Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ПОЛИТЕХНИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ

Кафедра физики

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторной работе № 5
"Определение средней силы сопротивления грунта
при забивании сваи на модели копра"

Минск 1999

УДК 53 + 531] (075.3)

В работе изложен метод измерения сил сопротивления, возникающих при работе механической установки, которая моделирует работу строительного копра. Теоретической основой для вычисления основных кинематических и динамических характеристик движения подвижных элементов установки являются законы кинематики и динамики поступательного движения твердого тела, а также механические законы сохранения энергии и импульса.

Методические рекомендации утверждены на заседании кафедры физики (протокол № 13 от 1 октября 1998 г.).

Составители:

А.П.Каравай, П.Г.Кужир, В.Н.Павловский, Б.И.Тесевич

Рецензент И.А.Сатиков

Цель работы — изучение законов кинематики и динамики поступательного движения твердого тела и вычисление средней силы сопротивления грунта, которая возникает при забивании сваи в модели копра.

1. ЗАКОНЫ НЬЮТОНА

Динамика изучает законы механического движения тел, а также причины, вызывающие или изменяющие это движение. В основе динамики лежат три закона Ньютона.

Первый закон Ньютона, который иногда называют законом инерции, гласит: всякое тело находится в состоянии покоя либо равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока воздействие со стороны других тел не вынудит его изменить это состояние.

Смысл этого закона состоит в следующем: если на тело не действуют внешние силы, то можно выбрать такую систему отсчета, в которой оно покоится. При этом существует множество других систем отсчета, в которых тело движется прямолинейно с постоянной скоростью. Такие системы отсчета называются **инерциальными**. Следовательно, все системы отсчета, по отношению к которым выполняется первый закон Ньютона, являются инерциальными.

Свойство материальных тел сохранять состояние покоя либо равномерного прямолинейного движения называется **инерцией**. Физической величиной, характеризующей инертность тела, является его **масса**.

Изменение скорости движения тел вызывается **силами**. Силу $\vec{F}$ определяют как физическую величину, характеризующую действие одного тела на другое. Сила как векторная величина характеризуется численным значением, направлением в пространстве, а также точкой приложения. Если на тело действует несколько сил, то их результирующее действие эквивалентно воздействию одной равнодействующей силы $\vec{F}_{\text{рав}}$, являющейся геометрической суммой этих сил.

Импульсом тела $\vec{p}$ называется произведение массы тела m на его скорость $\vec{v}$, т. е.

$$\vec{p} = m\vec{v}.$$

Скорость изменения импульса тела есть производная от импульса по времени $\frac{d\vec{p}}{dt}$.

Второй закон Ньютона, который иногда называют основным законом динамики поступательного движения тела, гласит: скорость изменения импульса тела равна равнодействующей $\vec{F}_{\text{рав}}$ всех сил, действующих на тело, т. е.

$$\vec{F}_{\text{рав}} = \frac{d\vec{p}}{dt}. \qquad (1)$$

Если масса тела не зависит от его скорости, то формула (1) принимает вид

$$\vec{F}_{\text{рав}} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = m\frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{a},$$

где $\vec{a}$ — ускорение, которое приобретает тело.

Третий закон Ньютона гласит: силы $\vec{F}_{12}$ и $\vec{F}_{21}$, с которыми действуют друг на друга два взаимодействующих тела, равны по величине и противоположны по направлению, т. е.

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}. \qquad (2)$$

Эти силы не уравновешивают друг друга, так как приложены к разным телам. Они всегда действуют вдоль прямой, проходящей через центры масс взаимодействующих тел (см. рис. 1).

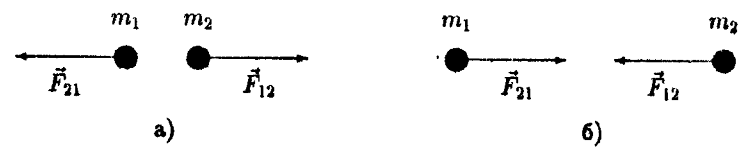

Рис. 1

Рис. 1а соответствует случаю, когда силы взаимодействия между двумя телами являются силами отталкивания, а рис. 2а — случаю притяжения.

Отметим, что все законы Ньютона выполняются только в инерциальных системах отсчета.

2. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА

Для тела, движущегося под действием произвольной внешней силы $\vec{F}(t)$, на основании второго закона Ньютона в виде (1) получаем следующее равенство:

$$d(m\vec{v}) = \vec{F}\,dt, \qquad (3)$$

т. е. бесконечно малое приращение импульса тела за малое приращение времени dt равно произведению силы $\vec{F}$, действующей на тело, на этот промежуток времени. Это произведение $\vec{F}\,dt$ называют **импульсом силы**. Интегрируя выражение (3) во временно́м интервале действия силы от t_1 до t_2, получаем:

$$\int_{t_1}^{t_2} d(m\vec{v}) = \int_{t_1}^{t_2} \vec{F}(t)\,dt. \qquad (4)$$

Если сила $\vec{F}$ в формуле (4) не зависит от времени, то после выполнения интегрирования получаем соотношение

$$m\vec{v}_2 - m\vec{v}_1 = (t_2 - t_1)\,\vec{F},$$

где $\vec{v}_1 = \vec{v}(t_1)$ и $\vec{v}_2 = \vec{v}(t_2)$ — скорости тела соответственно в моменты t_1 и t_2.

Рассмотрим два тела с массами m_1 и m_2, между которыми действуют силы взаимного притяжения (например, гравитационные силы либо силы упругости) (см. рис. 1б). Тогда бесконечно малое изменение импульса первого тела согласно формуле (3) равно

$$d(m_1\vec{v}_1) = \vec{F}_{21}\,dt,$$

где $\vec{F}_{21}$ — сила, действующая на первое тело со стороны второго, которую можно считать неизменной в течение бесконечно малого промежутка времени dt. Подобным образом можно вычислить аналогичное изменение импульса второго тела за тот же промежуток времени, т. е.

$$d(m_2\vec{v}_2) = \vec{F}_{12}\,dt,$$

где $\vec{F}_{12}$ — сила, действующая на второе тело со стороны первого. Тогда в соответствии с третьим законом Ньютона в виде (2) будет выполняться следующее равенство:

$$\vec{F}_{12}\,dt = -\vec{F}_{21}\,dt.$$

Следовательно, при этом должно выполняться соотношение

$$d(m_1\vec{v}_1) = -d(m_2\vec{v}_2). \qquad (5)$$

Согласно равенству (5) в результате взаимодействия двух тел увеличение импульса одного тела равно уменьшению импульса другого тела. Наконец, равенство (5) можно переписать в таком виде:

$$d(m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2) = 0 \quad \text{или} \quad m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = \vec{p} = \overrightarrow{\text{const}}. \qquad (6)$$

Таким образом, при взаимодействии двух тел, на которые не действуют внешние силы, их суммарный импульс $\vec{p}$ не зависит от времени, т. е. остается постоянным.

Полученный результат можно обобщить на любое число тел, образующих **замкнутую (изолированную) систему**, т. е. такую механическую систему, в которой тела взаимодействуют только друг с другом, но не взаимодействуют ни с какими внешними по отношению к ней телами (внешними силами). Предполагая, что такая замкнутая система состоит из n тел, получим

$$\vec{p} = \vec{p_1} + \vec{p_2} + \ldots + \vec{p_n} = \overrightarrow{\text{const}}\,. \tag{7}$$

Равенство (7) выражает **закон сохранения импульса**: полный вектор импульса замкнутой системы, равный векторной сумме импульсов тел, образующих эту систему, остается неизменным с течением времени.

Отметим, что согласно равенству (1) закон сохранения импульса может выполняться и в случае незамкнутых систем, если при этом геометрическая сумма всех внешних сил равна нулю.

3. КИНЕТИЧЕСКАЯ И ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ. ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ В МЕХАНИКЕ

Механическая энергия является важнейшей физической величиной, характеризующей способность тела или системы тел совершать работу. **Кинетической энергией** называют механическую энергию, которая связана с движением системы или ее частей. Величину кинетической энергии рассчитаем, исходя из выражения для элементарной работы dA произвольной силы $\vec{F}$ на бесконечно малом перемещении $d\vec{r}$, т. е.

$$dA = \vec{F}\,d\vec{r}.$$

Интегрируя это равенство, получаем выражение для работы A_{12} силы $\vec{F}$ на участке между двумя произвольными точками 1 и 2 ;

$$A_{12} = \int_1^2 dA = \int_1^2 \vec{F}\,d\vec{r}. \tag{8}$$

Поскольку скорость тела равна $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$, то из равенства (8) с учетом второго закона Ньютона в виде (1) получаем

$$A_{12} = \int_1^2 \frac{d\vec{p}}{dt}\,d\vec{r} = \int_1^2 \vec{v}\,d\vec{p}. \tag{9}$$

Из тождества $\vec{v}^{\,2} = v^2$ следует, что $\vec{v}\,d\vec{v} = v\,dv$. Тогда $\vec{v}\,d\vec{p} = m\vec{v}\,d\vec{v} = m\,v\,dv$, а равенство (9) принимает вид

$$A_{12} = m\int_{v_1}^{v_2} v\,dv = \frac{m\,v_2^2}{2} - \frac{m\,v_1^2}{2} = E_{k_2} - E_{k_1},$$

где введена новая физическая величина, численно равная

$$E_{k_i} = \frac{m\,v_i^2}{2} \quad (i = 1 \text{ или } 2) \tag{10}$$

— **кинетическая энергия поступательного движения** тела.

Потенциальной энергией E_p называется механическая энергия, обусловленная взаимным расположением системы тел или ее частей, а также характером их взаимодействия. **Полная механическая энергия** E такой системы равна сумме ее кинетической и потенциальной энергий.

Рассмотрим вычисление потенциальной энергии в поле так называемых консервативных сил. **Консервативной силой** называется такая сила, работа которой не зависит от формы пути, а зависит лишь от начального и конечного положений перемещаемого тела, поэтому работа такой силы вдоль любой замкнутой траектории всегда равна нулю. Консервативными являются, например, сила тяготения, сила упругости, кулоновские силы.

Сила называется **неконсервативной**, если ее работа зависит от формы пути. К таким относятся, например, силы трения, силы сопротивления. Так, действие силы трения на тело приводит к переходу механической энергии во внутреннюю энергию тела, в результате чего оно нагревается.

Элементарная работа dA консервативной силы $\vec{F}$ при бесконечно малом изменении взаимного расположения элементов системы, как известно, равна бесконечно малой убыли потенциальной энергии системы, т. е.

$$dE_p = -dA = -\vec{F}\,d\vec{r}. \tag{11}$$

Интегрируя полученное соотношение при переходе системы из состояния 1 в состояние 2, с учетом формулы (8) получаем, что изменение ее потенциальной энергии при этом удовлетворяет следующему соотношению:

$$\int_1^2 dE_p = E_{p_2} - E_{p_1} = -\int_1^2 \vec{F}\,d\vec{r}. \tag{12}$$

Рассмотрим примеры вычисления потенциальной энергии тела в поле упругой силы, а также в поле силы тяготения. Обе эти силы, как уже указывалось выше, являются консервативными, поэтому для вычисления потенциальной энергии в полях этих сил можно воспользоваться выражением (12).

Известно, что деформация пружины, которая характеризуется смещением $\vec{x}$ относительно ее равновесного положения, пропорциональна возникающей при этом упругой силе пружины $\vec{F}_{упр}$. Поскольку направления векторов $\vec{F}_{упр}$ и $\vec{x}$ всегда взаимно противоположны, то их значения связаны соотношением

$$F_{упр}(x) = -kx,$$

где k — жесткость пружины. Согласно формуле (12) величина потенциальной энергии пружины по отношению к ее равновесному положению равна

$$E_p = -\int_0^x F_{упр}(x)\,dx = -\int_0^x (-kx)\,dx = k\int_0^x x\,dx = \frac{1}{2}kx^2. \tag{13}$$

Рассмотрим теперь, как вычисляется потенциальная энергия тела (материальной точки) массой m, находящегося на небольшой высоте над поверхностью Земли. Со стороны Земли, масса которой $M \simeq 5{,}96 \cdot 10^{24}$ кг и средний радиус $R \simeq 6{,}37 \cdot 10^6$ м, на тело действует гравитационная сила F_g, величина которой согласно закону всемирного тяготения зависит от расстояния r между центрами взаимодействующих (притягивающихся) тел и равна

$$F_g(r) = G\frac{mM}{r^2},$$

где $G \simeq 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \frac{\text{Н м}^2}{\text{кг}^2}$ — гравитационная постоянная. При перемещении тела под действием силы $F_g(r)$ из точки, расположенной на небольшой высоте h над Землей, в точку, находящуюся на поверхности Земли, начальную и конечную точки перемещения в формуле (12) (пределы интегрирования) следует выбрать равными $r_1 = R+h$ и $r_2 = R$. В итоге получаем следующее соотношение:

$$E_p = -\int_{r_1}^{r_2} G\frac{mM}{r^2}\,dr = GmM\left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1}\right) = \frac{GmMh}{R(R+h)} \simeq \frac{GmMh}{R^2}, \tag{14}$$

поскольку предполагается, что $h \ll R$.

Если не учитывать суточное вращение Земли вокруг своей оси, то равенство сил тяжести P и гравитационного тяготения на поверхности

Земли вида

$$P = mg = F_g(R) = G\frac{mM}{R^2}$$

приводит к следующему выражению для ускорения свободного падения:

$$g = G\frac{M}{R^2}.$$

Подставляя это соотношение в выражение (14), получаем в итоге хорошо известный результат:

$$E_p = mgh \tag{15}$$

— потенциальную энергию тела, поднятого над Землей на небольшую высоту h.

При переходе системы из одного состояния (начального) в другое состояние (конечное) изменение полной механической энергии системы равно сумме работы внешних консервативных сил $A_{вн}$ и работы сил трения (сил сопротивления) $A_{тр}$, совершаемой системой, т. е.

$$(E_k + E_p)_{кон.} - (E_k + E_p)_{нач.} = A_{вн} + A_{тр}. \tag{16}$$

Из формулы (16) при $A_{вн} = A_{тр} = 0$ следует закон сохранения полной механической энергии E для замкнутой системы, в которой действуют только консервативные силы. Согласно этому закону полная механическая энергия замкнутой системы остается неизменной с течением времени, т. е.

$$E = E_k + E_p = \text{const}. \tag{17}$$

Если же в замкнутой механической системе помимо консервативных сил действуют и неконсервативные силы, то в ней выполняется общий закон сохранения и превращения энергии, согласно которому в изолированной системе сумма всех видов энергий остается постоянной с течением времени.

Закон сохранения энергии можно применять и к незамкнутой (неизолированной) механической системе в тех случаях, когда действующие на нее внешние силы взаимно уравновешены (их геометрическая сумма равна нулю) либо когда направление внешних сил перпендикулярно направлению перемещения тел системы (при этом эти внешние силы не совершают работу).

4. УПРУГИЙ И НЕУПРУГИЙ УДАР

Под **столкновением** частиц или тел понимается их кратковременное взаимодействие друг с другом. Примерами столкновений являются соударения бильярдных шаров, рассеяние одних элементарных частиц на других, захват электрона положительным ионом и т. д.

Удар представляет собой частный случай столкновения. Под ударом в механике понимается кратковременное взаимодействие двух и более тел, возникающее при их соприкосновении. **Ударом** обычно называют такое столкновение тел, при котором за весьма малые промежутки времени скорости тел изменяются на конечные величины. В процессе удара возникают кратковременные силы взаимодействия соударяющихся тел. Эти ударные силы являются внутренними по отношению к механической системе соударяющихся тел. Они, как правило, значительно больше внешних сил, действующих на тела системы со стороны других тел (например, сил тяжести, трения и т. д.), поэтому систему соударяющихся тел можно считать практически замкнутой, в которой выполняется закон сохранения импульса.

Удар называется **абсолютно упругим**, если при этом механическая энергия тел не переходит в немеханические виды энергии, т. е. остается неизменной со временем. Упругим ударом можно считать, например, процесс соударения стальных шаров. При таком ударе кинетическая энергия тел сначала переходит в энергию упругой деформации, т. е. возникают упругие силы, возрастающие с увеличением деформации. В момент наибольшего сжатия упругие силы достигают своих максимальных значений, а затем под действием этих же сил тела снова принимают свою первоначальную форму, отталкивая при этом друг друга. Таким образом, потенциальная энергия упругой деформации снова переходит в кинетическую энергию соударяющихся тел. После удара столкнувшиеся тела будут двигаться со скоростями, величины и направления которых должны удовлетворять законам сохранения механической энергии и импульса.

Удар называется **неупругим**, если при этом механическая энергия сталкивающихся тел полностью или частично переходит во внутреннюю (например, тепловую) энергию. После такого удара столкнувшиеся тела либо покоятся, либо двигаются как единое целое с одинаковой скоростью, причем эта скорость определяется на основании закона сохранения импульса. Несмотря на то, что полная механическая энергия системы тел при неупругом ударе не сохраняется, при этом безусловно выполняется более общий физический принцип – закон сохранения и превращения различных

видов энергии.

Строго говоря, в природе не существует ни абсолютно упругого, ни абсолютно неупругого удара. Реальный удар можно считать упругим либо неупругим лишь с определенной степенью точности, причем основным критерием определения характера процесса столкновения при этом является сравнение значений полной кинетической энергии системы взаимодействующих тел, вычисленных до и после соударения.

Если направления движения двух соударяющихся шаров в момент их соприкосновения совпадают с прямой, соединяющей центры масс этих шаров, то такой удар называется **центральным**. В противном случае удар будет нецентральным.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕЙ СИЛЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА ПРИ ЗАБИВАНИИ СВАИ НА МОДЕЛИ КОПРА

Копер – это механическое устройство для забивания свай. Рассмотрим принципиальную схему его работы, схематически представленную на рис.2.

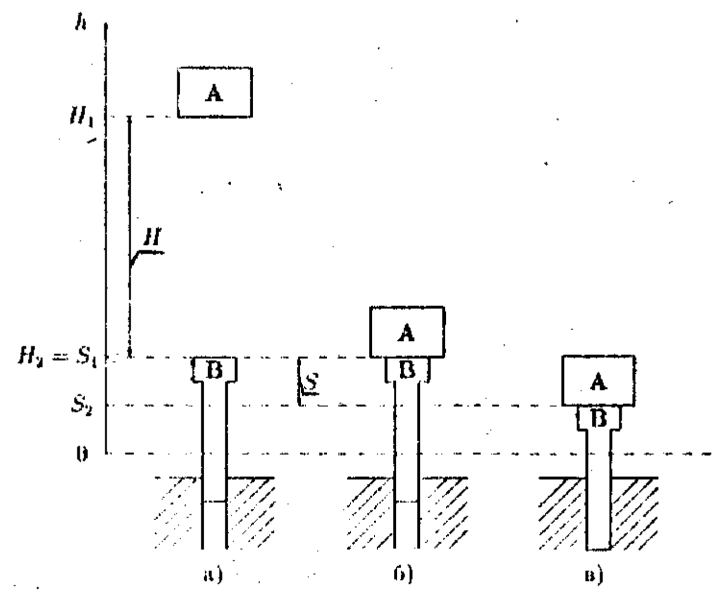

Рис. 2

Груз копра А, падая с высоты H_1 (см. рис. 2а), проходит путь $H = H_1 - H_2$ и соударяется со сва́ей В (рис. 2б). Поскольку после удара груз и сва́я будут двигаться с одинаковой скоростью, то такой процесс их взаимодействия с большой степенью точности можно считать абсолютно неупругим.

При совместном движении груза и сва́и после удара на пути $S = S_1 - S_2$ происходит их полное торможение (см. рис. 2в) под действием силы трения скольжения $\vec{F}(t)$ сва́и о грунт (силы сопротивления грунта), причем величина этой силы зависит от времени. Целью данной работы является определение среднего значения этой силы F_c на пути торможения.

Пренебрегая влиянием сил сопротивления воздуха, в системе груз-Земля, которую можно считать изолированной, будем рассматривать процесс падения груза на сва́ю как движение в поле консервативной силы тяжести. Согласно закону сохранения энергии полная механическая энергия груза, первоначально расположенного на высоте H_1, равна его полной энергии в точке соударения со сваей, расположенной на высоте H_2 (см. рис. 2а и 2б), т. е. в соответствии с равенствами (10), (15) и (17) получаем

$$m_1 g H_1 = \frac{m_1 v^2}{2} + m_1 g H_2, \tag{18}$$

где m_1 — масса груза, v — его скорость в момент удара о сва́ю, которая на основании формулы (18) равна

$$v = \sqrt{2gH}. \tag{19}$$

Рассмотрим теперь процесс ударного взаимодействия груза со сва́ей. По отношению к механической системе груз-сва́я внешними силами являются силы тяжести и сила сопротивления грунта (т. е. сила трения покоя, максимальное значение которой равно значению силы сопротивления грунта при движении сва́и). В данной модели копра сумма этих внешних сил намного (в несколько десятков раз) меньше возникающих при этом упругих сил ударного взаимодействия, поэтому систему груз-сва́я можно считать с хорошей степенью точности замкнутой и в ней выполняется закон сохранения импульса. Как уже указывалось выше, удар груза о сва́ю можно считать абсолютно неупругим. В этом случае согласно равенству (6) закон сохранения полного импульса системы груз-сва́я имеет вид

$$m_1 \vec{v} = (m_1 + m_2)\vec{u},$$

где m_2 — масса сва́и, $\vec{u}$ — скорость системы груз-сва́я сразу же после удара. При этом в последнем равенстве учтено, что до момента удара свая была

неподвижной. Проецируя полученное уравнение на направление движения нашей механической системы, получаем соотношение

$$m_1 v = (m_1 + m_2)u, \tag{20}$$

из которого находим значение скорости u, т. е.

$$u = \frac{m_1}{m_1 + m_2} v. \tag{21}$$

Работу $A_{тр}$ зависящей от времени силы трения (сопротивления грунта) $\vec{F}(t)$ на пути торможения $S = S_1 - S_2$ (см. рис. 2в) согласно формуле (8) можно вычислить следующим образом:

$$A_{тр} = \int_{S_1}^{S_2} \vec{F}(t)\, d\vec{S} = -F_c S,$$

где F_c — среднее значение силы сопротивления грунта на участке S, а знак минус в правой части этого равенства отражает тот факт, что направление действия силы сопротивления $\vec{F}$ противоположно направлению вектора перемещения сва́и $\vec{S}$ при торможении.

В процессе совместного движения груза и сва́и после соударения можно считать систему груз-сва́я-Земля замкнутой системой, на которую действует сила трения (сопротивления грунта). Для такой механической системы справедлив закон сохранения энергии в виде уравнения (16), согласно которому

$$(m_1 + m_2) g S_2 - \left[\frac{1}{2}(m_1 + m_2) u^2 + (m_1 + m_2) g S_1\right] = -F_c S, \tag{22}$$

где S_1 и $S_2 = H_2$ (см. рис. 2в) — положение груза соответственно в момент удара о сва́ю и в момент остановки сва́и после удара, S — расстояние, на которое перемещается сва́я. Учитывая, что $S = S_1 - S_2$, получаем из формулы (22) величину силы F_c в виде

$$F_c = \frac{(m_1 + m_2)}{2S} u^2 + (m_1 + m_2) g. \tag{23}$$

Используя выражения (19), (21) и (23), получаем окончательную рабочую формулу для вычисления средней силы сопротивления грунта:

$$F_c = g\left[\frac{m_1^2}{m_1 + m_2} \cdot \frac{H}{S} + m_1 + m_2\right]. \tag{24}$$

Рассмотрим условие наиболее эффективной работы копра. При неупругом ударе груза о сваю часть механической энергии системы груз-сва́я превращается в работу сил деформации. Чем меньше потери механической энергии в результате такого неупругого удара, тем выше эффективность работы копра. Так как до удара свáя была неподвижной, то кинетическая энергия системы груз-свáя при этом равнялась

$$E_i = \frac{1}{2} m_1 v^2.$$

Сразу же после удара эта энергия уменьшилась до значения

$$E_f = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) u^2.$$

Поскольку в течение времени неупругого взаимодействия тéла со свáей потенциальную энергию такой системы можно считать практически неизменной, то работа сил деформации A_{def} (убыль механической энергии системы) при этом будет равна $A_{def} = E_i - E_f$. Вычислим отношение

$$\frac{A_{def}}{E_i} = \frac{E_i - E_f}{E_i} = \frac{m_1 v^2 - (m_1 + m_2) u^2}{m_1 v^2},$$

которое с учетом равенства (21) можно привести к виду

$$\frac{A_{def}}{E_i} = \frac{m_2}{m_1 + m_2}. \qquad (25)$$

Следовательно, чем меньшим будет это отношение, тем более эффективной будет работа копра, т. е. тем бóльшая часть кинетической энергии падающего груза будет затрачена на вертикальное перемещение системы груз-свáя. Именно поэтому для эффективной работы промышленных копров всегда необходимо, чтобы масса падающего груза m_1 была как можно больше массы забиваемой свáи m_2.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Какие системы отсчета называются инерциальными?
2. Сформулировать законы Ньютона.
3. Как получить закон сохранения импульса для замкнутой механической системы?
4. Как определяется кинетическая, потенциальная и полная энергия механической системы?

5. Сформулировать закон сохранения энергии в механике.
6. Какой удар называют абсолютно упругим, а какой — абсолютно неупругим?
7. Вывести рабочую формулу для средней силы сопротивления грунта.
8. Какой вид имеет условие наиболее эффективной работы копра?

Литература

1. Трофимова Т.И. *Курс физики.* — 5-е изд. — М.: Высшая школа, 1998. — Гл. 2, 3, 5.
2. Савельев И.В. *Курс общей физики.* В 3 т. Т. I. Механика. Молекулярная физика. – 3-е изд., перераб. – М.: Наука. Гл.ред.физ.-мат. лит-ры, 1986. – Гл. 2, 3, 6.
3. Зисман Г.А., Тодес О.М. *Курс общей физики.* В 3 т. Т. I. – 6-е изд., перераб. – М.: Наука. Гл. ред.физ.-мат. лит.-ры, 1974. – Гл.2.
4. Савельев И.В. *Курс физики.* — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1989. — Гл. 2, 3, 8.
5. Стрелков С.П. *Механика.* — 2- изд., перераб. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит-ры, 1965. — Гл. 2-6.