

ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ ГІРНИЧОГО ВИРОБНИЦТВА

УДК 622.236.234+622.256.4

О КРИТЕРИИ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАПРЯЖЕНИЙ

*Р. С. Крысин, докт. техн. наук (НГУ Украины), В. В. Новинский, инж.
(ЗАО «Турстрой-Украина»)*

Запропоновано критерій руйнування крихких середовищ імпульсними навантаженнями у вигляді функції подрібнюваності, встановлено її властивості і обгрунтовано достовірність експрес-методу її визначення.

На основании исследований [1] показано, что в основе распределения кусков горной породы, образующихся за счет реализации случайных структурных дефектов, лежит статистическая теория разрушения. С позиций этой теории при росте величины разрушающего фактора в одном и том же объеме будет реализовываться все большее количество дефектов, вследствие чего расстояния между прорастающими из них трещинами будут уменьшаться, а рассматриваемый объем – разрушаться на более мелкие куски.

Применительно к горным породам естественная трещиноватость массива соответствует условиям, когда величина разрушающего фактора равна нулю и гранулометрический состав массива определяется размерами естественных отдельностей. При нагружении взрывом первыми реализуются связи между отдельностями, а затем, в зависимости от уровня нагрузки, генерируемой в отдельности, начнутся их разрушения.

Это дает основание предположить, что существует некая зависимость количества трещин (кусков) в единице объема от величины разрушающего фактора, вызвавшего их возникновение.

$$n = \varphi(\sigma), \quad (1)$$

где n – количество образующихся в единице объема трещин (кусков); σ – величина разрушающего фактора.

Зависимость (1), определяющая способность среды дробиться под действием импульсной нагрузки, названа функцией дробимости. В координатах n и σ функция дробимости должна удовлетворять графику, изображенному на рис. 1.

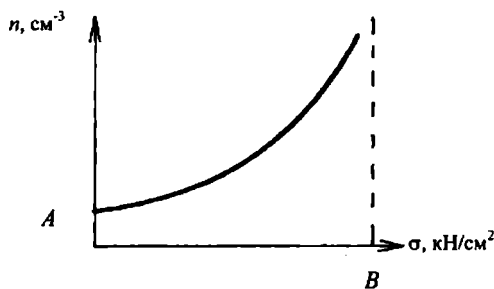


Рис. 1. Графическое выражение функции дробимости

Точка A пересечения кривой с осью n , где $\sigma = 0$, дает характеристику блочности массива, то есть удельное количество кусков, на которые разбит массив естественной трещиноватостью. Точка B , определяющая положение прямой, параллельной оси n , к которой асимптотически приближается кривая графика, показывает величину теоретической прочности материала, слагающего массив.

Через функцию дробимости нетрудно определить средний объем куска, образовавшегося при разрушении среды:

$$V_{\text{ср}} = \psi(\sigma) = V_{\text{ср}}(\sigma).$$

Отметим одну из важных особенностей функции дробимости: она всегда возрастающая и характеризует способность среды разрушаться на куски того или иного размера. Если функция $n = \psi(\sigma)$ всегда возрастает, то $V_{\text{ср}} = \psi(\sigma)$, как обратная ей, всегда убывает.

С помощью функции дробимости можно объяснить закономерность разброса точек при статических испытаниях «одинаковых» образцов, а также проявление масштабного фактора.

Если проведены испытания большого количества m «одинаковых» образцов и из них k образцов разрушились при напряжении более σ , то относительное их количество k/m определяет вероятность непопадания в объем образца точек, имеющих критическое напряжение менее σ .

В [1] было показано, что при случайном и независимом расположении точек в массиве их количество в каком-либо объеме определяется распределением Пуассона. Согласно этому распределению, вероятность непопадания в объем ни одной точки

$$P_0 = e^{-nV}. \quad (2)$$

Подставим $\psi(\sigma)$ вместо n и приравняем к вероятности, определенной из опыта:

$$\frac{k(\sigma)}{m} = e^{-\psi(\sigma)V}.$$

Преобразуя это выражение и учитывая, что $V_{cp}(\sigma) = 1/\varphi(\sigma)$, получим формулу для нахождения функции дробимости по данным испытаний образцов одинакового объема V :

$$V_{cp}(\sigma) = \frac{V}{\ln m - \ln k(\sigma)}. \quad (3)$$

Как следует из (3), функция дробимости определяет закономерность разброса разрушающих напряжений.

Проявление масштабного фактора может быть установлено в результате статических испытаний образцов с широким диапазоном размеров. Представим результаты испытаний в координатах σ (разрушающее напряжение) и V (объем образца). Определенному объему образца будет соответствовать серия точек на графике. Для каждой серии отыщем точки, каждая из которых делит количество точек в серии пополам, и соединим их плавной кривой. Эта кривая определяет напряжения σ , при которых разрушилась половина образцов. При этом вероятность непопадания в объем образца точек с критическим напряжением менее σ равна 0,5.

Тогда выражение (2) перепишем в следующем виде:

$$0,5 = e^{-\varphi(\sigma)V(\sigma)}. \quad (4)$$

Из формулы (4) получаем

$$\varphi(\sigma) = -\frac{\ln 0,5}{V(\sigma)}.$$

Учитывая, что $\ln 0,5 = 0,6932 \approx 0,7$, а $\varphi(\sigma) = \frac{1}{V_{cp}(\sigma)}$, выразим через функцию дробимости закономерность проявления масштабного фактора:

$$V_{cp}(\sigma) = \frac{V(\sigma)}{0,7}.$$

Из вышеизложенного следует, что функция дробимости является параметром, характеризующим не только широкий круг свойств материала, но и закономерности поведения его под нагрузкой, что дает основание рассматривать функцию дробимости как критерий разрушения хрупких сред.

Нагрузка должна подбираться такой, чтобы соответствовать конкретному технологическому процессу. Для целей дробления горных пород взрывом функцию дробимости следует определять при динамическом приложении нагрузки.

Возможность получения лабораторным путем экспресс-информации о способности горных пород оказывать сопротивление диспергированию при импульсном приложении нагрузки позволяет избавиться от сложных и дорогостоящих «забойных» испытаний, которые не всегда осуществимы.

Экспресс-метод определения функции дробимости предусматривает те же средства проведения испытаний, что и при определении показателя дробимости по Барону [2]. Испытаниям подвергались образцы горных пород примерно изометрической формы с размерами граней 4...6 см, причем хотя бы одна из них должна быть относительно плоской. Перед испытаниями тщательно измерялась высота образца, его объем и вычислялась средняя площадь поперечного сечения. Образец помещался в стальной цилиндр плоской гранью вверх. Диаметр и высота цилиндра 100 мм. Цилиндр устанавливался на массивную плиту. Чтобы образец сохранял устойчивость в цилиндре, на его дно подсыпался песок с размерами частиц не более 1 мм, который заполнял неровности в нижней грани образца и позволял придать верхней грани горизонтальное положение. Над образцом монтировалось устройство, детали которого показаны на рис. 2.

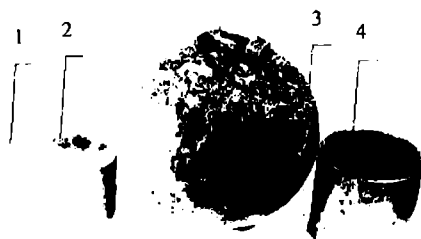


Рис. 2. Элементы устройства для динамических испытаний образцов горных пород

На верхнюю грань образца устанавливалась накладка 1 в форме шарового сегмента (сталь 45), имеющего диаметр основания 80 мм и радиус шаровой поверхности 90 мм. На накладку помещался сплошной цилиндрический пуансон 2 (сталь 45) с диаметром поперечного сечения 80 мм. В основании пуансона имеется шаровое углубление с тем же радиусом шаровой поверхности, что и у накладки. Высота пуансона 70 мм. Такой шарнир позволяет установить верхний торец пуансона, который воспринимает удар груза, в горизонтальное положение и равномерно передать нагрузку от падающего груза на всю плоскость верхней грани образца. Падающий груз 3 из серого чугуна (СЧ-00) в форме шара массой 32 кг был соединен медной проволокой с подъемным канатом. Для нанесения удара в центр пуансона к грузу с боков прикреплялись проводники, которые перемещались по боковым направляющим тросам и строго фиксировали направление падения груза. Для указания высоты подъема груза на одном из проводников была установлена стрелка, которая перемещалась по шкале с делениями. Сбрасывание груза на образец производилось путем перескусывания медной проволоки.

После каждого испытания продукты дробления просеивались на двух ситах: верхнее с диаметром ячейки 5 мм, нижнее – 1,5 мм. Куски, находящиеся на верхнем сите, подсчитывались. Подсчет продукта дробления с нижнего сита

выполнялся в следующем порядке. В мерную мензурку объемом 15...20 мл помещали надрешетный продукт в объеме 1 см³ (1 мл) и производили подсчет кусков. Производили не менее 5 таких измерений, затем определяли среднее количество кусков, приходящееся на 1 см³. Общее количество мелочи, прошедшее через верхнее сито, подсчитывали по величине объема мелочи в мерной мензурке. Подрешетный продукт нижнего сита вместе с песком в расчет не принимался. По результатам измерений определялось удельное количество кусков n как отношение количества кусков в опыте к объему образца.

Важным моментом при подготовке испытаний является расчет высоты подъема груза, сообразяющего образцу заданную нагрузку. Исходя из закона сохранения импульса

$$mv = \int P dt \text{ или } m\sqrt{2gH} = k_{\phi}P\tau,$$

где m – масса груза; P – амплитуда импульса; τ – длительность импульса; k_{ϕ} – коэффициент формы импульса,

$$H = \frac{\sigma^2 \tau^2 k_{\phi}^2 F^2}{2gm^2}. \quad (5)$$

Используя выражение (5), при заданном σ , можно определить H , если известны k_{ϕ} и τ . Для выяснения формы и длительности импульса по вышеизложенной методике были испытаны образцы горных пород кубической формы с размером ребра 5 см. Измерение деформаций в образце производилось при помощи тензодатчиков типа КТЭ в комплексе с электронным осциллографом С-1-42. Одновременно фиксировалось (путем замыкания цепи) время соударения груза и пуансона (до момента первого отскока). На рис. 3 показаны характерные осциллограммы импульса деформаций (треугольной формы) и времени соударения (прямоугольник).

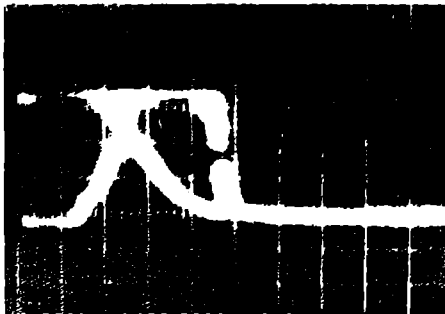


Рис. 3. Осциллограммы импульсов деформации и времени соударения при динамических испытаниях образцов горных пород

Во всех экспериментах длительность импульса оставалась постоянной и равной 250 мкс. Однако вступление импульса деформации по отношению к импульсу соударения происходило со сдвигом на определенный и постоянный промежуток времени, равный времени пробега волны от точки соударения до датчика. При увеличении высоты падения груза форма импульса деформаций, его длительность и длительность соударения не изменялись. Возрастала лишь амплитуда сигнала.

Проведенные эксперименты показали, что импульс деформаций имеет форму, близкую к треугольной, поэтому $k_{\phi} = 0,5$. Длительность соударения определяется сочетанием типов соударяющихся металлов и целиком зависит от скорости протекания в них волновых процессов. Поэтому вышеописанные условия проведения экспериментов приняты в дальнейшем за стандартные.

При постоянных $k_{\phi} = 0,5$ и $\tau = 250$ мкс величина расчетного напряжения, генерируемого в образце, зависит только от амплитуды сигнала, которая пропорциональна динамической нагрузке.

Чтобы убедиться в правомерности формулы (5), кубические образцы с наклеенными тензодатчиками были подвергнуты динамическим испытаниям с заданной величиной импульса (mv). Тарировка датчиков осуществлялась статическим методом со ступенью нагружения 10 тонн. Запись сигналов при статическом и динамическом нагружении производилась осциллографом С-1-42 при одном и том же коэффициенте усиления тензодатчика ($k_y = 0,025$). На рис. 4 показаны осциллограммы сигналов, полученных при сбрасывании груза с высоты 0,12 м; 1,0 м; 2,0 м (mv равна соответственно 50; 144,4; 204 Нс).

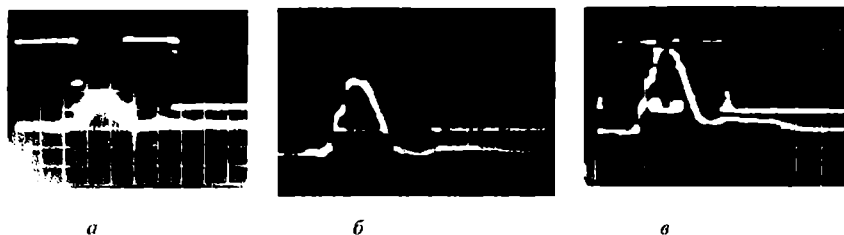


Рис. 4. Осциллограммы импульсов при нагружении образцов падающим грузом с высоты: а - 0,12 м; б - 1,0 м; в - 2,0 м

Сопоставление амплитуд сигналов с тарировочными графиками позволило рассчитать величины амплитуд нагрузок, которые равны соответственно 38; 112; 160 тонн. Длительность соударения и длительность импульса нагрузки остались одинаковыми и равными 250 мкс. При коэффициенте формы импульса 0,5 найдены площади импульсов нагрузки, которые составили, соответственно высотам падения груза, величины, равные 47,5 Нс; 140 Нс; 200 Нс. Как видно, расхождения между заданными величинами импульсов и полученными из опытов не превышают 5 %.

Представляет интерес сравнение величин напряжений, измеренных в опыте, с рассчитанными по формуле Герца из классической теории продольного удара:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2T}{F_2 \left(\frac{F_2 l_1}{E_1 F_1} + \frac{l_2}{E_2} \right)}} \quad (6)$$

Здесь T – потенциальная энергия груза. Площадь поперечного сечения пуансона $F_1 = 50,24 \text{ см}^2$, высота пуансона вместе с накладкой $l_1 = 8 \text{ см}$, модуль упругости стали $E_1 = 2,1 \cdot 10^4 \text{ кН/см}^2$. Гранитный образец кубической формы имел площадь поперечного сечения $F_2 = 25 \text{ см}^2$, высоту 5 см , модуль упругости $0,6 \cdot 10^4 \text{ кН/см}^2$. При сбрасывании груза с высоты $0,12 \text{ м}$ величина амплитуды сигнала составила 38 тонн ; при высоте $1,0 \text{ м}$ – 112 тонн ; при высоте $2,0 \text{ м}$ – 160 тонн . Измеренные напряжения составили соответственно $15,2 \text{ кН/см}^2$; $44,8 \text{ кН/см}^2$ и 64 кН/см^2 . После подстановки исходных данных в формулу (6) получены напряжения соответственно $17,3 \text{ кН/см}^2$; $50,0 \text{ кН/см}^2$; $70,7 \text{ кН/см}^2$. Расхождение между данными составляет $9...12 \%$, что находится в пределах допустимой погрешности и обосновывает достоверность предложенной методики испытаний.

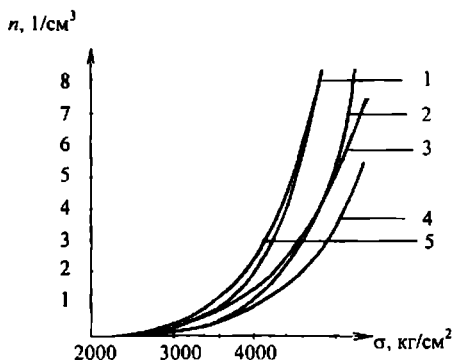


Рис. 5. Вид функций дробимости: 1 – овручский гранит; 2 – магнетитовые сланцы; 3 – звенигородский гранит; 4 – янцевский гранит; 5 – магнетитовые кварциты

В соответствии с разработанной методикой были проведены испытания образцов горных пород по определению функций дробимости (рис. 5). Из железорудного месторождения, разрабатываемого Ингулецким ГОКом, испытаниям были подвергнуты роговики магнетит-силикатный и силикат магнетитовый, джеспилит магнетитовый и джеспилит гематитовый; из месторождения, разрабатываемого Полтавским ГОКом – магнетитовый кварцит и кумингит-магнетитовый сланец. Из гранитных месторождений испытаны образцы гранита, разрабатываемого Овручским карьером в Житомирской обл.,

Янцевским карьером в Запорожской обл., Звенигородским карьером в Кировоградской обл.

Экспериментальные кривые были аппроксимированы зависимостью $n = A\sigma^b$. В результате получены аналитические выражения функций дробимости:

1) для гранита Овручского карьера

$$n = 512 \cdot 10^{-30} \sigma^{7.65};$$

2) для магнетитовых сланцев (ИнГОК, ПГОК)

$$n = 85276 \cdot 10^{-30} \sigma^{7.0};$$

3) для гранита Звенигородского карьера

$$n = 7633543000 \cdot 10^{-30} \sigma^{5.625};$$

4) для гранита Янцевского карьера

$$n = 5653040 \cdot 10^{-30} \sigma^{-6.42};$$

5) для магнетитовых кварцитов (ИнГОК, ПГОК)

$$n = 1560500 \cdot 10^{-30} \sigma^{6.71}.$$

Анализ этих зависимостей показал, что чем больше крутизна кривой функции дробимости, тем лучше дробится порода при импульсном приложении нагрузки.

Чтобы убедиться в том, что функция дробимости, установленная экспресс-методом, отражает показатели реального производственного процесса, были проведены эксперименты по установлению ее вида при взрывании образцов янцевского гранита. При этом осуществлялось измерение напряжений в образце и подсчет удельного количества образовавшихся кусков по описанной выше методике. Испытуемые образцы имели призматическую форму длиной 15 см, сечением 5×5 см и нагружались взрывом с торца. Одним из основных условий таких испытаний является нагружение образцов однородным полем напряжений с постоянной интенсивностью. Реализация этого условия осуществлялась путем приклеивания к наружному торцу образца куска гранита произвольной формы и иного цвета с одной плоской гранью. Его объем значительно превышал объем образца, а плоская грань обеспечивала надежный контакт с образцом. Этим исключалось влияние отраженного поля напряжений, которое гасилось при отражении от неровностей. К внутреннему торцу образца приклеивался образец гранита кубической формы (рис. 6). Демпферный образец приклеивался клеем БФ-2, в результате чего после прохождения волны сжатия контакт демпферного образца с испытуемым нарушался, что препятствовало прорастанию в него трещин.

Измерение напряжений производилось тензодатчиками с коэффициентом усиления $k_y = 0,025$. Нагружение осуществлялось взрывами зарядов ТЭНа массой от 3 до 18 г. В первом испытуемом образце напряжения измерялись двумя тензодатчиками, наклеенными на противоположных гранях, для

установления степени однородности поля напряжений. При взрыве заряда массой 3 г датчики зафиксировали напряжения $31,9 \text{ кН/см}^2$ и $31,7 \text{ кН/см}^2$, что свидетельствует о равномерности нагружения.



Рис. 6. Модель для определения функции дробимости при взрывном нагружении образца

Дальнейшие измерения напряжений производились одним тензодатчиком, расположенным на середине грани образца. С каждой массой заряда испытывалось 5 образцов. На рис. 7 приведены типичные осциллограммы импульсов от действия различных по массе зарядов.

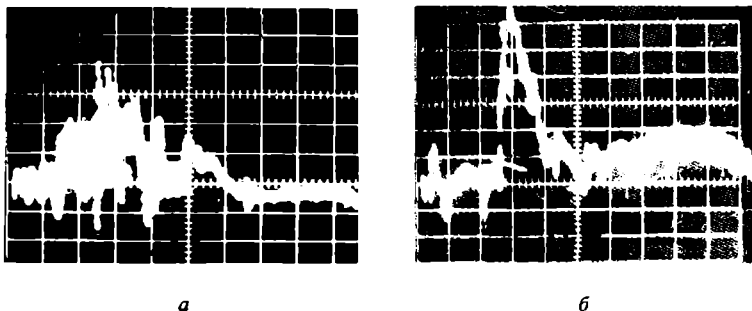


Рис. 7. Осциллограммы импульсов напряжений в образце от взрыва зарядов ТЭНа массой 3 г (а) и 10 г (б)

Чтобы куски демпфирующего образца и образца, гасящего отраженную волну, не вносили искажений в определение n , они были подобраны из гранита иного цвета.

В таблице приведены результаты экспериментов по определению функции дробимости при взрывном нагружении и экспресс-методом.

Данные таблицы показывают, что значения функций дробимости, определенные двумя методами, достаточно хорошо коррелируют. При нагружении зарядом массой 3 г среднее расхождение с данными экспресс-метода составляет 1,9 %; при взрывании зарядов массой 6 г – 9,5 %; 8 г – 12,7 %; 10 г –

4,3 %; 18 г – 4,29 %. Среднее расхождение по результатам всех экспериментов равно 6,5 %, что свидетельствует о достаточной достоверности экспресс-метода определения функции дробимости.

Сравнение результатов измерений параметров функции дробимости при взрывном нагружении и экспресс-методом

№ образца	Объем образца	Масса заряда, г	Амплитуда сигнала, делений	Величина нагрузки, т	Напряжение, кН/см ²	Удельное количество кусков, см ⁻³	Удельное количество кусков, измеренное экспресс-методом, см ⁻³
9	382	3	11;10,4	79,5;79,25	31,9; 31,7	0,1; 0,1	0,18; 0,17
10	380	3	10	78	31,2	0,25	0,157
12	437	3	9,6	74,25	29,7	0,06	0,11
17	387	3	10	75,75	30,3	0,17	0,13
37	462	3	10	77,5	31,0	0,2	0,15
18	428	6	29,2	85,75	34,3	0,38	0,29
36	40	6	30	88,6	35,4	0,45	0,35
21	432	6	30,5	89,25	35,8	0,43	0,38
43	419	6	30,5	89,25	35,7	0,3	0,37
47	413	6	30	87,5	35	0,34	0,33
20	422	8	30	87,5	35	0,36	0,33
27	435	8	31,2	91,5	36,5	0,45	0,43
33	432	8	31,5	92	36,8	0,52	0,45
41	430	8	31,5	92,5	37	0,55	0,47
46	430	8	31,8	93,75	37,5	0,6	0,52
22	397	10	33	96,25	38,5	0,5	0,6
25	385	10	33,8	98,75	39,5	0,65	0,72
32	412	10	34,3	100	40	0,75	0,78
44	410	10	32	97,5	39	0,6	0,66
46	415	10	34,8	101,25	40,5	0,95	0,84
34	387	18	35,5	107,5	43	1,15	1,23
39	448	18	38,2	111,25	44,5	1,4	1,54
40	470	18	38,6	112,5	45	1,56	1,66
42	457	18	38,2	111,25	44	1,38	1,43
45	432	18	37	110	44	1,5	1,43

Как видно из приведенных данных, функция дробимости действительно является представительной характеристикой сопротивляемости горных пород действию взрыва и может выступать как критерий разрушения хрупких сред взрывом.

1. Крысин Р. С., Новинский В. В. Закономерности распределения размеров кусков в развале горной массы // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія "Гірництво": НТУУ "КПІ". – 2002. – Вип. 6. – С. 21–30.

2. Барон Л. И. Кусковатость пород и методы ее измерения. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 124 с.

УДК 622.235

ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ТА МІЦНІСНИХ ФАКТОРІВ НА РУХ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ ЗАРЯДУ ВИБУХОВОЇ РЕЧОВИНИ

***В. Г. Кравець, докт. техн. наук, О. О. Фролов, канд. техн. наук (НТУУ "КПІ"),
П. З. Луговий, докт. техн. наук (ІМ НАН України),
А. З. Маргарян, інж. (ДержНІХП, м. Шостка)***

Рассмотрено влияние параметров конструкции цилиндрической оболочки заряда взрывчатого вещества, физико-механических характеристик материала оболочки и свойств взрывчатого вещества на процесс движения оболочки.

Розширення та стиснення оболонок зарядів вибухової речовини (ВР) під дією продуктів детонації ВР використовується при зварюванні вибухом, штампуванні, обтисканні капсул з різними матеріалами тощо. Приклади розв'язання подібних задач для випадку циліндричної симетрії в одномірному наближенні наведено в [1, 3, 4].

При виробництві та збиранні системи оболонка–ВР виникають певні технологічні похибки, які призводять до відхилення руху оболонок від ідеальної осі. Міра впливу похибок залежить як від виду, величини і характеру розподілення останніх, так і від параметрів конструкції – товщини стінок, фізико-механічних характеристик матеріалу оболонок, властивостей ВР тощо. Для обґрунтування вимог до рівня точності виготовлення системи оболонка–ВР необхідно оцінити міру впливу різних видів відхилення на рух оболонок. Розглянемо це на прикладі розв'язання в плоскій постановці задачі про динамічне деформування системи, яка складається з двох нескінченно довгих пружнопластичних циліндричних оболонок, простір між якими заповнений ВР (рис. 1). При цьому враховуємо такі технологічні похибки, як неоднакова щільність ВР по коловій координаті, різна товщина стінок внутрішньої та зовнішньої оболонок, неспіввісність внутрішньої та зовнішньої оболонок або різна товщина шару ВР, а також комбінацію вищенаведених факторів. Вважаємо, що різна товщина заряду ВР і стінок внутрішньої та зовнішньої оболонок зумовлена неспіввісністю внутрішньої та зовнішньої оболонок. В