

PACS numbers: 47.35.Lf, 47.40.Nm, 47.40.Rs, 47.55.dr, 62.50.Ef, 81.40.Vw

## **Определение сил при гидровзрыве в ограниченном объёме. I. Расчёт сил от действия ударных волн**

Ю. А. Невешкин, В. В. Остапчук, А. У. Соломяный

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского  
«Харьковский авиационный институт»,  
ул. Чкалова, 17,  
61070 Харьков, Украина*

Рассмотрено формирование внешней нагрузки от взрыва бризантного взрывчатого вещества в стационарном бассейне, вызванной действием ударных волн и волн разгрузки, а также её воздействие на дно бассейна. Учтены волны разгрузки от газового пузыря. Уточнены временные характеристики начала действия этих волн.

Розглянуто формування зовнішнього навантаження від вибуху бризантної вибухової речовини в стаціонарному басейні, що викликане дією ударних хвиль та хвиль розвантаження, а також його вплив на дно басейну. Враховано хвилі розвантаження від газового пузыря. Уточнено часові характеристики початку дії цих хвиль.

The formation of the external load (that was exerted by the shock and unloading waves) caused by the explosion of high (blasting) explosive in stationary pool is considered. The effect of the above-mentioned load on pool bottom is also studied. The unloading waves caused by the gas bubble are taken into consideration. Time characteristics of the beginning of the action of these waves are determined more precisely.

**Ключевые слова:** нагрузка, волновые взаимодействия, ударная волна, отражённая волна, волна разгрузки, газовый пузырь, стационарный бассейн, гидровзрыв.

*(Получено 16 сентября 2014 г.)*

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

Настоящая работа посвящена исследованию формирования внешней нагрузки и её воздействия на элементы конструкций гидро-

взрывных установок, в частности, на дно взрывного гидробассейна.

Взрывная штамповка получила широкое распространение в середине прошлого столетия и использовалась исключительно для штамповки высокопрочных и жаростойких листовых авиационных деталей.

Для реализации этих технологических процессов основная доля нагрузки отводится действию ударных волн начального этапа развития взрыва, параметры которых достаточно хорошо изучены и с успехом используются по сегодняшний день.

При внедрении взрывных технологий на производствах потребовалось создание взрывных установок с их последующим размещением в цеховых зданиях и сооружениях. При расчётах фундаментов и элементов конструкций этих установок использовались значения нагрузок от действия ударных волн. На сегодняшний день существующие нормативные строительные документы [1] базируются на этих данных, что практически позволяет выполнять лишь приближенные расчёты стойкости фундаментов и вопросов их сейсмичности.

В последние годы появилось ряд работ [2, 3] по изучению интегральных величин нагрузки гидровзрыва на элементы конструкций и дно взрывной ёмкости. Эти работы показали, что величины нагрузок, в частности, на дно гидробассейна, от действия газового пузыря соизмеримы или даже превосходят величины нагрузок от действия ударных волн [4]. Здесь получены довольно простые инженерные зависимости для определения величин импульсов.

Показано, что на начальном этапе развития взрыва нагрузка формируется от действия прямых ударных волн, волн разгрузки и действия гидропотока от расширяющегося газового пузыря. При этом расчётные зависимости величины суммарного импульса хорошо согласуются с экспериментом. Не смотря на удовлетворительное согласование расчётных значений импульсов с экспериментальными, здесь величина импульсов волн разгрузки вычислялась из представлений формирования их от действия свободной поверхности. Как будет показано дальше, природа формирования этих волн иная. При расчётах от действия свободной поверхности получается значительное расхождение таких важных параметров нагрузки как амплитудные значения сил, и особенно отличаются временные характеристики. Несмотря на недостаточную точность предыдущих исследований, они дали возможность значительно расширить технологические возможности взрывной металлообработки [5].

Так в работах [6–8] представлены исследования по возможности объёмной взрывной штамповки. Получен ряд деталей, произведён расчёт технологических параметров для объёмного взрывного деформирования и т.д. Здесь внешняя нагрузка вообще представлена

в виде импульса от действия ударных волн многократного отражения без учёта волн разгрузки и нагрузок от гидротока. Такой подход не позволяет ни до конца раскрыть возможности взрывной объёмной штамповки, ни производить расчёт технологических параметров этого вида обработки, не имея достаточно точного определения внешней нагрузки невозможно также рассчитывать сейсмичность взрывных установок [9].

Исходя из вышесказанного, необходимым является более детальное исследование формирования внешней нагрузки гидровзрыва на дно бассейна, вызванной действием ударных волн и волн разгрузки.

В действительности внешняя нагрузка кроме ударных волн давления и разгрузки состоит из нагрузки, вызванной действием запаздывающего гидротока от расширения продуктов детонации. Настоящее исследование посвящено определению первой части составляющей, а именно, действию ударных волн, предпосылки к которому были рассмотрены в работе [10].

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для нашего исследования использовалась схема и модельная установка [2, 3], для которой имеется большое количество экспериментальных данных.

На рисунке 1 представлена схема условий взрывания.

Как и в предыдущих исследованиях, импульс от действия ударных волн рассматривается в виде:

$$I_{\text{уд}}(R) = 2 \int_S i_{\text{уд}} ds = 4\pi \int_0^R i_{\text{уд}} R \sin \alpha dR, \quad (1)$$

где  $i_{\text{уд}}$  — удельный импульс давления в ударной волне, величина которого определяется [10] как

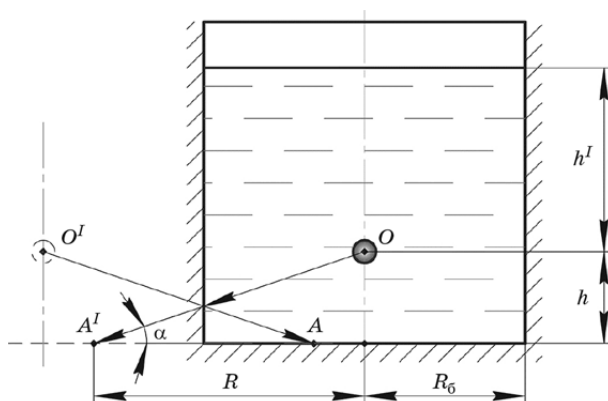
$$i_{\text{уд}} = \int_0^t P(t) dt, \quad (2)$$

где

$$P(t) = \begin{cases} P_m e^{-\frac{t}{\theta}}, & \text{при } t < \theta, \\ P_m 0,368 \frac{\theta}{t}, & \text{при } t \leq 10\theta, \end{cases} \quad (3)$$

$\theta$  — величина характерного времени затухания давления в ударной волне.

Такое представление нагрузки можно рассматривать как еди-



**Рис. 1.** Схема условий взрыва:  $h$  — расстояние заряда от дна бассейна,  $h^I$  — заглубление заряда,  $R_0$  — радиус бассейна.

ничный импульс для интервала времени от 0 до  $R_x/C_0$  (где  $C_0$  — скорость звука в воде), не раскрывая её временных и амплитудных характеристик. Для возможности расчёта нагрузки с учётом всех факторов, влияющих на её величину, для различных значений времени произведём замену переменной интегрирования  $R$  в выражении (1) на переменную времени  $t$ . После несложных преобразований получим:

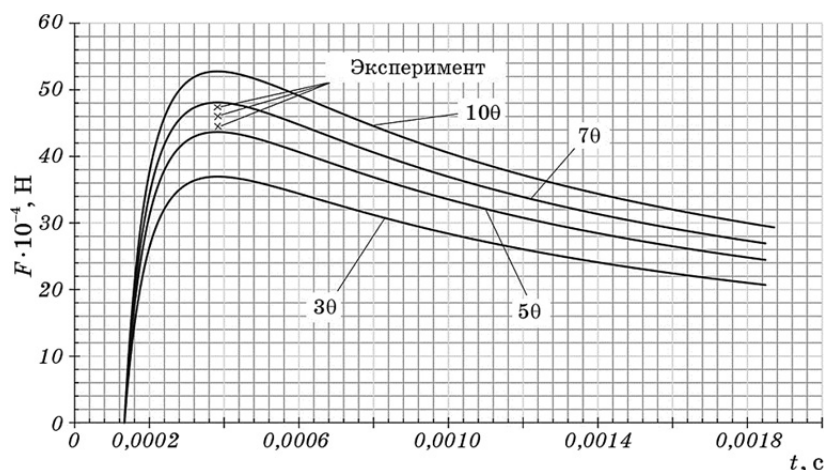
$$I_{\text{уд}}(t) = 4\pi k_\theta \int_0^t T(t) P_m dt, \quad (4)$$

где  $k_\theta$  — коэффициент, учитывающий принятое время затухания волны:

$$T(t) = \sqrt{C_0^2 t^2 - h^2} \left[ \frac{C_0^2 t^3}{3} - ht \right] \theta \sin \alpha.$$

Как видно из (2), величина удельного импульса  $i_{\text{уд}}$  значительно зависит от  $\theta$ . В большинстве работ, посвящённых листовой штамповке [11, 12], эта величина бралась равной  $(5-6)\theta$ . В работах [2, 6] расчёт нагрузки выполнялся для  $t = 10\theta$ .

Для удовлетворительной точности расчёта нагрузки величину  $\theta$  можно получить, исходя из экспериментальных данных. Наибольшую точность при измерениях нагрузки имеет значение максимальной силы. На рисунке 2 представлены зависимости силы действия прямой и отражённых волн давления от времени для различных значений  $\theta$ , рассчитанных по зависимости (4), при взрыве одного электродетонатора ЭД8 для  $h = 0,2$  м. Здесь же нанесены величины максимальной силы, полученные из эксперимента для этих



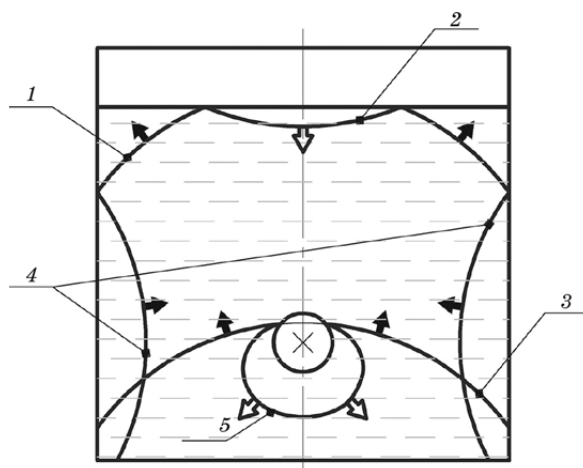
**Рис. 2.** Усилие на дно бассейна от ударных волн для различных значений  $\theta$  при взрыве одного электродетонатора ЭД-8 при  $h = 0,2$  м.

условий взрывания. Как видно из рисунка, экспериментальные значения максимальной силы находятся в области между расчётными значениями, полученными для  $(5-7)\theta$ . Это объясняется тем, что математическая модель, положенная в основу расчётов, исходит из акустического приближения (интенсивность отражённой волны равна интенсивности падающей волны при абсолютной жёсткости преграды), что не совсем справедливо в реальных условиях взрывной штамповки. Здесь не учитываются потери на излучение во внешнюю среду и другие факторы.

Исходя из этого, можно заключить, что в определении нагрузки на дно бассейна удовлетворительную точность может обеспечить расчёт с использованием значения времени затухания равного  $6\theta$ .

Для дальнейшего исследования волновых взаимодействий необходимо рассмотреть возможность влияния свободной поверхности на формирование нагрузки, действующей на дно бассейна.

На рисунке 3 представлена картина распространения отражённых волн давления и волн разгрузки начального этапа развития взрыва. Здесь 1 — прямая волна давления, 2 — волна разгрузки от взаимодействия волны 1 и свободной поверхности, 3 — волна давления отражённая от дна бассейна, 4 — волна давления от первого отражения волны давления от стенок бассейна, 5 — волна разгрузки от действия отражённой волны давления от дна с газовым пузырьком. Как видно из рисунка, возможное время прихода волны разгрузки от свободной поверхности ко дну равно  $t_{\text{рд}} = (2h + h^I) / C_0$ , а время начала действия отражённой волны давления от дна равно  $t_{\text{од}} = h / C_0$ . Для того чтобы эта волна разгрузки оказала существенное воздействие на дно бассейна, должно выполняться условие, при



**Рис. 3.** Схема распространения отражённых ударных волн давления и разгрузки начального этапа развития взрыва.

котором:

$$\frac{R_{\text{ф.разгрузки}}}{C_0} \leq \frac{R_{\text{ф.давления}}}{C_0} \quad \text{или} \quad \frac{2h^I + h}{C_0} \leq \frac{h}{C_0}, \quad (5)$$

откуда  $h^I \leq 0$ , что невозможно в условиях взрывной штамповки, так как подразумевает взрыв на свободной поверхности или выше её, который во взрывных технологиях не используется. Поэтому в реальных технологических процессах взрывной штамповки эти волны всегда встречаются в объёме жидкости, при этом интенсивность волны давления всегда будет превосходить интенсивность волн разгрузки, так как радиус фронта волны разгрузки  $R_{\text{ф.разгрузки}}$  всегда больше радиуса фронта волны давления  $R_{\text{ф.давления}}$ . Аналогичные рассуждения показывают, что и отражённые от стенок бассейна волны давления встречаются с волнами разгрузки в объёме жидкости. Как видно из рис. 3, первая волна разгрузки, которая может оказать воздействие на дно бассейна, будет волна 5.

Исходя из рис. 3, она придёт ко дну за время, равное

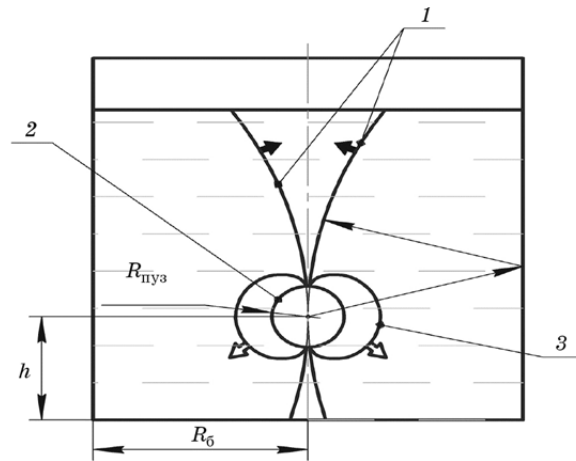
$$t_1^- = (3h - R_{\text{пузы1}})/C_0, \quad (6)$$

где  $R_{\text{пузы1}}$  — радиус пузыря, определяемый зависимостью [10]:

$$R_{\text{пузы1}} = R_0(1 + 2,42C_0t/R_0)^{0,4} \quad (7)$$

и рассчитываемый для времени  $2h/C_0$ , где  $R_0$  — радиус заряда.

Для упрощения расчётов будем считать, что следующие волны



**Рис. 4.** Формирование волн разгрузки от ударной волны первого отражения от стенок бассейна: 1 — ударные волны первого отражения, 2 — газовый пузырь, 3 — волны разгрузки.

разгрузки будут образовываться только от взаимодействия отражённых волн давления от стенок бассейна с газовым пузырём.

На рисунке 4 показана схема для определения времени формирования волны разгрузки от первого отражения волн давления от стенок бассейна. Как видно из этого рисунка, вторая волна разгрузки от газового пузыря придёт ко дну за время:

$$t_2^- = (2R_6 + h - R_{\text{пуз}2})/C_0, \quad (8)$$

где  $R_{\text{пуз}2}$  — рассчитывается для времени  $2R_6/C_0$ .

Аналогично и третья волна разгрузки придёт ко дну за время:

$$t_3^- = (4R_6 + h - R_{\text{пуз}3})/C_0, \quad (9)$$

где  $R_{\text{пуз}3}$  — рассчитывается для времени  $4R_6/C_0$  и т.д.

С увеличением размеров газового пузыря наступает момент, когда отражённые от стенок бассейна волны давления экранируются им и не могут взаимодействовать с дном бассейна. Определим это время. Для этого рассмотрим схему волновых взаимодействий, которая позволит в первом приближении рассчитать это время, представленную на рис. 5.

Упростим методику определения времени начала экранирования. Как видно из рис. 5, отрезок  $EC$  очень мал; поэтому будем считать что  $O^I E = R_n \approx O^I C \approx O^I C^I$ , тогда для определения начала времени экранирования необходимо решить систему из двух уравнений. Первое — закон развития газового пузыря (7) и второе уравне-

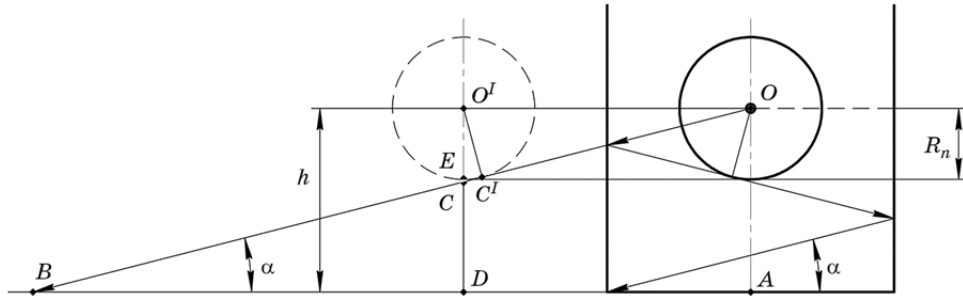


Рис. 5. Расчётная схема для учёта экранирующего действия газового пузыря.

ние — соотношение, полученное из рис. 5, с рассмотрением подобных треугольников  $OAB$  и  $CDB$ :

$$\frac{AB}{DB} = \frac{OA}{CD}, \quad \frac{2R_6 + DB}{DB} = \frac{h}{h - R_n}, \quad DB = \frac{2R_6(h - R_n)}{R_n},$$

$$OB^2 = (C_0 t_{\text{экp}})^2 = h^2 + \left[ 2R_6 + \frac{2R_6(h - R_n)}{R_n} \right]^2, \quad (10)$$

а именно, из

$$\frac{(R_n / R_0)^{2,5} - 1}{2,42C_0} R_0 = \frac{\sqrt{h^2 + \left[ 2R_6 + \frac{2R_6(h - R_n)}{R_n} \right]^2}}{C_0} \quad (11)$$

находим радиус пузыря, а затем и время, которому соответствует этот радиус, по зависимости (7) или (10). На рисунке 6 показано графическое решение уравнения (11) для условий взрывания одного ЭД8 для  $h = 0,2$  м.

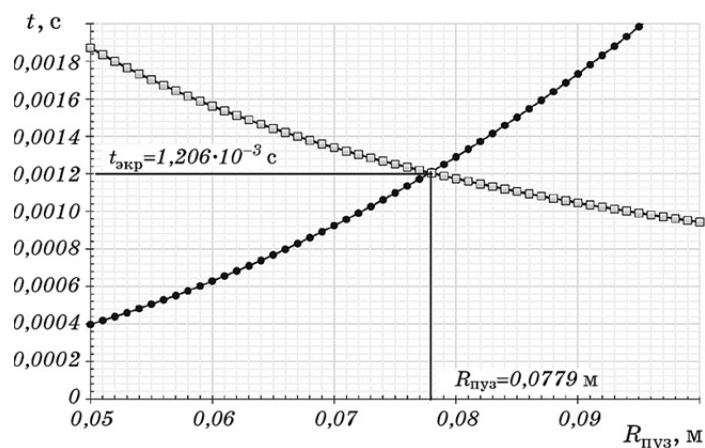
Исходя из выше изложенного, можно заключить, что в моменты прихода каждой волны разгрузки ко дну необходимо из уравнения (4) вычитать величины их импульсов, определяемые так же уравнением (4), но с подстановкой своего значения  $P_m$ , которое можно найти из условия возникновения кавитации [12]:

$$P_m^p = P_{\text{пуз}} + P_k + \rho_0 g h, \quad (12)$$

где  $P_{\text{пуз}} = 134 \cdot 10^6 (R_0 / R_{\text{пуз}})^{3,75}$  — давление в газовом пузыре в момент подхода волны давления (Па),  $P_k = 405300$  Па — разрывная прочность жидкости [12],  $\rho_0 g h$  — давление столба жидкости.

Таким образом, результирующий импульс от ударных волн мо-





**Рис. 6.** Графическое нахождение решения уравнения (10) — радиуса пузыря и времени экранирования.

жет быть выражен:

$$I_{рез1} = 4\pi k_0 \left[ \int_0^{t_{экп}} T(t)P_m dt - \int_{t_1}^t T(t)P_{m1}^p dt - \int_{t_2}^t T(t)P_{m2}^p dt - \dots - \int_{t_n}^t T(t)P_{mn}^p dt \right], \quad (13)$$

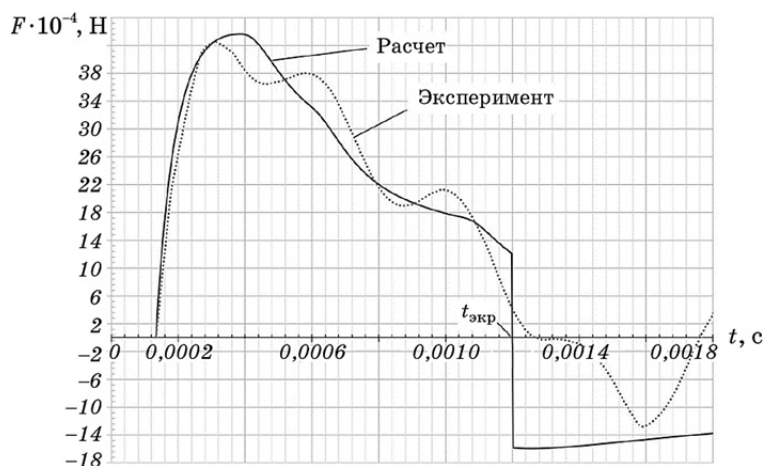
где  $n$  — номер волны разгрузки.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 7 представлена расчётная кривая зависимости силы, действующей на дно бассейна, от времени, определённая по приведённой методике. Здесь же нанесена экспериментально полученная кривая. Максимальное значение силы находится в диапазоне экспериментальных значений, приведённых на рис. 2. В расчётной кривой также учтено экранирование ударных волн газовым пузырём. Как видно из рисунка, расчётное значение нагрузки имеет удовлетворительное совпадение с экспериментом, а нижняя часть (по оси абсцисс за временем экранирования) сместится ближе к экспериментальной при дальнейшем учёте влияния гидропотока.

### 4. ВЫВОДЫ

Представленная методика позволяет рассчитать силы гидровзрыва в ограниченном объёме. При этом учитываются параметры взрыва: размеры стационарного бассейна, высота подвески заряда, физические характеристики заряда, что в итоге позволяет с достаточ-



**Рис. 7.** Зависимость усилия действующего на дно от времени для условий взрывания одного ЭД8 для  $h = 0,2$  м.

ной степенью точности определять основные технологические параметры при объёмной взрывной штамповке, а также производить расчёт параметров сейсмичности взрывных установок от действия ударных волн и волн разгрузки.

В дальнейшем (во второй части) будет представлен расчёт сил гидровзрыва от действия гидропотока.

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. М. Ф. Барштейн, Н. М. Бородачев, Л. Х. Блюмина и др., *Справочник проектировщика* (Ред. Б. Г. Корнев, И. М. Рабинович) (Москва: Стройиздат: 1981), с. 215.
2. А. У. Соломяный, А. В. Шкалова, В. А. Лесничий, А. Т. Колодезный, *Импульсная обработка металлов давлением: Сборник трудов* (Харьков: 1986), вып. 13, с. 95.
3. А. У. Соломяный, В. Е. Панченко, В. И. Московец, *Импульсная обработка металлов давлением: Сборник трудов* (Харьков: 1986), вып. 14, с. 104.
4. А. У. Соломяный, А. В. Шкалова, Е. В. Агаркова, К. Л. Гузь, *Процессы и оборудование импульсной штамповки: Сборник трудов* (Харьков: 1989), с. 37.
5. Ю. А. Невешкин, *Авиационно-космическая техника и технология*, № 11: 150 (2007).
6. А. В. Шкалова, В. К. Борисевич, П. И. Коваленко, А. У. Соломяный, *Технологические системы*, № 5: 68 (2001).
7. А. В. Шкалова, *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением*, № 11: 23 (1999).
8. Ю. А. Невешкин, В. К. Борисевич, *Авиационно-космическая техника и технология*, № 9: 15 (2010).

9. В. В. Остапчук, Н. И. Семишов, *Праці Всеукраїнської науково-технічної конференції «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ–2011» (22–25 листопада 2011 г.)* (Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»: 2011), т. 1, с. 177.
10. *Фізика взрива* (Ред. Л. П. Орленко) (Москва: ФИЗМАТЛИТ: 2006), т. 1.
11. Дж. Райнхард, Дж. Пирсон, *Взрывная обработка металлов* (Москва: Мир: 1966).
12. *Штамповка взрывом. Основы теории* (Ред. М. А. Анучин) (Москва: Физматгиз: 1975).

## REFERENCES

1. M. F. Barshteyn, N. M. Borodachev, L. Kh. Blyumina et al., *Spravochnik Proektirovshchika* (Eds. B. G. Korenev and I. M. Rabinovich) (Moscow: Stroyizdat: 1981), p. 215 (in Russian).
2. A. U. Solomyanyi, A. V. Shkalova, V. A. Lesnichiy, and A. T. Kolodeznyi, *Impul'snaya Obrabotka Metallov Davleniem: Sbornik Trudov* (Kharkov: 1986), Iss. 13, p. 95 (in Russian).
3. A. U. Solomyanyi, V. E. Panchenko, and V. I. Moskovets, *Impul'snaya Obrabotka Metallov Davleniem: Sbornik Trudov* (Kharkov: 1986), Iss. 14, p. 104 (in Russian).
4. A. U. Solomyanyi, A. V. Shkalova, E. V. Agarkova, and K. L. Guz', *Protsessy i Oborudovanie Impul'snoy Shtampovki: Sbornik Trudov* (Kharkov: 1989), p. 37 (in Russian).
5. Yu. A. Nevshkin, *Aviatsionno-Kosmicheskaya Tekhnika i Tekhnologiya*, No. 11: 150 (2007) (in Russian).
6. A. V. Shkalova, V. K. Borisevich, P. I. Kovalenko, and A. U. Solomyanyi, *Tekhnologicheskie Sistemy*, No. 5: 68 (2001) (in Russian).
7. A. V. Shkalova, *Kuznechno-Shtampovochnoe Proizvodstvo. Obrabotka Metallov Davleniem*, No. 11: 23 (1999) (in Russian).
8. Yu. A. Nevshkin and V. K. Borisevich, *Aviatsionno-Kosmicheskaya Tekhnika i Tekhnologiya*, No. 9: 15 (2010) (in Russian).
9. V. V. Ostapchuk and N. I. Semishov, *Pratsi Vseukrayins'koyi Naukovo-Tekhnichnoyi Konferentsiyi 'Integrovani Komp'yuterni Tekhnologiyi v Mashynobuduvanni IKTM–2011' (November 22–25, 2011)* (Kharkiv: Natsional'nyy Aerokosmichnyy Universytet im. M. Ye. Zhukovsk'oho 'KhAI': 2011), vol. 1, p. 177 (in Russian).
10. *Fizika Vzryva* (Ed. L. P. Orlenko) (Moscow: FIZMATLIT: 2006), vol. 1 (in Russian).
11. J. S. Rinehart and J. Pearson, *Vzryvnaya Obrabotka Metallov (Behavior of Metals under Impulsive Loads)* (Moscow: Mir: 1966) (Russian translation).
12. *Shtampovka Vzryvom. Osnovy Teorii* (Ed. M. A. Anuchin) (Moscow: Fizmatgiz: 1975) (in Russian).