С.Д.ВИКТОРОВ, Н.Г.ДЕМЧЕНКО, А.П.КУЗНЕЦОВ
Институт проблем комплексного освоения недр, Москва, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОНИКНОВЕНИЯ ХИМИЧЕСКИ АКТИВНОЙ СТРУИ В РАЗРУШАЕМЫЙ МАТЕРИАЛ

На предыдущей конференции авторы сделали сообщение* о весьма эффективном способе разрушения материалов (в том числе и горных пород) с помощью воздействия на них низконапорной химически активной струи (ХАС). Дальнейшее исследование феномена привело к постановке математической задачи о проникновении ХАС в разрушаемый материал**. Постановка этой задачи сопровождалась рассмотрением сферически-симметричного уравнения теп-

---

* *Викторов С.Д.* Разрушение материалов с помощью химически активных струй / С.Д.Викторов, Н.Г.Демченко, А.П.Кузнецов // Физические проблемы взрывного разрушения массивов горных пород: Сб. трудов международной научной конференции. Москва, 7 – 11 сентября 1998 / ИПКОН РАН. М., 1999.

** *Викторов С.Д.* Имитация проникновения химически активных струй в разрушаемый материал / С.Д.Викторов, Н.Г.Демченко, А.П.Кузнецов // ФТПРПИ, 2000. № 1.

лопроводности с граничным условием первого рода и с пороговым критерием терморазрушения. Полученное решение выглядит следующим образом:

$$LR_* = 1 - \mathrm{erf}\left[\frac{r_0(R_* - 1)}{\sqrt{4at_*}}\right], \qquad (1)$$

где L – обобщенный параметр термонагружения, $L = (m-1)/(n-1)$; $m = T_*/T_0$; $n = T_b/T_0$; T_* – порог терморазрушения; T_0 – начальная температура разрушаемого материала; T_b – граничное условие – температура при $r = r_0$; r_0 – радиус струи; r – радиальная координата; $R_* = r_*/r_0$ – приведенная координата границы зоны разрушения (при $r < r_*$ $T > T_*$); a – коэффициент температуропроводности разрушаемого материала; t_* – время прогрева разрушаемого материала на глубину $r = r_*$.

Сам процесс проникновения ХАС в разрушаемый материал представлялся последовательностью «шагов», состоящих из двух стадий: на первой стадии осуществляется прогрев разрушаемого материала, на второй – массоперенос в зоне взаимодействия ХАС с разрушаемым материалом (будем называть эту зону активной). Ясно, что вопрос о величине t_* может быть решен только после детального рассмотрения второй стадии «шага» проникновения ХАС в разрушаемый материал. Какие же явления образуют эту вторую стадию? Вполне вероятно, что в набор этих явлений входят:

– фильтрация ХАС в разрушаемый материал;

– фрагментация разрушаемого материала в активной зоне;

– удаление фрагментов и продуктов реакции ХАС с разрушаемым материалом из активной зоны;

– кинетические процессы химической реакции в активной зоне.

Пока остается не ясным, какое (какие) из перечисленных выше явлений являются определяющими на второй стадии, и дальнейшее развитие математической модели требует уточнения величины t_* с привлечением экспериментальных данных.

Заметим, что в предыдущем эксперименте величины r_* и t_* не могли быть зафиксированы, поскольку определялась средняя скорость проникновения ХАС в разрушаемый материал V. Введенное при постановке задачи понятие «шага» позволяет написать:

$$V = (r_* - r_0)/t_* = r_0(R_* - 1)/t_* . \qquad (2)$$

Оценка t_* производилась следующим образом: уравнение (1) решалось для набора величин t_*, для каждой из которых по формуле (2) вычислялось значение скорости V, которое и сравнивалось с экспериментальным значением. Близость вычисленного и экспериментального значений скорости V позволяет говорить об определении величины t_*. Таким образом, можно получать информацию об одном из важных параметров второй стадии единичного «шага» проникновения ХАС в разрушаемый материал и тем самым сделать выбор в пользу существенности того или иного явления, определяющего эту стадию. При этом, конечно, предполагается, что существуют возможности оценить величину t_* независимым образом для каждого из рассматриваемых явлений, определяющих вторую стадию «шага».

Результаты предыдущей работы позволили также сделать предположение о том, что в первом приближении зависимость скорости проникновения V от давления торможения струи P линейна: $V = kP$($k \approx 2 \cdot 10^{-8}$ м^2·с/кг). Явная недостаточность экспериментального материала, с одной стороны, и материально-технические затруднения проведения опытов с реальными ХАС, с другой, поставили вопрос о физическом моделировании исследуемого явления. Имея в виду (1), такое моделирование вполне возможно. Действительно, термонагружение, характеризуемое величиной L, достаточно просто реализовать и без привлечения реальных ХАС. Было решено заменить ХАС струей воды, нагретой до определенной температуры. В качестве разрушаемого материала использовались: а) замороженный с водой песок; б) замороженный с водой порошок алюминия; в) чистый лед. В этой методике сразу определились достаточно точно величины, задающие характер термонагружения: T_b, заданная температурой струи воды, $T_* = 273$ К и T_0, заданная

температурой холодильника, в котором замораживались образцы разрушаемого материала. Таким образом, коэффициент в правой части (2) был достаточно точно определен. Методика открывала возможности исследовать еще один важный подход к проблеме: моделирование проникновения газовых ХАС в разрушаемый материал. И такие эксперименты также были проведены.

Условия эксперимента можно описать следующими данными:

– давление торможения струи P изменялось от 10^5 до 10^6 Па;

– значение параметра термонагружения изменялось от 0,37 до 0,47;

– значение коэффициента температуропроводности разрушаемого материала a изменялось от $7\cdot10^{-5}$ м^2/с (замороженный в воде порошок алюминия) до $8\cdot10^{-7}$ м^2/с (водонасыщенный гипс);

– время воздействия струи составляло несколько секунд для жидких струй и несколько десятков секунд для газовых.

После обработки опытные данные удобно представить в виде таблицы.

Результаты экспериментов

Система: разрушаемый материал – вещество струи, коэффициент температуропроводности, м^2/с	Зависимость скорости V проникновения струи от давления P, м/с	Оценка t_* для давления $P = 5\cdot10^5$Па, с
Водонасыщенный гипс – жидкий Na, $a = 8\cdot10^{-7}$	$V = 2\cdot10^{-8}P$	$6\cdot10^{-3}$
Замороженный с водой песок – вода, $a = 3\cdot10^{-6}$	$V = 10^{-7}P$	10^{-3}
Замороженный с водой порошок Al – вода, $a = 7\cdot10^{-5}$	$V = 3\cdot10^{-8}P$	$5\cdot10^{-2}$
Лед – вода, $a = 1{,}3\cdot10^{-6}$	$V = 2\cdot10^{-8}P$	$9\cdot10^{-3}$
Лед – воздух	Проникновение струи не имело места	–
Замороженный с водой песок – воздух	$V = 9\cdot10^{-10}P$	$6\cdot10^{-1}$
Замороженный с водой порошок Al – воздух	$V = 9\cdot10^{-10}P$	$9\cdot10^{-1}$

Полученные оценки t_* однозначно отметают предположение о том, что на второй стадии «шага» внедрения ХАС в разрушаемый материал процесс удаления фрагментов из активной зоны имеет какое-либо значение. Вычисленная для него оценка t_* на несколько порядков меньше меньшего из приведенных в таблице значения t_*. Относительно других значений t_*, приведенных в таблице, заметим следующее. Их можно объединить в группы. В первую группу войдут значения t_*, близкие к 10^{-3} и характерные для систем водонасыщенный гипс – жидкий натрий и замороженный с водой песок – вода. Во вторую группу отнесем t_*, полученные в системах, моделирующих газовые ХАС. Значения t_* для экспериментов в этой группе приближаются к 1 с. Различие в этих группах около двух порядков. Учитывая одинаковые условия экспериментов, отличающихся только фазовым состоянием струи, разумно предположить, что, скорее всего, фильтрация определяет характерное время второй стадии «шага» проникновения ХАС в разрушаемый материал. Дело в том, что попадаемая в разрушаемый материал газовая струя не просто фильтруется, она вытесняет среду, заполняющую поры разрушаемого материала. Естественно, что при разнице плотностей вещества струи и среды, заполняющей поры, на три порядка в пользу последней проникновение струи сильно затрудняется.

Если обратиться к опытам с системой замороженный с водой порошок Al – вода, то существенное превышение $t_* = 2{,}5\cdot10^{-2}$с значений t_*, характерных для первой группы, можно объяснить высокой температуропроводностью разрушаемого материала системы. Действительно, высокая температуропроводность существенно продвигает внутрь разрушаемого материала границу разрушения r_*, и время второй стадии, определяемое процесом фильтрации, возрастает

в еще большей степени вследствие нелинейной зависимости времени фильтрации от глубины проникновения из-за трехмерности явления. В этом случае также можно отметить, что и в опытах с газовой струей величина t_* превышает значение t_*, полученное в опытах с водяной струей, хотя и не так значительно, как это имело место в экспериментах с замороженным с водой песком.

Особняком стоят опыты с системой лед – вода и лед – воздух. Полученные результаты, по крайней мере в системе лед – вода, можно объяснить,привлекая, как и ранее, фильтрацию и повышенный коэффициент температуропроводности льда. Однако отсутствие эффекта проникновения воздушной струи в лед (в течение 1 мин) остается пока не объясненным. Вполне возможно, что фильтрация для материалов такой, как лед, структуры может оказаться не существенным явлением при анализе проникновения струи.

Если обратиться ко второму главному результату проведенных экспериментов, то можно сказать, что полученные оценочные формулы для зависимости скорости проникновения ХАС в разрушаемый материал от давления (при $L \approx 0{,}4$) дают возможность представить энергетические возможности рассмотренного способа разрушения материала. Видно, что повышение давления торможения струи в 10 раз (до 50 атм) доведет скорость проникновения жидких ХАС до 0,1 м/с, а скорость проникновения газовых ХАС составит 5 мм/с. Заметим, что традиционные гидроструи при таких давлениях не оказывают разрушающего воздействия ни на какие представляющие интерес материалы.

Переходя к выводам из проделанной работы, можно сказать, что полученные экспериментальные результаты (как при натурных, так и при моделирующих опытах) позволяют:

– выдвинуть в качестве рабочей гипотезы для создания математической модели исследуемого явления важность процессов фильтрации вещества ХАС в разрушаемый материал;

– оценить масштабы скоростей проникновения ХАС в разрушаемый материал при сравнительно малых скоростях истечения ХАС.

Работа выполнена в рамках проекта «Экспериментальное и теоретическое исследование процесса разрушения горной породы с помощью химически активных струй», финансируемого Российским фондом фундаментальных исследований по гранту № 98-05-64082.