

УДК 532.685

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ БАЗАЛЬТОВЫХ ВЗРЫВОВ

А.Ю. Озеров

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский,
683006; e-mail: ozerov@ozerov.ru*

Завораживающие и прекраснейшие явление на Планете - извержение вулкана. Каждое извержение неповторимо, но следует искать общие закономерности в механизме этого грандиозного явления. Наиболее удачными представляются работы, выполненные на основе теории гидродинамики течения газо-жидкостных систем [1, 4, 5, 7, 8, 9]. Для объяснения механизма извержений вулканов уже в прошлом веке проводились лабораторные модельные эксперименты [2, 3, 6, 10, 11, 12, 13]. В русле этих исследований в Институте вулканологии и Сейсмологии ДВО РАН создан Комплекс Аппаратуры для Моделирования Базальтовых Извержений (КАМБИ) и проведена серия лабораторных экспериментальных работ.

Цель эксперимента - исследование процессов, происходящих при образовании и подъеме газо-жидкостных смесей в вертикальных каналах, как аналога течения базальтовых магм.

Технические характеристики КАМБИ

КАМБИ состоит из двух систем - моделирующей и регистрирующей. Комплекс создан для изучения вулканических процессов, поэтому наряду с техническими терминами в описании будут приведены вулканологические представления о том, чему соответствует тот или иной узел КАМБИ.

Моделирующая система включает в себя – очаговую область (емкость для приготовления газонасыщенной модельной жидкости), питающий канал (прозрачный шланг), кратерная область (зона для приема поступающей модельной жидкости) (рис. 1). Опишем их снизу вверх:

«*Очаговая зона*». Герметичный бак из нержавеющей стали объемом 350 литров, рассчитанный на давление 5 атмосфер. Система вентилей дает возможность заполнять установку жидкостью. В нижнюю часть бака вварена перфорированная трубка с 50-ю отверстиями для насыщения жидкости газом. Измерение давления в системе осуществляется манометром, располагающимся в верхней части бака. Водомерная колонка, позволяет следить за объемом жидкости в баке. В верхнюю часть бака вварен штуцер, через него в ходе эксперимента в бак подается инертный газ, выполняющий в нашем случае роль выдавливающего поршня. Безопасность насыщения жидкости газом обеспечивается аварийным предохранительным клапа-

ном. Эта часть установки, являющаяся, по сути, сатуратором, позволяет растворять газ в жидкости.

В работе используется жидкость и два вида газа. В качестве жидкости применяется обыкновенная водопроводная вода (H_2O). В качестве растворяемого газа выбран углекислый газ (CO_2). Он хорошо растворяется в воде (в 1 литре H_2O при температуре эксперимента 20^0C растворяется ~ 828 мл CO_2), кроме этого, этот газ достаточно легко переходит в свободную фазу. Газ азот (N_2), наоборот, при наших температурах практически нерастворим в воде (в 1 литре H_2O при $T = 20^0C$ растворяется ~ 18 мл N_2), поэтому нами он используется в качестве поршня, выдавливающего жидкость из бака. Оба баллона подающие CO_2 и N_2 , снабжены редукторами, позволяющими регулировать расход газа.

При конструировании этой части установки мы преследовали цель создать аналог магматического очага, из которого однофазная жидкость с растворенным газом по питающему каналу поступает на поверхность.

«Питающая/подводящая система». Из нижней части боковой стенки емкости горизонтально выведена нержавеющая труба, которая, плавно изгибаясь ($R_{\text{изгиба}} = 200$ мм), меняет свое осевое направление на вертикальное. К верхней части трубы прикреплен прозрачный пластиковый шланг, он имеет внутренний диаметр 16 мм и имеет высоту (длину) – 16 600 мм. Специальная система крепления позволяет держать шланг в вертикальном состоянии. Вдоль шланга располагается мерная лента с ценой деления 1 мм. Отходящая от бака нержавеющая труба снабжена запирающим краном.

Внутренние диаметры выходящих из бака нержавеющей трубы и шарового крана равны внутреннему диаметру, прикрепленного к ним прозрачного шланга, а плавный изгиб трубы призван уменьшить эффекты трения и выборочного разряжения. Это дает возможность сохранить ламинарную тенденцию течения модельной жидкости при перемещении ее из бака в пластиковый шланг.

Отношение рабочего сечения - внутреннего диаметра шланга к длине, в нашем случае – высоте, соответственно $\sim 1:1\ 000$, близко к реальным питающим каналам. В этой части установки моделируются процессы, происходящие в питающем канале вулкана.

«Кратерная область». Верхняя часть пластикового шланга введена в прозрачный герметичный аквариум из оргстекла прямоугольного сечения. Шланг имеет срез перпендикулярно его оси и возвышается над дном аквариума на 200 мм. Это дает возможность следить за процессами, происходящими на выходе из трубки, и препятствует попаданию жидкости за пределы КАМБИ. Аквариум снабжен сливом, в его стенке имеется технологическое окно, позволяющее производить монтаж внутреннего дополнительного оборудования.

Описанная часть моделирующей системы дает возможность отслеживать процессы, происходящие при переходе жидкости из питающей системы в открытое пространство.

Эруптивным аналогом этой части Комплекса является вулканическая бокка или кратер вулкана.

Регистрирующая система. В нее входят система динамического видеослежения (рис. 1), электронный высотомер и спидометр, блок видеорегистрации, блок акустической регистрации, синхронизирующие устройства, отключающая система.

Видеослежение призвано в динамическом режиме осуществлять наблюдение за процессами, происходящими в вертикальных трубах при движении по ним модельной жидкости. Вдоль вертикальных прозрачных шлангов по системе направляющих тросов перемещается тележка с видеокамерой, движение которой обеспечивается электродвигателем. На тележке предусмотрен мощный источник света, позволяющий обнаруживать даже мелкие неоднородности в движущемся потоке. Изображение, получаемое видеокамерой слежения, по телеметрическому каналу в реальном времени передается на монитор. Оператор, следящий за видеоизображением, используя созданный нами пульт управления, имеет возможность оперативно изменять скорость тележки в интервале от 1 см/сек до 1.5 м/сек.

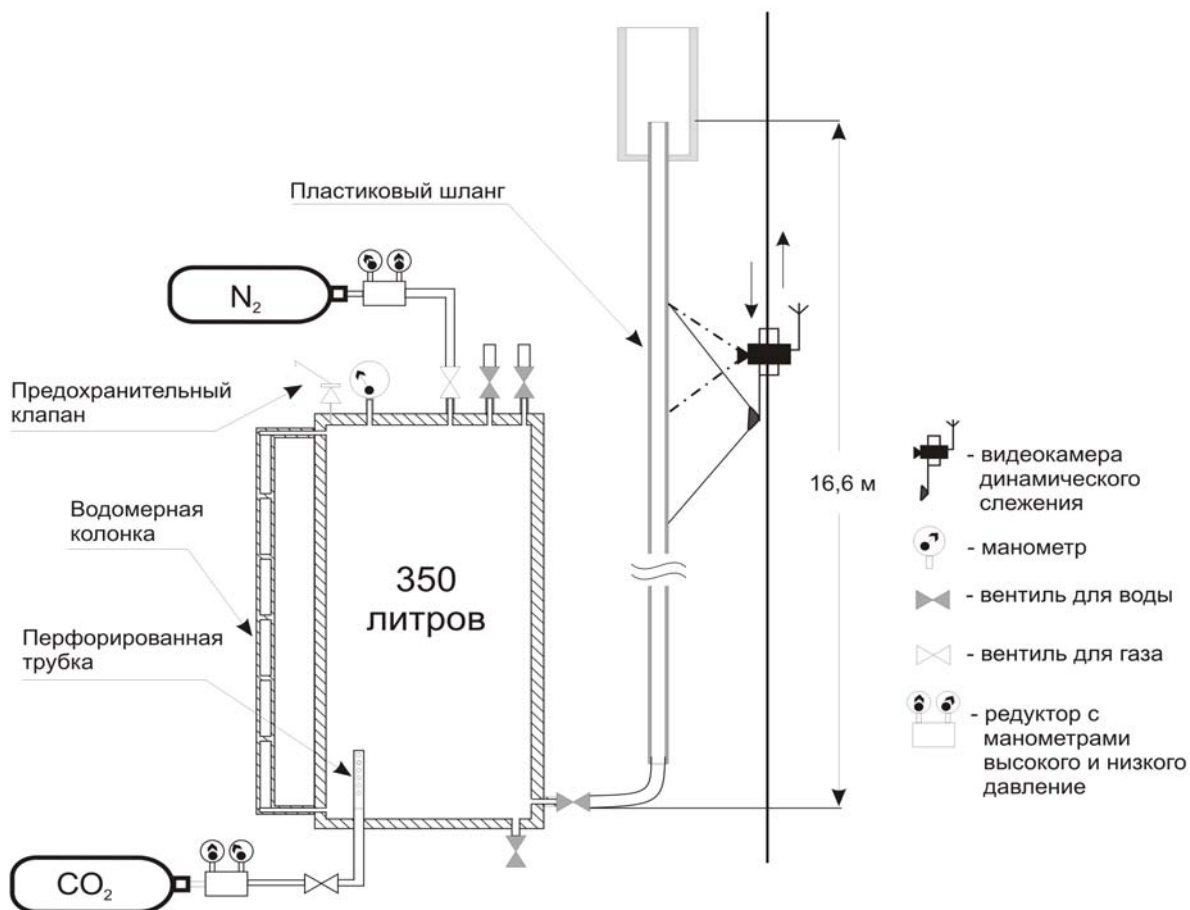


Рис. 1. Принципиальная схема моделирующей и регистрирующей систем Комплекса аппаратуры для моделирования базальтовых извержений.

Высотомер и спидометр. Для одновременного определения высоты и скорости движущейся тележки создан специальный электронный блок. Он позволяет фиксировать верти-

кальное положение тележки с точностью до 10 мм с помощью высотомера и определять изменения ее скорости в интервале от 2 см/сек до 1.5 м/сек с помощью спидометра, точность работы которого – 2 см/сек.

Видеорегистрация. Ход эксперимента фиксируется тремя видеокамерами. Одна из них расположена на тележке и записывает картину эволюции поднимающейся по прозрачным шлангам модельной жидкости. Для удобства восприятия картины, происходящей в шланге, и при этом сохранения достаточного качества изображения выбран оптимальный угол захвата изображения, позволяющий записывать видеоряд в 30-сантиметровом интервале высоты. Вторая камера регистрирует процессы на верхнем урезе шлангов, в зоне выхода жидкости на поверхность. Третья - записывает данные высотомера и спидометра.

Акустическая система дает возможность регистрировать звуковой сигнал, образующийся при достижении пузырьками поверхности модельной жидкости. Для этого, над верхним урезом пластикового шланга устанавливается влагозащитный микрофон, сигнал от которого в цифровом виде передается и записывается на компьютер. Это аналог геофизической станции, записывающей колебания, возникающие в непосредственной близости от источника.

Блок синхронизации. Эта часть Установки создана для синхронизации видео- и акустической информации. Он позволяет синхронизировать сигнал с точностью до миллисекунд.

Блок экстренного торможения. Установка снабжена устройством экстренной остановки тележки в случае выхода ее за пределы рабочей области.

Заканчивая описание КАМБИ необходимо отметить, что общая высота Комплекса 18 метров. Он смонтирован в здании Института вулканологии и сейсмологии, в межлестничном проеме блока «С».

Идея, расчеты, изготовление всех узлов и монтаж Установки осуществлены коллективом сотрудников Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Руководитель работ – в.н.с. А.Ю. Озеров, инженеры А.В. Буткач, О.И. Дьячкова, токарь-фрезеровщик С.Ф. Локтионов. Постоянным членом нашего коллектива является бывший сотрудник Института вулканологии, а ныне инженер ТЭЦ-2 – В.С. Шульга. Значительное содействие работе оказали ценные советы и консультации – в.н.с. В.А. Дроздина.

Подготовка к эксперименту

Заливаем бак (очаг) водой на 4/5 высоты, открываем вентиль насыщения CO_2 , газ пробулькивает через воду. При помощи манометра следим за условиями насыщения. Для нижеописанной серии экспериментов было выбрано оптимальное давление растворения - 1,6 атмосферы, позволяющее газу начать выделяться в свободную фазу в нижней части газонасыщенной колонны.

Заполняем шланги обычной водопроводной, не насыщенной газом водой. Этим достигаются стабильные условия на момент запуска системы, открываем вентиль подачи N_2 и открываем кран подачи модельной жидкости в прозрачный пластиковый шланг. Азот создает избыточное давление в баке, и поднимающаяся газонасыщенная жидкость выдавливает не газонасыщенную воду из шлангов. Сохраняя низкий расход подачи азота ~ 1.65 атмосферы, даем системе стабилизироваться и наблюдаем за событиями в прозрачном шланге. Расход газонасыщенной жидкости, поступающей в колонну в процессе одного эксперимента, сохраняется постоянным.

Результаты эксперимента

В ходе эксперимента было установлено, что при движении газонасыщенной жидкости в колонне возникает 4 разных режима – жидкостный, пузырьковый, пакетный и снарядный (рис. 2). Эти режимы стабильны – при неизменных расходах подачи модельной жидкости они, каждый в своем интервале высоты, сохраняются сколь угодно долго. Следует добавить, что в зависимости от условий растворения газа в жидкости, любой из этих режимов мы можем вывести на поверхность – на верхний срез шланга для того, чтобы наблюдать особенности внешнего проявления того или иного режима.

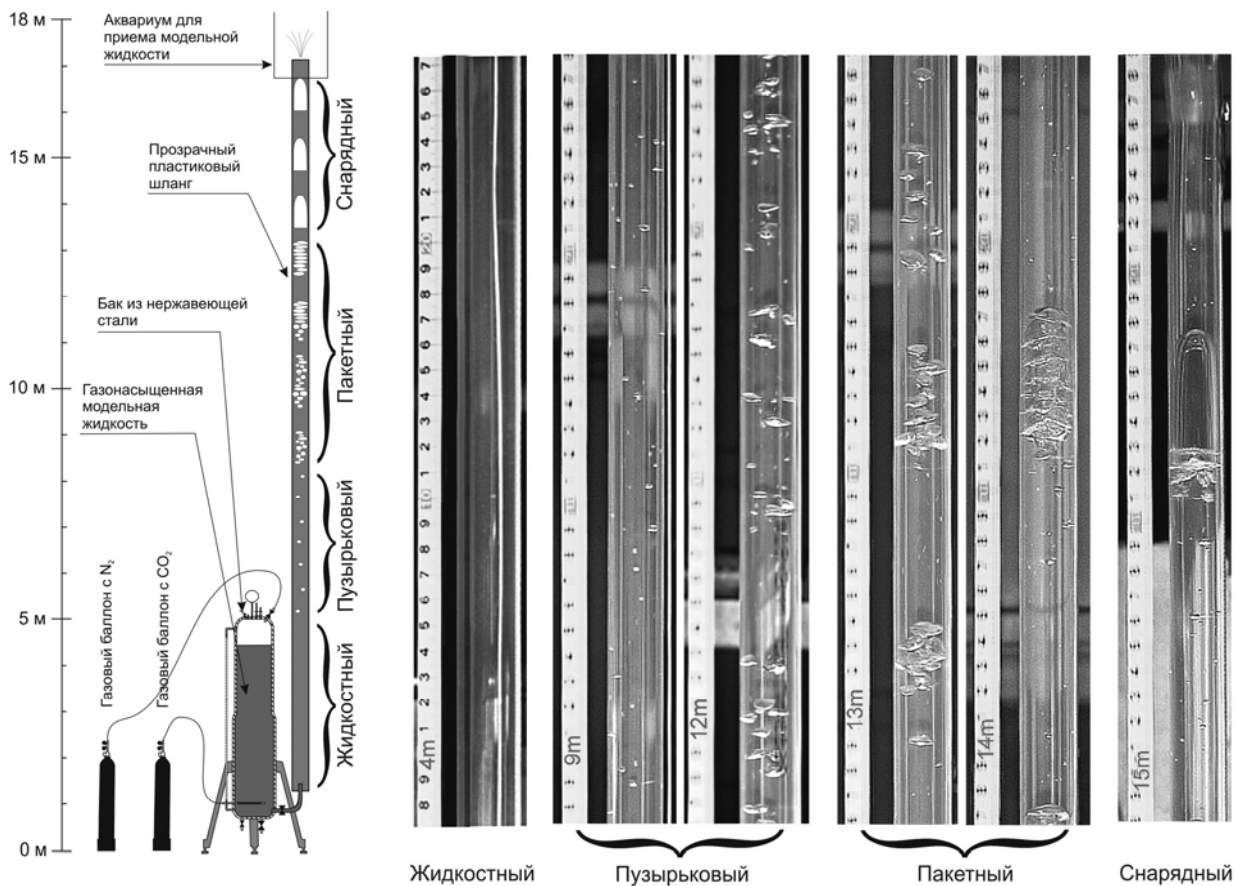


Рис. 2. Схема работы моделирующей системы Комплекса аппаратуры для моделирования базальтовых извержений (слева) и режимы течения газонасыщенной модельной жидкости в вертикальном канале (слева).

Жидкостный режим. Модельная жидкость с растворенным в ней газом CO_2 поднимается по шлангу вверх. Это режим ламинарного однофазного движения, поэтому какие-либо неоднородности в потоке отсутствуют (см. рис. 2). В условиях проведения эксперимента жидкостный режим прослеживается от 0 м до 5 м по вертикали.

Пузырьковый режим - возникает в момент образования первого пузырька. С этого момента в колонне наблюдается двухфазный режим течения. Сначала процесс нуклеации (зарождения пузырьков) очень медленный – в 30-сантиметровой зоне слежения мы видим на 5-м метре – 3 пузырька, на 6-м – 4 пузырька, затем темп нуклеации возрастает – на 8, 9, 10 и 11 метрах образуются соответственно – 10, 35, 18 и 20 новых пузырьков. Зарождающиеся пузырьки имеют размер < 1 мм, они движутся, меняются местами, ускоряются, замедляются, подрастают (рис. 2). Таким образом, в верхних частях зоны пузырькового режима наблюдается несколько генераций пузырьков или, точнее сказать, плавный переход от мелких, вновь образованных, до крупных пузырей, формирование которых началось в нижних структурных горизонтах пузырькового режима. В зоне перехода в следующий гидродинамический режим, на высоте 10-11 метров, крупные, долго существующие пузырьки дорастают до 7-9 мм в диаметре.

Этот режим характеризуется свободным подъемом пузырьков, обусловленным минимальным влиянием их друг на друга. Пузырьки сначала поднимаются со скоростью ~ 30 см/сек, затем, по мере движения их скорость увеличивается до ~ 50 см/сек.

Важно отметить, что распределение пузырьков по колонне в описываемом режиме имеет не равномерный характер – в отдельных местах образуются сгустки пузырьков, а в других - разряженные участки.

Пузырьковый режим четко прослеживается на расстоянии нескольких метров - от 5-го до 12-го метра. Ведущий процесс этого режима - нуклеация и рост пузырьков.

Проявление описываемого режима на поверхности (в кратерной зоне) может быть достаточно многообразным. В зависимости от количества лопающихся пузырьков на поверхности будет та или иная картина – слабое кипение в жидких магмах, а в более вязких – равномерная слабая пепло-газовая активность.

Пакетный режим. Увеличение количества и размеров пузырьков приводит к структурной перестройке модельной жидкости, расстояние между отдельными пузырьковыми сгустками заметно увеличивается, а сами сгустки уплотняются. Это приводит к тому, что образуются хорошо выраженные сгустки-стяжения пузырьков, которые при последующем подъеме трансформируются в четкие структуры – своеобразные пузырьковые пакеты, состоящие из 20-35, до 50 сильно сближенных пузырьков (см. рис. 2). Пузырьковые пакеты разделяются между собой слоем жидкости, не содержащим свободной газовой фазы. Пакеты имеют высоту 2-3 диаметра шланга (30-50 мм), межпакетное пространство - 8-10 диаметров

шланга (120-160 мм). Скорость движения пакетов – 40-45 см/сек, несколько ниже, чем в верхней части пузырькового режима. Для удобства пузырьковые пакеты в дальнейшем будем называть – пакеты.

В зрелом пакетном режиме пузырьки плотно примыкают друг к другу и приобретают форму перевернутой тарелки – возникает своеобразная динамическая плотнейшая газовая упаковка.

Наблюдается два вида пузырьковых пакетов – открытые и заблокированные. Открытые пакеты состоят из пузырьков близкого диаметра, в процессе движения отдельные пузырьки меняются местами - обгоняя или отставая друг от друга, но в целом они находятся в пределах своеобразной мнемонической границы. Блокированные пакеты представляют собой совокупность пузырьков, следующих за одним крупным пузырьком, занимающим практически весь диаметр трубки.

Следующие друг за другом четкие пакеты, разделенные слоем жидкости, наблюдаются в интервале от 13 до 14 м. В пакетном режиме доминируют процессы торможения, сжатия отдельных пузырьков, коалесценции.

На поверхности проявления этого режима – дискретные кратковременные фонтанчики, надувающиеся пузыри, взрывы с большим количеством пепла. Пепел образуется в результате разрушения тонких перегородок, разделяющих плотно прижатые друг к другу пузырьки газа.

Снарядный режим. Последующая структурная перестройка двухфазной смеси обусловлена разрывом стенок между пузырьками, плотно прижатыми друг к другу в пакете. В верхней части пакета возникает крупный пузырек, реакция коалесценции идет сверху вниз, и через какое-то время газовый пакет превращается в четкий обособленный газовый снаряд длиной 3-4 калибра трубки (см. рис. 2). Как правило, за снарядом следует шлейф мелких пузырьков. Снарядный режим тоже имеет изменяющийся, эволюционный характер, обусловленный тем, что снаряды по мере подъема увеличивают свои продольные размеры, количество мелких пузырьков за снарядом тоже может увеличиваться. Но в целом морфологические изменения невелики - это самый устойчивый режим, пузырьковые снаряды следуют друг за другом на фиксированном расстоянии. Форма газовых снарядов, их объем и расстояния между ними практически не меняются вплоть до достижения верхней части трубы, т.е. в проводимом эксперименте они прослеживаются в интервале 2.5 метра. Скорость движения снарядов несколько выше, чем у пакетов – 45-50 см/сек.

Снарядный режим характеризуется наличием следующих друг за другом отдельных одиночных крупных пузырьков. Каждый пузырек занимает все сечение трубки/канала, он плотно примыкает своей боковой поверхностью к трубе. Снаряд имеет отношение высоты к диаметру 2:1 - 4:1. По отношению к окружающей жидкости – это крупные газовые полости.

При переходе от пакетного к снарядному режиму коалесценция выражена наиболее ярким образом. Последующее дорастание снарядов обусловлено аккумуляцией ими газа из модельной жидкости.

На поверхности проявления этого режима – четкие обособленные сильные дискретные взрывы.

Обсуждение результатов

1. Полученные данные показывают, что в ходе эксперимента происходит постоянная перестройка структуры жидкости - каждый из четырех описанных режимов является закономерным продолжением друг друга.

От момента образования пузырька до наступления зрелого снарядного режима строение потока непрерывно изменяется. Наблюдается четкая последовательность: растворенный газ - газовый пузырек - пузырьковый пакет - газовый снаряд (см. рис. 2), таким образом, мы имеем дело с явно выраженным многообразием форм, то есть полиморфизмом. Под полиморфизмом в современной науке принято понимать способность или свойство некоторых веществ, как простых, так и сложных давать в разных термодинамических условиях две или несколько модификаций, сохраняя одинаковый химический состав, но с разными физико-химическими свойствами. Разные видоизменения или формы одного и того же вещества называются - полиморфными модификациями. В нашем эксперименте показано, что вещество одного и того же состава в процессе эволюции приобретает совершенно разные формы, таким образом, мы имеем дело с явно выраженным газо-гидродинамическим полиморфизмом. В этом случае, описанные режимы - жидкостной, пузырьковый, пакетный и снарядный, следует считать полиморфными модификациями. Общую структуру движущегося вещества – полиморфными потоками, а сам процесс движения – полиморфным течением.

2. В результате наших исследований найдено необходимое звено, связывающее пузырьковый и снарядный режимы, - это новый, морфологически устойчивый, пакетный режим (см. рис. 2).

Механизм образования газового пакета обусловлен процессом запираания идущими выше пузырьками нижних. Прежде всего, следует сказать, что прообразы будущих пакетов хорошо прослеживаются в верхней части пузырькового режима, где наблюдается неоднородное распределение пузырьков – достаточно определенно выделяются сгустки или стяжения, состоящие из отдельных пузырьков. В зоне пакетообразования эти процессы становятся более выраженными. В какой то момент один крупный или несколько более мелких пузырьков, оказавшиеся на одном уровне, начинают явно взаимодействовать со стенками канала. Это взаимодействие обусловлено тем, что поднимающаяся газовая структура, дорастая до определенного уровня, существенно сокращает полезное сечение обратного тока жидкости. По сути, уменьшается сечение канала, через которое может проходить вода. Пузырек или не-

сколько пузырьков начинают тормозиться обратным током жидкости. В результате их скорость снижается, и он/они становится своеобразной пробкой для идущих ниже пузырьков. Они собираются под «пробкой», расстояние между ними уменьшается и из большого количества пузырьков формируется новая структура - пузырьковый пакет. Пузырьки, располагающиеся в колонне выше запирающего, продолжают двигаться с прежней скоростью и уходят вверх, таким образом, над пакетом создается объем жидкости без газовых пузырьков. Отсутствие пузырьков за конкретным отдельным газовым пакетом обеспечивается более низким зарождающимся пакетом. Создается пакетный режим, при котором друг за другом на определенном расстоянии движутся газовые пакеты, разделенные между собой слоями жидкости без пузырьков.

Нагляднее всего этот процесс прослеживается для заблокированных пакетов. В этом случае, выпукло-вогнутые пузырьки, направленные выпуклой частью вверх, полностью или почти полностью примыкают своими бортами к внутренним стенкам канала. При такой плотнейшей динамической упаковке процесс коалесценции неизбежен и в верхней части пакета появляется крупный пузырек. Начинается снарядообразование и через какое-то время весь пакет превращается в классический газовый снаряд.

3. Исследование полиморфного течения в длинной тонкой вертикальной колонне позволили выделить новый, ранее нигде не описанный, газо-гидродинамический режим. Мы предлагается называть его – пакетным режимом (см. рис. 2). Структура этого режима значительно отличается от известных режимов течения - пузырькового, снарядного, пенообразного, диспергированного и дисперсного. Определены основные характеристики пакетного режима: 1 - главным составляющим элементом является пузырьковый пакет, представляющий собой объем жидкости с высокой концентрацией пузырьков. Сверху и снизу пакет ограничен жидкостью, не содержащей свободной газовой фазы; 2 - совокупность пузырьковых пакетов, следующих друг за другом на определенном расстоянии, создает пакетный режим; 3 - пакетные структуры на определенных интервалах канала имеют устойчивый повторяющийся характер; 4 - продолжительность существования пакетного режима сопоставима со временем существования пузырькового и снарядного; 5 - обязательное его проявление между пузырьковым и снарядным режимами; 6 - в структурном плане пакетный режим более сложный, чем пузырьковый и снарядный; 7 - морфологически выделяются пакеты двух видов – открытые и заблокированные; 8 - скорость подъема пакетов ниже, чем у пузырькового, но выше, чем у снарядного режимов; 9 - механизм образования пакетов обусловлен процессами запираания и торможения более крупными газовыми неоднородностями располагающихся ниже пузырьков. Перечисленные характеристики позволяют полагать, что пакетный режим в физическом плане следует рассматривать, как самостоятельный отдельный режим движения двухфазных смесей и полиморфных потоков.

4. Теперь, когда стали известны недостающие элементы течения газонасыщенной жидкости по каналу, появилась возможность дать генетическое понятие одного из базовых понятий вулканологии – базальтового вулканического взрыва.

Базальтовый (флюидный) взрыв – очень быстрое выделение энергии, связанное с выходом на поверхность значительного дискретного объема вулканического газа и сопровождающееся разбрасыванием или разбрызгиванием магматического расплава, поступающего вместе с газом. Механизм образования крупных обособленных скоплений газа обусловлен полиморфными газо-гидродинамическими изменениями в питающей магматической колонне. Вследствие падения гидростатического давления газонасыщенный расплав, поднимающийся из недр Земли по подводящему каналу, проходит четыре режима – жидкостный, пузырьковый, пакетный и снарядный. Реализация на поверхности пакетного или снарядного режимов и приводит к флюидным взрывам.

Эти взрывы характерны для расплавов ультранизкой (10-100 Па·с) и низкой (100-1000 Па·с) вязкости. Они происходят на вулканах Килауэа, Питон-де-ля-Фурнез, Толбачик, Ключевской, Стромболи, Этна, Эребус.

В отличие от химических и ядерных взрывов, где из одного объема ВВ генерируется 1000-3000 объемов газа, здесь при поступлении снаряда или пакета на поверхность расширение объема поступающего газа происходит в 10-100 раз.

При химических взрывах время перехода из твердого/жидкого состояния в газообразное меньше 1 сек, в нашем случае, время выделение газовой фазы из расплава часы – сутки.

Преобразование вещества происходит в вертикальной, субвертикальной магматической колонне. Описываемые взрывы всегда наблюдаются сериями. Средний флюидный взрыв выбрасывает на поверхность 50 тонн твердых продуктов. В вулканологии эти взрывы называются Гавайскими и Стромболианскими.

Заключение

Для исследования процессов, происходящих в питающих системах базальтовых вулканов, создан Комплекс аппаратуры моделирования базальтовых извержений (КАМБИ). Он включает Моделирующую и Регистрирующую системы. Комплекс позволяет исследовать процессы, происходящие при образовании и подъеме газовой-жидких двухфазных смесей в вертикальных каналах.

Выявлен и описан новый режим течения двухфазных смесей в вертикальной колонне – пакетный, характеризующийся закономерным чередованием плотных скоплений газовых пузырьков (пакетов), разделенных между собой жидкостью, не содержащей свободной газовой фазы.

Механизм образования пакетного режима обусловлен процессами запираания рабочего сечения трубки одним большим пузырьком или несколькими маленькими пузырьками. Этот

процесс приводит к торможению запирающего пузырька (группы пузырьков), при этом располагающиеся выше уходят вверх, а нижние догоняют пузырьковую пробку.

Выявлены кинетические особенности, возникающие при поступлении модельной жидкости с растворенным газом в вертикальные подводящие каналы. Показано, что жидкостный, пузырьковый, пакетный и снарядный режимы имеют свои морфологические особенности и являются закономерным продолжением друг друга.

Анализ разнообразия режимов течения одной и той же модельной жидкости сначала с растворенным газом, а затем уже с газом, выделившимся в свободную фазу, позволяет говорить о структурном полиморфизме течения жидкости. Разные формы одного и того же вещества, в нашем случае - жидкостный, пузырьковый, пакетный и снарядный режимы, являются полиморфными модификациями.

Анализ взрывов на базальтовых вулканах с учетом полученных экспериментальных данных о механизме этого процесса позволяет ввести определение этого явления - базальтовый (флюидный) взрыв. Это позволяет рассматривать описываемый природный феномен наряду с такими явлениями как взрыв химический, тепловой, атомный, ядерный и т.д.

Благодарности:

Автор выражает искреннюю благодарность Дрознину В.А. за многолетнюю поддержку наших исследований. Большое содействие работам оказывала дирекция Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН чл.-корр. РАН Гордеев Е.И., Муравьев Я.Д., Карпов Г.А., Селиверстов Н.И., Казанцев В.А., а также Абубакиров И.Р., Авдейко Г.П., Алидибилов М.А., Аносов Г.И., Бабушкин Ю.А., Белоусов А.Б., Белоусов В.И., Боград О.Е., Бычков К.А., Буткач А.В., Варяников С.А., Васильев Г.Ф., Висловой Т.Д., Гавриленко М.Г., Гаврилов А.А., Грачев Л.А., Демянчук Ю.В., Дьячкова О.И., Дунин-Барковский Р.Л., Дубровский В.Н., Дубровская И.К., Дядин В.И., Иванов В.В. (мл.), Карпенко В.Н., Касьянов С.В., Кириченко В.А., Конов А.С., Кравец С.И., Кузьмин Д.Ю., Кузьмин Ю.Д., Ландер А.В., Леонов В.Л., Локтионов С.Ф., Лутай В.С., Максимов А.П., Марынова В., Мулькеев А.А., Мушинский А.В., Нуждаев А.А., Озерова Н.А., Озерова Н.А. (мл.), Осипенко Л.Г., Ототюк И.Л., Панов В.К., Плотников С.И., Пономарев Э.Г., Пушкарев В.Г., Разина А.А., Рашидов В.А., Рогозин А.Н., Романов Н.В., Сакоренко А.П., Сашенкова А.Ф., Свирид И.Ю., Сергеев В.А., Сторчеус А.В., Тимофеева И.Ф., Тимошенко Г.П., Шапарь В.Н., Шпак В.П., Шульга В.С., Фидористов О.В., Фирстов П.П., Фролова Ю.В., Чаплыгин И.В., Чаплыгин О.В., Чирков С.А., Чубарова О.С., Чуриков В.А., Richard Joels.

Исследование поддержано грантами РФФИ № 06-05-64590-а, 07-05-10052-к, 05-05-64730-а и ДВО РАН 06-III-A-08-331, 07-III-D-08-095.

1. Абишев С.К. Булгаков Р.Р., Сахаров В.А. Экспериментальная установка по исследованию движения газожидкостных смесей в вертикальных трубах для подъема высоковязких нефтей // Труды МИНХ и ГП. Вып. 156. Москва. 1981. С. 98-104.
2. Дрознин В.А. О природе вулканических извержений // Труды 1 городской конференции молодых ученых и специалистов. Петропавловск-Камчатский: Дальневосточное книжное издательство, 1969. № 45. С. 4-6.
3. Дрознин В.А. Физическая модель вулканического процесса. Москва. Наука. 1980. 92 с.
4. Козлов Б.К. Режимы и формы движения воздушно-водяной смеси в вертикальной трубе. – В книге: Гидродинамика и теплообмен при кипении в котлах высокого давления. 1955. С. 7-18.
5. Кутателадзе С.С., Накоряков В.Е. Тепломассообмен и волны в газожидкостных системах. Новосибирск. Наука. 1984. 302 с.
6. Мельник О.Э., Бармин А.А., Спаркс С. Беспокойная жизнь лавовых куполов // Природа. 2006. № 3. С. 46-55.
7. Сахаров В.А., Мохов М.А. Гидродинамика газожидкостных смесей в вертикальных трубах и промысловых подъемниках. Издательство Нефть и газ. Москва. 2004. 392 с.
8. Сорокин Ю.Л. Об условиях устойчивости некоторых режимов движения газожидкостных смесей в вертикальных трубах // Прикладная механика и теоретическая физика. 1963. № 6. С. 160-165.
9. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. М.: Мир, 1972. 440 с.
10. Ozerov A.Yu. Periodicities in the dynamics of the volcanic eruptions in Kamchatka // 32nd International Geological Congress. Florence. Abstracts. Part 1. P. 614.
11. Phillips J.C., S.J. Lane, A.M. Lejeune, and M. Hilton (1995), Gum rosin-acetone system as an analogue to the degassing behavior of hydrated magmas, *Bull. Volcanol.*, 57, 263-268.
12. Vergnolle, S. and C. Jaupart (1986), Separated two-phase flow and basaltic eruptions, *J. Geophys. Res.*, 91, 12842-12860.
13. Vergnolle, S., and C. Jaupart (1990), The dynamics of degassing at Kilauea volcano, Hawaii, *J. Geophys. Res.*, 95, 2793-2809.