

## Особенности динамики состояния тяжелой пузырьковой магмы при взрывных извержениях вулканов<sup>1</sup>

Кедринский В.К.

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

Взрывное извержение вулкана, возникающее при внезапной разгерметизации вулканического канала, одно из загадочных явлений природы, механизм которого связан с внезапной декомпрессией сжатой до высоких давлений магмы, содержащей растворенный газ и микрокристаллиты, и с ее переходом в многофазное состояние. При очевидном отсутствии возможности напрямую исследовать эти процессы актуальной становится задача экспериментального и численного моделирования, создание математических моделей, которые позволили бы с определенной степенью адекватности описывать состояние магмы в различные периоды ее извержения. В качестве такой матмодели предложена комбинация систем уравнений механики многофазных сред, которая формулируется на базе модифицированной модели Иорданского–Когарко–ван Вингаардена (ИКВ-модели) с уравнением Навье–Стокса для переменной вязкости, и полного спектра кинетических соотношений, включая спонтанное зарождение и динамику насыщения магмы зародышами кавитации. Выполнен анализ предвзрывного состояния ряда вулканов, который показал, что по структурному признаку взрывные вулканы аналогичны схемам гидродинамических ударных труб (VT) типа Glass–Heuckroth. При экспериментальном моделировании структуры потока продемонстрирована вероятность формирования снарядного режима как следствия коалесценции пузырьков в потоке. Предложена физическая модель комбинированных взрывных вулканических извержений, экспериментально исследован процесс формирования в потоке магмы независимого потока кристаллических кластеров (магматических «бомб»), движущегося относительно потока кавитирующей магмы с существенно большей скоростью.

### 1. Введение

Как это не покажется странным, учитывая многолетние и достаточно интенсивные исследования по моделированию процессов, сопровождающих взрывные вулканические извержения, первое же обращение к проблеме вызывает ощущение, что это классическая проблема «черного ящика». «Вход» в него более или менее известен — состояние магмы в вулканической камере оценивается геофизиками с определенной степенью вероятности, а «выход» (вулканическое извержение в атмосферу) изучен в деталях настолько, насколько существующие методы позволяют это сделать. Основная проблема состоит не столько в ответе на вопрос — какова динамика состояния магмы в вулканическом канале в волнах декомпрессии, сколько в необходимости выяснения механизмов, управляющих этой динамикой. С одной стороны, постановка

задачи казалось бы становится более конкретной — детально исследовать фазовые переходы в магматическом расплаве в поле тяжести при возникновении декомпрессии. С другой, мы сталкиваемся с необходимостью анализа динамического перехода насыщенного газом расплава из первоначально по сути однофазного состояния к двухфазному состоянию «газ–твердые частички» — облака пепла, извержение которых из кратера вулкана имеет очевидный взрывной характер. При этом упомянутый переход до сих пор практически остается загадкой. Не добавляют понимания и исследования Н.М. Gonnermann и М. Manga [1], проводившиеся на вулканических материалах, в которых утверждается, что фрагментация магмы и взрывное извержение не обязательно должны быть причинно-следственными процессами: фрагментация может происходить глубоко в вулканах без инициирования извержения. Таким образом уже один этот пример показывает, что развивающиеся в магме процессы — это очень сложные, многогранные и мно-

<sup>1</sup>Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Программы Президиума РАН № 2.6 и РФФИ (грант 12-01-00134а).

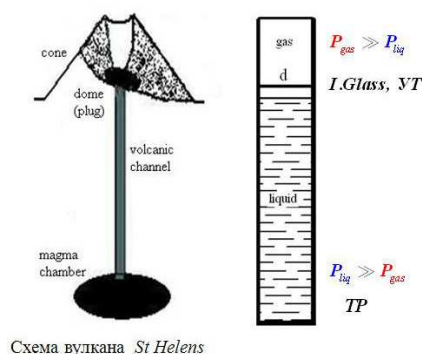


Схема вулкана St Helens

Рис. 1. Импульсная гидродинамическая трубка разрезания как схемный аналог предвзрывного состояния вулкана St Helens

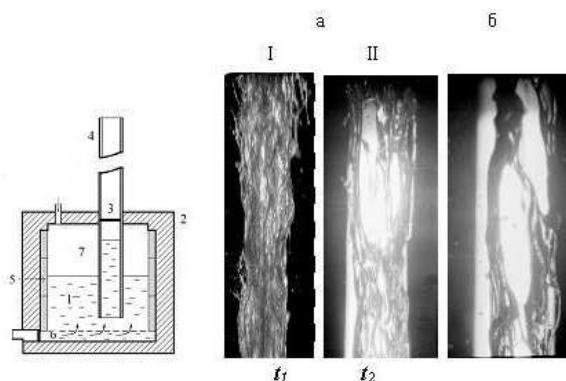


Рис. 2. Статическая схема предвзрывного состояния, динамика структуры потока различной вязкости

гомасштабные явления, которые нуждаются в поисках модельных постановок, по возможности наиболее адекватных природным. С точки зрения верификации возможных моделей полезно иметь ввиду утверждение геофизиков относительно условий взрывного характера извержений магмы и ее фрагментизации: извержения носят взрывной характер, если магма имеет высокую вязкость.

Эти характеристики, в частности, присущи rhyolitic магме с содержанием кремния, превышающим 63%, и большим содержанием растворенного газа, вязкость которой в  $10^6 \div 10^8$  раз превышает вязкость воды ( $10^{-3}$  Па·сек). При такого рода процессах объемная концентрация выделившегося из расплава растворенного газа достигает 75%. Утверждается, что эффективность фрагментации магмы контролируется такими факторами как степень пересжатия, температура, пористость, вкрапление и содержание микролитов. Анализ известных данных показывает, что в целом процессы извержения взрывных вулканов по всему спектру их классификации по признаку интенсивности (А. Ласроix, 1908 г.), можно отнести к области высокоскоростной гидродинамики многофазных и многокомпонентных течений. В этом случае возникает принципиальная возможность найти общие с вулканическими системами, начиная от их предвзрывного состояния, характерные признаки гидродинамических течений обычных жидких сред при их ударно-волновом нагружении [2].

## 2. Механика взрывных извержений — проблемы экспериментального моделирования

Анализ результатов исследований по механике разрушения жидкостей при их ударно-волновом на-

гружении [2] и данных по вулканическим извержениям позволяет утверждать, что вулканы взрывного типа по структурному признаку и по признакам состояний, предшествующих взрывным извержениям, близки к гидродинамическим ударным трубам (УТ) [3]. При этом нестационарные высокоскоростные процессы, возникающие при импульсном нагружении жидких сред [2], при определенных условиях могут рассматриваться как аналоги природных вулканических процессов и по вероятным механизмам их инициирования, и по динамике состояния потока.

### 2.1. Предвзрывное состояние вулканической системы

При экспериментальном моделировании извержений взрывного типа в качестве рабочих схем могут использоваться различного типа гидродинамические ударные трубы, предназначенные для генерации в жидкости в лабораторных условиях ударных волн с управляемыми параметрами [2]. Это могут быть как статические двухсекционные схемы УТ (рис. 1, 2), в которых достаточно поменять местами газ и жидкий образец, так и динамические схемы (рис. 3), в которых используются только жидкие образцы со свободной поверхностью. В последнем случае газодинамическая схема предвзрывного состояния вулкана формируется в динамическом режиме. Образец сжимается до заданного уровня давления ударной волной, генерируемой в нем каким-либо внешним источником, распространяется по образцу до межфазной границы, моделируя предвзрывную гидростатику в канале вулкана. Отраженная от этой границы волна, распространяясь по сжатому образцу в противоположном направлении, выполняет функцию волны декомпрессии. В статической схеме удар-

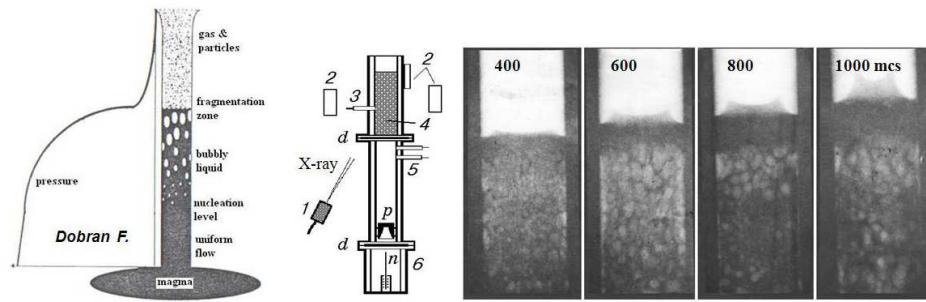


Рис. 3. Эскиз динамики состояния потока (Dobran F.), динамическая схема предвзрывного состояния вулкана и развитие кавитирующего потока магмы в волне декомпрессии

ной трубки секции разделены диафрагмой, в вулканическом канале — затвердевшей лавовой пробкой (domes/plugs).

Таким образом мы приходим к классической постановке задачи об УТ, задаче о распаде произвольного разрыва, в результате которого в камере высокого давления формируется и распространяется волна разрежения (волна декомпрессии). Это начальная стадия извержения, в течение которой, по сути, закладывается структура магматического потока и создаются условия для перехода его в двухфазное состояние. Как известно, возникающие в жидкой среде фазовые переходы и динамически развивающаяся пузырьковая кавитация приводят к существенному изменению параметров и структуры импульсного поля растягивающих напряжений, инициирующего эти процессы [2]. Естественно ожидать подобных эффектов и в вулканической системе. Наглядным примером вулканов взрывного типа, начальное состояние которых перед извержением соответствует схеме УТ, является вулкан St. Helens, мощное взрывное извержение которого инициировал гигантский оползень, сорвавший (согласно данным геофизиков) пробку, закрывающую вулканический канал [4].

## 2.2. Особенности структуры потока: статический и динамический режимы инициирования извержения

На рис. 2 представлены характерные структуры извержения, зарегистрированные (при микросекундной экспозиции) в атмосфере вблизи выхода из канала (рис. 2(а, б)) для жидкостей с вязкостью, отличающейся на порядок. На рис. 2(а) показана структура потока жидкости с вязкостью  $\mu = 0,2$  Па·с ( $T = 19^\circ$  C) в момент времени  $t_1$  и его изменение в интервале  $t_2 > t_1$ . Видно, что на начальной стадии разрушения переход кавитирующей жидкости в пенную структуру, характерный для воды [2], наблюдается также для жидко-

сти, вязкость которой на два порядка выше (кадр I на рис. 2(а)). Микросекундная экспозиция позволила разрешить тонкую структуру течения, которая с течением времени (кадр II на рис. 2(а)) существенно меняется: течение расслаивается на систему вертикальных струй, имеющих пространственную форму. При увеличении вязкости разрушаемой жидкости еще на порядок ( $\mu = 2,6$  Па·с,  $T = 42^\circ$  C) течение практически полностью расслаивается, приобретая более четко выраженный струйный характер (см. рис. 2(б)). Вероятная причина данного эффекта определена в результате исследования динамики структуры потока при низкоскоростном режиме извержения насыщенных жидкостей непосредственно в канале 4 установки. Оказалось, что в случае обычной воды ( $\mu = 10^{-3}$  Па·с) в структуре низкоскоростного извержения формируется система всплывающих плотных пузырьковых кластеров, состояние которых оказывается близким к пенному. В некоторых из них в результате коалесценции пузырьков пенная структура спонтанно разрушается, формируя своеобразный «снарядный» режим с полостями, заполненными парогазовой смесью с частицами жидкости: структура потока постепенно превращается в комбинационную систему снаряд-пузырьковый кластер. Для магматического расплава с вязкостью на три порядка выше динамика структуры течения в основном такая же, как и для воды (меняются лишь временные масштабы). Этот результат позволяет предположить, что в окрестности поверхности магмы может «взрываться» не система отдельных пузырьков, а имеющие макрообъемы пространственные «снаряды», содержащие смесь газа и частиц, образовавшуюся в результате «внутреннего кавитационного взрыва». При этом, очевидно, что пространственные «снаряды» могут образовываться в различных частях потока магмы, всплывают к ее поверхности с различными скоростями и с различной глубины. Формиро-

вание такого рода цепочки макрообъемов в потоке магмы и последовательность их взрывного разрушения могут рассматриваться как один из механизмов периодичности выбросов облаков пепла (смеси газа и частиц) при взрывном извержении вулкана.

С другой стороны, динамическая схема моделирования предвзрывного состояния вулкана, как следует из рис. 3, дает вполне адекватную сложившимся в геофизике представлениям (таким, например, как схема Dobran F., [5]) экспериментальную модель начальной динамики состояния магмы в волне декомпрессии. Правда, представленный результат описывает лишь начальное (в пределах 1 мс) развитие кавитационного процесса в магме и не дает «гарантии», что в дальнейшем разрушение будет определяться взрывом ячеек пенной магмы с последующим распространением его фронта (в виде своеобразного «эффекта домино») вглубь канала вулкана.

### 2.3. Извержение потока магматических бомб — модель кластеров кристаллитов

Наличие в магме кристаллитов не вызывает сомнений. Однако их роль в механике состояния магмы и их влияние на протекающие в ней динамические процессы при декомпрессии далеко не однозначны. В частности, известны вулканы, извержения которых имеют комбинационную структуру и сопровождаются мощным выбросом раскаленных магматических «бомб» на значительную высоту [6]. Скорость кристаллизации слишком мала, чтобы «бомбы» могли сформироваться в процессе извержения. В связи с этим наиболее вероятна модель, предложенная в [7], согласно которой предполагается, что кристаллиты в период между извержениями в канале вулкана могут формировать кластеры — своего рода «зародыши» магматических бомб. С учетом этой физической модели можно выделить три предполагаемых состояния магмы, насыщенной кристаллитами: а) кристаллиты сохраняют свою фазу и растут в кавитирующей среде, б) становятся зародышами новой (паровой) фазы и таким образом гомогенная нуклеация сопровождается гетерогенной, с) наконец, кристаллиты в период между извержениями формируют кластеры.

Экспериментальное моделирование динамики состояния (с) системы при импульсной декомпрессии было выполнено для образца «жидкость–несмачиваемые твердые частицы», в качестве которого использовались смеси твердых частиц произвольной формы размером 1–3 мм с раствором канифоли в ацетоне или с дистиллированной водой, содержащей естественные микронеоднородности в виде газовых зародышей плотностью до  $10^{12} \text{ м}^{-3}$ .

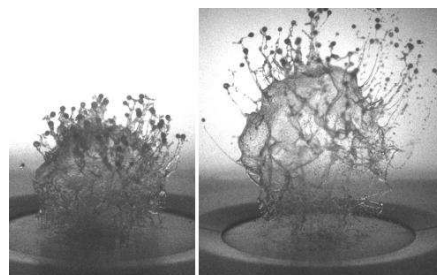


Рис. 4. Выброс высокоскоростного потока магматических «бомб» из кавитирующей магмы (экспериментальное моделирование)

Лабораторное моделирование выполнено методом последовательного (ударная волна–волна разрежения) нагружения капли указанных смесей (диаметром около 1 см) на электромагнитной гидродинамической ударной трубке. Этот метод предоставляет уникальную возможность в реальном масштабе времени в импульсном режиме реализовать в исследуемом образце процессы, во многом адекватные моделируемым природным эффектам. Поскольку реальная жидкость (дистиллированная вода) содержит микронеоднородности с плотностью, имеющей порядок  $10^{12} \text{ м}^{-3}$  [8], ее небольшие объемы (капли радиусом 0,5 см) могут рассматриваться как характерные элементы исследуемой среды. Таким образом, масштаб процесса (но не сам процесс!) можно существенно изменить, добываясь тем самым необходимого разрешения тонкой структуры потока.

Эксперименты показали, что процесс разрушения трехфазного потока может быть обусловлен, прежде всего, выделением магматических «бомб» в самостоятельный движущийся с большей скоростью поток и разрушением кавитирующего магматического расплава на стадии развития его пенной структуры. На двух последовательных кадрах рис. 4 представлены фотографии начальной стадии разделения потока частиц и кавитирующей капли жидкости. Как показали эксперименты, твердые частицы, движущиеся с существенно большей скоростью, выбрасываются из общего потока и образуют систему, практически не зависящую от кавитирующей жидкости. Обнаружено, что с увеличением концентрации частиц на начальной стадии они вовлекаются в процесс формирования ячеистой структуры потока, распределяясь в основном вдоль жидких границ ячеек, затем поток частиц выбрасывается из основного течения вместе с элементами ячеек, которые в виде жидких шлейфов «сопровождают» поток частиц (рис. 4).

### 3. Динамика состояния магмы, структура волнового поля (многофазная матмодель)

Численный анализ динамики состояния магматического расплава и процесса формирования в нем волны декомпрессии проводится в рамках математической модели механики многофазных сред, включающей в качестве базовой ИКВ-модель, а также наиболее полную систему уравнений кинетики, описывающих основные физические процессы (такие как спонтанное зарождение кавитационных ядер, диффузию газа из расплава и кинетику кристаллизации), протекающие в сжатой магме при ее декомпрессии. Ниже приведем только те уравнения, которые включают числа подобия:

– закон сохранения импульса

$$\frac{\partial \tilde{v}}{\partial t} + \tilde{v} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{z}} = -\frac{Eu}{\tilde{\rho}} \frac{\partial \tilde{p}}{\partial \tilde{z}} - \frac{1}{Fr} + \frac{1}{Re} \frac{1}{\tilde{\rho}} \frac{\partial}{\partial \tilde{z}} \left( \tilde{\mu} \frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tilde{z}} \right);$$

– частоту нуклеации

$$\tilde{J} = \exp \left\{ -G \left[ (\tilde{p}_{ch}/\Delta \tilde{p})^2 - 1 \right] \right\};$$

– уравнение Рэлея

$$\tilde{R} \ddot{\tilde{R}} + \frac{3}{2} \dot{\tilde{R}}^2 = \frac{Eu}{\tilde{\rho}} (\tilde{p}_g - \tilde{p}) + \frac{4}{Re R} \frac{d\tilde{R}}{dt};$$

– уравнение диффузии

$$Re Pr_D \frac{d\tilde{m}_g}{dt} = 3 \tilde{R} (C_i - C^{eq}(\tilde{p}_g));$$

– уравнение энергии

$$\frac{d\tilde{T}}{dt} = Ku \frac{dX}{dt} + Ku' \frac{4\pi}{3} N_b z_0^3 \frac{d\tilde{m}_g}{dt};$$

– уравнение динамики состояния кристаллитов

$$X_{cr} = (4\pi/3) N_{cr} v_{cr}^3 t_0^3 \left( \int_0^t v_{cr} d\tau \right)^3; \quad v_{cr} = \Delta T.$$

Здесь  $\Delta T$  — переохлаждение расплава;  $v_{cr}$  — скорость роста кристаллов;  $X_{cr}$  — их объемная концентрация. Течение характеризуется числами Эйлера, Фруда, Рейнольдса, Гиббса, Прандтля и числами Кутателадзе для кристаллизации и десорбции соответственно:  $Eu = p_0/\rho_0 v_0^2$ ,  $Fr = v_0/gt_0$ ,  $Re = z_0 v_0/\nu_0$ ,  $G = 16\pi \sigma^3/3 p_{ch}^2 k_B T$ ,  $Pr_D = \nu_0/D$ ,  $Ku = L/(c T_0)$ ,  $Ku' = r_d/(c T_0)$ . Здесь  $L$  — теплота кристаллизации;  $r_d$  — теплота десорбции;  $c$  — теплоемкость магмы.

*Постановка задачи.* Рассматривается задача о динамике состояния тяжелой газонасыщенной магмы с высокой плотностью зародышей микрокристаллитов, заполняющей часть (высотой  $H$ ) вулканического канала (ось  $z$ ). Волна декомпрессии формируется на поверхности столба магмы в результате каких-то природных явлений. На его нижней границе задано постоянное давление  $p_{ch}$ , равное

давлению в магматической камере. Начальная равновесная концентрация  $C^{eq}$  растворенного в магме газа определяется законом Генри  $C^{eq}(p) = K_H \sqrt{p}$ . Расчеты динамики состояния магмы (в условиях, когда кристаллиты сохраняют фазу) проводились при следующих параметрах:  $H = 1$  км,  $p_{ch} = 170$  МПа,  $T_{mel} = 1150^0 K$ ,  $\rho_0 = 2300$  кг/м<sup>3</sup>;  $K_H = 4.33 \cdot 10^{-6}$  Па<sup>-1/2</sup>;  $D = 2 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с;  $\sigma = 0,076$  Дж/м<sup>2</sup>;  $E_\mu^* = 5,1 \cdot 10^{-19}$  Дж;  $L = 1,4 \cdot 10^5$  Дж/кг;  $c = 1,35 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К);  $N_{cr} = 10^{13}$  м<sup>-3</sup>. Как показал анализ динамики характеристик, определяющих состояние магмы, практически во всех распределениях выделяются три зоны. Отметим 600–700 м зону распределения давления со слабым градиентом, выросшую на 6 порядков вязкость расплава магмы с довольно резким градиентом вблизи свободной поверхности и значительные концентрации газовой  $K_b$  и кристаллической  $K_{cr}$  фаз. Первая из них в районе интервала 700–1300 м к  $t = 6,1$  сек достигает 40% со скачком до 50–60% вблизи свободной поверхности, что соответствует насыщенной плотности пузырьков. Относительный объем кристаллитов в интервале 500–1300 м достигает примерно 25% от объема трехфазной среды. После 4 сек распределение объемной концентрации газовой фазы остается практически неизменным.

Рис. 5 представляет динамику распределения вязкости  $\mu$  и радиусов кавитационных пузырьков в зоне насыщения для моментов времени  $1 - t = 0,6$  с;  $2 - t = 2,1$  с;  $3 - t = 3,0$  с;  $4 - t = 5,8$  с. Сравнение распределений проведено на высотах магматического столба, которые увеличиваются по мере развития кавитации, и которые для каждого из указанных моментов времени принимаются за 100%. В частности, если при  $t = 0,6$  с высота столба магмы в канале увеличивается всего на несколько десятков метров, то при  $t = 6$  с она достигает полутора километров. Из расчета следует, что размер кавитационных пузырьков, с учетом гигантского значения вязкости магмы, очевидно приблизился к предельно возможному. Таким образом, имеются основания предполагать, что примерно к 6 сек после начала разгрузки в трехфазной магме с «вмороженными» пузырьками радиусом около 0,3 мм на значительной части столба практически завершается процесс стеклования, при котором структура магмы по параметрам оказывается близка к структуре реальной пемзы [9].

*Двухфазная модель гомогенно-гетерогенной нуклеации.* Рассматривается случай, когда микрокристаллиты выполняют функцию зародышей пузырьковой кавитации. Они «вбрасываются» в зону насыщения, увеличивая таким образом плотность

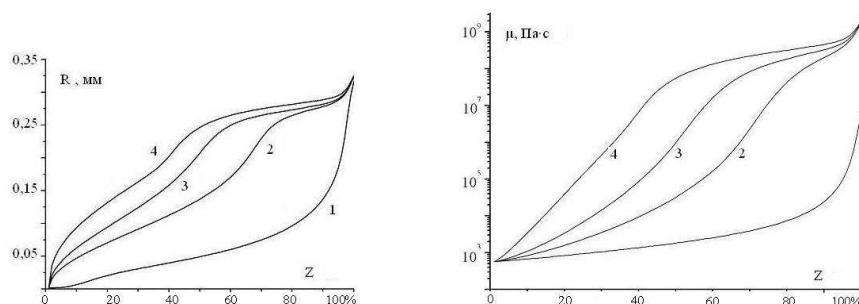


Рис. 5. Динамика распределения вязкости  $\mu$  и радиусов кавитационных пузырьков в зоне насыщения

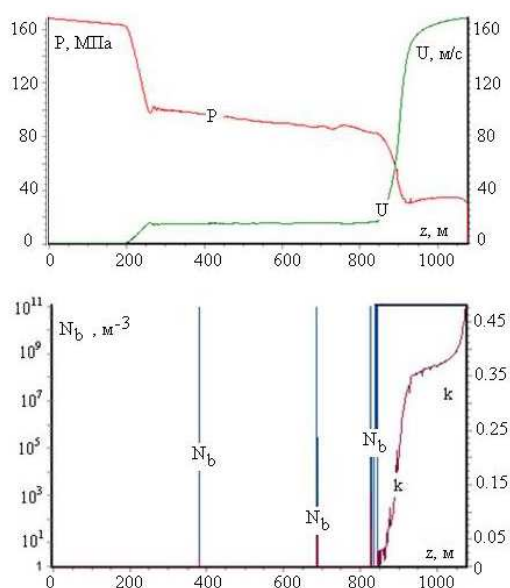


Рис. 6. Структура волнового поля, массовой скорости и концентрации газовой фазы в зоне насыщения

зародышей на заданную величину, но не меняют количество газа, поступившего в зону спонтанного насыщения. Рис. 6 показывает, что в такой среде происходит кардинальное (по сравнению с классикой однофазного состояния несущей фазы) изменение структуры и волнового поля, и поля массовых скоростей. Зона насыщения  $N_b$  оказывается сосредоточенной в ближних к поверхности слоях, в которых скачком практически на порядок увеличиваются объемная концентрация пузырьков  $k$ , потери расплавом растворенного газа и, как следствие, вязкость расплава.

В качестве заключения: приведенный результат по структуре и параметрам потока дает основание сделать заключение о том, что в потоке есте-

ственным образом формируется состояние, близкое к состоянию взрывного извержения.

### Список литературы

- [1] Gonnermann H.M., Manga M. Nature, 2003, vol. 426, с. 432–435.
- [2] Кедринский В.К. Нелинейные проблемы кавитационного разрушения жидкости при взрывном нагружении (обзор) // ПМТФ. 1993. Т. 34, № 3. С. 74–91.
- [3] Кедринский В.К. О газодинамических признаках взрывных извержений вулканов (часть I) // ПМТФ. 2008. Т. 49, № 6. С. 3–12.
- [4] Eichelberger J., Gordeev E., Koyaguchi T. A Russian-Japan-US Partnership to understand explosive Volcanism // www.kscnet.ru /conference / sovbes / agenda / cvs Jun. 22, 2006. С. 1–4.
- [5] 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. С. 285–311.
- [6] Hill D.P., Pollitz F. and Newhall Ch. Earthquake-volcano interactions // J. Phys. Today. 2002. V. 55, № 11. С. 41-47.
- [7] Кедринский В.К. О газодинамических признаках взрывных извержений вулканов (часть II) // ПМТФ. 2009. Т. 50, № 2. С. 167-177.
- [8] Бесов А.С., Кедринский В.К., Пальчиков Е.И. Изучение начальной стадии кавитации с помощью дифракционно-оптической методики // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10, вып. 4. С. 240-244.
- [9] Кедринский В.К., Давыдов М.Н., Чернов А.А., Такаяма К. Начальная стадия взрывного извержения вулканов: динамика состояния магмы в волнах разгрузки // Докл. Академии наук. 2006. Т. 407, № 2. С. 190-193.