

Применение технологии ударной трубы для экспериментального изучения разрушения пористого газонасыщенного материала при вулканических взрывах
Панов В.К.

Application of shock tube technology to study the porous gas-saturated materials rupture during volcanic explosions

Panov V.K.

Камчатский государственный технический университет, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: vspanov@yandex.ru

При извержении типа направленный взрыв пористый газонасыщенный материал интрузии хрупко разрушается с образованием пироклаستي. Для моделирования такого процесса создана установка на основе теории и практики ударных труб, где моделируемый процесс происходит в камере высокого давления. Обсуждается методика эксперимента.

Введение

Основной движущей силой при эксплозивных извержениях является сила давления газов, растворенных в магме, выделяющихся из расплава при снижении давления в нем по мере подъема к поверхности. Магма превращается в пористую структуру, а дегазация способствует отвердеванию околопорового расплава. В результате давление газа в порах может значительно превышать литостатическое [1]. При быстром снижении внешнего давления такая пористая структура способна к хрупкому разрушению с высвобождением энергии сжатых газов и образованием большого объема пироклаستي.

Разрушение пористого газонасыщенного материала (в дальнейшем ПГМ) при быстром сбросе давления происходит в ряде техногенных и природных процессов. Основы теории процесса разрушения ПГМ волной дробления разработал С.А. Христианович [4] применительно к угольным пластам. Последующие исследования позволили разработать методы предотвращения аварий, связанных с этим явлением. Однако экспериментальные работы по детальному изучению механизма процесса собственно разрушения ПГМ крайне немногочисленны.

Новое направление исследования процесса разрушения ПГМ в 1990-е гг. связано с изучением эксплозивных извержений типа «направленный взрыв». Характерные черты этого явления выделены в результате детального полевого и камерального изучения извержения вулкана Сент-Хеленс в 1980 г. Благодаря обширному материалу этих исследований [6], сложились модельные представления о механизме фазы направленного взрыва извержения, которые сводятся к следующему. Внедрившееся в постройку вулкана магматическое тело объемом порядка 1 км³ имело пористую газонасыщенную структуру. Внедрение привело к обрушению части вулканической постройки и быстрому сбросу литостатического давления с интрузии. За этим последовал взрыв и направленный под углом выброс раздробленного материала интрузии. Изучение отложений взрыва показало, что разрушение магматического материала носило хрупкий характер.

Для моделирования такого процесса создана экспериментальная установка на основе теории и практики ударных труб (далее УТ), но в отличие от традиционного использования УТ, моделируемый процесс происходит в камере высокого давления.

Ударная труба: теория и методика эксперимента

Ударная труба, применяющаяся в качестве экспериментальной установки с 1940-х годов, представляет собой трубу круглого или прямоугольного сечения, состоящую из двух секций, разделенных диафрагмой (рис. 1). В секции большей длины (КНД) находится газ низкого давления, в короткой (КВД) — газ с многократно большим давлением. После разрушения диафрагмы в КНД движется ударная волна (УВ),

в КВД распространяется волна разрежения (ВР). Во фронте УВ в тонком слое происходит сильное сжатие газа и скачкообразное повышение давления и температуры. За фронтом УВ следует спутный поток (СП) сжатого газа КНД, который толкается, как поршнем, газом, расширяющимся из КВД. Газы разделяет контактная поверхность (КП). Скорость УВ всегда больше скорости звука, скорость СП может быть как дозвуковой, так и сверхзвуковой, ВР распространяется всегда со скоростью звука.

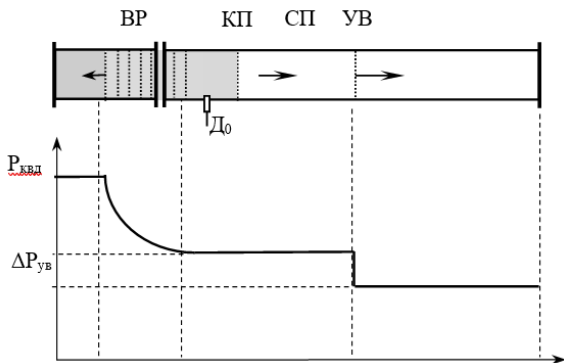


Рис. 1. Волновая картина и профиль давления в ударной трубе после разрыва диафрагмы.

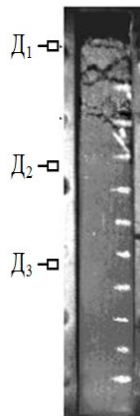


Рис. 2. Камера высокого давления, заполненная модельным материалом. Кадр из кинограммы разрушения образца. D₁-D₃ – датчики давления.

Решением уравнений газовой динамики применительно к процессу в УТ установлены зависимости между величинами, описывающими процесс.

Традиционно с помощью УТ изучались закономерности самой УВ и ее воздействия на преграду, аэродинамика сверхзвуковых потоков, быстропотекающие физико-химические высокотемпературные процессы. В нашей работе УТ используется иначе – для изучения поведения ПГМ, помещенного в КВД (рис. 2), при быстром снижении давления под действием ВР. При этом в материале возникают растягивающие напряжения из-за разгрузки твердого скелета ПГМ и из-за нестационарного фильтрационного потока порового газа. В качестве модельного ПГМ использовался малопрочный теплоизоляционный материал, перлитопластобетон (пластиприн), позволяющий проводить опыты при комнатной температуре и низких давлениях 1-10 бар. В КВД были устроены прозрачные окна для съемки процесса разрушения с помощью скоростной кинокамеры.

Отработка методики эксперимента включала ряд задач: амплитудно-временная тарировка пьезодатчиков давления для регистрации напряженного состояния образца; подбор геометрии установки для создания волновой картины «чистой декомпрессии» образца; достаточное импульсное освещение для скоростной кинорегистрации процесса разрушения; синхронизация всей регистрирующей аппаратуры.

1. Тарировка датчиков. Амплитудная тарировка пьезодатчиков для быстрых процессов, связанных с УВ, может проводиться на основе зависимости между ее скоростью, $V_{ув}$, и скачком давления в ней $\Delta p_{ув}$ [2]:

$$\Delta p_{ув} = \frac{2\rho_{кнд} V_{ув}^2}{1+k} \left(1 - \frac{c_{кнд}^2}{V_{ув}^2} \right), \quad (1)$$

где ρ – плотность газа, c – скорость звука в нем. Скорость УВ уверенно определяется по времени прохождения ею расстояния между датчиками давления.

Профиль давления в ВР весьма пологий, давление в КВД изменяется сравнительно медленно, и датчик на основе пьезокерамики ЦТС-19 может исказить сигнал из-за стекания заряда с него через входную цепь подключенного регистрира. Для выявления и учета этого эффекта проведена серия опытов при разном начальном $p_{квд}$ без образца в КВД. Профиль ВР, зарегистрированный датчиком, сравнивался с расчетным профилем, полученным при численном решении полной системы уравнений Эйлера для течения газа в условиях ударной трубы (рис. 3). Сравнение показывает, что

профили отличаются несущественно в течении первых ~ 2.5 мс. Это было бы вполне удовлетворительно, поскольку примерно за это время происходит разрушение образца длиной 365 мм (длина прозрачной КВД) первичными трещинами.

Однако, как показали дальнейшие эксперименты, по газу в пористой среде волна разрежения распространяется с меньшей скоростью, чем по воздуху, и в точке образца давление меняется заметно медленнее, чем в той же точке КВД без образца. Это потребовало корректировки сигнала датчика подбором постоянной времени схемы «датчик – входная RC-цепь» для наилучшего соответствия регистрируемого сигнала рассчитанному по уравнению нестационарной фильтрации при пористости и проницаемости модельного материала. Различие удалось снизить до менее 10 %.

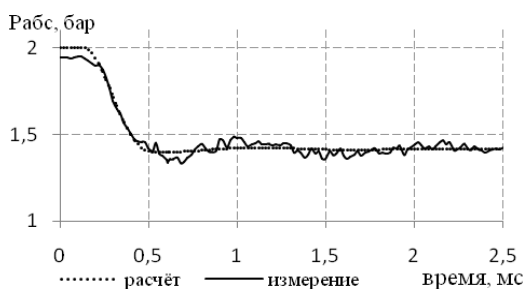


Рис. 3. Расчетный и измеренный сигналы

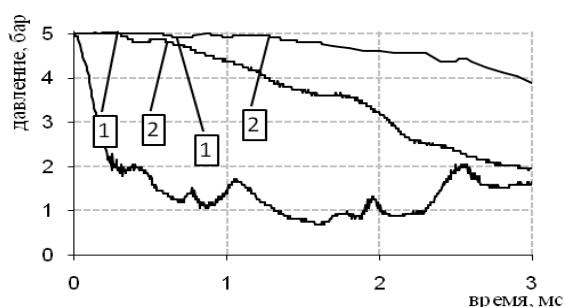


Рис. 4. Сигналы датчиков Д1-Д3: 1 – приход упругой волны; 2 – приход волны разрежения

2. Геометрия установки и волновая картина. В УТ традиционной компоновки (рис. 1) после разрыва диафрагмы, УВ, пройдя по КНД, отражается от ее торца и движется в обратном направлении с меньшей скоростью относительно трубы, но с удвоенной амплитудой. Через определенное время она достигнет КВД, проинтерферировав с хвостом ВР, дойдет до образца и изменит его напряженно-деформированное состояние, возможно даже с растяжения на сжатие.

С другой стороны (в прямом смысле, от разрушенной диафрагмы), ВР, дойдя до образца, и отразившись от его пористой поверхности, обеспечивает требуемую декомпрессию образца. С этого момента вглубь по твердой матрице пористой среды распространяется упругая волна разгрузки, а по газу в порах – волна разрежения. Волна разгрузки движется со скоростью звука в твердом «скелете» образца, а волна разрежения – со значительно меньшей скоростью. Это проявляется на датчике давления, установленном в КВД, который регистрирует сначала небольшой сброс давления, затем глубокое и продолжительное его снижение (рис. 4). Обе волны, дойдя до конца образца, последовательно отражаются от него и двигаются в обратном направлении, навстречу отраженной УВ, которая может успеть дойти до образца.

Таким образом, в образце из-за наложения волн будет возникать сложное напряженно-деформированное состояние. Этого хотелось избежать, чтобы выделить «в чистом виде» процесс, описываемый моделью волны дробления Христиановича для выявления ее применимости к моделируемому взрывному явлению.

Решением этой задачи в результате экспериментальных поисков стало использование КНД и КВД длиной более 1 м. При таких размерах и доступном диапазоне начальных давлений до 10 бар, отраженные волны встречаются в образце уже после его разрушения первичными трещинами в волне дробления.

3. Освещение и синхронизация. Для регистрации быстрого процесса разрушения образца использована барабанная скоростная кинокамера СК-2, способная вести съемку на фотопленку 35 мм с частотой кадров до 20 тыс. в секунду. В силу ограниченного фотографического разрешения, оптимальной оказалась частота ~ 15 тыс. к/с. При этом время экспозиции кадра составляет ~ 12 мкс. Для такой короткой экспозиции потребовалось создать источник питания трубчатой лампы-вспышки ИФП-

1200, который обеспечивал близкий к прямоугольному световой импульс продолжительностью ~2.5 мс с энергией до 800 Дж. Такого импульса было достаточно для съемки разрушения верхних 250 мм образца, видимых в прозрачной части КВД.

Для количественной обработки результатов особенно важна синхронизация всего оборудования. Камера СК-2 разгоняется до заданной частоты съемки около 40 с, после чего открывает затвор и выдает импульс готовности. Этот импульс использован для запуска схемы прожига диафрагмы. После ее разрушения формирующаяся УВ достигает ближайшего к диафрагме датчика D_0 , сигнал с которого запускал вспышку и развертки цифровых запоминающих осциллографов С9-8. Сигнал на вспышку подавался с задержкой начала свечения до момента прихода ВР к поверхности образца. Этот момент, как начало отсчета времени исследуемого процесса, контролировался по датчику D_1 , установленному у поверхности образца.

По сигналу фотодиода, фиксирующего свечение вспышки, осуществлялась временная привязка первого кадра. При частоте съемки ~15 тыс. к/с интервал между кадрами составляет ~70 мкс, длительность фронта вспышки ~80 мкс. Кадр становится виден на негативе примерно на середине фронта. Таким образом, при длительности съемки ~2.5 мс погрешность временной привязки 1-го кадра составляет ~1.5 %.

Используя описанную методику, при обработке кинограмм удалось увидеть детали процесса:

- разрушение ПГМ происходит путем последовательного образования трещин, преимущественно перпендикулярных длине образца (рис. 2);
- размер отрывающихся по трещинам кусков увеличивается вдоль образца;
- определена скорость распространения области разрушения;
- определены скорость и ускорение кусков.

По сигналам давления определены скорость упругой волны разгрузки и скорость ВР, распространяющейся по газу в порах [3].

Полученные данные использованы для дальнейшего теоретического описания процесса разрушения модельного ПГМ с последующим обобщением на условия для магматического материала при направленном взрыве.

Описанная методика впоследствии была использована для создания установки для работы с образцами подлинного извергнутого материала при высоких давлениях и температурах (~ 100 бар, 1000 °С) [5].

Список литературы

1. *Алидибиров М.А.* Физическая природа и механизм вулканических взрывов. Автореф. дис. на соиск. уч. ст. к.ф.-м.н. Москва, 1988. 16 с.
2. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1978. 840 с.
3. *Панов В.К.* Экспериментальное моделирование процессов при извержении типа «направленный взрыв» // Проблемы взрывного вулканизма. Материалы международного симпозиума Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2006. С. 49-57.
4. *Христианович С.А.* О волне дробления // Известия Академии наук СССР. Отделение технических наук. 1953. № 12. С. 1689-1699.
5. *Alidibirov M., Dingwell D.B.* An experimental facility for investigation of magma fragmentation by rapid decompression // Bulletin of volcanology. 1996. V. 58. P. 411-416.
6. *Lipman P.V., Mullinaux D.R. (eds.)* The 1980 eruptions of Mount St. Helens, Washington // US Geol. Surv. Prof. Pap. 1981. V. 1250. 844 p.