

**ОСОБЕННОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ СРЕД
ПРИ СЛАБЫХ ВЗРЫВАХ***Ю. И. Войтенко**Институт геофизики НАН Украины,
252054 Киев*

Обобщены результаты экспериментальных исследований разрушения горных пород и модельных материалов при горении порохов, горении и детонации газовых смесей, а также при взрыве зарядов конденсированных ВВ в инертных оболочках. Определены механизмы зарождения и условия старта трещин, причины роста количества трещин с повышением скорости нагружения стенок полости. Отмечено влияние на картину разрушения вида начальных трещин и высоты зоны нагружения цилиндрической полости. Оценена кинетика трещин при камуфлетном газовом взрыве. Обращено внимание на возможность периферийного разрушения берегов трещины при внутритрещинной детонации газа. Получены критические поверхности разрушения для радиальной и дискообразной трещин при квазистатических и динамических нагружениях полиметилметакрилата (ПММА).

Исследованию разрушения твердых сред взрывами ядерных зарядов и зарядов химических бризантных взрывчатых веществ (ВВ) посвящены многочисленные статьи и монографии. В то же время изучению разрушения твердых сред при горении пороховых зарядов, при взрыве ВВ с низкой скоростью детонации зарядов в инертных оболочках, а также при детонации газовых смесей уделялось значительно меньшее внимание.

В теоретических работах рассмотрены в основном задачи о развитии магистральных трещин под действием давления, возникающего в шпурах или скважинах при взрыве [1, 2], или под действием движущегося в трещине газа [3]. Результаты экспериментального моделирования процесса разрушения твердой среды при горении порохового заряда в скважине показали, что кроме особенностей кинетики отдельной трещины разрыва существует зависимость количества трещин и их геометрии от скорости нагружения стенок скважины, конфигурации начальных трещин или надразов и размера зоны приложения нагрузки вдоль образующей скважины. Не совсем ясен механизм возникновения нескольких трещин при относительно небольших (10^{10} – 10^{11} Па/с) скоростях нагружения стенок скважины [4, 5]. Несмотря на прикладной характер исследований, в процессе их проведения преследовалась цель получить общие закономерности разрушения твердой среды при горении порохового заряда в скважине, при горении и детонации газовой смеси в камуфлетной полости, сравнить механическое действие порохового заряда, камуфлетного газового взрыва и взрыва заряда конденсированного ВВ в инертной оболочке, а также механизмы трещинообразования при разрушении твердой среды действием перечисленных зарядов.

Разрушение горных пород пороховыми зарядами

Опыты по разрушению плотных однородных глин проводились в вертикальных скважинах диаметром 0,093 м, глубиной 1,5–3,5 м зарядами в виде патронов с полиэтиленовой оболочкой, заполненных дымным или пироксилиновым (в виде прутков) порохом. Патроны размещали в устройстве симметрично в двух камерах сгорания и инициировали помощью

штатных воспламенителей. Плотность заряжения камер сгорания изменялась от 102 до 568 кг/м³.

Ширина кольцевого сопла между камерами сгорания устройства для локализации интервала нагружения скважины вдоль образующей изменялась от $2 \cdot 10^{-3}$ до $8 \cdot 10^{-3}$ м. Устройство свободно подвешивалось в скважине на тросе без постановки на забой (рис.1). Давление в камерах сгорания устройства регистрировали тензодатчиками мембранного типа, ввинченными в стенки камер сгорания, а также крешерными датчиками [6].

На рис. 2 показаны осциллограммы давления в зарядных камерах при горении зарядов дымного и пироксилинового порохов. Процесс истечения пороховых газов на воздухе регистрировали скоростной кинокамерой СКС-1М16 со скоростью 800–1000 кадр/с. Кинограммы показали, что в процессе истечения струя расширяется в осевом направлении, трансформируясь в облако разлета продуктов горения. Небольшой поперечный ее размер, соизмеримый с диаметром скважины $2r_c$, предопределяет разрушение породы, в соответствии с выводами работы [4], радиально-кольцевой трещиной в плоскости течения. Киносъемкой установлено, что средняя скорость вылета струи из сопла шириной $2 \cdot 10^{-3}$ м при плотности заряжения в каждой из камер устройства по 102 или 204 кг/м³ составляет 160 или 285 м/с.

Данные скоростной киносъемки и визуализация зон разрушения позволяют сделать вывод о том, что расширение струи в процессе разлета и сильная сжимаемость испытанных мягких пород составляют причину образования полости в ближней зоне разрушения как в сухих, так и в обводненных скважинах. Высота и диаметр полости, радиус трещины зависят от массы порохового заряда m_z и свойств породы. При увеличении m_z наблюдается непрерывный рост размеров полости и трещины. При больших массах зарядов в прискважинной зоне появляются дополнительные 3–4 вертикальные трещины, зарождающиеся в зоне действия локализованной по высоте скважины нагрузки. Это связано с ростом скорости нагружения [4].

Экспериментальные данные обработали методами математической статистики и на основании результатов расчетов построили зависимости радиуса магистральной радиально-кольцевой трещины R , отнесенного к

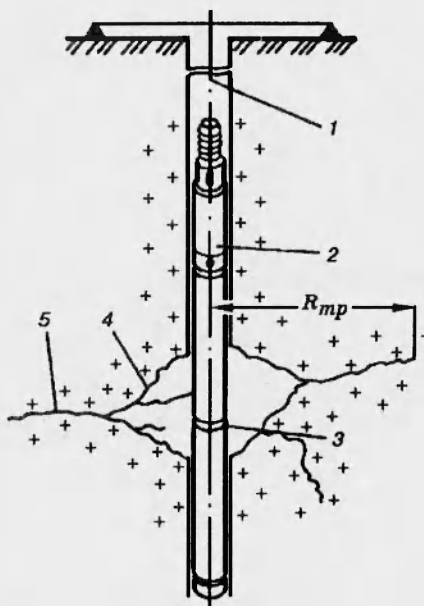


Рис. 1. Схема установки устройства и характер разрушения массива:

1 — шпур; 2 — устройство; 3 — кольцевое сопло; 4 — полость; 5 — трещина.

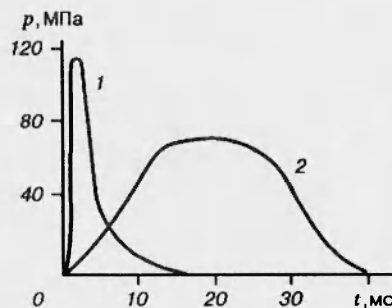


Рис. 2. Осциллограммы давления в камерах сгорания устройства при горении различных порохов:

1 — дымный порох, $\Delta = 387$ кг/м³, $\delta = 1,25$ мм; 2 — пироксилиновый порох, $\Delta = 568$ кг/м³, $\delta = 6$ мм.

радиусу скважины r_c , от массы порохового заряда m_3 , для различных значений ширины сопла δ (рис. 3). Вид зависимостей на рис. 3 свидетельствует о пропорциональном росте размеров трещины с увеличением массы заряда и уменьшении коэффициента пропорциональности с ростом ширины сопла.

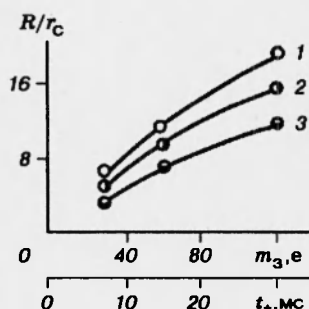


Рис. 3. Зависимость радиуса магистральной трещины от массы порохового заряда при ширине сопла 2 (1), 4 (2) и 6 мм (3); диаметр скважины 93 мм.

В таблице приведены значения максимального давления в камерах сгорания p_{\max} и плотности заряжения Δ для дымного (серии опытов 1–8) и пироксилинового (опыт 9) порохов. Данные таблицы свидетельствуют об естественной зависимости p_{\max} от Δ и δ . Время истечения газовой струи при $\Delta = 102 \div 204 \text{ кг/м}^3$ составляет $10^{-2} \div 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ с}$, возрастая при увеличении плотности заряжения (см. рис. 2, 3). При горении открытого порохового заряда без применения устройства с камерами сгорания глинистый массив разрушался вертикальными трещинами.

При наличии начальной радиальной трещины на стенке скважины разрушение происходит в плоскости начальной трещины. Это показали как результаты опытов с бетонными блоками, так и эксперименты, проводившиеся в глинистом массиве.

Внутрибаллистические параметры устройства порохового разрыва пород

Номер эксперимента	Δ , кг/м ³	p_{\max} , МПа	δ , мм
1	102	20,2	6
2	204	43,0	6
3	221	58,5	6
4	416	75,5	6
5	102	22,4	4
6	204	49,0	4
7	416	82,0	4
8	387	115,5	1,25
9	568	67,8	6

Разрушение ПММА при камуфлетных газовых взрывах

Разрушение твердой среды при детонации газа в полости с начальной трещиной отличается возможностью детонации или горения газа не только в полости, но и в трещине¹. Причем, оптимальная по составу газовая смесь может детонировать в мельчайших трещинах с раскрытием порядка $10^{-4} \div 10^{-3} \text{ м}$ [7].

Механика разрушения твердой среды при камуфлетном газовом взрыве практически не изучена. Только отдельные теоретические работы по

¹Эксперименты проводились совместно с В. В. Захаровым, В. Д. Кукшиным, П. А. Паршуковым.

постановке близки к рассмотрению задачи о развитии трещины разрыва при внутритрещинной детонации газа. В работе [8] рассмотрено движение трещины разрыва в твердом теле под действием динамической нагрузки, распространяющейся за вершиной трещины с переменной скоростью, — близкая к ней по постановке задача [9]. Решение, полученное в [8], позволяет рассчитать параметры движения трещины в момент ее старта при условии мгновенной детонации газа в ней. При реальной детонации или быстром горении газа в трещине в зависимости от состава газовой смеси и начального давления газа вдоль берегов трещины будет распространяться динамическое возмущение в виде фронта волны детонации или горения, и условие старта трещины может быть реализовано еще до того, как фронт волны достигнет окрестности вершины трещины. После старта трещины и полной детонации газа начнется падение давления в ней, поэтому движение трещины на этой стадии уже нельзя описывать с помощью аналитических решений, полученных в [8].

Более уместным здесь был бы подход, предложенный в [3], при условии пренебрежения волновыми процессами в газе и тепловыми потерями. При движении волны детонации вдоль берега трещины в окрестности движущегося возмущения или на определенном расстоянии от него распространяются волны сжатия и сдвига. Не могут ли эти волны напряжений, как и сама подвижная нагрузка, стать источниками возникновения дополнительных трещин на стенках магистральной трещины? Ответ на этот вопрос также требует специальных исследований.

В экспериментах использовали объемные образцы 2 полиметилметакрилата [4] (рис. 4). Начальная дискообразная трещина 8 радиусом $(2-5,2)r_c$ в окрестности цилиндрической полости скважины создавалась ударом поршня по жидкости. В отдельной серии опытов использовались образцы с двумя трещинами 7 и 8 и одной трещиной 8. После этого на противоположной грани образца выполнялось посадочное место и устанавливался пьезодатчик давления [4]. Скважина заполнялась необходимым количеством воды и герметизировалась пробкой 1. Под пробкой между проводами 3 размещали карбид кальция 4, так, чтобы он не касался воды 6.

После герметизации скважины образец переворачивали. Химическая реакция карбида кальция с водой протекала в течение 400–600 с. Взрыв газовой смеси инициировали электровзрывом медной проволоки диаметром 10^{-4} м, длиной от $3 \cdot 10^{-3}$ до $6 \cdot 10^{-3}$ м разрядом конденсатора емкостью 100 мкФ с начальным напряжением 2–2,5 кВ и энергией электровзрыва 0,1–0,2 кДж.

Среднюю скорость распространения магистральной трещины 8 регистрировали методом сигнальных датчиков 9, расположенных в водонаполненных отверстиях 5, на расстояниях $11r_c$ и $18r_c$ от центральной скважины (см. рис. 4). Указанные значения выбраны для полного исключения влияния дополнительных отверстий на характер разрушения образца. Размер (высота) интервала нагружения h в опытах изменялся от $3,6r_c$ до

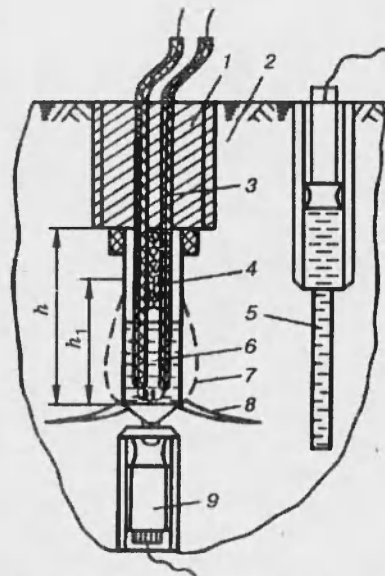


Рис. 4. Схема нагружения образца ПММА и регистрации средней скорости трещины при газовом взрыве.

10,6 r_c . В режиме быстрого горения и детонации наблюдается отражение волны сжатия от торца взрывной полости с постепенным нарастанием давления в последующих отражениях (рис. 5,а). Среднюю скорость волны горения или детонации определяли как отношение $2h_1/\tau$ (см. рис. 4).

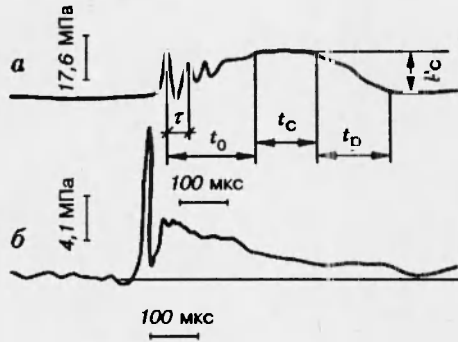


Рис. 5. Осциллограммы давления:

а — во взрывной полости при взрыве смеси $148 \text{ C}_2\text{H}_2 + 1,4 \text{ N}_2 + 0,40 \text{ O}_2$, $p_0 = 2,1 \text{ МПа}$; б — ближний сигнальный датчик при взрыве смеси $148 \text{ C}_2\text{H}_2 + 1,3 \text{ N}_2 + 0,3 \text{ O}_2$, $p_0 = 3,6 \text{ МПа}$.

Задний фронт импульса давления, характеризующий режим разрушения, близок к линейному при полном разрушении образца и имеет выполаживающуюся форму при частичном разрушении (рис. 5,б).

Средняя скорость остановившейся в образце дискообразной трещины, зарегистрированная сигнальными датчиками, составила $113 \pm 10 \text{ м/с}$, скорость радиальной трещины при полном разрушении образца $131 \pm 10 \text{ м/с}$, средняя скорость нарастания давления в этих опытах 300 и 266 ГПа/с соответственно. Учитывая, что при взрывном разрушении твердых сред скорость трещин с увеличением расстояния затухает [11, 12], следует ожидать, что в ближней зоне взрыва скорость трещин может быть в несколько раз выше полученного значения.

При наличии начальной дискообразной трещины, высоте интервала нагружения $h < (6 \div 6,5)r_c$ и скорости нагружения $\dot{p} \leq 10^{11} \text{ Па/с}$ образец разрушается одной дискообразной трещиной. При $h > (6 \div 6,5)r_c$ появляется радиальная трещина. С ростом скорости нагружения при переходе к детонационному режиму взрывчатого разложения газовой смеси количество радиальных трещин увеличивается до 2–4, и суммарное количество трещин составляет 3–5. Возможность зарождения и развития радиальных трещин при наличии дискообразной трещины в образце объясняется существованием времени задержки старта трещины (индукционного периода) t_c , в течение которого в вершине начальной макротрещины создается область высоких напряжений и накапливаются микрповреждения и различного рода несплошности [13]. За это время вокруг скважины формируется область высоких напряжений, в которой происходят аналогичные деструкционные процессы, приводящие к зарождению и росту микротрещин. Аналогичная (докритическая) стадия рассматривается в теории откольного разрушения [14]. Наличие индукционного периода, а также конечность скорости дискообразной трещины на начальной стадии развития, ее неспособность полного поглощения выделяющихся продуктов взрыва являются причиной возникновения радиальных трещин вокруг скважины.

Физические процессы, протекающие в газе, достаточно подробно описаны, например, в работах [7, 10]. Поэтому приведем лишь диапазон основных величин, характеризующих волновые процессы в газе и параметры процесса разрушения ПММА, а также отметим ряд эффектов, обнаруженных в эксперименте: диапазон начальных давлений газа в полости 1,9–7,5 МПа, амплитуда давления при взрыве 12,7–225,0 МПа, длительность импульса давления $t = 4 \cdot 10^{-4} \div 9 \cdot 10^{-3} \text{ с}$, средняя скорость нарастания давления 30–3500 ГПа/с, скорость движения волны бездетонационного горения газа 600–800 м/с, волны детонации 1800–2000 м/с.

Впервые предположение о существовании времени задержки старта трещины высказано в [15]. Типичная осциллограмма давления $p(t)$ — это пологая или полкообразная кривая, где прослеживается участок примерно постоянного давления на уровне критического напряжения определенной длительности, что подтверждает данное предположение (см. рис. 5,а). В настоящих опытах установлено, что эта величина зависит от скорости нагружения или, что то же самое, от величины действующего давления. На рис. 6 показана зависимость времени задержки старта трещины t_c от величины критического давления разрушения в полулогарифмических координатах, где t — время существования образца с трещиной под нагрузкой, равное сумме времени нарастания давления до критического уровня t_0 , индукционного периода t_c и времени развития макротрещин t_p (длительность закритической стадии разрушения). Рис. 6 свидетельствует об аналогичности рассматриваемых зависимостей.

На рис. 7 показаны критические поверхности в пространстве параметров нагружающего импульса для критерия максимального коэффициента интенсивности напряжений, построенные по результатам испытаний объемных образцов ПММА на разрушение при взрыве газа в полости с внутренними дисковидной (рис. 7,а) и радиальной (рис. 7,б) трещинами. При построении этих поверхностей использованы данные по пороговому давлению разрыва ПММА при испытаниях на гидроразрыв [4], а также данные, полученные при различных режимах горения и детонации газа в полости. Графики рис. 7 показывают, что с ростом скорости нагружения наблюдается все более существенная зависимость порогового давления разрушения p_c от размеров начальной трещины R_0/r_c и l_0/r_c . Критическая поверхность $F_R(p_c, t_+, R_0/r_c)$ лежит выше критической поверхности $F_l(p_c, t_+, l_0/r_c)$. Этот результат находится в полном согласии с известными из линейной механики разрушения зависимостями порогового давления разрыва для случаев дисковидной и радиальной одно- или двухсторонней начальных трещин [16].

Сравнивая механическое действие зарядов быстрогорящего дымного пороха при локализации нагрузки с помощью описанного выше устройства и взрыва газовой смеси в указанном диапазоне начальных давлений, нетрудно убедиться, что они практически одинаковы.

При сравнении временных параметров разрушения при слабом и сильном взрыве (в смысле скорости выделения энергии) видно, что время формирования зоны предразрушения вокруг полости изменяется от единиц и десятков миллисекунд при квазистатическом пороховом разрыве до десятков и сотен микросекунд при газовом взрыве и до единиц и десятков микросекунд при взрыве заряда конденсированного ВВ [17, 18]. Так, в работе [17] показано, что время задержки старта трещины t_c из надреза при разрушении плоских образцов волнами растяжения составило $2,8 \cdot 10^{-6}$ с. В [18] определено время начала процесса трещинообразования в ненарушенных блоках ПММА при взрыве удлиненных зарядов тэна в зависимости от величины воздушного бокового зазора Δr : $t^* = 12 \div 21,6$ мкс.

Тенденция к сокращению времени роста трещин в докритической стадии разрушения с увеличением уровня напряжений вокруг полости вполне

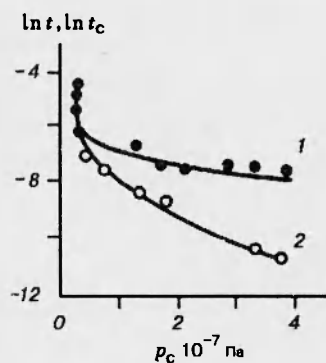


Рис. 6. Зависимость периода задержки старта трещины от критического давления в полости (1) и график долговечности ПММА с трещиной (2).

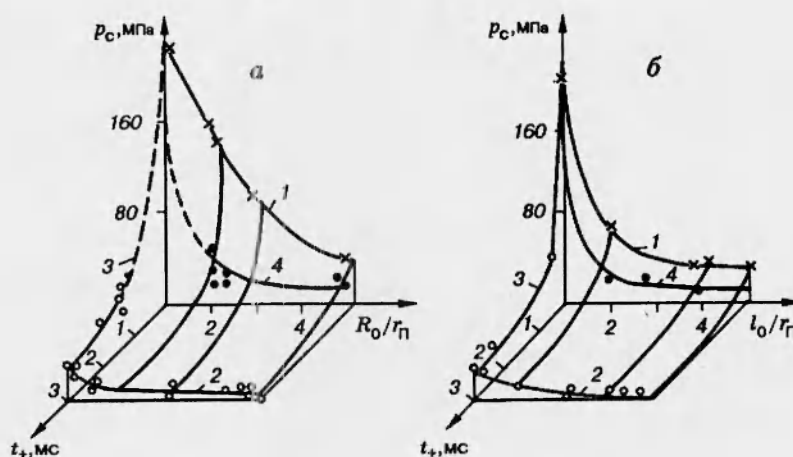


Рис. 7. Критические поверхности разрушения в пространстве параметров нагружающего импульса для критерия максимального коэффициента интенсивности напряжений.

1 — $t_+ = 30 \div 15$ мкс; 2 — $t_+ = 3000 \div 200$ мкс; 3 — $R_0/r_c \rightarrow 1, l_0/r_c \rightarrow 1$;
4 — $t_+ = 160 \div 20$ (а) и $30 \div 20$ мкс (б).

согласуется с представлением о начальном периоде разрушения как о термодиффузионном процессе [19].

Механическое действие зарядов бризантных ВВ в инертных (демпфирующих) оболочках при определенных условиях подобно действию пороховых зарядов и газовых взрывов. Так, сосредоточенный заряд гексогена массой $0,15 \cdot 10^{-3}$ кг в песчаной оболочке частично разрушал блок ПМ-МА тех же размеров тремя радиальными трещинами глубиной $(5-7)r_c$. Однако дальнейшее увеличение массы заряда и замена песчаной оболочки на воздушную ведет к полному разрушению блока и росту количества трещин, что связано, по-видимому, с уплотнением микротрещин в зоне предразрушения [14].

Выводы

1. Механическое действие камуфлетного газового взрыва при $p_0 \leq 7 \div 7,5$ МПа подобно механическому действию быстрогорящего порохового заряда при локализации нагрузки вдоль полости и механическому действию взрыва заряда бризантного ВВ в инертной (демпфирующей) оболочке.

2. Характер разрушения твердой среды вокруг полости зависит не только от вида начальных трещин, их ориентации и скорости выделения энергии при взрыве газа, взрыве или горении конденсированного вещества, но также и от высоты интервала приложения динамической нагрузки.

3. Возникновение радиальных трещин вокруг полости при наличии начальной дискообразной трещины или кольцевого надреза, перпендикулярных к оси полости, связано с существованием времени задержки старта трещины, в течение которого в ее вершине формируется зона предразрушения, а в окрестности полости — зона предразрушения для образования радиальных трещин. Их количество растет с повышением скорости нагружения стенок полости, что, по-видимому, связано с ростом плотности микротрещин в зоне предразрушения вокруг полости.

4. Длительность индукционного периода для трещины разрыва и об-

щая длительность докритической стадии разрушения увеличиваются с уменьшением скорости приложения нагрузки. Зависимость индукционного периода от давления в полости по форме аналогична кривым долговечности.

5. Скорость трещин при камуфлетном газовом взрыве промежуточная между скоростью медленных трещин квазистатического гидроразрыва и быстрых трещин при взрывном разрушении твердой среды.

6. Критические поверхности в пространстве нагружаемых параметров для критерия максимального коэффициента интенсивности напряжений указывают на усиливающуюся зависимость порогового давления разрыва от размера радиальной и дискообразной начальных трещин с ростом скорости нагружения.

Автор выражает признательность А. В. Михалюку за полезные обсуждения, стимулировавшие развитие работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Исаков А. Л., Шер Е. Н. Задача о динамике развития направленных трещин при шпуровом взрывании // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 1983. № 3. С. 28–36.
2. Исаков А. Л. Расчет динамики развития направленных трещин при предварительном шелеобразовании // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 1984. № 3. С. 50–55.
3. Гордеев Ю. Н., Кудряшов Н. А. Развитие магистральной трещины под действием движущегося в ней газа // ПМТФ. 1986. № 4. С. 116–122.
4. Вовк А. А., Войтенко Ю. И., Михалюк А. В. Импульсный гидроразрыв полиметилметакрилата // ПМТФ. 1986. № 5. С. 135–141.
5. Войтенко Ю. И., Михалюк А. В., Токарчук А. В. Импульсный гидроразрыв пористой среды // ПМТФ. 1992. № 1. С. 98–102.
6. Вовк А. А., Замышляев Б. Д., Евтерев Л. И. и др. Поведение грунтов под действием импульсных нагрузок. Киев: Наук. думка, 1984.
7. Васильев А. А., Войцеховский Б. В., Гавриленко Т. П. и др. Исследование детонации газовых смесей. Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1982.
8. Сарайкин В. А. Развитие плоской трещины под действием внезапно приложенного равномерного давления // ПМТФ. 1980. № 3. С. 172–177.
9. Костров Б. В. Осесимметричная задача о распространении трещины нормального разрыва // Прикл. математика и механика. 1964. Т. 28, № 4. С. 644–652.
10. Герасименко В. Ф., Лин Э. Э. Экспериментальное изучение режимов сгорания смесей $C_2H_2 + N_2O + N_2$ в замкнутых цилиндрических камерах // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 4. С. 38–40.
11. Степанов Г. В., Бедий И. Н., Маковой В. А. Некоторые особенности кинетики быстрых трещин в ПММА // Проблемы прочности. 1989. № 8. С. 32–36.
12. Петросян М. И. Разрушение горных пород при взрывной отбойке. М.: Недра, 1991.
13. Панасюк В. В., Андрейкив А. Е., Партон В. З. Основы механики разрушения материалов. Киев: Наук. думка, 1988. (Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие; Т. I).
14. Наймарк О. Б., Беляев В. В. Кинетика накопления микротрещин и стадийность процесса разрушения при ударно-волновых нагрузках // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 4. С. 115–123.
15. Kalthoff J. F. and Shockey D. A. Instability of cracks under impulse loads // J. Appl. Phys. 1977. V. 48, N 3. P. 986–993.
16. Саврук М. П. Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами. Киев: Наук. думка, 1988. (Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие; Т. II).

17. **Констандов Ю. А., Рыжаков А. Н., Федоркин С. И.** Разрушение твердых полимеров при импульсном растяжении // Проблемы прочности. 1992. № 7. С. 14-17.
18. **Ефремов Э. И., Кравцов В. С., Мясина Н. И. и др.** Разрушение горных пород энергией взрыва. Киев: Наук. думка, 1987.
19. **Никифоровский В. С., Шемякин Е. И.** Динамическое разрушение твердых тел. М.: Наука, 1979.

Поступила в редакцию 23/VIII 1994 г.
