

Экспериментальное изучение фрагментации сильновязкой магмы при быстрой декомпрессии

Алидибиров М.А.

Experimental study of highly viscous magma fragmentation under rapid decompression **Alidibirov M.A.**

Самостоятельный исследователь, г. Москва;

e-mail: ma1828@mail.ru

Приводятся схемы установок для изучения фрагментации (дробления) сильновязкой магмы при быстрой декомпрессии до 200 бар и при температуре до 1000 °С. Для образцов дацита были получены значения перепада давления, необходимого для возникновения фрагментации, а также скорости фрагментации и зависимость размеров фрагментов от температуры.

Введение

Экспериментальное моделирование эксплозивных извержений активно развивается в последние десятилетия [4]. Направленные взрывы происходили на вулканах Безымянный в 1956 г., Шивелуч в 1964 г. и Сент-Хеленс в 1980 г. [2, 9]. Внедрение магмы в постройку вулкана Сент-Хеленс перед 18 мая 1980 г. привело к деформациям постройки и ее последующему обрушению, спровоцированному землетрясением магнитудой 5+. Возникший взрыв вызвал разрушения на площади 500 км² и сформировал отложения. Средняя пористость выброшенного материала интрузии (криптокупола) составляла 36 об. %. Магма криптокупола находилась перед взрывом в высоковязком, близком к солидусу, состоянии и имела объем около 0.1 км³. В работе [10] предполагалось, что перед взрывом газовые пузырьки, находившиеся в магме криптокупола, прекратили рост. Максимальная температура внутри криптокупола оценивается в 900 °С, а перепад давления, вызванный обрушением части вулканической постройки, оценивается величиной 200 бар. Инструментальные изучения извержений вулкана Карымский [3, 5] также позволили получить важную информацию о взрывах вулканского типа.

Механизм развития взрывов и механизм образования пирокластики в случае сильновязких ($\eta \geq 10^8$ Па·с) магм, содержащих пузырьки газа, оставался не ясным. Было высказано предположение, что сильновязкие магмы, содержащие пузырьки газа с избыточным давлением, могут вести себя при быстрой декомпрессии как твердые пористые тела и разрушаться путем хрупкого послойного дробления отрывом с выбросом продуктов дробления в атмосферу [1]. Однако эта модель требовала экспериментальной проверки.

Экспериментальные установки

Установка для изучения фрагментации модельных пористых материалов при декомпрессии до 10 бар и при температуре 20 °С [8]. Схема этой установки изображена на рисунке. Камера высокого давления (КВД) (рисунок) и камера низкого давления (КНД) разделялись диафрагмой. Стальная секция высокого давления имела длину 365 мм, внутреннее квадратное сечение 40×40 мм и стеклянные окна. Для съемки процесса дробления материала в КВД использовались скоростные кинокамеры со скоростью съемки до 15000 кадр/с. Датчик динамического давления был установлен в дне КВД. КНД имела такое же внутреннее сечение, как и КВД, длину 200 мм и открывалась в бак объемом 0.5 м³. Бак был снабжен окнами для наблюдения процесса выброса. Разрыв диафрагмы вызывал возникновения волны разрежения в объеме сжатого воздуха, прилегающего к диафрагме, и быструю декомпрессию пористого материала. В качестве образцов использовался пористый малопрочный материал пластиприн. Материал имел плотность 100 кг/м³ и в основном открытую пористость 90 %. Характерный размер пор составлял около 100 мкм при толщине перегородок порядка нескольких микрометров. Проведенные эксперименты позволили получить

важную информацию о динамике процесса дробления твердой пористой среды при быстрой декомпрессии [8].

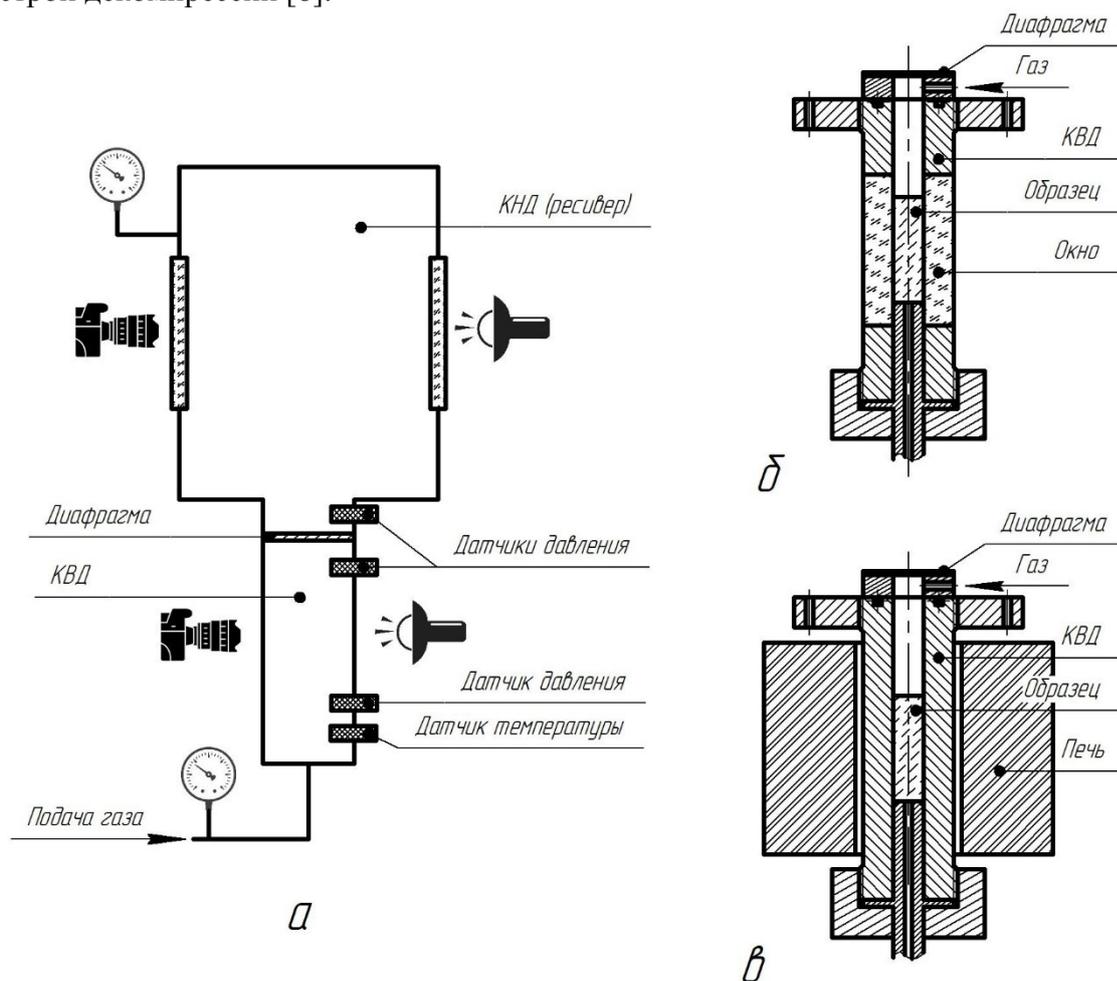


Рисунок. Схема экспериментальной установки (а); устройство камеры высокого давления установки для исследования фрагментации модельных пористых материалов (б); устройство камеры высокого давления установки для исследования образцов лавы (магмы) (в).

Установка для исследования фрагментации образцов магмы (лавы) при декомпрессии до 200 бар и при температуре до 1000 °С [6]. Схема этой установки изображена на рисунке. Установка состояла из высокотемпературной камеры высокого давления (КВД) (рисунок) и камеры низкого давления (КНД), которые были разделены диафрагмой, разрывающейся при определенном перепаде давления ΔP . КВД была рассчитана на работу при ΔP до 200 бар и температуре T до 1000 °С. КВД имела длину 450 мм, внешний диаметр 40 мм и внутренний диаметр 20 мм. Она была изготовлена из специального жаропрочного сплава Nimonic 105. Горячая зона располагалась в центре КВД, находящейся внутри электрической печи. Контроль температуры осуществлялся с помощью термопары. Аргон заполнял поры образца длиной 50 мм и диаметром 17 мм, закрепленного внутри никелевой гильзы. КНД изготавливалась из нержавеющей стали, имела длину 120 мм и внутренний диаметр 20 мм и соединялась с баком объемом 0.7 м³. Бак имел специальные окна для наблюдений. Разрыв диафрагмы вызывал резкую декомпрессию образцов.

Использовались образцы серого дацита вулкана Сент-Хеленс из криптокупола 1980 г. Физические свойства образцов были детально изучены [7]. Дацит содержал 30 об. % фенокристаллов со средним размером 210 мкм, которые состояли из плагиоклаза, гиперстена, роговой обманки и окислов Fe-Ti. Содержание SiO₂ составляло 63.3 вес. %, а содержание SiO₂ в стекле – 76.05 вес. %. Образцы дацита имели плотность 1590 кг/м³ и среднюю пористость 35.9 %. Примерно 80 % всех пор

были открытыми. Средний размер пузырьков составлял ~ 5 мкм при толщине перегородок 1-4 мкм. Температура стеклования $T_g = 810$ °С. Вязкость дацита была близкой к 10^{11} Па·с при температуре 850 °С.

Установка позволила впервые осуществить высокотемпературную фрагментацию (дробление) образцов реальных магм (лав) при быстрой декомпрессии [6].

Результаты экспериментов

1. Было осуществлено дробление (фрагментация) образцов пористого дацита при резкой декомпрессии при температурах до 900 °С. Пороговые значения ΔP_f , вызывающие фрагментацию, снижались с 90 бар до 30 бар при росте T от 15 °С до 900 °С. При ΔP , близких к порогу разрушения, наблюдалась задержка во времени начала разрушения и наблюдался многоактный характер дробления образца.

2. Скорость фрагментации пористого дацита N была в диапазоне 5-170 м/с. Она зависела от ΔP . Значения N , близкие к 5 м/с, были характерны для экспериментов, где дробление носило многоактный характер. При более высоких ΔP разрушение носило одноактный характер, а скорость N возрастала. Величина скорости N возрастала также при увеличении скорости декомпрессии.

3. Скоростная съемка процесса разрушения пористых образцов пемзы и пластирина показала, что процесс разрушения осуществляется путем последовательного отрыва слоев образца. При этом трещины были ориентированы параллельно поверхности образца. Длительность стадии фрагментации была в десятки раз меньше длительности стадии выброса. В процессе выброса наблюдалось дополнительное дробление материала. Процесс выброса фрагментов носил пульсирующий характер: порции смеси газа с фрагментами чередовались с преимущественно газовыми порциями.

4. Крупные фрагменты имели дискообразную и пластинчатую форму, в то время как мелкие фрагменты имели более изометрическую форму. Частицы размером ~ 1 мм состояли из кристаллов, окруженных пористой стеклянной матрицей, а частицы размером 0.1 мм и меньше представляли собой либо только фрагменты кристаллов, либо только фрагменты пористого стекла. Угловатая форма фрагментов, наблюдавшаяся для всего диапазона температур, включая $T = 900$ °С, превышающую температуру стеклования матрицы дацита $T_g = 810$ °С, указывала на хрупкий характер фрагментации. Процесс дробления при высокой $T = 900$ °С не сопровождался изменением характера пористости материала, и дополнительного вспенивания стекловатой матрицы дацита не наблюдалось.

5. Эксперименты, проведенные при $\Delta P = 120$ бар и температуре $T = 15-900$ °С, показали, что увеличение T вызывает ухудшение дробления (размеры фрагментов возрастают) и приводит к появлению бимодальных кривых распределения частиц по размерам. Эксперименты, проведенные при $T = 20$ °С и 900 °С и ΔP в диапазоне 10-185 бар, показали, что увеличение ΔP и скорости декомпрессии вызывает уменьшение характерного размера частиц.

6. Медианный и средний диаметр экспериментально полученных фрагментов оказались близки с аналогичными характеристиками продуктов дробления магмы криптокупола вулкана Сент-Хеленс. Коэффициент сортировки экспериментально полученных фрагментов имел меньшие значения (т.е. материал был лучше сортирован), чем у натуральных частиц [14].

Заключение

Были определены количественные параметры процесса фрагментации пористых образцов дацита криптокупола вулкана Сент-Хеленс при температуре до 1000 °С и декомпрессии до 200 бар. Экспериментальная установка также использовалась для определения параметров фрагментации образцов лав куполов вулканов Мерапи,

Унзена, Колимы и др. [15], а также для исследования процесса дегазации лав куполов при быстрой декомпрессии [12]. Полученные результаты широко используются в настоящее время для объяснения процессов при вулканических эксплозивных извержениях [9, 13, 16]. Они могут быть также использованы для постановки новых задач, связанных с будущими исследованиями фрагментации магм [11, 13].

Список литературы

1. *Алидибиоров М.А.* Модель высвобождения энергии при вулканических взрывах вулканского типа // *Вулканология и сейсмология*. 1987. № 4. С. 50-58.
2. *Богоявленская Г.Е., Брайцева О.А., Мелекесцев И.В. и др.* Катастрофические извержения типа направленных взрывов на вулканах Сент-Хеленс, Безымянный, Шивелуч // *Вулканология и сейсмология*. 1985. № 2. С. 3-26.
3. *Иванов В.В.* Вклад научной школы к.ф.-м.н. П.И. Токарева в развитие методов прогноза вулканических извержений и изучение их механизмов // *Материалы XXVII конференции, посвященной Дню вулканолога. 27-29 марта 2024 г.* Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2024. С. 71-74.
4. *Озеров А.Ю.* Ключевской вулкан: вещество, динамика, модель. Москва: ГЕОС, 2019. 306 с.
5. *Фирстов П.П., Токарев П.И., Лемзиков В.К.* Киносъемка выбросов и схема эксплозивного процесса вулкана Карымского // *Бюллетень вулканологических станций*. 1978. № 5. С. 151-157.
6. *Alidibirov M., Dingwell D.B.* Magma fragmentation by rapid decompression // *Nature*. 1996. V. 380. P. 146-149. <https://doi.org/10.1038/380146a0>
7. *Alidibirov M., Dingwell D.B., Stevenson R.J. et al.* Physical properties of the 1980 Mount St. Helens cryptodome magma // *Bulletin of Volcanology*. 1997. V. 59. P. 103-111. <https://doi.org/10.1007/s004450050178>
8. *Alidibirov M., Panov V.* Magma fragmentation dynamics: experiments with analogue porous low-strength material // *Bulletin of Volcanology*. 1998. V. 59. P. 481-489. <https://doi.org/10.1007/s004450050205>
9. *Belousov A., Voight B., Belousova M.* Directed blasts and blast-generated pyroclastic density currents: A comparison of the Bezymianny 1956, Mount St Helens 1980, and Soufrière Hills, Montserrat 1997 eruptions and deposits // *Bulletin of Volcanology*. 2007. V. 69. P. 701-740. <https://doi.org/10.1007/s00445-006-0109-y>
10. *Eichelberger J.C., Hayes D.B.* Magmatic model for the Mount St. Helens blast of May 18, 1980 // *Journal of Geophysical Research*. 1982. V. 87. P. 7727-7738.
11. *Jones T.J., Cashman K.V., Liu E.J. et al.* Magma fragmentation: a perspective on emerging topics and future directions // *Bulletin of Volcanology*. 2022. V. 84. P. 45. <https://doi.org/10.1007/s00445-022-01555-7>
12. *Mueller S., Melnik O., Spieler O. et al.* Permeability and degassing of dome lavas undergoing rapid decompression: An experimental determination // *Bulletin of Volcanology*. 2005. V. 67. P. 526-538. <https://doi.org/10.1007/s00445-004-0392-4>
13. *Scheu B., Dingwell D.B.* Magma fragmentation // *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*. 2022. V. 87. Is. 1. P. 767-800. <https://doi.org/10.2138/rmg.2021.87.16>
14. *Spieler O., Alidibirov M., Dingwell D.B.* Grain-size characteristics of experimental pyroclasts of 1980 Mount St. Helens cryptodome dacite: Effects of pressure drop and temperature // *Bulletin of Volcanology*. 2003. V. 65. P. 90-104. <https://doi.org/10.1007/s00445-002-0244-z>
15. *Spieler O., Dingwell D.B., Alidibirov M.* Magma fragmentation speed: an experimental determination // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2004. V. 129(1). P. 109-123. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(03\)00235-X](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(03)00235-X)
16. *Woods A.W., Sparks R.S.J., Ritchie L.J. et al.* The explosive decompression of a pressurized volcanic dome: the 26 December 1997 collapse and explosion of Soufriere Hills Volcano, Montserrat // *Geological Society London Memoirs*. 2002. V. 21(1). P. 457-465. <https://doi.org/10.1144/gsl.mem.2002.021.01.20>