

УДК 622.02: 539.375

И.Г. Сахно (канд. техн. наук, доц.)Донецкий национальный технический университет, г. Донецк
sahno_i@mail.ru**А.В. Молодецкий** (канд. техн. наук)Институт физики горных процессов НАН Украины, г. Донецк
Molodoy27@yandex.ru

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ РОСТА ДАВЛЕНИЯ САМОРАСШИРЕНИЯ НЕВЗРЫВЧАТОЙ РАЗРУШАЮЩЕЙ СМЕСИ В ТИПИЧНЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ РЕЖИМАХ

Одним из перспективных направлений статических методов разрушения является использование невзрывчатых разрушающих смесей (НРС). Давление, развиваемое НРС, является одной из главных характеристик при его использовании, являющейся основой для расчета параметров разрушения, поэтому точное определение величины давления достаточно важно. Отмечено несоответствие получаемых на практике величин давлений НРС и заявляемых производителями и авторами патентов. В статье приведены результаты лабораторных испытаний (НРС) в трех наиболее типичных для условий шпуровых и скважинных зарядов деформационных режимах. Эксперименты проводились на установке неравнокомпонентного трехосного сжатия (УНТС). Проведенные испытания позволили установить динамику роста давления и объема НРС от момента приготовления до окончания перекристаллизации. Были определены особенности работы НРС в условиях различной жесткости стенок полости, в которую он помещен, в разных направлениях. Установлено, что в этом случае не происходит выравнивание напряжений в испытуемом образце, а рост давления саморасширения по определенной оси зависит от сопротивления соответствующего гидроцилиндра УНТС. Определено время начала и протекания наиболее активной стадии роста давления саморасширения, которое составляет 2,5-2,7 часа. Максимальное давление саморасширения в условиях нулевых заданных деформаций составило 52,5МПа. Установлено, что давление на плиты УНТС и их перемещения определяются не всем объемом НРС в образце, а некоторой его частью, расположенной в непосредственной близости от нажимной плиты, где создаются различные условия для роста кристаллов гидроксида кальция и форм их взаимодействия. Таким образом, давление саморасширения не является константой по всему объему. Про-

веденные эксперименты позволяют сделать важный вывод о том, что при помещении НРС в замкнутую полость давление его саморасширения и увеличение объема в любом пространственном направлении определяется сопротивлением стенок полости в соответствующем направлении.

Ключевые слова: невзрывчатая разрушающая смесь, саморасширение, гидратация, напряжение, деформация.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Взрывные работы в любой отрасли потенциально относятся к категории работ повышенной опасности. Ведение взрывных работ в условиях подземных горных выработок требует соблюдения специальных мер безопасности, выдвигает дополнительные требования к пылегазовому режиму, достаточно сложно при необходимости разрушения в забоях вблизи работающего оборудования, трубопроводов, при работе в условиях пластов склонных к газодинамическим явлениям и т.д. Таким образом, при подземной разработке полезных ископаемых в ряде случаев применение невзрывных методов разрушения позволит быстро и безопасно решать острые производственные задачи,

За последние 20 лет наблюдается значительный прогресс в развитии статических методов разрушения. Это относительно недавнее направление в науке имеет достаточно большие перспективы благодаря ряду преимуществ перед взрывным разрушением. Способы невзрывного разрушения позволяют исключить следующие недостатки или последствия взрыва: высокая степень дробления и наведенная трещиноватость, большое выделение газообразных и вредных продуктов взрыва, шум, разлет осколков разрушенного объекта, особые меры безопасности при хранении, перевозке и использовании, относительно высокая стоимость. Поэтому их разработка и внедрение являются достаточно актуальной задачей.

Анализ исследований и публикаций. В настоящее время разработано большое количество способов невзрывного разрушения, в частности, механические методы (клиновой, гидроклиновой, алмазно-канатное пиление, камнерезные буровые установки и комбайны), методы, основанные на энергии жидкости (гидродинамический, физико-химический импульсный разрыв,

гидроудар, гидрорезание, флюидоразрыв), тепловые (терморезка), электрические и электромагнитные (взрывание электрических проводников, электрический пробой, тепловой пробой, токами высокой частоты, плавлением, лазерным излучением, электромагнитным излучением), комбинированные методы. Большинство этих методов находятся на стадии научно-исследовательских и проектных разработок. Их промышленное использование сдерживается отсутствием оборудования, малой надежностью, высокой энергоемкостью, опасным воздействием на человека, высокой стоимостью. Одним из главных конкурентов описанных способов является использование невзрывчатых разрушающих смесей НРС.

За 30 летнюю историю развития НРС в мировой практике разработано и внедрено более 100 различных композиций НРС. Анализ патентной литературы [1-5] позволяет сделать вывод, что за это время давление, развиваемое при саморасширении, возросло более чем в 3 раза, а время разрушения сократилось до 2 раз. Так, например, давление саморасширения, развиваемое отечественным составом НРВ-80 при температуре окружающей среды 25-35⁰ С через 24 часа после затворения, по сведениям авторов [5] достигает 153 МПа.

Однако практика показывает, что при применении невзрывчатых разрушающих составов заявляемые давления от их саморасширения не развиваются. Это может быть объяснено тем фактом, что указанные в заявках значения измерены в идеально жестких условиях, то есть при недопущении объемных изменений НРС, например, при помещении состава в металлические трубы с жесткой пробкой [5]. Однако создание таких условий при формировании шпуровых и скважинных зарядов на практике практически невозможно. Фактические давления, развиваемые НРС, будут зависеть от физических свойств материала, на который производится воздействие, а также технических параметров конструкции шпурового заряда. Кроме того, точность метода измерения давления саморасширения по деформированию стенок трубы [5], является достаточно дискуссионным вопросом.

Давление, развиваемое НРС, является одной из главных характеристик при его использовании, являющейся основой для расчета параметров разрушения, поэтому точное определение величины давления достаточно важно. Комплексных исследований динамики роста давления саморасширения НРС в различных условиях, характерных для пород Донбасса не проводилось. Авторами статьи проведены такие исследования.

Постановка задач исследований. Измерение высоких давлений требует применения специальной высокоточной аппаратуры. Одной из лучших установок в Украине, позволяющих независимо фиксировать давления во всех трех направлениях и контролировать процесс деформирования и разрушения, является УНТС [6, 7], разработанная в ИФГП НАН Украины.

УНТС оборудована электронной измерительной системой, позволяющей фиксировать деформации по трем осям и нагрузку на его гранях и записывать данные в виде массива данных в реальном времени. В проводимых экспериментах данные записывали с частотой 1с.

Образцы для испытаний представляли собой пластифицированный НРС. Объем смеси соответствовал объему куба со сторонами 55мм, и имел массу 0,385 кг. Образец помещали в испытательную камеру с замкнутыми горизонтальными плитами, после чего с помощью верхней плиты пресса поджимали образец до закрытия камеры для обеспечения надежного контакта (рис. 1).

После окончания эксперимента с помощью штангенциркуля (цена деления 0,05 мм) проводилось измерение ребер граней затвердевшего образца НРС. Испытания по изучению динамики роста давления расширения НРС проводили в режиме заданных деформаций, что само по себе является уникальным для УНТС, т.к. обычно при проведении экспериментов нагружение производят в режиме заданных напряжений (моделируя глубину разработки или вид напряженного состояния)). После помещения образца в рабочую камеру в процессе перекристаллизации оксида кальция происходил рост давления саморасширения, что вызывало сдвигание плит пресса, соответствующие нажимные плиты удерживали в заданном диапазоне деформаций путем их плавно-

го поджатия. Температура окружающей среды при проведении экспериментов находилась в диапазоне 21-22,5⁰ С.



Рис. 1. Пластифицированный НРС помещенный в испытательную камеру установки УНТС

Испытания на установке УНТС проводили по трем программам.

1. В условиях ограничения перемещений по всем трем осям.
2. В условиях свободного перемещения по всем осям.
3. В условиях ограничения перемещений по горизонтальным осям и свободного перемещения по вертикальной оси.

Целью испытаний по первой программе было получение динамики роста давления саморасширения в условиях имитирующих донную или среднюю часть шпурового или скважинного заряда, когда горизонтальные перемещения ограничены стенками скважины, а вертикальные донной частью скважины или НРС. При такой схеме эксперимента давления саморасширения достигает максимальной величины.

Целью испытаний по второй программе было получение динамики роста давления саморасширения в условиях различного сопротивления расширению по всем трем осям. При этом разница сопротивления саморасширению по осям была вызвана разной жесткостью гидросистемы установки в различных направлениях.

Такая схема эксперимента позволила выяснить особенность работы НРС в условиях различной жесткости стенок полости, в которую он помещен, в разных направлениях. В натуре аналогичная ситуация может возникнуть в случае когда скважина или шпур пробурены в трещиноватом массиве или пересекают его.

Целью испытаний по третьей программе было получение динамики роста давления саморасширения в условиях имитирующей устьевою часть шпурового или скважинного заряда, когда горизонтальные перемещения ограничены стенками скважины, а вертикальные не ограничены.

Изложение материала и результаты. Проведенные испытания на этой установке показали, что максимальное давление саморасширения НРС было достигнуто при испытании по первой программе, при удерживании деформаций в нуле. Графики роста давления по осям во времени приведены на рисунке 2.

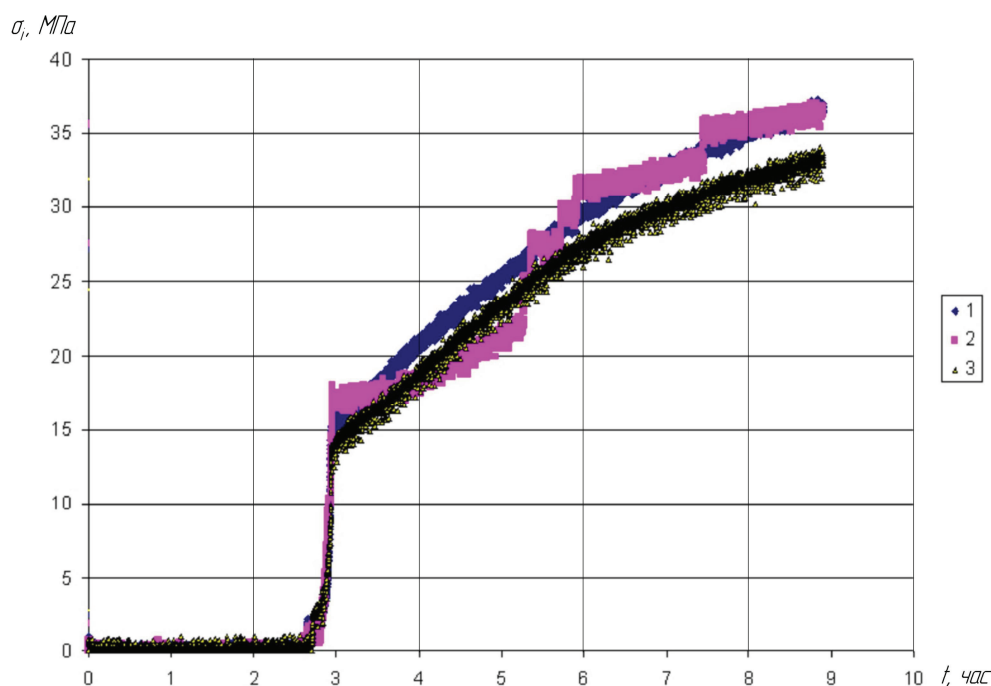


Рис. 2. Графики роста давления саморасширения НРС во времени в различных направлениях (первая программа испытаний)

- 1 – напряжения σ_{oz} по оси OZ;
- 2 – напряжения σ_{oy} по оси OY;
- 3 – напряжения σ_{ox} по оси OX.

Анализ графиков позволяет сделать вывод, что рост давления по всем осям происходит равномерно. При температуре окружающей среды в диапазоне 21-22,5⁰ С активный рост начинается через 2,7 часа, что отображается крутым участком на кривых роста давления, затем графики выполаживаются и скорость роста давления стабилизируется. Давление через 8 часов составляет около 35МПа. Максимальное давление расширения через 24 часа после приготовления смеси составило 52,5 МПа. Резкий скачок интенсивности набора давления расширения НРС в начальный период, наблюдаемый на графиках (рис. 2) объясняется активной стадией гидратации, а также высоким нижним порогом чувствительности пресса.

Результат испытания НРС по второй программе приведен на рисунке 3.

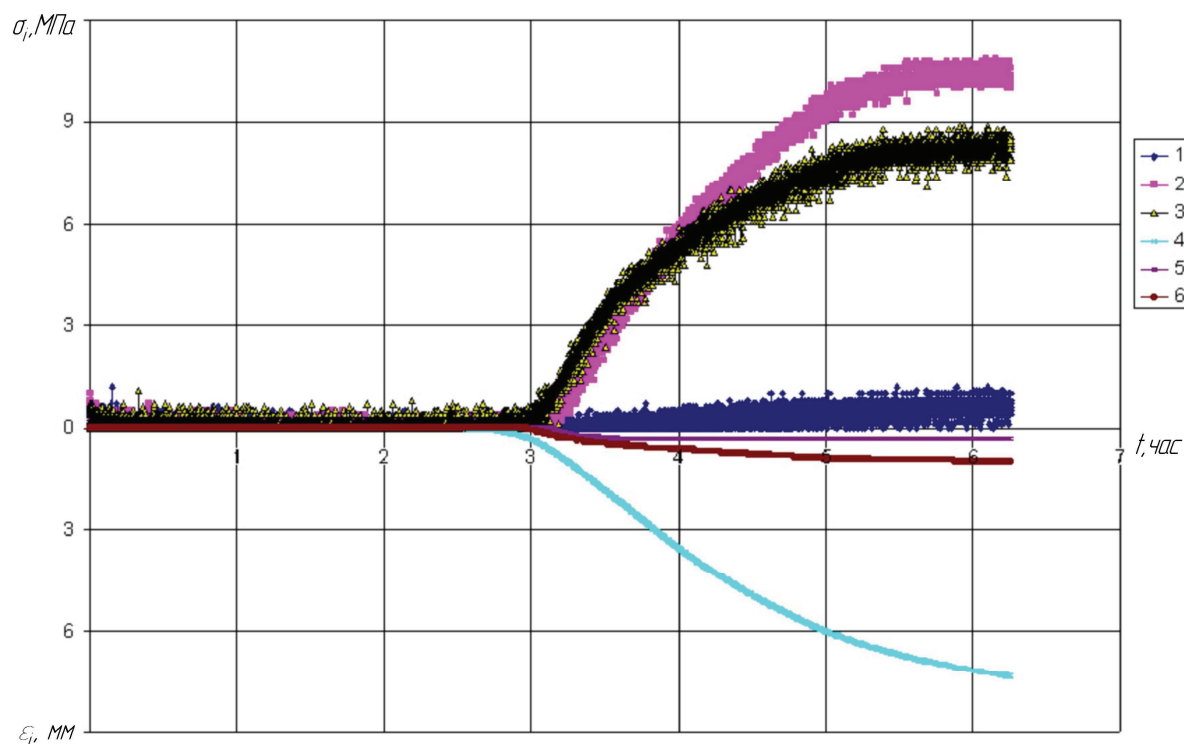


Рис. 3. Графики роста давления саморасширения и объема НРС во времени в различных направлениях (вторая программа испытаний)

- 1, 4 – напряжения σ_{oy} и смещения ε_{oy} по оси OY;
- 2, 5 – напряжения σ_{oz} и смещения ε_{oz} по оси OZ;
- 3, 6 – напряжения σ_{ox} и смещения ε_{ox} по оси OX.

Анализ графиков позволяет сделать вывод, что начало расширения смеси происходит через 2,5 часа после приготовления, что отмечается по смещению в направлении ОУ. Жесткость гидросистемы прессы по разным осям различна, максимальна она в направлении ОZ, минимальна в направлении ОУ. Жесткость в данном случае определяется сопротивлением системы гидродомкрат-насос-клапанная группа. Из графиков видно, что рост давления по осям происходит неравномерно, а зависит от сопротивления в соответствующем направлении. Так в направлении ОZ давление через 6 часов составляет 10,6МПа, а смещения 0,33мм, в направлении ОX давление – 8,4МПа, смещения 0,98мм, а в направлении оси ОУ давление 0,7 МПа смещения 7,18мм. Необходимо отметить, что давление, развиваемое в направлениях ОУ и ОZ через 6 часов после приготовления смеси отличается более чем в 15 раз, а смещения в этих направлениях более чем в 21 раз. Не происходит выравнивание давлений в испытуемом образце, а рост давления по определенной оси зависит от сопротивления соответствующего гидроцилиндра. Это важная особенность работы НРС.

Объяснение полученному эффекту может заключаться в том, что давление на плиты прессы и их перемещения определяются не всем объемом НРС в образце, а некоторой его частью расположенной в непосредственной близости от нажимной плиты, где создаются различные условия для роста кристаллов гидроксида кальция и форм их взаимодействия. Таким образом, давление саморасширения не является константой по всему объему.

Результат испытания НРС по третьей программе приведен на рисунке 4.

Анализ рис. 4 позволяет сделать вывод, что начало расширения смеси происходит через 2,75 часа после приготовления, это отмечается по росту давлений по осям ОУ и ОX при удерживании их деформаций в нуле. При этом рост давления по осям происходит неравномерно, в направлении ОУ и ОX давления растут с одинаковой интенсивностью и существенно не отличаются по абсолютной величине, а по оси ОZ в условиях свободных деформаций нажимной плиты рост давления более плавный, а абсо-

лютные значения давлений меньше чем по другим осям. Так давление саморасширения через 6 часов после приготовления смеси в направлении осей OY и OX составляет 17-18 МПа, а по оси OZ при деформациях 0,11мм – 10,6МПа. При этом среднее давление по трем осям 15,2МПа на 46% меньше чем в условиях ограничения перемещений по всем осям (первая программа испытаний 28,2 МПа). В направлении OY и OX давления снизились по сравнению с первой программой испытаний на 35%. Выравнивание давлений по образцу не произошло, и результаты повторили проведенный ранее эксперимент, давление в соответствующем направлении определяется сопротивлением среды. Однако было уточнено, что суммарное давление в направлениях ограничения перемещений также снижается. Результаты экспериментов послужили исходной информацией для расчета физико-механических характеристик НРС при его саморасширении.

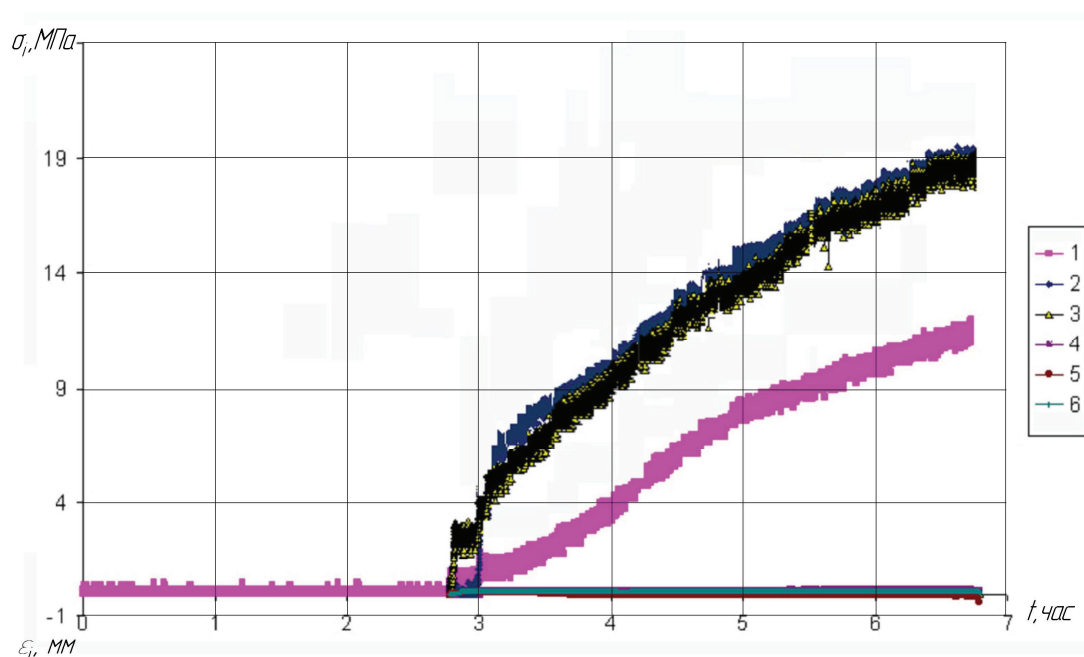


Рис. 4. Графики роста давления саморасширения и объема НРС во времени в различных направлениях (третья программа испытаний)

- 1, 4 – напряжения σ_{oy} и смещения ε_{oy} по оси OZ;
- 2, 5 – напряжения σ_{oz} и смещения ε_{oz} по оси OY;
- 3, 6 – напряжения σ_{ox} и смещения ε_{ox} по оси OX.

Для случая испытаний по первой программе результаты расчета по данным первых 8 часов после приготовления НРС приведены ниже в виде графиков на рис. 5-7.

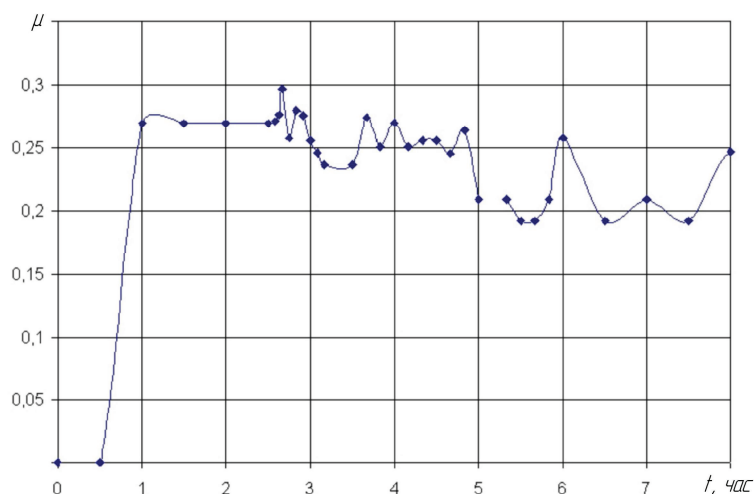


Рис. 5. Изменение коэффициента поперечной деформации НРС во времени при испытании по первой программе

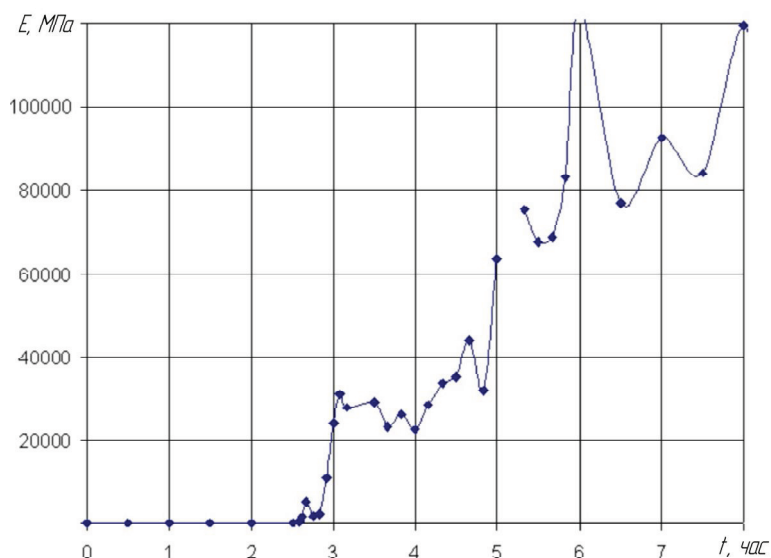


Рис. 6. Изменение модуля деформации НРС во времени при испытании по первой программе

Из графиков видно, коэффициент поперечной деформации от саморасширения НРС при испытании по первой программе изменяется от 0,19 до 0,3, в среднем составляет 0,257. Модуль деформации растет во времени и достигает максимума 120ГПа, при этом рост модуля деформации коррелирует с ростом средних напряжений вызванных саморасширением, и удовлетворительно

описывается экспоненциальной зависимостью $E = 1987,3e^{0,1182\sigma_{cp}}$ (рис. 7). Такие большие значения величины модуля деформации объясняются программой нагружения, поскольку деформации удерживаются близкими к нулю (в пределах погрешности эксперимента) а напряжения от саморасширения растут.

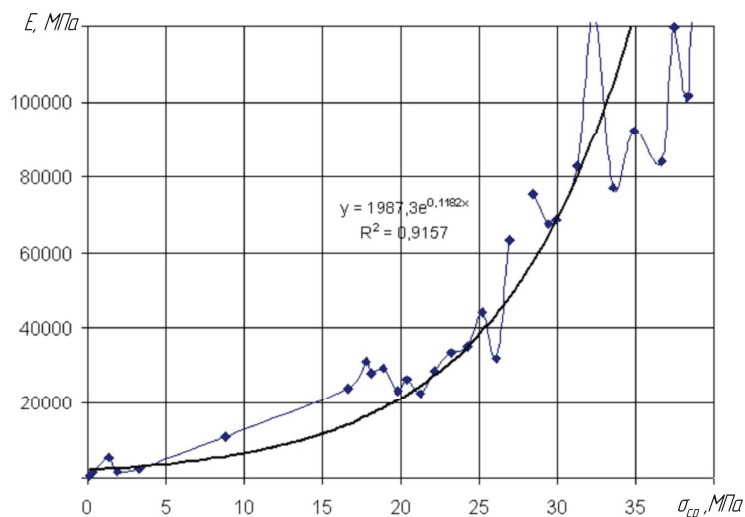


Рис. 7. Зависимость модуля деформации НРС от среднего напряжения при испытании по первой программе

Аналогичные построения были проведены для испытаний по второй программе. Результаты представлены ниже в виде графиков на рис. 8-10.

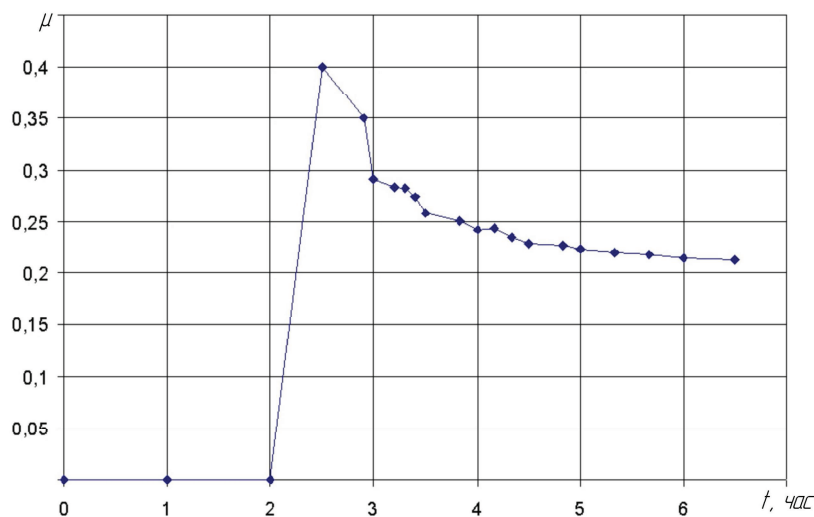


Рис. 8. Изменение коэффициента поперечной деформации НРС во времени при испытании по второй программе

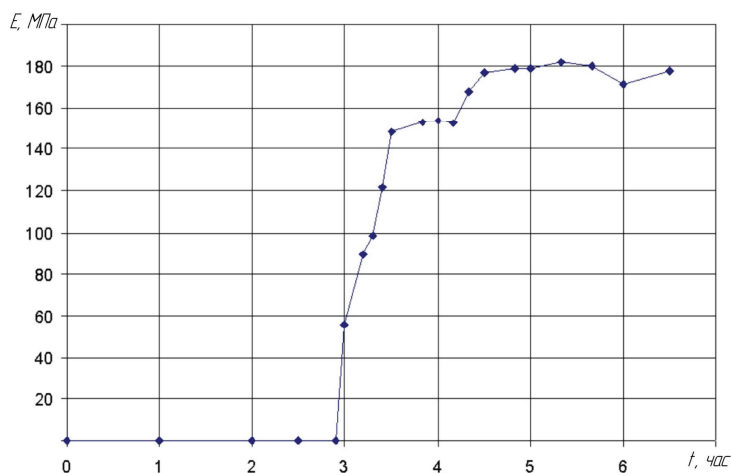


Рис. 9. Изменение модуля деформации НРС во времени при испытании по второй программе

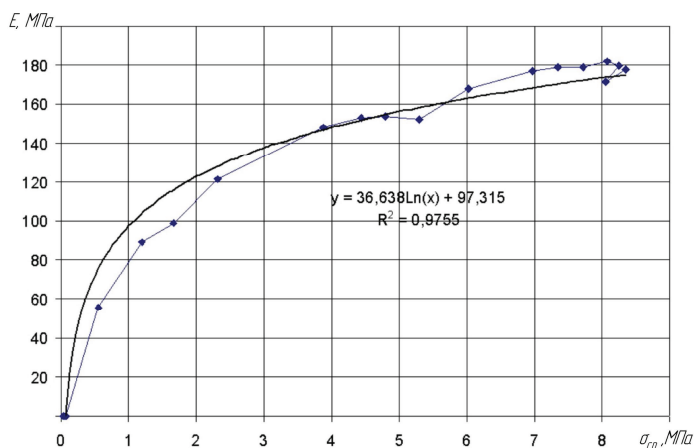


Рис. 10. Зависимость модуля деформации НРС от среднего напряжения при испытании по второй программе

Из графиков видно, что коэффициент поперечной деформации от саморасширения НРС при испытании по второй программе изменяется от 0,21 до 0,4, в среднем составляет 0,234. Модуль деформации растет во времени и достигает максимума 180 МПа, что на три порядка меньше чем при испытаниях по первой программе, при этом рост модуля деформации коррелирует с ростом средних напряжений вызванных саморасширением, и удовлетворительно описывается логарифмической зависимостью $E = 36,64 \ln(\sigma_{cp}) + 97,31$ (рис. 10). Такое отличие в значениях величины модуля деформации по сравнению с предыдущим экспериментом объясняются тем, что при испытаниях по второй программе деформации и напряжения от саморасширения растут произвольно.

Выводы и направления дальнейших исследований. Проведенные эксперименты позволяют сделать следующие выводы. При помещении НРС в замкнутую полость давление его саморасширения и увеличение объема в любом пространственном направлении определяется сопротивлением стенок полости в соответствующем направлении. Рост давления обеспечивает не весь объем НРС в образце, а некоторая его часть, находящаяся в непосредственной близости от границы с полостью в которую он помещен.

При расчете параметров разрушения с помощью НРС модуль поперечной деформации при расширении НРС независимо от программы нагружения может быть принят 0,235-0,255. При разрушении с помощью НРС значение модуля деформации следует принимать по зависимости $E = 1987,3e^{0,1182\sigma_{cp}}$, так как он находится в шпуре или скважине в условиях близких к моделированию по программе 1. А в случае помещения НРС в полость с податливыми стенками модуль деформации может быть рассчитан по зависимости $E = 36,64\ln(\sigma_{cp}) + 97,31$.

Дальнейшие исследования будут посвящены разработке методики расчета давления саморасширения НРС в зависимости от деформационного режима.

Список литературы

1. Средство для разрушения каменных материалов и бетона: заявка 57-187044, Япония, МКИ В 02 С 19/18 / Сайто Акира, Накатани Сэйити, Мива Акира, Аги Исао, Исакаи Дзюк; Дэнки кагаку коге к.к. - № 56-71233; заявл. 12.05.81; опубл. 17.11.82.
2. Средство для разрушения каменных материалов, в том числе бетона: заявка 57-136954, Япония, МКИ В 02 С 19/18 / Нисихара Акио, Мива Мотому, Тада Сюти; Асахи дэнка коге к. к. - №56-23509; заявл. 19.02.81; опубл. 24.08.82.
3. Разрушающий материал: А.с. 1189831 СССР, МКИЗ С 04 В 7/00 / Л.Г. Шпынова, Я.Б. Якимечко, И.М. Петрушка; Львовский политехнический институт. - № 3698569/29-33; Заявл. 30.01.84; Опубл.07.11.85, Бюл. № 41.
4. Разрушающий материал: А.С. СССР N 1648911, МПК 5 С 04 В 7/00 / И.Г. Лугинина, Ю.Г. Шереметьев. – № 4496506/33; заявл. 19.10.1989; опубл. 15.05.1991, Бюл. №18. – 2 с.

5. Невибухова руйнівна речовина НРР-80: пат. вин. UA 59940, МПК 51 С 04 В 7/00 / Грибко В.Ф.; Щєбликін С.В.; Палей А.В. (UA). – № 2002129862; заявл. 09.12.2002; опубл. 15.07.2005, Бюл. №7. – 6 с.

6. Алексеев А.Д. Совершенствование УНТС с целью повышения точности измерений / А.Д. Алексеев, Г.П. Стариков, И.А. Бойко // Физика и техника высоких давлений. - 1987. - № 25. - С. 23-28.

7. Экспериментальная техника для исследования предельных состояний горных пород / [А.Д. Алексеев, Г.П. Стариков, Т.П. Асеева, А.Ф. Морозов] // Физика и техника высоких давлений. - 1993. - Т.3, №3. – С. 135-145.

Стаття надійшла до редакції 16.10.2013.

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук В.В. Назимко

І.Г. Сахно

Донецький національний технічний університет, м. Донецьк

А.В. Молодецький

Інститут фізики гірничих процесів НАНУ, м. Донецьк

ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ЗРОСТАННЯ ТИСКУ САМОРОЗШИРЕННЯ НЕВИБУХОВИХ РУЙНУЮЧИХ СУМІШЕЙ У ТИПОВИХ ДЕФОРМАЦІЙНИХ РЕЖИМАХ

Одним з перспективних напрямків статичних методів руйнування є використання невибухових руйнуючих сумішей (НРС). Тиск, що розвивається НРС, є однією з головних характеристик при його використанні, що є основою для розрахунку параметрів руйнування, тому точне визначення величини тиску досить важливе. Відзначено невідповідність одержуваних на практиці величин тисків НРС і тих, що заявляються виробниками та авторами патентів. У статті наведені результати лабораторних випробувань (НРС) у трьох найбільш типових для умов шпурових і свердловинних зарядів деформаційних режимах. Експерименти проводилися на установці нерівнокомпонентного тривісного стиснення (УНТС). Проведені випробування дозволили встановити динаміку зростання тиску й обсягу НРС від моменту приготування до закінчення перекристалізації. Були визначені особливості роботи НРС в умовах різної жорсткості стінок порожнини, в яку він поміщений, в різних напрямках. Встановлено, що в цьому випадку не відбувається вирівнювання напружень у випробуваному зразку, а зростання тиску саморозширення за певною віссю залежить від опору відповідного гідроциліндра УНТС. Визначено час початку і перебігу найбільш активній стадії росту тиску саморозширення, яке становить 2,5-2,7 години. Максимальний тиск саморозширення в умовах нульових заданих деформацій склало 52,5 МПа. Встановлено, що тиск на плити УНТС та їх переміщення визначаються не всім об'ємом НРС у зразку, а деякою його частиною, розташованою в безпосередній близькості від натискної плити, де створюються різні умови для росту кристалів гідроксиду кальцію і форм їх

взаємодії. Таким чином, тиск саморозширення не є константою по всьому об'єму. Проведені експерименти дозволяють зробити важливий висновок про те, що при приміщенні НРС в замкнуту порожнину тиск його саморозширення і збільшення обсягу в будь-якому просторовому напрямку визначається опором стінок порожнини у відповідному напрямку.

Ключові слова: невибухові руйнівні суміші, саморозширення, гідратація, напруга, деформація.

I.G. Sakhno

Donetsk National Technical University, Donetsk

A.V. Molodetsky

Institute for Physics of Mining Processes, NAS of Ukraine, Donetsk

LABORATORY STUDIES OF THE DYNAMICS OF GROWTH OF SELF-EXPANSION PRESSURE OF NON-EXPLOSIVE DESTRUCTIVE MIXTURE IN TYPICAL DEFORMATION MODES

One of the promising areas of static destruction methods is the use of non-explosive destructive mixtures (NDM). Pressure developed by NDMs, is one of the main characteristics, which is the basis for calculation of fracture parameters, so the exact definition of pressure is quite important. There is a discrepancy between NDM pressure values obtained in practice and the patents claimed by producers and writers. The paper presents the results of laboratory tests (NDMs) in three deformation modes most typical for the conditions of blast-hole and borehole charges. The experiments were conducted on a triaxial compression facility. The tests determined the dynamics of NDM pressure and volume growth from the moment of preparation up to the end of recrystallization. We identified the features of NDM action for different stiffness of cavity walls and in different directions. We found that in this case there is no stresses equalization in the test sample and the growth of self-expansion pressure on a certain axis depends on the resistance of the corresponding cylinder. We determined the time of beginning and duration of the most active stage of self-expansion pressure growth (2,5-2,7 hours). Maximum self-expansion pressure in case of zero set strain was 52,5 MPa. We found out that the pressure on plates and their movements are determined not by the whole NDM volume, but by a certain part of it located in the immediate vicinity of the pressure plate, where there are different conditions for the growth of calcium hydroxide crystals and their interactions. Thus, self-expansion pressure is not constant over the entire volume. The experiments lead to the important conclusion that when NDM is placed in a closed cavity the growth of its self-expansion pressure and volume in any spatial direction is determined by the resistance of cavity walls in this direction.

Keywords: non-explosive destructive mixtures, self-expansion, hydration, stress, strain.