

5. Кутателадзе С.С., Накоряков В.Е. Теплообмен 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.

УДК 532.685

ДИНАМИЧЕСКИЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА,
МОДЕЛИРУЮЩЕГО РАЗРУШЕНИЕ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ИЗВЕРЖЕНИИ
ТИПА «НАПРАВЛЕННЫЙ ВЗРЫВ»

В.К. Панов

Камчатский Государственный технический университет, Петропавловск-Камчатский, 683003, ул. Ключевская 35, e-mail: spanov@mail.kamchatka.ru

Введение

С помощью искусственного пористого материала на установке типа ударной трубы моделируется та часть процесса направленного взрыва, которая представляет собой разрушение материала интрузии и движение его фрагментов в пределах вулканической постройки. Направленное распространение в атмосфере и отложение пирокластики не рассматриваются.

Основные черты процесса, сохраненные при моделировании, таковы:

- а) материал интрузии высокопористый, содержит в порах газ высокого давления;
- б) интрузия находится под высоким литостатическим давлением, которое быстро снижается в результате обвала части постройки вулкана;

- c) разрушение и выброс материала происходят за короткое время, но не мгновенно;
- d) выброшенный материал в основном мелко раздроблен.

Экспериментальная установка и основные черты методики эксперимента описаны в [1, 2, 1]. Значительная часть пор в модельном материале (перлитопластобетон, ППБ) сообщаются, поэтому он проницаем для газа и насыщается в камере высокого давления сжатым воздухом без заметных деформаций. При быстром сбросе давления воздуха над поверхностью образца давление газа в самом материале и напряжения в твердых межпузырьковых перегородках убывают значительно медленнее. От поверхности вглубь распространяется область разгрузки, и это приводит к разрушению материала путем последовательного отрыва его фрагментов.

Скоростная киносъемка разрушения позволяет определить кинематические, динамические характеристики движения и совместно с записями сигналов давления в разных точках образца составить энергетический баланс процесса.

Эксперименты проводились при сбросе давления от начального избыточного $1 \div 8$ бар до атмосферного. Устойчивое разрушение с образованием одного-двух кусков имело место, начиная с перепада в 1 бар. При большем начальном давлении происходит разрушение образца на большее число обломков [1].

Результаты экспериментов

1. *Кинематические характеристики процесса.* За движением материала удобно следить по меткам, предварительно нанесенным на образец (рис. 1). Координаты меток, изме-

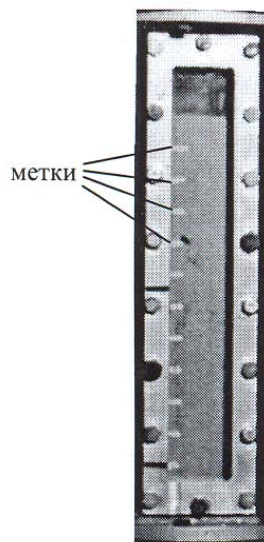


Рис. 1. $x-t$ диаграмма движения меток в опыте с $p = 8$ бар (результаты этого же опыта отражены на рис. 3, 4). Координаты меток отсчитаны от поверхности вглубь образца, время — от начала спада давления у поверхности. Ромбами обозначено появление трещин, пунктиром — распространение волны разрежения.

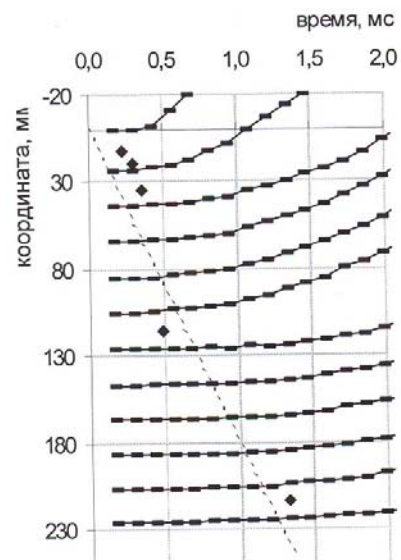
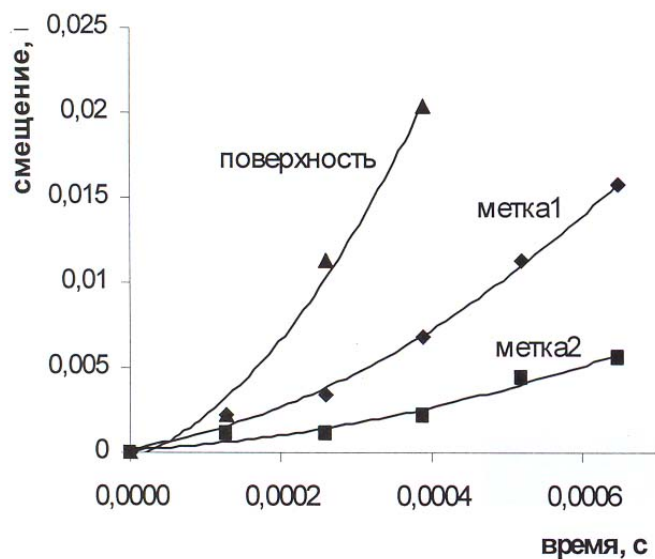


Рис. 2. Смещение меток от начального положения. Приведены уравнения линий и критерий достоверности аппроксимации.



поверхность:

$$x = 100296 t^2 + 14,777 t - 0,0003; R^2 = 0,9911$$

метка 1:

$$x = 26268 t^2 + 7,0159 t + 0,0002; R^2 = 0,9953$$

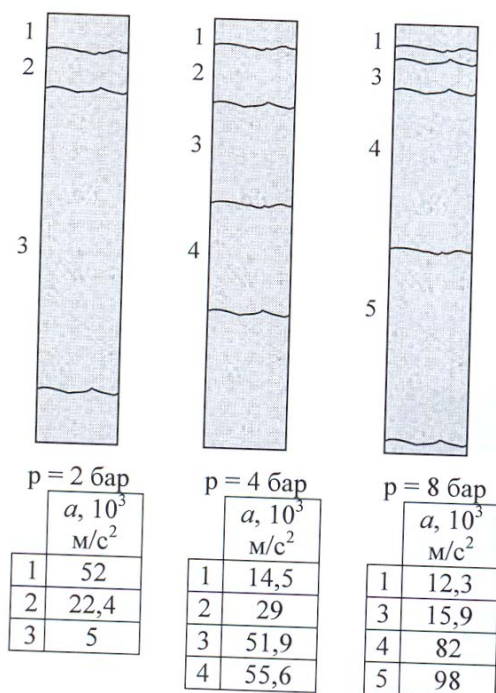
метка 2:

$$x = 9552 t^2 + 2,4835 t + 0,0002; R^2 = 0,9697$$

Рис. 3. Смещение меток от начального положения. Приведены уравнения линий и критерий достоверности аппроксимации.

ренные на последовательных кадрах, образуют первичную $x-t$ диаграмму движения (рис. 2). Смещение меток от начального положения за межкадровые промежутки времени (рис. 3) отражает характер движения материала до его разрушения и отдельных обломков после их образования. Аппроксимация точек по методу наименьших квадратов дает для всех обломков квадратичный закон движения (в пределах располагаемой точности измерений). Это означает, что движение фрагментов на протяжении съемки равноускоренное, на них действует постоянная по величине равнодействующая сила.

Дифференцирование закона движения метки дает значения скорости и ускорения фрагмента, на который метка нанесена. Рис. 4 представлены результаты трех опытов при



начальном давлении 2, 4, 8 бар: исходный образец и местоположение трещин, впоследствии разделивших его на части. Рядом размеры и ускорения обломков, определенные описанным способом. С наибольшим ускорением движется первый обломок, для каждого следующего оно меньше. С увеличением начального давления газа в образце ускорения растут.

2. Силы. В соответствии со вторым законом Ньютона определяется равнодействующая сил, приложенных к телу, $F = ma$. По размерам обломков и отдельно определенной плотности материала, ускорению, вычислены значения этих сил для каждого обломка (табл. 1).

Рис. 4. Положение трещин, размер и ускорение кусков.

Таблица 1. Силы, действующие на обломки образца при их образовании.

$p_{нач} = 2 \text{ бар}$					$p_{нач} = 4 \text{ бар}$					$p_{нач} = 8 \text{ бар}$				
раз-мер куска, мм	m , Н	$F_{давл}$, Н	$F_{уск}$, Н	$F_{тр}$, Н	раз-мер куска, мм	m , Н	$F_{давл}$, Н	$F_{уск}$, Н	$F_{тр}$, Н	раз-мер куска, мм	m , Н	$F_{давл}$, Н	$F_{уск}$, Н	$F_{тр}$, Н
19	140	88	193	53	14,5	248	126	231	-17	12,3	234	138	243	9
20	64	65	170	106	29	242	160	265	23	15,9	119	136	241	122
154	110	237	342	132	51,9	323	257	362	39	82	223	656	761	538
					55,6	233	288	393	160	98	243-300	610	715	472

Сигналы пьезодатчиков позволяют определять изменение со временем давления газа в материале и силу давления, приложенную к обломкам. Один датчик установлен у поверхности образца, два других на расстоянии 110 и 220 мм от поверхности вглубь (рис.5, а).

По разности моментов начала спада давления на двух соседних датчиках определяется скорость волны разрежения, распространяющейся по газу в поровых каналах [1]. Ее величина — от 150-170 м/с при $p_{нач} = 2 \text{ бар}$ до 220-280 м/с при $p_{нач} = 8 \text{ бар}$. Считая скорость волны постоянной на отрезках между датчиками, определяем местоположение границы, отделяющей область уменьшающегося давления от невозмущенной области с начальным давлением, в момент образования трещины (рис. 5, б).

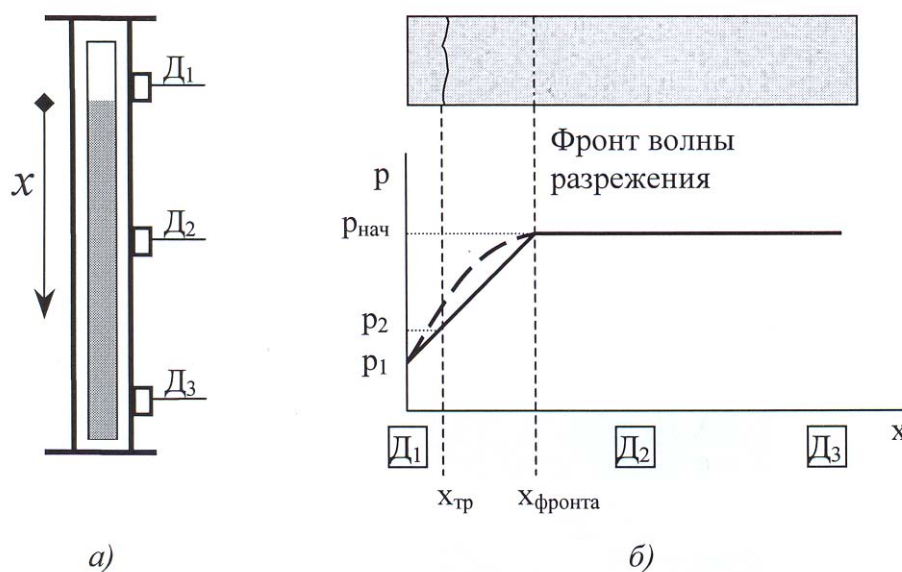


Рис. 5. Измерение давления в образце: а) расположение датчиков; б) распределение давления в материале.

Полагая в первом приближении изменение давления во фронте волны линейным, по сигналам пьезодатчиков можно определить разность давлений на поверхностях фрагмента в момент его отделения. Умножая эту величину на площадь поперечного сечения, получаем силу давления $F_{давл}$, приложенную к обломку в направлении движения и ускоряющую его (табл.1). Допущение о линейности распределения давления несколько занижает величину силы.

3. Расход газа. Давление газа в порах уменьшается со временем, потому что газ вытекает по каналам, соединяющим поры. Можно оценить массовый расход газа в этом потоке на момент образования первой трещины, т. е. отделения первого обломка.

Количество вытекшего газа равно разности между начальной и оставшейся массами газа в области, охваченной течением к выбранному моменту. Это область от переднего края волны разрежения до свободной поверхности образца (рис. 5, б). Начальная масса вычисляется по уравнению состояния газа:

$$m_0 = \frac{p_{\text{нач}} V_{\text{пор}} \mu}{R_0 T}. \quad (1)$$

Здесь $p_{\text{нач}}$ – начальное абсолютное давление газа, $V_{\text{пор}}$ – объем пор в рассматриваемой части образца, μ – молярная масса газа, $R_0 = 8.31$ кДж/(кмоль·К) – универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура газа. Оставшееся количество можно вычислить по этому же уравнению при среднем в рассматриваемой области давлении. Для линейного профиля волны (рис. 5, б) среднее давление равно полусумме начального и давления, измеренного датчиком у поверхности при образовании первой трещины. Разделив разность масс на промежуток времени, за который она образовалась, получим средний массовый расход газа. В диапазоне начальных избыточных давлений 2÷8 бар определенный таким образом расход газа составляет $M = 0.33 \div 1.33$ кг/с.

Вытекание газа из образца аналогично истечению из сосуда через канал в среде с меньшим давлением. В таком процессе, как известно, скорость истечения определяется отношением давлений в сосуде и внешней среде [4]. На выходе из канала она достигает скорости звука (в условиях экспериментов ≈ 340 м/с) при внешнем давлении равном примерно половине внутреннего. В наших опытах такое соотношение достигается значительно раньше появления первой трещины. Используем выражение для максимального расхода [4] и приведенные выше его значения для определения площади проходного сечения для потока воздуха на выходе из образца:

$$S_{\text{сеч}} = M / \sqrt{k \frac{p_0}{v_0} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}. \quad (2)$$

Здесь p_0, v_0 — параметры начального состояния, $k = 1,4$ — показатель адиабаты для воздуха. Для представленных на рис. 4 опытов $S_{\text{сеч}} = 4.73$ см² ($p_{\text{нач}} = 2$ бар), 4.64 см² ($p_{\text{нач}} = 4$ бар), 6,23 см² ($p_{\text{нач}} = 8$ бар). Иными словами, суммарное выходное сечение поровых каналов составляет 30÷40 % от полной площади сечения образца. В отдельных экспериментах по определению проницаемости материала при малых перепадах давления ($\leq 0,1$ бар), малых скоростях фильтрационного потока площадь проходного сечения для потока газа составила

$1.2 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$. Столь сильное различие, по-видимому, свидетельствует о разрушении межпузырьковых перегородок потоком газа, ускоряющимся во фронте волны разрежения.

4. Энергетические характеристики процесса. В начальном состоянии пористая среда обладает запасом энергии, в который входит упругая энергия всесторонне сжатой твердой матрицы и энергия сжатого газа. Упругая энергия, оцененная в [1], не превышает 0.01 % энергии сжатого газа и может не учитываться. При снятии внешней нагрузки расширяющийся газ совершает работу, которая расходуется на: ускорение газа, растяжение твердого вещества и образование трещин, ускорение обломков, работу против силы трения образца о стенки канала и против вязкого сопротивления потоку газа.

Составим энергетический баланс для области, охваченной движением газа к моменту образования первой трещины, на примере тех же трех опытов, для которых сделаны оценки действующих сил.

Считая расширение адиабатным в силу его быстроты, работу газа определим по формуле [5]:

$$L_{\text{газа}} = \frac{mR_0T}{\mu(\kappa-1)} \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right). \quad (3)$$

Здесь m — масса вытекшего газа, p_1 — начальное давление в образце, p_2 — среднее в области течения.

Работа, потраченная на ускорение вытекшего газа, равна изменению его кинетической энергии. Начальная скорость газа равна нулю, во фронте волны разрежения она увеличивается. Полагая возможным истечение газа со звуковой скоростью (≈ 340 м/с в условиях экспериментов) на выходе из образца, для оценок возьмем скорость равной средней в интервале $0 \div 340$ м/с. Тогда

$$L_{\text{ускор. газа}} = E_{\text{кин.газа}} = mw_{\text{ср}}^2/2. \quad (4)$$

Работа образования одной поперечной трещины в образце сечением 4×4 см (таким же, как и в описываемых опытах), определенная отдельно при квазистатических испытаниях на разрывной машине, составляет $L_{\text{трещ}} \approx 0,2$ Дж.

Результаты расчетов по (3), (4) сведены в таблице 2. Здесь же приведена суммарная работа сил вязкого трения в потоке газа и трения образца о стенки канала, определенная как разность работы расширения газа и остальных затрат:

$$L_{\text{тр}} = L_{\text{газа}} - (E_{\text{кин.газа}} + L_{\text{трещ}}). \quad (5)$$

Обсуждение и выводы

Данные, представленные в табл. 1, показывают следующее.

1. Величина силы давления, приложенной к первому обломку, во всех случаях меньше равнодействующей. Одна эта сила не может обеспечить полученное ускорение, должны быть еще и другие.

При декомпрессии упругие напряжения сжатия в твердом скелете пористого материала уменьшаются до нуля, сменяясь затем растягивающими напряжениями. В момент отрыва фрагмента по вновь образовавшейся поверхности приложена в направлении движения упругая сила. Ее величина определяется пределом прочности материала на разрыв. Она, как и перепад давления, способствует ускорению обломка до тех пор, пока уменьшаются деформации растяжения. Разрывное усилие, определенное на разрывной машине, для образца ППБ сечением 4x4 см составляет $F_{\text{разр}} = 80 \div 130$ Н (разброс вызван заметной неоднородностью материала; среднее значение 105 Н). Сумма этой силы и силы давления, представленная в табл. 1 как $F_{\text{уск}} = F_{\text{давл}} + F_{\text{разр}}$, примерно равна или несколько превышает равнодействующую.

Кроме упругой силы, способствующей ускорению обломка, в направлении движения со стороны потока газа к стенкам поровых каналов приложена сила вязкого трения. Она тоже ускоряет оторвавшийся обломок. Ее величину можно оценить.

На электронной фотографии ППБ, приведенной в [1, 2], размер отверстий, соединяющих поры, меньше 0.1 мм, размер пор ~ 0.3 мм. Вместе с тем невооруженным глазом в материале видно некоторое количество пор и отверстий ~ 1 мм и более. К тому же, приведенные выше расчеты проходного сечения для потока газа могут говорить о значительном изменении поровых каналов из-за разрушения стенок пор. Поэтому для оценок будем считать поровый канал прямой цилиндрической трубкой диаметром 0.2 мм длиной, равной длине обломка. Тогда для обеспечения сечения 4.73 см^2 (опыт при $p = 2$ бар) потребуется примерно 15 тыс. таких каналов. Их суммарная цилиндрическая поверхность составит $\approx 0.18 \text{ м}^2$. Касательные напряжения на стенках каналов

$$\tau = \mu dw/dy, \quad (6)$$

где y – поперечная координата в канале. При скорости $w = 300$ м/с напряжения составят 54 Па, а сила вязкого трения 9,7 Н. Эта величина на порядок меньше сил давления и упругости, но все же заметна. Реальная геометрия поровых каналов очень сложна, и течение в них будет отличаться сильной завихренностью, а это существенно увеличивает взаимное действие потока и канала. Кроме этого наличие обломков поровых перегородок делает поток двухкомпонентным, газозвесью, и из-за этого его воздействие на канал тоже увеличивается.

2. Сила давления, действующая на первый фрагмент, практически такой же величины, как и разрывное усилие. Это говорит о том, что в макроскопическом разрушении материала основную роль играет именно перепад давления в газе. Оцененное выше воздействие на по-

ристую среду со стороны фильтрационного потока играет значительно меньшую, дополнительную роль.

Из табл. 1 далее видно, что сила давления, приложенная к последующим фрагментам по мере их образования, увеличивается. Причины этому видятся такие.

В распространяющейся волне разрежения градиент давления уменьшается. Перепад давления, необходимый для отрыва куска материала, образуется на большем расстоянии. Пропорционально этому расстоянию (при прочих равных условиях) растет боковая поверхность, по которой происходит трение о стенки канала, и сила трения. В табл. 1 приведены значения силы трения, определенные как разность между равнодействующей и остальными силами: $F_{тр} = ma - F_{уск}$. Видно, что с увеличением размера куска она в целом растет, хотя прямой пропорциональности нет. Видимо это связано с неодинаковыми условиями контакта образца с каналом.

3. Расширение газа в обсуждаемых экспериментах, конечно, весьма быстрое. Первый фрагмент образуется через 0.2-0.4 мс после начала спада давления у поверхности материала, весь процесс занимает несколько миллисекунд. Это приближает расширение к адиабатному, сопровождающемуся понижением температуры. При $p_{нач} = 2$ бар (избыточное) конечная температура составит -61 °С, при $p_{нач} = 8$ бар — -118 °С.

Вместе с тем, течение газа сквозь пористую среду и истечение из нее — некоторый аналог процесса дросселирования, впервые исследованного Джоулем и Томсоном [5]. Дросселирование воздуха в условиях наших экспериментов, если обратиться к T - s диаграмме или термодинамическим справочникам [3], должно протекать практически изотермически. Правда, это относится к стационарному и довольно медленному процессу, в котором не только изменением, но и самой кинетической энергией потока пренебрегают в сравнении с энтальпией. В нашем случае процесс сугубо нестационарный и большая часть работы расширения (50-80 %, см. табл. 2) расходуется именно на увеличение кинетической энергии газа.

Таблица 2. Составляющие энергетического баланса в момент образования первой трещины.

	$p_{нач} = 2$ бар	$p_{нач} = 4$ бар	$p_{нач} = 8$ бар
размер куска, мм	19	14.5	12.3
$m_{куска}$, Г	2.7	2.1	1.16
$m_{газа}$, Г	0.153	0.165	0.31
$L_{газа}$, Дж	4.43	3.6	5.64
$E_{кин.газа}$, Дж, (%)	2.21 (49)	2.38 (66)	4.48 (79)
$L_{трещ}$, Дж	0.2	0.2	0.2
$L_{тр}$, Дж	1.74	0.82	0.84

Реальный процесс не будет адиабатным, поскольку заметный вклад в силовой и энергетический баланс делает сила вязкого трения и связанное с ней тепловыделение. Изотермиче-

ским дросселированием при таких скоростях и ускорениях процесс тоже не будет. Для определения его типа и соответствующего уточнения баланса не хватает еще одного параметра. Нужно измерить либо действительную скорость истечения газа, либо его температуру.

4. Подводя итог оценкам, можно сделать некоторые выводы.

Макроскопическое разрушение исследованного пористого материала при быстрой декомпрессии осуществляется силами, связанными с градиентом давления газа в волне разрежения, распространяющейся по газу в порах. Однако, из-за значительной доли связанных пор, бóльшая часть энергии сжатого газа тратится не на разрушение, а на ускорение газа, вытекающего по поровым каналам. При отсутствии связанной пористости, фильтрации до разрушения не будет, а следовательно не будет и расходования на нее энергии сжатого газа. Это обстоятельство должно способствовать более мелкому дроблению материала.

Важную роль в процессе разрушения играет характер взаимодействия материала со стенками канала, сила трения. Если проскальзывание вовсе отсутствует, или на стенке канала материал почти неподвижен из-за большого трения, могут возникнуть значительные поперечные градиенты давления и скорости. Это повлечет за собой появление сдвиговых деформаций дополнительно к деформациям растяжения, что, как и отсутствие фильтрации, должно способствовать дроблению материала на более мелкие фрагменты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панов В.К. Экспериментальное моделирование процессов при извержении типа «направленный взрыв» // Проблемы эксплозивного вулканизма. Материалы международного симпозиума. 25-30 марта 2006 г. Отв. ред. чл.-корр. РАН Е.И. Гордеев. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2006. С. 49-57.
2. Панов В.К., Пашкевич Р.И. Экспериментальное исследование мгновенной декомпрессии неподвижной газонасыщенной пористой среды. //Тепломассообмен гетерогенных сред. Труды ПКВМУ, Петропавловск-Камчатский, 1996. С. 81-89.
3. Alidibirov M., Panov V. Magma fragmentation dynamics: experiments with analog porous low-strength material. // Bull.volcanol. (1998), 59, p.481-489.
4. Ривкин С.Л. Термодинамические свойства газов. М.: Энергия, 1964. 80 с.
5. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1973. 848 с.
6. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. М.: Наука, 1979. 512 с.