

А.В. Грачев, Д.В. Клеников, С.Д. Руднев

СТЕНД, МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СВОБОДНОМ УДАРЕ

Для экспериментального определения работы разрушения твердых тел, предела прочности при динамическом приложении нагрузки разработан стенд однократного разрушения свободным ударом, предложена методика расчета и приведены результаты экспериментов и расчета предельного напряжения при разрушении для тел с оболочками на примере кедровых орешков.

Свободный удар, экспериментальный стенд, методика расчета, предел прочности при динамическом разрушении.

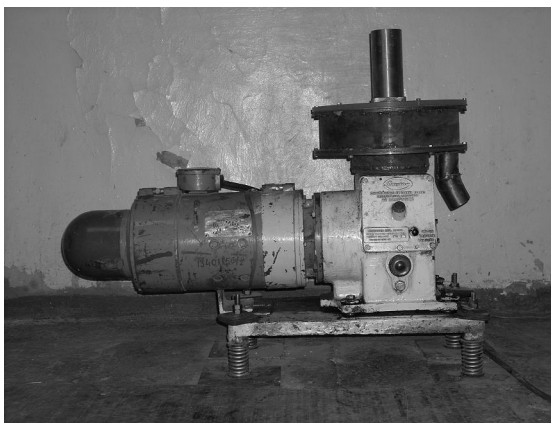
Введение

Определение кинетической энергии рабочих органов либо частиц материала, необходимой и достаточной для разрушения твердого тела при динамическом приложении нагрузки, является центральной задачей при проектировании аппаратов, разрушающих материал свободным ударом. Расчет оборудования для селективной дезинтеграции, дробления и измельчения твердых тел предусматривает знание прочностных параметров материала – предела прочности и модуля упругости при разрушении. Целью работы является разработка экспериментального стенда, методики расчета и определение работы разрушения природных объектов с оболочками.

Объектами исследований является растительное сырье, содержащее оболочки, не связанные с ядром и проявляющие упругие свойства; **методы исследований** базируются на фундаментальных физических законах.

Для экспериментального определения предела прочности материалов при динамическом приложении нагрузки свободным ударом был разработан стенд, показанный на рис. 1.

Рис. 1. Общий вид стенда



Конструкция стенда (рис. 2) включает цилиндрический корпус 10, в котором на вертикальном валу 14 закреплен диск-ускоритель 6, представляющий собой быстро вращающийся ротор. На верхней поверхности диска установлен полый стакан 8, к боковым отверстиям которого прикреплены четыре радиальные разгонные трубки 7. На нижней поверхности диска закреплены четыре лопатки 5 для усиления вентиляционного эффекта, который способствует выводу осколков из зоны разрушения. На внутренней цилиндрической поверхности корпуса установлены неподвижные отражательные ребра 11 с углом закрепления 45°. Вертикальный вал 14, установленный в горловой опоре 13, снабженной горизонтальными пружинами, приводится во вращение от горизонтального вала 3 привода через винтовую пару 4. Для создания высоких угловых скоростей вращения рабочего органа использован привод-мультипликатор жидкостного сепаратора ОМ-1 производства завода «Смычка» (г. Плавск). Горизонтальный вал 3, установленный в шарикоподшипниковых опорах 15, через центробежную фрикционную муфту 2 сопряжен с валом электродвигателя 1 постоянного тока 2ПБ-112 мощностью 0,75 кВт с частотой вращения ротора до 3000 об/мин.

Принцип действия устройства заключается в следующем. Исследуемые единичные твердые тела, подлежащие разрушению свободным ударом, подаются в загрузочный патрубок 9 устройства.

При попадании из нижнего отверстия загрузочного патрубка 9 в стакан 8 быстро вращающегося диска-ускорителя 6 материал меняет направление с вертикального на горизонтальное и поступает в разгонные трубки 7.

Под действием центробежных сил, развиваемых при вращении ротора 6, начинается процесс движения единичных твердых тел в направляющих разгонных трубках 7. Частицы материала разгоняются в трубках 7 диска-ускорителя 6 до определенной скорости и срываются с их поверхности. После вылета из разгонной трубки 7 в рабочее пространство твердые тела ударяются о поверхность ребер 11 и разрушаются вследствие свободного удара.

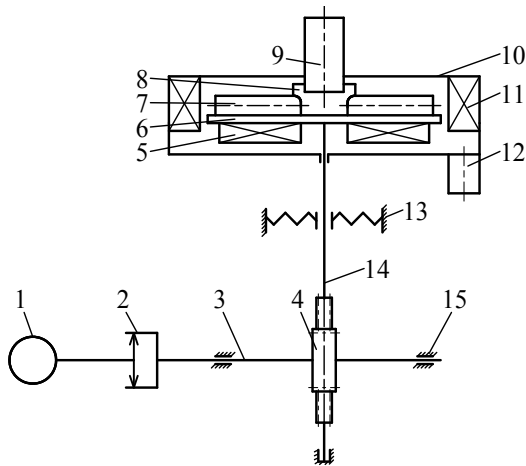


Рис. 2. Принципиальная схема стенда для изучения процесса разрушения твердых тел свободным ударом: 1 – электродвигатель; 2 – центробежная фрикционная муфта; 3 – горизонтальный вал; 4 – винтовая пара; 5 – лопатки; 6 – диск-ускоритель; 7 – разгонные трубки; 8 – стакан; 9 – загрузочный патрубок; 10 – корпус; 11 – отражательные ребра; 12 – разгрузочный патрубок; 13 – горловая опора; 14 – вертикальный вал; 15 – опоры вала

При вращении разгонного диска возникает значительный вентиляционный эффект. Как только прекращается центробежное действие разгонных трубок 7, частицы материала начинают тормозиться в свободном пространстве рабочей камеры под действием сопротивления воздуха, который движется медленнее частицы. Для уменьшения влияния аэродинамического сопротивления воздуха при движении тела в свободном пространстве на нижней поверхности диска-ускорителя 6 установлены четыре лопатки 5, которые при вращении ротора создают дополнительный вентиляционный эффект. При этом уменьшается влияние сопротивления воздуха на движущееся к отражательным ребрам тело.

Схема однократного разрушения твердых тел свободным ударом представлена на рис. 3.

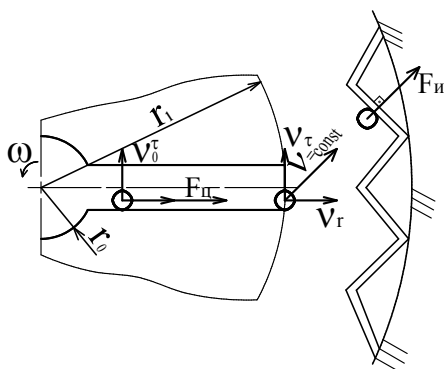


Рис. 3. Схема однократного разрушения твердых тел свободным ударом

Процесс разрушения твердых тел в представленном устройстве (см. рис. 2) осуществляется за счет свободного удара частиц об отбойную поверхность отражательных ребер. При этом радиальные трубки ротора выполняют разгонную функцию.

Для разрушения твердых тел создается кинетическая энергия, зависящая от скорости нагружения v . Кинетическая энергия трансформируется в потенциальную энергию деформирования и разрушения частиц материала и, как следствие, в конечном итоге приводит к образованию новой поверхности.

Расчет предела прочности твердого тела в результате свободного удара в данном устройстве (см. рис. 3) можно осуществить при помощи разработанной методики, представленной ниже. Рассмотрим частицу материала массой m , радиуса R и площадью поперечного сечения $S_{пр}$, находящуюся в кольцевом пространстве разгонной трубки ротора и движущуюся к периферии ротора и далее к отражательным ребрам. В кольцевом пространстве радиальной разгонной трубки устройства в момент разгона на движущуюся частицу действует центробежная сила $F_{Ц}$, равная:

$$F_{Ц} = ma_{ц},$$

где $a_{ц}$ – центробежное ускорение.

В момент столкновения тела с отражательными ребрами возникает сила инерции $F_{И}$:

$$F_{И} = mr_1\omega^2, \quad (1)$$

где r_1 – радиус диска; ω – угловая скорость разгонного диска.

При попадании частицы в радиальную разгонную трубку в начальный момент времени она обладает тангенциальной скоростью v_0^{τ} , равной:

$$v_0^{\tau} = \omega r_0, \quad (2)$$

где r_0 – радиус начальной окружности.

На выходе из разгонного диска в кольцевой зазор рабочей камеры скорость движения тела имеет две составляющие: тангенциальную v_{τ} и радиальную v_r и определяется следующим образом:

$$v = \sqrt{(v_{\tau})^2 + (v_r)^2} \quad (3)$$

В свою очередь

$$v_r = \sqrt{\frac{F_{И}r_1}{m}}. \quad (4)$$

После подстановки (1) в (4) получим:

$$v_r = \omega r_1. \quad (5)$$

Подставляя в уравнение (3) соответствующие значения скоростей v_t и v_r из формул (2) и (5), окончательно получим:

$$v = \sqrt{2}\omega r_1. \quad (6)$$

В результате удара об отражательные ребра, установленные на внутренней цилиндрической поверхности корпуса устройства, твердое тело разрушается или не разрушается в зависимости от установленной скорости вращения разгонного диска. Если произошло разрушение половины испытуемых образцов при установленной постоянной скорости испытаний, то критическую кинетическую энергию можно вычислить через первый член закона Ребиндера – его упругую составляющую.

Допуская, что кинетическая энергия K ударяющегося тела полностью переходит в потенциальную энергию Π упругой деформации и разрушения, предположим, что

$$K = \Pi. \quad (7)$$

Из закона П.А. Ребиндера [1] о работе разрушения твердых тел:

$$A = \frac{\sigma_{np}^2 \Delta V}{2E},$$

где σ_{np} – предельное напряжение разрушения; ΔV – объем разрушаемого материала, в котором достигнуто предельное состояние; E – модуль упругости разрушаемого материала.

Подставляя в уравнение (7) соответствующие значения энергий, получим:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{\sigma_{np}^2 \Delta V}{2E}. \quad (8)$$

С учетом уравнения (6) из равенства (8) выражаем предел прочности σ_{np} материала:

$$\sigma_{np} = \omega_{кр} r_1 \sqrt{\frac{2mE}{\Delta V}}, \quad (9)$$

где $\omega_{кр}$ – угловая скорость, при которой происходит разрушение половины используемых образцов.

Для сферического тела, состоящего из двух структурных элементов – оболочки и ядра, не имеющих поверхностной связи между собой, объем ΔV_{np} разрушаемого тела определяется следующим образом:

$$\Delta V = \frac{4}{3} \pi (R^3 - r^3), \quad (10)$$

где R – радиус оболочки; r – радиус ядра.

Тогда предельное напряжение σ_{np} при разрушении сферического тела с оболочкой, с учетом подстановки (10) в (9), можно определить выражением:

$$\sigma_{np} = \omega_{кр} r_1 \sqrt{\frac{3mE}{2\pi(R^3 - r^3)}}. \quad (11)$$

В соответствии с разработанной методикой расчета прочностных свойств материалов при разрушении свободным ударом был проведен расчет предельных напряжений разрушения σ_{np} оболочек семян кедрового при их различной влажности. Для установления диапазона изменения угловых скоростей диска-ускорителя был проведен ряд предварительных поисковых экспериментов по разрушению восьми партий кедровых орешков. Выбрали образцы близких геометрических размеров, подвергнутых сушке до остаточной равновесной влажности 6–8 %. Формировали партии по десять штук в каждой. Плавным изменением скорости вращения разгонного диска добивались разрушения оболочек половины испытуемых образцов при сохранении целостности ядра. Для определения угловой скорости диска-ускорителя механическим тахометром измеряли частоту вращения вала электродвигателя. Полученное значение умножали на величину передаточного отношения привода-мультипликатора, равную 5,2, вычисляя частоту вращения вертикального вала, на котором закреплен диск. С учетом полученного значения рассчитывали угловую скорость разгонного диска.

Предварительные испытания показали, что начало разрушения оболочек образцов семян кедрового было отмечено при частоте вращения диска-ускорителя $19,1 \text{ с}^{-1}$, а при частоте вращения 33 с^{-1} происходит переизмельчение оболочки и разрушение ядра. Оптимальное качество дезинтеграции в ходе предварительных испытаний, при котором разрушалась оболочка и не разрушалось или сохранялось с незначительными повреждениями ядро ореха, а соотношение семян в ходе многократного повторения оставалось в среднем 5:5, было зафиксировано при частоте вращения $29,5 \text{ с}^{-1}$.

Основные экспериментальные исследования проводили на четырех партиях семян близких геометрических размеров различной относительной влажности (равновесной влажности W_p , 12,3; 21,3; 48,7 %) в десяти повторениях для каждого десяти образцов материалов. Предельное напряжение разрушения σ_{np} для каждой из четырех партий семян определяли как среднее арифметическое вычисленных предельных напряжений разрушения последовательно десяти повторений для десяти семян одной пробы. Средние арифметические результатов испытаний представлены в табл. 1.

Экспериментальные значения предельных напряжений разрушения для семян кедрового орешка при различной влажности

Относительная влажность образцов W , %	Масса 100 образцов материала $m_{об}$, кг	Частота вращения ротора эл. двигателя n_s , с ⁻¹	Частота вращения диска-ускорителя n_d , об/с	Угловая скорость вращения диска-ускорителя $\omega_{кр}$, с ⁻¹	Предельное напряжение разрушения σ_{np} , МПа
W_p	23,1	5,67	29,47	185	6,38
$W_p + 12,3$	26	5,33	27,73	174,14	6,42
$W_p + 21,3$	28	5,5	28,6	179,61	6,88
$W_p + 48,7$	34,3	5,53	28,78	180,74	7,61

При расчете предельного напряжения разрушения σ_{np} исходные параметры стенда и экспериментальных образцов материалов составили: радиус диска-ускорителя, $r_1 = 0,238$ м; масса частицы материала при различной относительной влажности, m , кг; модуль упругости разрушаемого материала, $E = 6$ МПа; радиус оболочки, $R = 4 \cdot 10^{-3}$ м; радиус ядра, $r = 3,2 \cdot 10^{-3}$ м. Согласно литературным данным, масса 100 семян кедрового орешка с остаточной равновесной влажностью 6–8 % изменяется в пределах от $20,6 \cdot 10^{-3}$ до $25,6 \cdot 10^{-3}$ кг. Измеренная нами средняя масса одного орешка с влажностью 6–8 % составила $m = 0,231 \cdot 10^{-3}$ кг. Значение модуля упругости E для семян кедрового орешка принимаем из экспериментов по определению прочностных свойств материалов в условиях квазистатического нагружения при сжатии и сдвиге до разрушения.

В табл. 1 представлены следующие средние экспериментальные и расчетные значения: относительная влажность образцов W , %; масса 100 семян кедрового орешка $m_{об}$, кг; частоты вращения вала электродвигателя n_s и диска-ускорителя n_d (об/с); угловая скорость вращения диска-ускорителя $\omega_{кр}$, с⁻¹; предельное напряжение разрушения σ_{np} , МПа.

По результатам экспериментов построен график (рис. 4) зависимости предельного напряжения разрушения σ_{np} для оболочек семян кедрового орешка от относительной влажности W свободным ударом. Относительная влажность образцов варьировалась в диапазоне от W_p до 48,7 %.

Анализ полученной зависимости $\sigma_{np} = f(W)$ показывает, что с увеличением относительной влажности до 12,3 % напряжение разрушения σ_{np} незначительно изменяется, возрастая на 1 % в интервале от $\sigma_{np} = 6,38$ до 6,42 МПа. При дальнейшем росте относительной влажности с 12,3 до 21,3 % происходит резкое возрастание на 6 % предельного напря-

жения разрушения до величины $\sigma_{np} = 6,88$ МПа.

Последующее увеличение относительной влажности до 48,7 % сопровождается линейным ростом предела прочности оболочки семян кедрового орешка до $\sigma_{np} = 7,61$ МПа, что составило 10 %.

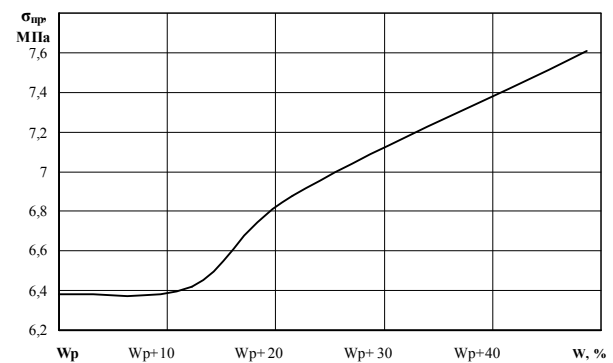


Рис. 4. Зависимость предельного напряжения разрушения σ_{np} оболочек семян кедрового орешка от относительной влажности W

Результаты и их обсуждение

Из проведенных экспериментов видно, что незначительное увлажнение семян кедрового орешка, находящихся в условиях хранения (в пределах 10 %), увеличивает связность компонентов в материале, что повышает эластичность ядра. В то же время прочность и, соответственно, работа разрушения оболочки практически не изменяются. Однако качество процесса селективной дезинтеграции заметно улучшается, так как меньшее количество ядер разрушается в процессе раскрытия орешков ударом. Следовательно, для достижения высокого качества селективной дезинтеграции кедровых орешков свободным ударом рекомендуется их незначительное увлажнение.

Результаты проведенных экспериментальных исследований на стенде для изучения процесса разрушения твердых тел свободным ударом позволяют при помощи разработанной методики расчета определить предельное напряжение разрушения σ_{np} ма-

териалов при динамическом приложении нагрузки, оценить работу, затрачиваемую на образование новой поверхности.

Полученные значения необходимы для расчета оборудования, предназначенного для селективной дезинтеграции растительного сырья.

Список литературы

1. Ребиндер, П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. Избранные труды. – М.: Наука, 1979. – 384 с.

ГОУ ВПО «Кемеровский технологический институт
пищевой промышленности»,
650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47.
Тел./факс: (3842) 73-40-40
e-mail: office@kemtipp.ru

SUMMARY

A.V. Grachev, D.V. Klenikov, S.D. Rudnev

Strength Properties of Plant Materials at Free Impact: Stand, Calculation Technique and Results

For the experimental determination of solids fracture and ultimate strength under dynamic load application, there was designed a stand of a single fracture with a free impact. The calculation technique was suggested. The results of experiments and the calculation of ultimate stress at fracture for bodies with shells such as pine nuts are given.

Free impact, experimental stand, calculation technique, ultimate strength under dynamic fracture.

Kemerovo Institute of Food Science and Technology
47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia
Phone/Fax: +7(3842) 73-40-40
e-mail: office@kemtipp.ru

