

УДК 531.3:534.1/.2

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ УДАРНОЙ СИСТЕМЫ  
НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПЛАСТИНЫ ПРИ ЕЕ ВИБРОУДАРНОЙ ОЧИСТКЕ**

*В.Э. Еремьянц, В.В. Ню*

Рассматривается изменение напряженного состояния пластины со слоем отложений на внутренней поверхности при ее виброударной очистке. Установлены зависимости напряжений от параметров ударной системы "боек-инструмент-пластина" и от толщины слоя отложений.

*Ключевые слова:* боек; инструмент; пластина; слой отложений; удар; волны деформации; напряжения.

---

**INFLUENCE OF THE IMPACT SYSTEM PARAMETERS ON THE STRESS CONDITION  
OF THE PLATE UNDER VIBRO-IMPACT CLEANING PROCESS**

*V.E. Eremjants, V.V. Niu*

Stress condition of the plate with a layer of slag on its internal surface under process of vibro-impact cleaning is considered. Relations of stresses from the "striker-instrument-plate" impact system parameters and from the thickness of slag layer are established.

*Key words:* striker; instrument; plate; slag layer; impact; strain waves; stress.

Виброударный способ очистки внутренних поверхностей труб большого диаметра, бункеров и других емкостей является относительно новым и малоизученным. Это определяет необходимость его исследования и совершенствования.

Работы в этом направлении были начаты в начале 2000-х годов с построения и обоснования математической модели ударной системы "боек машины-инструмент-обрабатываемая поверхность", используемой в кривошипно-коромысловых ударных механизмах для очистки золошлакопроводов. К настоящему времени разработана математическая модель ударной системы этих механизмов, установлены основные закономерности волновых процессов, протекающих в системе "боек-инструмент-пластина", и на их основе предложена методика выбора рациональных параметров элементов ударной системы, обеспечивающих высокий коэффициент передачи энергии удара в обрабатываемую пластину, при выполнении требований обеспечения прочности инструмента и пластины.

Результаты этих исследований обобщены в работах [1, 2], где боек ударной машины представлен в виде жесткого тела с податливой сферической ударной поверхностью. Считалось, что общие деформации бойка пренебрежимо малы по сравнению с его местными контактными деформациями.

Следует отметить, что такое представление бойка в модели справедливо не только для кривошипно-коромысловых, но и для пневматических ударных машин, в которых продольные размеры бойка соизмеримы с поперечными, а ударный торец имеет сферическую форму.

Однако данная модель и полученные с ее помощью результаты совершенно неприемлемы для гидравлических ударных механизмов, которые по ряду характеристик более перспективны по сравнению с пневматическими и кривошипно-коромысловыми.

В гидравлических ударных механизмах продольные размеры бойка 1 (рисунок 1) намного больше поперечных, а ударные торцы бойка и инструмента 2 – плоские. В этом случае боек представляется в модели в виде упругого стержня, местные контактные деформации которого пренебрежимо малы по сравнению с общими продольными деформациями. Это различие существенно изменяет математическую модель ударной системы, а следовательно, и решение ее уравнений. В связи с этим возникает необходимость корректировки математической модели и выявления основных закономерностей волновых процессов, присущих ударной системе гидравлических ударных механизмов.

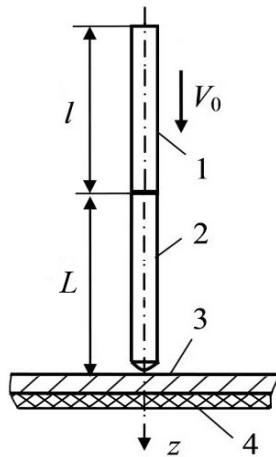


Рисунок 1 – Расчетная схема

Решение этой задачи было начато в работах [3–5]. Была исследована эффективность передачи энергии удара в обрабатываемую пластину 3 при различных толщинах пластины  $\delta_1$ , отношениях диаметра инструмента к толщине пластины  $\nu$  и отношениях толщины слоя отложения 4 к толщине пластины  $k_8$ . Полученные результаты показали, что с точки зрения эффективности передачи энергии для пластин толщиной 6 мм инструмент должен иметь диаметр 15 мм, толщиной 8 мм – 20–24 мм, и для пластин толщиной 10–12 мм диаметр инструмента должен составлять 25–30 мм. При указанных размерах коэффициент передачи энергии удара в пластину по мере изменения толщины слоя отложений в результате его разрушения составляет от 0,70 до 0,95, что примерно в 1,5 раза больше по сравнению с результатами, полученными для кривошипно-коромысловых и пневматических механизмов.

В данной работе решается задача определения напряженного состояния пластины и слоя отложений при различных соотношениях параметров  $\nu$  и  $k_8$ .

При решении задачи движение сечений бойка и инструмента описывалось одномерными волновыми уравнениями. Их решения отыскивались методом Даламбера в виде суммы двух функций. Одна из них описывает перемещение сечений в прямой волне деформации, распространяющейся в положительном направлении оси  $z$ , другая – в отраженной волне, движущейся в обратном направлении. Диаметры бойка и инструмента, а следовательно, и их ударные жесткости, принимались одинаковыми, так как предшествующие исследования показали, что при этом обеспечивается наибольшая передача энергии бойка в пластину при наименьших напряжениях, возникающих в эле-

ментах системы. Длины стержней также принимались равными. В таком случае волна, отраженная от поверхности пластины, перемещается по инструменту в обратном направлении и, отражаясь от его верхнего торца, снова подходит к пластине в виде второй прямой волны деформации к моменту окончания действия первой прямой волны. Таким образом, обеспечивается непрерывное воздействие волн деформации на обрабатываемую поверхность. Боек, инструмент и пластина выполнены из стали. Двухслойная пластина, состоящая из стальной пластины и слоя отложений, приводилась к однослойной по методике, приведенной в работе [6].

Дифференциальное уравнение колебаний пластины основывалось на допущении о малом влиянии на изгиб пластины поперечных сил и напряжений, нормальных к ее нейтральной плоскости. Решение этого уравнения отыскивалось в замкнутом виде, по методике, приведенной в работе [7].

Уравнения математической модели решались при граничных условиях, выражающих равенство упругих сил в контактном сечении бойка и инструмента и в контактном сечении инструмента и пластины. При этом коэффициент жесткости контактной характеристики инструмента и пластины находился из линеаризованной характеристики Герца [7]:

$$c = 1,25K^{\frac{2}{3}}P_{km}^{\frac{1}{3}}; \quad K = \frac{2E_1}{3(1-\mu_1^2)}\sqrt{r}, \quad (1)$$

где  $\mu_1$  – коэффициент Пуассона для стали;  $r$  – радиус сферической ударной поверхности инструмента;  $P_{km}$  – максимальное значение силы в контакте инструмента с пластиной;  $E_1, \mu_1$  – соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона материала стержней.

Зависимость контактной силы от времени описывается функцией

$$P_k(t) = P_1(1-q)(1-\exp(-sat)), \quad (2)$$

где  $P_1$  – амплитуда начальной волны деформации,  $P_1 = 0,5CV_0$ ;  $a$  – скорость распространения продольной волны деформации в стержнях;  $C$  – ударная жесткость стержней,  $C = \rho_1 a S$ ;  $S, \rho_1$  – площадь поперечного сечения и плотность материала стержней;  $V_0$  – скорость удара бойком по инструменту;

$$q = (\chi v_c^2 - 1) / (\chi v_c^2 + 1);$$

$$\chi = \pi \sqrt{3(1-\mu_1^2)} / 16;$$

$$v_c^2 = v^2 / \sqrt{k_D k_m};$$

$$v = d / \delta_1;$$

$d$  – диаметр бойка и инструмента;  $k_D, k_m$  – коэффициенты, учитывающие приведенную

цилиндрическую жесткость и приведенную массу пластины,

$$k_D = \left[ 1 + 4k_E k_\delta \left( 1 + 1,5k_\delta + k_\delta^2 + 0,25k_E k_\delta^3 \right) \right] / [1 + k_E k_\delta];$$

$$k_m = 1 + k_\rho k_\delta;$$

$$k_E = E_2 / E_1; \quad k_\delta = \delta_2 / \delta_1; \quad k_\rho = \rho_2 / \rho_1;$$

$E_2, \rho_2$  – модуль упругости и плотность материала слоя отложений;  $\delta_1$  – толщина пластины;  $\delta_2$  – толщина слоя отложений.

Контактная сила (2) достигает максимального значения в момент времени  $T = 2l/a$ , где  $l$  – длина бойка, и равна

$$P_{km} = P_1 (1 - q) (1 - \exp(-p)), \quad (3)$$

где

$$p = 4 / \Theta (1 - q); \quad \Theta = C^2 / cm.$$

В качестве начальных условий принималось, что до удара боек движется со скоростью  $V_0$ , инструмент и пластина – неподвижны.

Для оценки максимальных напряжений, возникающих на поверхности пластины и в слое отложений, использовался приближенный метод, основанный на предположении, что размеры пластины в плане таковы, что граничные условия на ее краях не оказывают влияния, по крайней мере, на первое взаимодействие инструмента с пластиной.

С учетом этого в результате совместного решения уравнений математической модели было получено выражение для амплитудной функции прогиба пластины при начале координат  $x$  и  $y$  в ее центре:

$$w(x, y) = W_0 \cos \gamma x \cos \gamma y,$$

где  $\gamma = \pi/\Lambda$ ,  $\Lambda$  – длина полуволны,

$$\Lambda = 2T \sqrt{D\omega^2 / m_0};$$

$\omega$  – частота колебаний,  $\omega = \pi/T$ ;  $W_0$  – постоянная, определяемая из условий, что в момент окончания удара прогиб в центре пластины максимален [7, 8],

$$W_0 = \frac{1}{8\sqrt{Dm_0}} \int_0^\tau P_k(t) dt,$$

$\tau$  – продолжительность действия контактной силы;  $D$  – приведенная цилиндрическая жесткость двухслойной пластины;  $m_0$  – приведенная масса одного квадратного метра пластины;

$$D = D_0 k_D; \quad m_0 = \rho_1 \delta_1 k_m,$$

$D_0$  – цилиндрическая жесткость пластины без слоя шлака,

$$D_0 = E_1 \delta_1^3 / 12 (1 - \mu_1^2).$$

Деформации, возникающие в пластине при изгибе, имеют вид

$$\varepsilon_x = -z \frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial x^2}; \quad \varepsilon_y = -z \frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial y^2},$$

где  $z$  – координата сечения, отсчитываемая от нейтральной плоскости.

В двухслойной пластине нейтральная плоскость расположена на расстоянии  $z_0$  от внешней поверхности пластины. При этом

$$z_0 = \frac{E_1 \delta_1^2 + 2E_2 \delta_1 \delta_2 + E_2 \delta_2^2}{2(E_1 \delta_1 + E_2 \delta_2)}.$$

Напряжения в пластине и слое шлака определяются выражениями

$$\sigma_{xi} = \frac{\bar{E}_i}{1 - \mu^2} (\varepsilon_{xi} + \mu \varepsilon_{yi}); \quad \sigma_{yi} = \frac{\bar{E}_i}{1 - \mu^2} (\varepsilon_{yi} + \mu \varepsilon_{xi}),$$

где  $\bar{E}_i, \mu$  – соответственно приведенные модуль упругости и коэффициент Пуассона двухслойной пластины после приведения ее к однослойной; здесь и далее индекс 1 соответствует материалу пластины, 2 – материалу шлака,

$$\mu = \frac{\mu_1 \bar{E}_1 \delta_1 + \mu_2 \bar{E}_2 \delta_2}{E_1 \delta_1 + E_2 \delta_2}; \quad \bar{E}_i = \frac{E_i}{1 - \mu_i^2},$$

где  $\mu_i$  – коэффициент Пуассона материалов элементов системы.

Предполагалось, что при симметричном распространении волн по поверхности пластины деформации вдоль осей  $x$  и  $y$  одинаковы ( $\varepsilon_{xi} = \varepsilon_{yi}$ ) и имеют максимальное значение в центре пластины. Тогда с учетом представленных зависимостей выражение для определения амплитудных значений напряжений принимает вид:

$$\sigma = \frac{\bar{E}_i z}{(1 - \mu)} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{\bar{E}_i z}{(1 - \mu)} W_0 \gamma^2.$$

В качестве примера рассмотрена модель с параметрами, такими же, как и в работе [5]: масса бойка  $m = 1$  кг, скорость в начальный момент удара  $V_0 = 3,5$  м/с, все элементы системы выполнены из стали,  $\rho_1 = 7850$  кг/м<sup>3</sup>,  $a = 5100$  м/с,  $E_1 = 20,4 \cdot 10^4$  МПа. Для слоя отложений  $\rho_2 = 2050$  кг/м<sup>3</sup>,  $E_2 = 0,247 \cdot 10^4$  МПа,  $\mu = \mu_1 = 0,3, \mu_2 = 0,15$ .

Максимальные напряжения на поверхности пластины возникают в случае отсутствия на ней слоя отложений, то есть при  $k_\delta = 0$ . Формула для определения амплитудных значений напряжений в центре внешней поверхности пластины ( $z = \delta_1 / 2$ ) при воздействии на нее первой волны, распространяющейся по инструменту, имеет вид:

$$\sigma_n = \frac{2\chi V_0 \rho_1 a}{(1 - \mu_1^2)(1 - \mu)} (1 + q) \left[ 1 - \frac{\Theta}{4} (1 - q) (1 - \exp(-p)) \right] \quad (4)$$

На рисунке 2 представлена диаграмма зависимости напряжений на поверхности пластины от

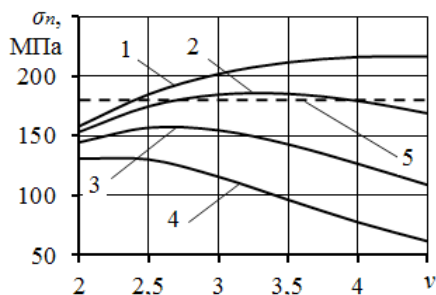


Рисунок 2 – Графики зависимости  $\sigma_n(v)$  при различной толщине пластин

отношения диаметра инструмента к толщине пластины  $v$  при разных  $\delta_1$ . Кривые 1, 2, 3, 4 на рисунке соответствуют толщинам пластины 6, 8, 10, 12 мм. Линия 5 показывает величину предела пропорциональности для стали  $\sigma_{nu} = 180$  МПа.

Из полученных результатов следует, что для пластины толщиной 6 мм ограничения на прочность пластины выполняются при значении  $v$  меньшем 2,4 ( $d < 15$  мм), для пластины толщиной 8 мм – при  $v$  меньшем 2,7 ( $d < 22$  мм) и для пластин толщиной 10 мм и более – при любых значениях  $v$ .

С учетом этих данных были скорректированы результаты, полученные в работе [5], по рациональным значениям параметра  $v$  и диаметрам инструмента (таблица 1).

Таблица 1 – Рациональные значения диаметров инструмента, значения коэффициента передачи энергии удара в пластину и максимальных напряжений в ней при обработке пластин различной толщины

$\delta_1$ , мм	6	8	10	12
$v$	2,0–2,4	2,5–2,7	2,5–3,0	2–2,5
$d$ , мм	12–14	20–22	24–30	24–30
$\eta_1$	0,70–0,99	0,70–0,95	0,70–0,95	0,70–0,90
$\sigma_{n^*}$ , МПа	158–180	175–180	155–157	130–131

Максимальные напряжения, возникающие в шлаке, рассчитываются отдельно для наружного слоя ( $z = \delta_1 + \delta_2 - z_0$ ):

$$\sigma_{cH} = \frac{4E_2\chi V_0}{(1-\mu_1^2)(1-\mu)ak_D} \frac{1+2k_\delta+k_E k_\delta^2}{2(1+k_E k_\delta)} (1+q) \left[ 1 - \frac{\Theta}{4}(1-q)(1-\exp(-p)) \right], \quad (5)$$

и для внутреннего слоя, прилегающего к пластине ( $z = \delta_1 - z_0$ ),

$$\sigma_{c0} = \frac{4E_2\chi V_0}{(1-\mu_1^2)(1-\mu)ak_D} \frac{1-k_E k_\delta^2}{2(1+k_E k_\delta)} \cdot (1+q) \left[ 1 - \frac{\Theta}{4}(1-q)(1-\exp(-p)) \right]. \quad (6)$$

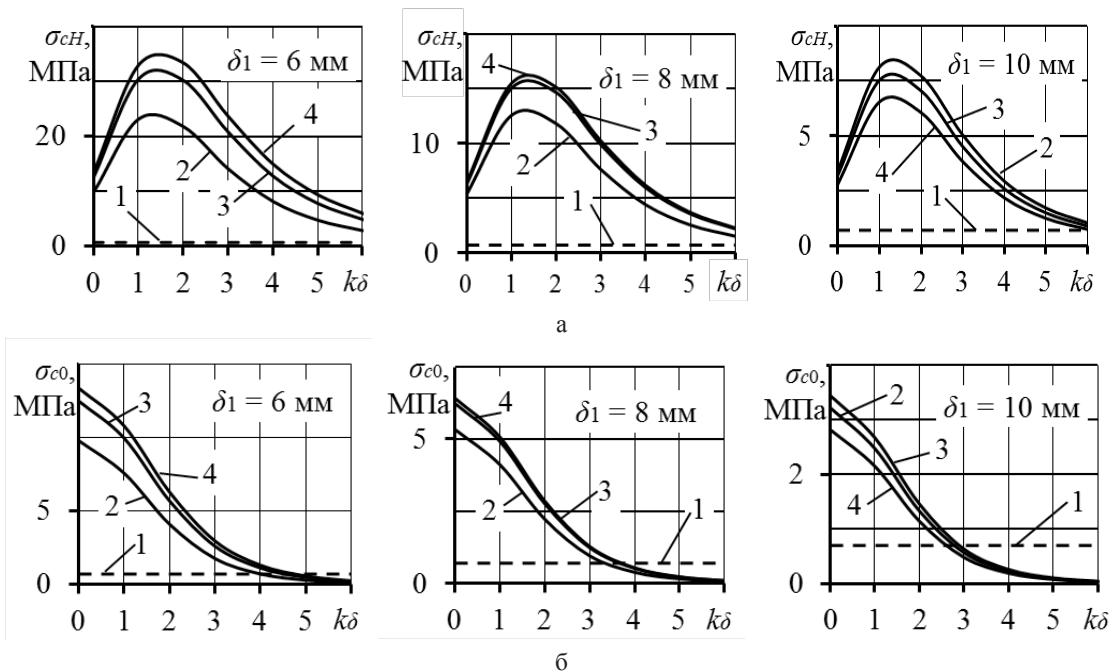


Рисунок 3 – Графики зависимости напряжений в слое отложений от параметра  $k_\delta$

На рисунке 3а показаны графики функции (5), а на рисунке 3б – функции (6), где линия 1 соответствует пределу прочности материала шлака при растяжении  $[\sigma_{\text{ш}}] = 0,7$  МПа. Кривые 2, 3, 4 соответствуют значениям  $\nu$ , равным 2, 3, 4.

На этих графиках видно, что изменение  $\nu$  от 2 до 4 при  $k_{\delta}$  больше 4 не оказывает существенного влияния на напряжения в слое отложений, особенно в контакте слоя с пластиной. Во всех рассмотренных случаях напряжения на внешней поверхности слоя превышают предел его прочности, что обеспечивает разрушение слоя отложений.

Напряжения на внутренней поверхности слоя достаточны для его разрушения при определенных значениях  $k_{\delta}$ . Например, при  $\delta_1 = 6$  мм разрушение внутренней поверхности слоя начнется при  $k_{\delta}$  меньше 5, при  $\delta_1 = 8$  мм – меньше 3,5, при  $\delta_1 = 10$  мм – меньше 2,8. В этих случаях будет происходить объемное разрушение слоя по всей его толщине.

Интересно отметить, что максимальные напряжения на наружной поверхности слоя при всех рассмотренных толщинах пластины возникают в диапазоне изменения  $k_{\delta}$  от 1 до 3. В этом же диапазоне происходит и объемное разрушение всего слоя. Следовательно, эти соотношения толщины слоя отложений и пластины являются наиболее оптимальными с точки зрения производительности процесса очистки.

В работе рассмотрены зависимости напряженного состояния пластины и слоя отложений при определенной скорости удара. При другой скорости диапазоны рациональных диаметров могут измениться. Оценка влияния скорости удара на эффективность передачи энергии удара в пластину и напряженное состояние элементов системы является задачей дальнейших исследований.

### Литература

1. Еремьянц В.Э., Панова Л.Т., Асанова А.А. Расчет характеристик процесса виброударной очистки поверхностей / В.Э. Еремьянц, Л.Т. Панова, А.А. Асанова // Проблемы машиностроения и надежности машин. РАН. 2012, № 6. С. 63–70.
2. Еремьянц В.Э., Панова Л.Т., Асанова А.А. Выбор рациональных параметров виброударных машин для очистки поверхностей / В.Э. Еремьянц, Л.Т. Панова, А.А. Асанова // Проблемы машиностроения и надежности машин. РАН. 2013, № 6. С. 24–30.
3. Еремьянц В.Э., Ню В.В. Передача энергии удара через инструмент в пластину / В.Э. Еремьянц, В.В. Ню // Вестник КPCУ. 2013. № 7. С. 36–40.
4. Ню В.В. Влияние параметров ударной системы “боек-инструмент-пластина” на эффективность передачи энергии удара / В.В. Ню // Современная техника и технологии в научных исследованиях: Матер. 6-й межд. конф. молодых ученых. Бишкек: Научная станция РАН, 2014. С. 176–180.
5. Ню В.В. К эффективности использования энергии удара при очистке пластин гидравлическими виброударными механизмами / В.В. Ню // Современные проблемы теории машин. 2015. №3. Новокузнецк, 2015. С. 168–173.
6. Королев В.И. Упругопластические деформации оболочек / В.И. Королев. М.: Машиностроение, 1971. 320 с.
7. Еремьянц В.Э. Динамика ударных систем. Моделирование и методы расчета / В.Э. Еремьянц. Palmarium academic publishing. Саарбрукен. Германия, 2012. 586 с.
8. Гольдсмит В. Удар. Теория и физические свойства соударяемых тел / В. Гольдсмит. М.: Стройиздат, 1965. 448 с.