ( $T = 19$  °С) и увеличенное изображение участка течения в этот же момент времени непосредственно вблизи выхода жидкости из канала показаны на рис. 2, а, б. На следующих двух кадрах показана структура течения той же жидкости в более поздний момент времени (общий вид (в) и увеличенное изображение (г) того же участка в том же масштабе, что и кадр (б)). Видно, что на начальной стадии разрушения переход кавитирующей жидкости в пенную структуру, характерный для воды [3], наблюдается и для жидкости с вязкостью на два порядка выше (см. рис. 2, б).

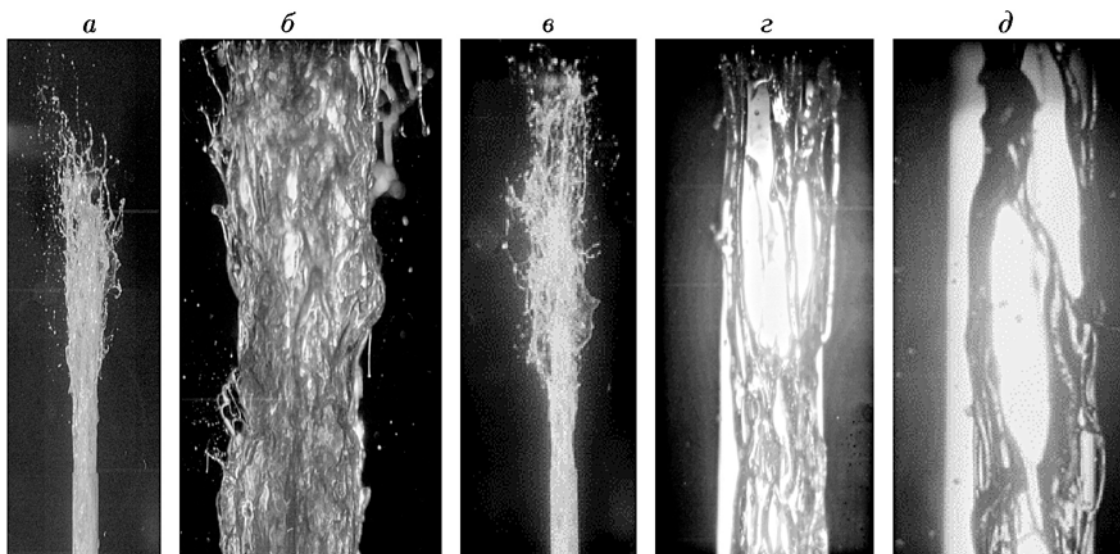


Рис. 2. Пенная структура потока (*а, б*) и его расслоение (*в, г*) в поздние моменты времени,  $T = 19\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\nu \approx 0.2\text{ Па}\cdot\text{с}$ ; расслоение вязкого течения (*д*),  $T = 42\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\nu \approx 2.6\text{ Па}\cdot\text{с}$

Сравнение общего вида структур потоков в различные моменты времени (см. рис. 2, *а, в*) позволяет сделать вывод лишь общего характера о факте динамического разрушения при извержении. Увеличение масштаба и микросекундная экспозиция позволили разрешить тонкую структуру течения, которая со временем, как оказалось (см. рис. 2, *г*), претерпевает существенное изменение: течение расслаивается на систему вертикальных струй пространственной формы. При увеличении вязкости разрушаемой жидкости еще на порядок ( $\nu \approx 2.6\text{ Па}\cdot\text{с}$ ,  $T = 42\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), как видно из рис. 2, *д*, течение практически полностью расслаивается, приобретая более четкий струйный характер.

Вероятная причина этого эффекта была обнаружена при исследовании режима экструзийного извержения насыщенных жидкостей различной вязкости. В этом случае роль камеры высокого давления выполняла только часть вертикальной трубки под клапаном с системой насыщения (камера термостата исключалась). Схема эксперимента соответствовала случаю открытия сосуда с жидкостью, насыщенной газом под давлением, которая в процессе дегазации при открытии клапана выдавливалась из сосуда. Результаты представлены на рис. 3. Несложно видеть, что в случае обычной воды (рис. 3, *а-в*,  $\nu = 0.001\text{ Па}\cdot\text{с}$ ) к моменту времени  $t = 50\text{ мс}$  (*а*) в структуре низкоскоростно-

го (экструзийного) «извержения» формируется система всплывающих плотных пузырьковых кластеров, к моменту  $t = 200\text{ мс}$  (*б*) в одном из кластеров образуется газовый снаряд — эффект коалесценции пузырьков, а при  $t = 500\text{ мс}$  (*в*) структура потока представляет собой уже комбинационную систему «снаряд — пузырьковый кластер».

Для раствора с вязкостью на три порядка выше динамика структуры течения, в принципе, та же, что и для воды. Отличие состоит в том, что в таком растворе формируются менее плотные пузырьковые кластеры (рис. 3, *г, д*), а процесс коалесценции и образование снарядного режима идут заметно быстрее (рис. 3, *д-з*;  $t = 50, 100, 200, 500$  и  $1000\text{ мс}$  соответственно). В динамическом режиме извержения взрывного типа этот процесс наглядно представлен на рис. 4.

#### ДИНАМИКА СТРУКТУРЫ ЖИДКОЙ КАПЛИ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Метод гидродинамических ударных труб дает возможность в динамическом режиме, используя систему последовательного нагружения «ударная волна — волна разрежения», моделировать процесс внезапной декомпрессии магмы, находящейся перед извержением в статически сжатом до высоких давлений состоянии. Электромагнитные гидродинамические ударные трубы позволяют генерировать в ис-

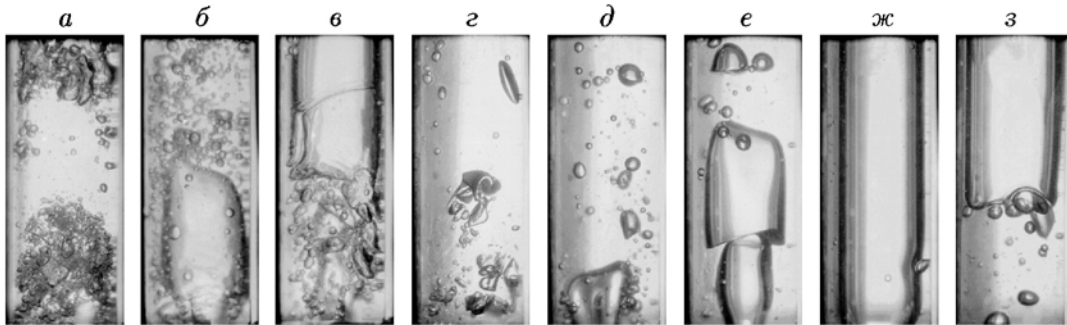


Рис. 3. Структура течения с образованием снарядного режима при экструзийном извержении исследуемых жидкостей:

*a-в* — вода,  $t = 50$  (*a*), 200 (*б*), 500 мс (*в*), *г-з* — раствор,  $t = 50$  (*г*), 100 (*д*), 200 (*е*), 500 (*ж*), 1000 мс (*з*),  $\nu \approx 2.6$  Па·с

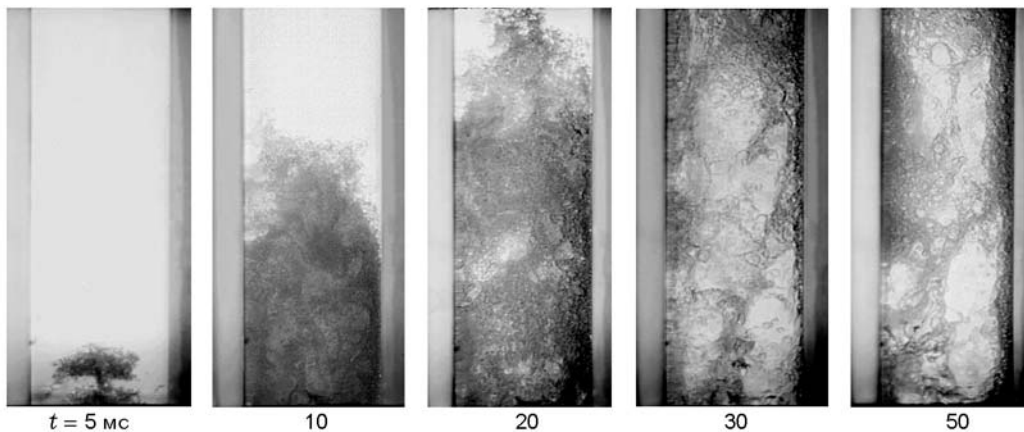


Рис. 4. Снарядный режим течения с пузырьковыми кластерами при взрывном характере извержения ( $\nu \approx 0.001$  Па·с)

следуемом образце короткие (микросекундной длительности) ударные волны и, таким образом, использовать жидкие образцы объемом всего в десятки и сотни микролитров (капли) для более прецизионного исследования структуры течения.

Схема эксперимента, начальная стадия развития кавитации с образованием пузырьковых кластеров в водяной капле диаметром около 1 см и структура «капли» на поздней стадии разрушения представлены на рис. 5 [10]. Ударная волна в капле, лежащей на проводящей диафрагме, создавалась импульсом магнитного поля, генерируемого под диафрагмой при разряде высоковольтной батареи конденсаторов на спиральную катушку. Распространяясь по капле, ударная волна сжимает ее, отражается от свободной поверхности капли, форми-

руя волну разрежения. Последняя распространяется по сжатой капле и разгружает ее, обеспечивая быструю декомпрессию. Рабочая секция ударной трубы включает прозрачный герметичный цилиндрический стакан, устанавливаемый над диафрагмой и позволяющий при необходимости исследовать процесс разрушения жидкостей при начальном относительно низком ( $\approx 0.01$  МПа) давлении. При этом в капле еще в стационарном состоянии возникает система кавитационных микропузырьков и характерные времена процесса ее разрушения в случае вязкой жидкости оказываются сравнимы с данными по капле воды.

На рис. 6 показана динамика структуры вязкой капли ( $\nu \approx 0.2$  Па·с) с тем же характерным размером ( $\approx 1$  см), формирующейся при импульсном нагружении для моментов време-

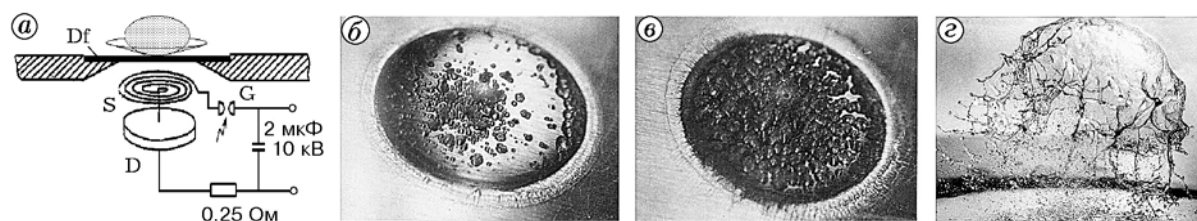


Рис. 5. Схема электромагнитной ударной трубки (а), вид кавитирующей капли воды ( $d \approx 1$  см) в моменты времени 50 (б), 70 мкс (в) и на поздней стадии разрушения  $t = 1500$  мкс (г):

S — спиральная катушка, D — металлический диск, G — разрядник, Df — диафрагма



Рис. 6. Динамика структуры капли вязкого раствора при импульсном нагружении в моменты времени 200 (а), 700 мкс (б) и на поздней стадии разрушения  $t = 1500$  мкс (в)

ни 200, 700 и 1500 мкс после инициирования ударной волны. Экспериментальные исследования показали, что механизм трансформации полусферической капли жидкости в структуру типа купола (рис. 6, в) с жидкой сеткой ячеек состоит в формировании системы поверхностных (рис. 6, а) и внутренних пузырьковых кластеров, возникновении эффекта «кавитационного взрыва» капли и коалесценции пузырьков. Оказалось, что за фронтом волны разрежения в центральной области капли развивается плотное облако кавитационных пузырьков [11], радиус которого быстро растет, а коалесценция пузырьков внутри облака приводит к трансформации его в расширяющуюся полость (аналог газового снаряда в потоке) и, как следствие, к формированию купола.

В то же время в результате аналогичных процессов в системе пузырьковых кластеров, возникших в окрестности поверхности капли (см. рис. 5, в, 6, а), формируется ячеистая структура самого купола, образующегося вследствие внутреннего «взрыва». Коалесценция пузырьков в этих кластерах приводит к формированию системы ячеек из жидких нитей, разрушающихся в дальнейшем на отдельные капельки. Как видно из сравнения рис. 5, г и рис. 6, в (время экспозиции соответственно 3 нс

и 1 мкс), при увеличении вязкости на два порядка механизм инверсии двухфазного состояния (переход среды из состояния пузырькового в газочапельное) и этапы процесса разрушения капли при ее динамическом нагружении сохраняются. Влияние вязкости сказывается в более четком проявлении самой структуры, формирование которой заметно ускоряется при начальном вакуумировании. Заметим, что эксперименты с микрообъемами жидкости — это практически исследование динамики локального характерного элемента структуры потока в свободном пространстве.

Как показано выше, в результате экспериментальных исследований структуры потока, формирующегося при внезапной декомпрессии предварительно статически или динамически сжатых жидкостей с вязкостью  $0.001 \div 2.6$  Па·с, обнаружено, что структура представляет собой сложную пространственную комбинацию «пузырьковые кластеры — газовые снаряды» (см. рис. 4), которая в процессе развития трансформируется в систему пространственных вертикальных струй (см. рис. 2). Этот результат указывает, что механизм разрушения потока более сложный, чем предполагалось в работах [4, 5, 9] (см. рис. 1, б).

Наиболее наглядно этот эффект можно

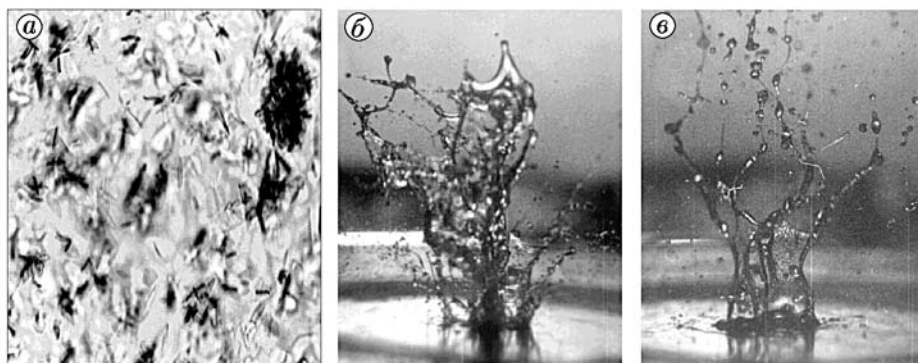


Рис. 7. Микрокристаллы в растворе «канифоль — ацетон» (а), структура течения при внезапной декомпрессии (б — 2 мс, в — 5 мс)

продемонстрировать на примере динамического разрушения капли раствора канифоли в ацетоне [12]. Этот раствор даже при комнатной температуре можно считать достаточно близким к магме по одному из основных ее свойств — эффекту кристаллизации и динамически растущей вязкости при быстрой декомпрессии. Последнее достигается за счет быстрого испарения ацетона в волнах разрежения при одновременной кристаллизации раствора в процессе его динамического нагружения в рамках той же постановки эксперимента с электромагнитной ударной трубкой. Начальное состояние раствора характеризуется большой концентрацией микрокристаллов канифоли (рис. 7, а, темные вытянутые частицы длиной  $\approx 10$  мкм), часть которых может еще в исходном состоянии формироваться в кластеры (рис. 7, а, характерный размер кластера  $\approx 50$  мкм). Как оказалось, структура потока при динамическом разрушении капли раствора «ацетон — канифоль» принципиально отличается от упомянутых выше эффектов кавитационного разрушения: вместо куполообразной формы с ячеистой структурой регистрируется система вертикальных струй (рис. 7, б), разрушающихся из-за эффекта неустойчивости на мелкие капельки на завершающей стадии разрушения (рис. 7, в).

#### КОМБИНАЦИОННАЯ СТРУКТУРА ИЗВЕРЖЕНИЯ

Хорошо известно, что характерные времена кристаллизации раствора заметно превышают характерные времена разрушения магмы, а тем более времена ее нуклеации при вне-

запной декомпрессии. Тем не менее для некоторых типов вулканов характерна своего рода комбинационная структура извержения, которое сопровождается мощным выбросом раскаленных магматических «бомб» на многокилометровую высоту и одновременно извержением потока лавы (рис. 8, а, [1], «гавайский» тип извержения). Это кажущееся противоречие может быть преодолено, если предположить, что в период между извержениями магма в канале вулкана представляет собой сильнокристаллизованный расплав, в котором возможно спонтанное формирование кристаллических кластеров и зон стеклования (типа рис. 7, а).

Это состояние можно рассматривать как метастабильное, с неоднородным распределением кристаллической фазы (кластерами), которому, в частности, могут способствовать периоды по сути квазистатической декомпрессии, о которых говорят, что вулкан «курит». При внезапной декомпрессии (как инициатора взрывного извержения) процесс интенсивной нуклеации магмы будет протекать прежде всего в окрестности межфазных границ «кластер — магма», формируя вокруг кластеров плотные кавитирующие слои жидкой магмы. Таким образом, поток магмы при комбинационном извержении может рассматриваться как трехфазная среда «магма — пузырьковые зоны — кристаллические и стекловидные кластеры (с внутренними кавитационными зонами)».

Кристаллизованная фаза в виде магматических «бомб» и вероятное их состояние в магме в плотной оболочке газовых ядер дают основание для моделирования динамики разрушения магмы в рамках системы «жидкость —

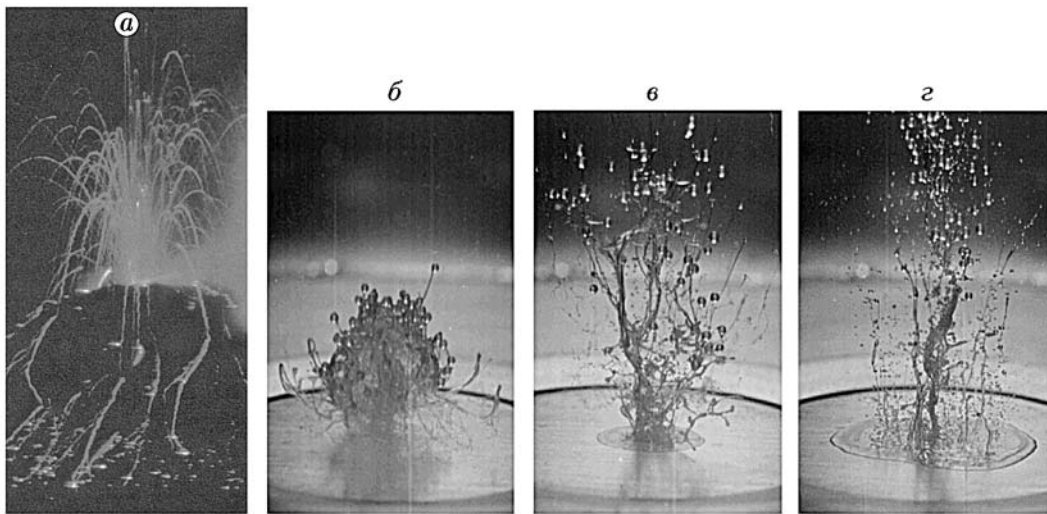


Рис. 8. Извержение вулкана (а), Гавайи, 1975 г., и модельный эксперимент по выбросу «кристаллической фазы» при импульсном нагружении капли смеси «канифоль в ацетоне — твердые частицы» (б — 500, в — 1000, г — 2000 мкс)

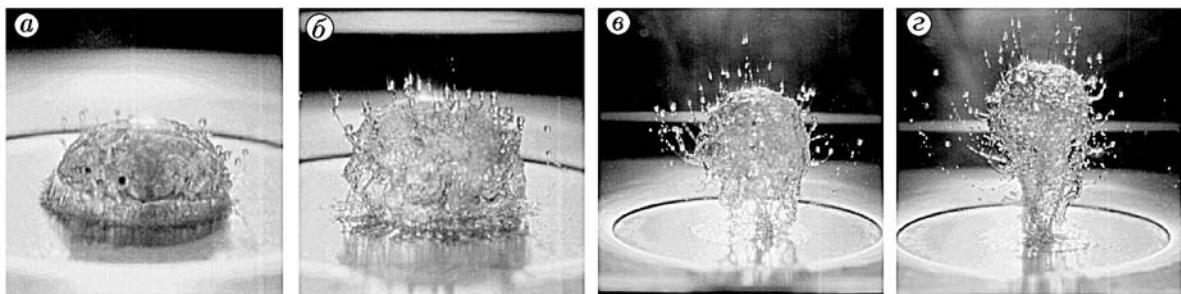


Рис. 9. Разрушение капли с выбросом твердых частиц при ударно-волновом нагружении капли смеси «вода — частицы» (а — 100, б — 200, в — 1000, г — 1500 мкс)

кавитационные зародыши — несмачиваемые твердые частицы». В качестве таких систем использовались смеси твердых частиц произвольной формы размером  $1 \div 3$  мм с раствором канифоли в ацетоне или с водой. В последнем случае их взвешенное состояние достигалось добавлением глицерина. Эксперименты показали, что твердые частицы выбрасываются из общего потока, движутся с существенно большей скоростью и формируют свою систему, практически независимую от кавитирующей жидкости (рис. 8, б-г).

Как видно из рис. 9, аналогичный эффект наблюдается и при разрушении капли смеси «вода — глицерин — частицы». Экспериментальные исследования показали, что разрушение жидкой фазы в потоке с частицами, форми-

рующемся при динамической разгрузке, сохраняет все присущие ему особенности динамики структуры — кластеры, ячейки, разрушающиеся на отдельные фрагменты и капли.

## ВЫВОДЫ

1. На основании результатов экспериментального моделирования динамики структуры потока, формирующегося при внезапной декомпрессии жидких аналогов магмы, можно сделать вывод о том, что механизм диспергирования потока магмы может существенно отличаться от предложенных ранее моделей [4, 5, 9]:

- переход кавитирующей жидкости в состояние плотных пузырьковых кластеров сопровождается не образованием пенной



структуры, а расслоением течения на систему вертикальных струй пространственной формы;

- механизм этого процесса связан с образованием газовых снарядов в результате коалесценции пузырьков в пузырьковых кластерах и с формированием смешанной «снарядно-кластерной» структуры в начальной стадии расслоения течения;
- поток «газ — частицы» (см. рис. 1, б; 4) формируется в основном не при разрушении пены на фрагменты, а в результате неустойчивости и распада системы струй.

2. На основании анализа извержений «гавайского» типа и информации о сильнозакристаллизованной, относительно холодной магме, извержение которой носит взрывной характер [1], предложена модель метастабильного состояния магмы с плотными кластерами кристаллов в период между извержениями. Предполагается, что именно такие кластеры составляют основу магматических «бомб», выбрасываемых на большую высоту при некоторых типах извержений.

3. Экспериментальные исследования этого эффекта на примере разрушения смеси «жидкость — газ — твердые частицы» при импульсном нагружении показали, что частицы выбрасываются из общего потока и формируют поток, движущийся независимо от кавитирующей жидкой фазы с существенно большей скоростью.

Авторы признательны д-ру геол.-мин. наук В. Н. Шарипову за обсуждение статьи и ценные замечания.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Hill D. P., Pollitz F., Newhall Ch. Earthquake-volcano interactions // *J. Physics Today*. November, 2002. V. 55, N 11. P. 41–47.
2. Gilbert J. S., Sparks R. S. Future research directions on the physics of explosive volcanic eruption // *The Physics of Explosive Volcanic Eruption* / J. S. Gilbert, R. S. Sparks (Eds). Geological Society, London, Special publication. 1998. V. 145. P. 1–7.
3. Кедринский В. К. Нелинейные проблемы кавитационного разрушения жидкости при взрывном нагружении // *ПМТФ*. 1993. № 3. С. 74–91.
4. Alidibirov M., Dingwell D. B. Magma fragmentation by rapid decompression // *Nature*. 1996. V. 380. P. 146–148.
5. Mader H. Conduit flow and fragmentation // *The Physics of Explosive Volcanic Eruption* / J. S. Gilbert, R. S. Sparks (Eds). Geological Society, London, Special Publication. 1998. V. 145. P. 51–71.
6. Давыдов М. Н., Кедринский В. К. Двухфазные модели формирования кавитирующих отколов в жидкости // *ПМТФ*. 2003. Т. 44, № 5. С. 72–79.
7. Чернов А. А. Об одной модели затвердевания магмы в процессе эксплозивного вулканического извержения // Там же. С. 80–90.
8. Piorkowska E., Nowacki R. Cavitation during isothermal crystallization of isotactic polypropylene and poly (methylene oxide) // *Liquids Under Negative Pressure* / A. Imre et al. (Eds). Kluwer Academic Publishers, the Netherlands, 2002. С. 137–144.
9. Dobran F. Nonequilibrium flow in volcanic conduits and application to the eruption of Mt St Helens on May 18 1980 and Vesuvius in AD79 // *J. Volcanology and Geotherm. Res.* 1992. V. 49. P. 285–311.
10. Кедринский В. К., Бесов А. С., Гутник И. Э. Инверсия двухфазного состояния жидкости при импульсном нагружении // *Докл. АН*. 1997. Т. 352, № 4. С. 477–479.
11. Давыдов М. Н. Развитие кавитации в капле при ударно-волновом нагружении // *Динамика сплошной среды*. Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО РАН, 2001. Вып. 117. С. 15–20.
12. Kedrinskii V, K., Besov A. S., Davydov M. N., et al. Shock tube simulation and direct observation of fragmentation in viscous liquid at dynamic and quasi-static loading. CAV-03-GS-4-004 // *Proc. of 5th Intern. Symp. on Cavitation*, 1–4 November, Osaka, Japan, 2003.

Поступила в редакцию 9/XI 2004 г.