

## ВЛИЯНИЕ АКТИВНЫХ СИЛ НА ПАРАМЕТРЫ УДАРНОГО ИМПУЛЬСА ПРИ КОНТРОЛЕ ВЯЗКОУПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ

**В.А.Рудницкий**, доктор технических наук, Институт прикладной физики НАН Беларуси;  
**А.П.Крень**, кандидат технических наук, Институт прикладной физики НАН Беларуси;  
**И.Г.Дейкун**, аспирант кафедры СМИС

При испытании вязкоупругих материалов методом ударного вдавливания одним из основных условий достижения высокой точности определения физико-механических характеристик является обеспечение достоверной регистрации измерительным прибором значений ударного импульса  $i$ , длительности  $\tau$  и максимальной глубины вдавливания индентора  $\alpha_{\max}$ . Согласно результатам, полученным авторами [1, 2, 3], уравнение для контактной силы на активном этапе удара в общем виде описывается следующей зависимостью:

$$F = k\alpha^{3/2} + \eta v\alpha^\lambda \pm Q, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – глубина вдавливания;

$k$  – динамическая контактная жесткость;

$v$  – текущая скорость внедрения индентора;

$\eta$  – коэффициент вязкости;

$Q = mg$  – сила тяжести;

$M$  – масса индентора;

$G$  – ускорение свободного падения;

$\lambda$  – коэффициент.

В данной формуле знаки "±" относятся соответственно к удару, при котором направление действия силы тяжести совпадает с направлением движения индентора (удар об «пол») и удару, при котором направления движения индентора и действия силы тяжести противоположны (удар о «потолок»).

На практике наиболее часто производят испытания изделий, расположенных горизонтально (удар об «пол»). В этом случае вектор  $Q$  будет направлен вертикально вниз и иметь знак, противоположный знакам первых двух составляющих силы в уравнении (1). Для испытательного удара, при индентировании вязкоупругих материалов, последним слагаемым в уравнении для контактной силы обычно пренебрегают [4]. В то же время при испытании материалов с относительно низкой жесткостью, например полиуретанов, ввиду наличия неоднородностей в слоях материала для получения объективных данных о свойствах необходимо осуществить съем информации с достаточной большой глубины и площади поверхности. Из-за того, что размеры нагружающего устройства, как правило, ограничены, необходимая глубина внедрения индентора достигается путем увеличения предупредарной энергии за счет увеличения массы индентора. При этом контактное усилие становится сопоставимым с силой тяжести и неучет ее влияния может привести к достаточно значительным погрешностям в определении длительности удара, максимального перемещения и ударного импульса, текущее значение которого вычисляется по формуле

$$I = \int_0^{\tau} F(\alpha, v) \cdot dt = m \cdot (v_0 - v) - Q \cdot \tau,$$

где  $v_0$  – предупредная скорость индентора;  
 $v$  – скорость индентора после соударения;  
 $\tau$  – время ударного процесса.

Влияние силы тяжести можно проиллюстрировать с помощью анализа изменения потенциальной энергии в процессе вдавливания индентора при ударе. Учитывая, что потенциальная энергия при ударе создается только силами упругого деформирования, запишем выражение для потенциальной энергии:

$$W = \int_0^{\alpha} (k\alpha^{3/2} - Q)d\alpha = \frac{2}{5}k\alpha^{5/2} - Q\alpha, \quad (2)$$

которое складывается из потенциальной энергии сил гравитации

$$W_{gp} = -Q\alpha \quad (3)$$

и запасенной упругой энергии деформированного материала

$$W_y = \frac{2}{5}k\alpha^{5/2},$$

где  $k$  – контактная жесткость (в уравнении Герца).

В соответствии с уравнением (2) динамика системы будет определяться соотношением этих двух энергий.

При этом из уравнения (3) следует, что массой индентора можно пренебречь при условии

$$\alpha \gg \left(\frac{5Q}{2k}\right)^{\frac{2}{3}}.$$

На рис. 1 представлена зависимость изменения потенциальной энергии  $W$  от глу-

бины вдавливания  $\alpha$  при индентировании образца из эластичного пенополиуретана марки N 2336 (ГО 2254-001-51818280-99), имеющего плотность  $22 \text{ кг/м}^3$  ( $k = 2830 \cdot 10^3$ ), сферическим индентором (радиус наконечника  $R = 3,25 \text{ мм}$ , масса  $m = 16,62 \text{ г}$ ).

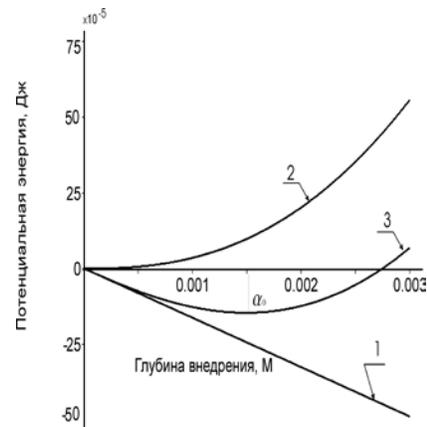


Рис. 1. Изменение потенциальной энергии при упругом ударе:

- 1 – потенциальная энергии сил гравитации;
- 2 – запасенная упругая энергии деформирования;
- 3 – суммарная потенциальная энергия при ударе

Как видно из рисунка, существует некоторое  $\alpha_0$ , соответствующее минимуму потенциальной энергии, значение которого зависит от соотношения массы индентора (силы тяжести) и сопротивления материала вдавливанию, характеризующегося в данном случае значением  $k$ :

$$\alpha_0 = \left(\frac{Q}{k}\right)^{\frac{2}{3}}.$$

Здесь следует отметить, что величина  $k$  в уравнении (4) для статического и динамического нагружений будет соответствовать различным значениям контактных сил. На рис. 2,а схематично представлены фазовые портреты при ударе об "пол" и "боковую стенку" для пенополи-

уретана марки ППУ-215 с плотностью 56

кг/м<sup>3</sup>.

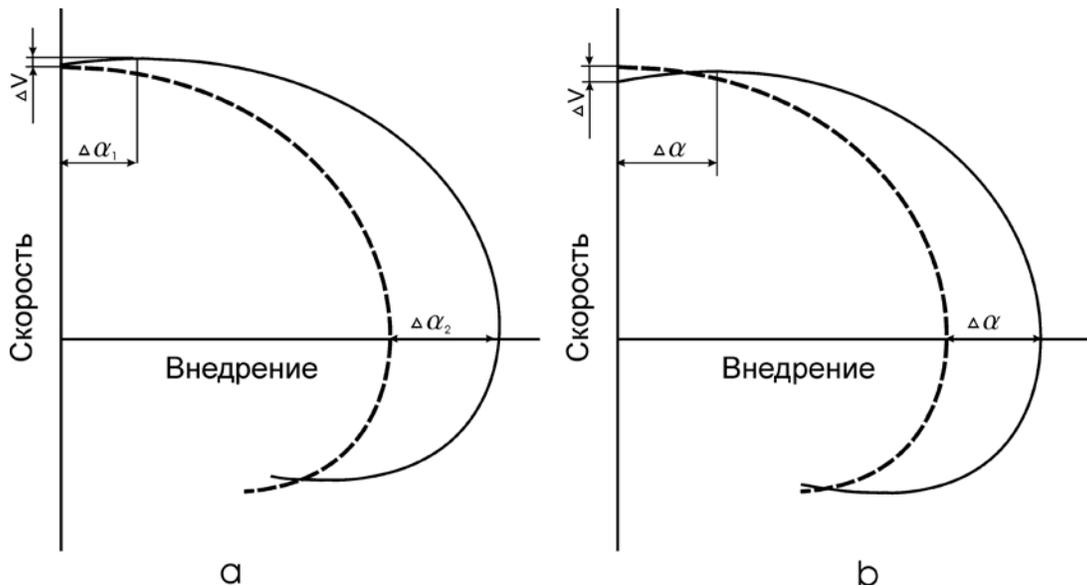


Рис. 2. Фазовые портреты при ударе: а – при ударе об «пол» (сплошная линия) и о «боковую стенку» (штриховая линия), б – при ударе об «пол» с учетом (сплошная линия) и без учета силы тяжести (штриховая линия)

Основное отличие в приведенных графиках заключается в увеличении скорости движения индентора в начальный момент времени после контакта для случая удара об "пол", несмотря на наличие нарастающего контактного сопротивления. В случае когда сила тяжести при ударе направлена перпендикулярно направлению вдавливания, минимум потенциальной энергии соответствует точке начала координат, и скорость индентора начинает падать сразу после момента касания.

Для исследования ударных процессов был использован ударный механизм (рис. 3), состоящий из поворотного рычага 1, закрепленного одним концом на вращающейся оси 2 и несущего на другом конце боек 3 (индентор) с вмонтированным в него постоянным магнитом 4.

При этом ударный механизм будем считать абсолютно твердым телом, представляющим собой систему материальных точек, расстояния между которыми остаются неизменными в процессе удара, т.е. связи между всеми точками системы абсолютно жесткие. При ударе, в момент касания испытуемой поверхности, индентор расположен таким образом, что линия действия ударного импульса перпендикулярна плоскости, на которой находятся ось вращения и центр масс системы. Кроме этого вектор ударного импульса проходит через центр масс системы. В этом случае нагрузка на ось вращения будет отсутствовать, потери энергии будут минимальными и процесс удара можно рассматривать как взаимодействие одиночного индентора с массой, равной приведенной массе индентора и поворотного рычага.

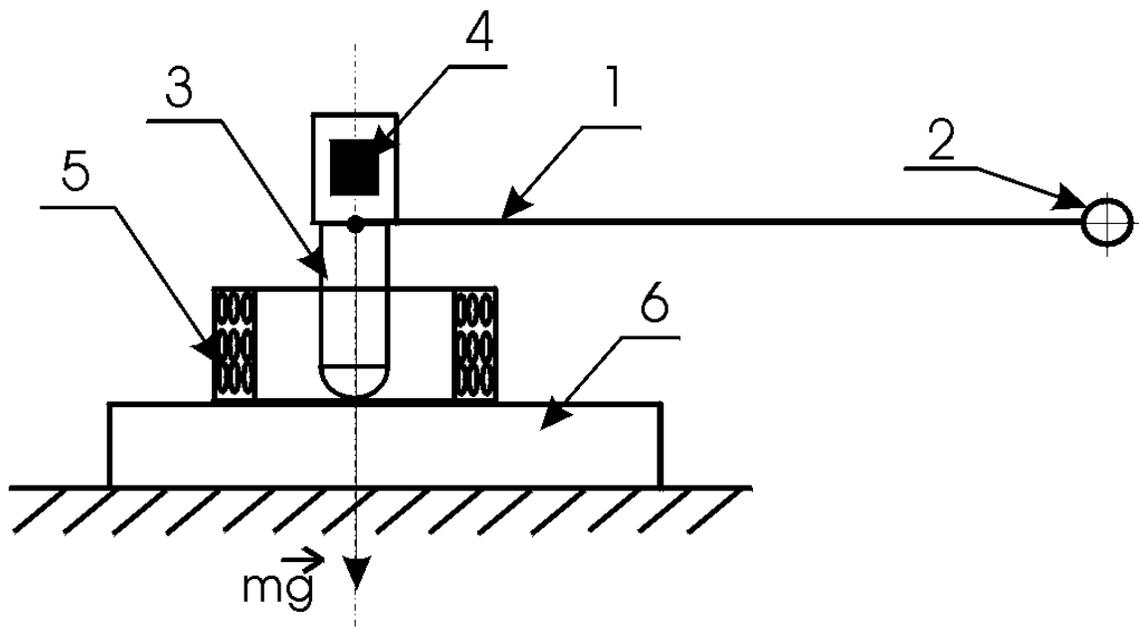


Рис. 3. Схема ударного механизма:  
 1 – поворотный рычаг; 2 – ось вращения; 3 – индентор; 4 – магнит;  
 5 – магнитоиндукционный датчик; 6 – испытуемый образец

На практике удар индентором, вращающимся вместе с рычагом, будет отличаться от удара, наносимого посредством свободно падающего индентора, из-за наличия в реальных телах внутренней степени свободы, что не учитывается в рамках модели абсолютно твердого тела и проявляется в нашем случае в виде потерь энергии удара на вибрацию рычага и волновые процессы в ударной системе. Эти потери, однако, не превышают 1%, вследствие чего расчетная схема удара прини-

мается такой же, как и для незакрепленного индентора.

Рассмотрим более подробно влияние активных сил, анализируя графические зависимости  $v(t)$  и  $F(t)$ . На рис. 4 представлен график изменения скорости  $v_p(t)$  индентора, полученный с помощью прибора ИМПУЛЬС-1Р, разработанного в Институте прикладной физики НАН Беларуси, при испытаниях образца из пенополиуретана N 2336.

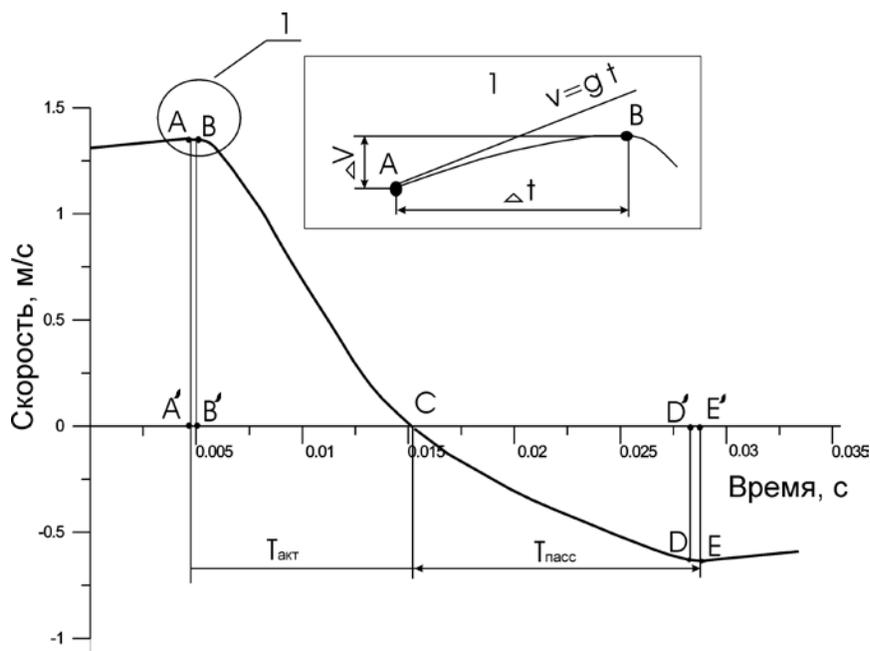


Рис. 4. Изменение скорости индентора в процессе ударного взаимодействия с пенополиуретаном N 2336

Данная кривая получена путем соответствующего пересчета зависимости ЭДС от времени, снимаемой с магнитоиндукционного датчика 5 (см. рис. 3) и обусловлена действием силы тяжести и сил сопротивления. Точка *A* на рис. 4 соответствует моменту касания индентором испытуемой поверхности. Слева от этой точки мы видим прямую линию, описывающую процесс свободного падения индентора под действием силы тяжести согласно уравнению  $v = gt$ . В момент касания индентором испытуемой поверхности в точке *A* начинается «отход» скорости от прямой линии, хотя рост скорости индентора сохраняется (вставка 1 на рис. 4). Это происходит до момента достижения ударной системой максимума кинетической энергии или минимума потенциальной энергии (см. рис. 1), что соответствует равенству контактной силы приведенной силе тяжести ударной системы (точка *B* на

графике). После этого наблюдается резкое уменьшение скорости по абсолютной величине вплоть до точки *C*, характеризующей окончание активной части удара. Пассивная часть удара происходит за счет упругих деформаций испытуемого материала в месте контакта и отображается на графике отрезком *CE*. Промежуточная точка *D* соответствует максимуму восстановленной кинетической энергии ударной системы. В точке *E* начинается прямолинейный участок изменения скорости индентора, характеризующий свободное движение индентора при отскоке. Как можно судить из рис. 4, прямолинейные участки скорости свободного падения и отскока строго параллельны, поскольку характеризуются одинаковым ускорением  $g$ . Фазовый портрет данной кривой показан на рис. 2, б.

Необходимую нам текущую контактную силу  $P_k(t)$  можно получить, если

дифференцировать скорость, обусловленную непосредственно сопротивлением материала, без влияния силы тяжести, т.е. использовать зависимость

$$v_k(t) = v_p(t) - v_g(t),$$

где  $v_g(t)$  – скорость, образующаяся за счет действия силы тяжести.

В то же время прямое определение  $v_g(t)$  несколько затруднительно из-за сложностей при описании процесса удара. Поэтому контактную силу, необходимую для расчета механических характеристик, получим путем дифференцирования полученной результирующей скорости индентора  $v_p(t)$  с последующим умножением на массу ударной системы  $m$  и вычитанием силы тяжести из полученного значения по следующей формуле:

$$P_k = -m \left[ -\frac{dv_p(t)}{dt} + g \right]. \quad (4)$$

Важным условием точного расчета параметров удара и вычисления на их основе механических характеристик материалов является правильное определение начала момента касания индентором испытуемой поверхности. Точка  $A$  (см. рис. 4), соответствующая моменту «отхода» от прямой, воспроизводится с некоторой погрешностью и часто не имеет четко выраженного характера. Поэтому для регистрации начала удара лучше использовать уравнение (4), где величина  $g$  является постоянной и не зависит от погрешности измерений.

На рис. 5 показана зависимость  $P(t)$  (кривая 1), полученная в результате дифференцирования  $v_p(t)$ . На данном рисунке хорошо видна точка начала контакта  $A$ , в которой сила переходит от прямой к криволинейной зависимости.

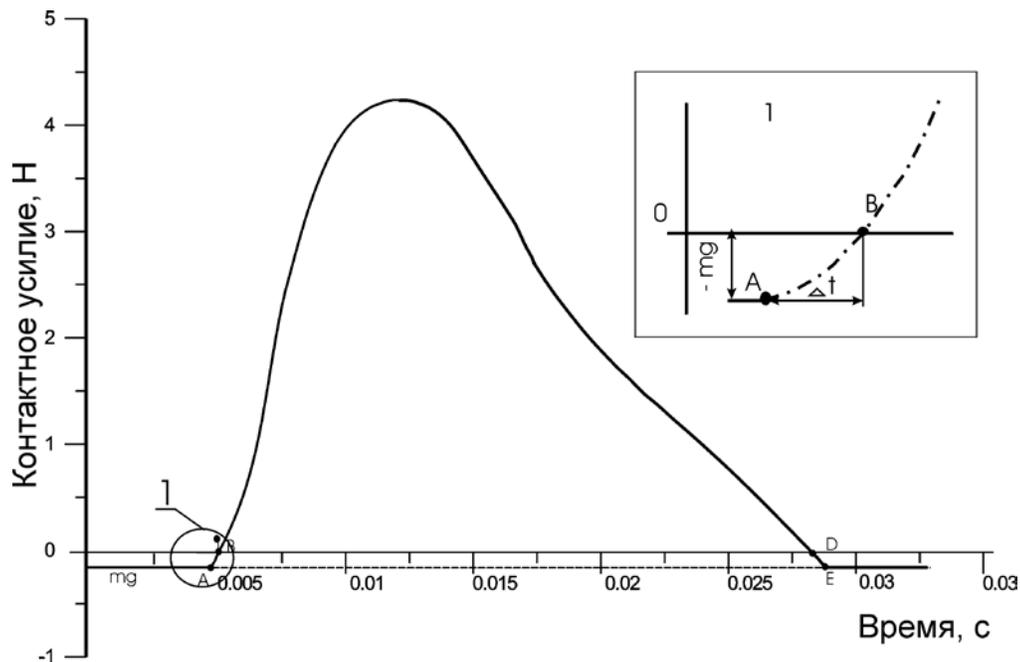


Рис. 5. Зависимость полного контактного усилия, получаемого с учетом реальной точки касания

Рис. 4 и 5 дают возможность оценить источники погрешности, возникающие при обработке данных. Из рис. 4 следует, что погрешность будет возникать при определении времени удара, поскольку время рассчитывалось как отрезок равный  $B'D'$ , тогда как истинное значение времени удара будет равно отрезку  $A'E'$ . Неверное определение точки касания окажет влияние и на значение внедрения индентора, поскольку оно дополнится значениями, равными площадям фигур  $AA'BB'$  и  $DD'EE'$ . Рис. 5 дает хорошее представление о том, что значение контактного уси-

лия за вычетом силы тяжести сохранит свое значение, а неучтенной окажется область отрицательных значений, в которой сила тяжести превосходит по своему значению силы сопротивления вдавлению.

Проанализируем, насколько важен учет данных областей для параметров ударного импульса. С этой целью были взяты полимерные материалы, имеющие различную плотность и жесткость (резины, интегральные, эластичные пенополиуретаны), сведения о которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики испытываемых материалов

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Динамическая жесткость к, · 10 <sup>3</sup> , Н/м <sup>3/2</sup>
Резина 7-4004-112	1670	20611
Резина ИРП-1346	1047	3637
Пенополиуретан полужесткий	324	107
Пенополиуретан эластичный формуемый ППУ-215	56	11,11
Пенополиуретан N 2336	22	2,83
Пенополиуретан S 1820	18	1,92

Испытания проводились индентором массой  $m = 16,62$  г с радиусом сферического наконечника  $R = 3,23$  мм и началь-

ной скоростью 1,36 м/с. Изменение параметров удара отражено в табл. 2.

Таблица 2

Материал	Усилие		Время			Перемещение			Импульс	
	Максимальное усилие $F_{\max}$ , Н	Отношение $mg/F_{\max}$ , %	Время удара, мкс	Дополнительное время, мкс	Отношение, %	Максимальное внедрение, мм	Неучтенное перемещение на активном этапе удара, мкм	Отношение, %	Импульс, $10^{-6}$ , Нс	Отношение, %
Резина 7-4004-112	98	0,17	477	10,64	2,28	0,25	3,96	1,01	14856	0,012
Резина ИРП-1346	18	0,9	323	17,58	0,55	1,37	1,26	0,57	43285	0,066
Пенополиуретан полужесткий	8,65	1,9	5200	210	4,22	1,70	132	4,86	92902	0,368
Пенополиуретан эластичный ППУ-215	5,24	3,17	13662	1085	8,63	4,58	599	8,17	10129	1,717
N 2336	4,44	3,74	25909	26139	11,22	7,92	1491	11,77	9565	4,26
S 1820	3,64	4,57	30312	33854	12,57	8,55	1931	14,12	88478	5,87

Как видно из таблицы, значение дополнительного перемещения для образца из пенополиуретана N2336 несколько меньше, чем теоретическое, показанное на рис. 1, ввиду наличия вязкой составляющей силы.

Таким образом, в работе проведен анализ влияния гравитационной силы на основные параметры ударного взаимодей-

ствия жесткого индентора с вязкоупругими материалами различной жесткости. Показано, что неучет гравитационной силы в уравнении контактных сил взаимодействия может приводить к погрешностям до 14% в определении длительности и глубины вдавливания при контроле изделий из эластичного полиуретана.

### Литература

1. Инженерные методы исследования ударных процессов // Г.С.Батуев, Ю.В.Голубков, Л.К.Ефремов, А.А.Федосов. – М.: Машиностроение, 1977. – 240 с.
2. Hunt K. H., Grossley F.R.E. Coefficient of restitution Interpreted as damping in vibroimpact // Trans. ASME. J. Appl. Mech.– 1975. – Vol. 97.– P.440-445.
3. Taguchi Y.-H. J. A new origin of a convective motion: Elastically induced convection in granular materials // Phys. Rev. Lett. – 1992. – No 69. – P. 1367-1370.
4. Hunter S. C. The Hertz problem for a rigid spherical indenter and viscoelastic half-space // J. Mech. Phys. Solids.– 1960. – No 8. – P. 219-234.