

УДК: 519.633.2

DOI: 10.53816/23061456\_2022\_7-8\_167

## ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ТОНКОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ВОЛНОЙ ДАВЛЕНИЯ

### NUMERICAL EVALUATION OF PLASTIC DEFORMATION OF A THIN METAL PLATE INTERACTION WITH A PRESSURE WAVE

*Канд. техн. наук К.С. Кулаков, И.К. Бородин, В.С. Помазов*

*Ph.D. K.S. Kulakov, I.K. Borodin, V.S. Pomazov*

*АО «НПО Спецматериалов»*

В статье рассмотрено численное моделирование поведения тонкой зафиксированной пластины, подвергнутой воздействию подводной волны давления. Совместное решение уравнений гидродинамики, нелинейной акустики и механики позволило оценить долю пластической деформации. Серия параметрических исследований допустила произвести расчёт амплитуды остаточной деформации в зависимости от расстояния между источником взрыва и тонкой пластиной, которая может выступать в качестве простого датчика давления. Продемонстрировано отсутствие резонансных эффектов вследствие демпфирующего воздействия окружающей среды, теоретически возможных при совпадении вынужденной частоты колебаний пластины с одной из собственных, выявленных в предварительно проведенном модальном анализе.

**Ключевые слова:** датчик давления, пластическая деформация, нелинейная акустика.

This article presents the results of numerical simulation of the interaction of a shock wave due to an electrohydraulic effect with a fixed thin metal plate. The joint solution of the equations of hydrodynamics, nonlinear acoustics, and mechanics made it possible to estimate the proportion of plastic deformation. A series of parametric studies made it possible to calculate the residual deformation amplitude depending on the distance between the explosion source and the thin plate. Which can act as a simple pressure sensor. The absence of resonant effects due to the damping effect of the environment, which are theoretically possible when the forced oscillation frequency of the plate coincides with one of the natural ones, identified in the preliminary modal analysis, is demonstrated.

**Keywords:** pressure sensor, plastic deformation, nonlinear acoustics.

При проведении исследований по формированию волны давления вследствие электрического разряда в жидкости требуется регистрация различных электрофизических параметров [1].

Работа большинства современных датчиков давления основана на переводе пневматического сигнала в электрический с помощью пьезоэ-

лектрического преобразователя. Недостатками данного способа являются сильная зависимость свойств пьезокерамики от температуры и необходимость в считывающем оборудовании [2]. Также для медленноменяющихся сигналов используются интегрирующие аналогово-цифровые преобразователи (АЦП). Они проводят изме-

рение не мгновенного значения сигнала, которое изменяется под действием помех, а интегрируют сигнальную функцию за заданный промежуток времени, который заведомо меньше постоянной времени процессов, происходящих в контролируемой среде, но заведомо больше периода самой низкочастотной помехи [3].

Для быстропротекающих процессов, например распространение ударной волны в конденсированной среде зачастую важно оценить лишь амплитуду давления в конкретной точке без снятия сигнала целиком. В качестве считывателя амплитуды давления в данной статье предлагается использовать жестко закрепленную круглую стальную пластину толщиной 1 мм и радиусом 120 мм.

Такие измерения актуальны при исследовании взрывчатых веществ как в оборонной промышленности, так и при добыче полезных ископаемых. Калибровка подобного датчика основывается

на сопоставлении давления в различных точках при распространении ударной волны в среде со значением амплитуды пластической деформации, при проведении численных экспериментов, которые способствуют существенной экономии временных и финансовых затрат.

Пластическая деформация — необратимая деформация, при которой после окончания воздействия происходит необратимое смещение межатомных связей и изменение различных физических свойств материала. Значение модуля упругости и модуля пластичности (isotropic tangent modulus) равно тангенсу угла наклона кривой на диаграмме напряжения и относительной деформации. На рис. 1 проиллюстрирована упругопластическая модель со значением конкретных коэффициентов, соответствующих изотропной металлической пластине [4].

На рис. 2 представлена постановка численного эксперимента по взаимодействию волны

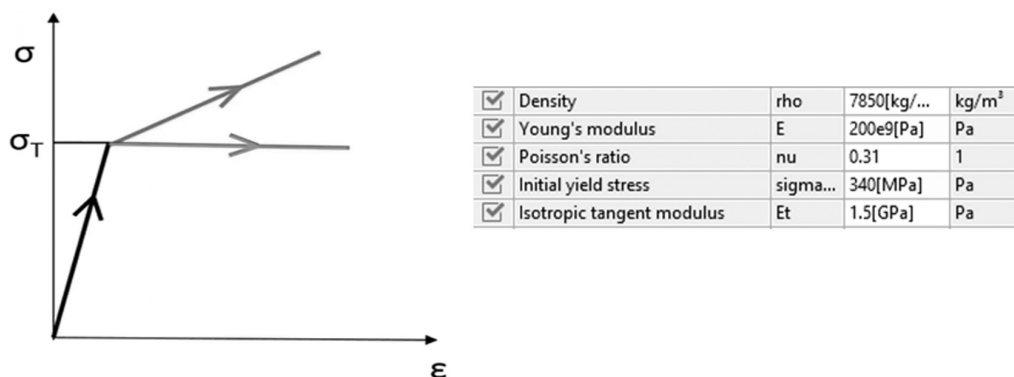


Рис. 1. Материальная модель датчика давления, где  $\sigma_T$  — предел упругости

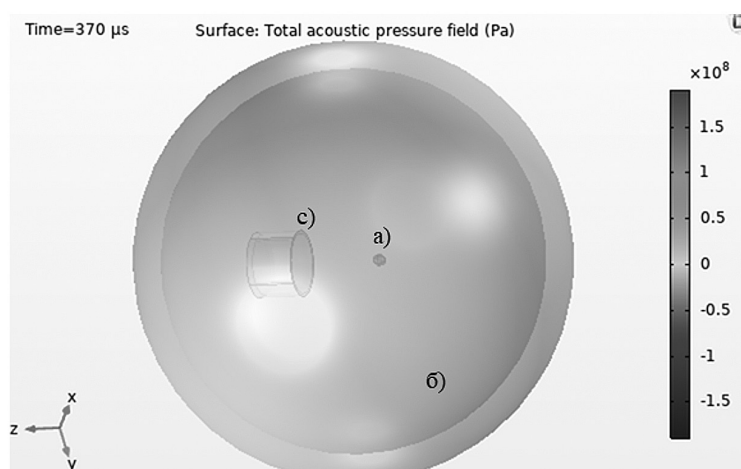


Рис. 2. Численное решение виброакустической задачи: а — источник взрыва; б — бесконечная окружающая среда; с — закрепленная тонкая пластина

давления вследствие электрогидравлического эффекта с закрепленной металлической пластиной. Начальные условия распространения ударной волны вследствие электрогидравлического эффекта берутся исходя из формул.

$$E = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_0^3 \cdot \rho \cdot \left( \frac{R_0}{\tau} \right)^2 / (\gamma - 1),$$

где  $E$  — запасенная энергия в конденсаторе;  $R_0$  — конечный радиус плазменного канала в сферическом приближении;  $\rho$  — плотность жидкости;  $\tau$  — характерное время ввода энергии в плазменный канал;  $\gamma$  — эффективный показатель адиабаты для плазмы.

$$\tau = \pi \cdot \sqrt{LC},$$

где  $C$  — ёмкость конденсатора;  $L$  — индуктивность контура.

Давление в плазменном канале  $P$  перед отрывом ударной волны можно оценить по формуле.

$$P = \rho \cdot \left( \frac{R_0}{\tau} \right)^2.$$

Таким образом, имея конденсаторную батарею ёмкостью 280 мкФ с запасённой энергией 40 кДж, индуктивность кабельной трассы около 1 мкГн и учитывая, что эффективный показатель адиабаты примерно равен 1,26, можно определить, что конечный радиус плазменного канала будет равен 23 мм, с давлением 210 МПа, что соответствует плотности энергии 807 МДж/м<sup>3</sup>.

Для описания распространения волны давления использовалось уравнение Вестервельта с коэффициентом нелинейности для воды, равным 5, а на границы металлической пластины было наложено условие акустического импеданса [5–8].

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho \cdot c^2} \cdot \frac{d^2 p}{dt^2} + \nabla \left( -\frac{1}{\rho} \cdot (\nabla p - q) \right) = \\ = Q + \frac{\beta}{\rho^2 \cdot c^4} \cdot \frac{d^2 p^2}{dt^2}, \end{aligned}$$

где  $c$  — локальная скорость звука в среде;  $p$  — давление;  $\beta$  — коэффициент нелинейности;  $q$  — источники объёмных сил;  $Q$  — монополярный источник.

Нелинейность выражена локальными изменениями свойств окружающей среды вследствие частичного поглощения энергии распространяющейся ударной волны.

На рис. 3 представлена схема эксперимента, целью которого является определение амплитуды прогиба пластины, находящейся на различных расстояниях от места взрыва.

Таким образом, первой актуальной задачей является нахождение минимального расстояния от источника взрыва до датчика давления. Критерием безопасности будет являться значение амплитуды механических напряжений в тонкой стальной пластине, пределом прочности которой можно считать значение 450 МПа.

На рис. 4 представлены временные зависимости максимальной механической напряжённости в тонкой пластине при её взаимодействии с ударной волной. Видно, что с учётом определенного предела прочности, минимальное расстояние, при котором тонкая пластина способна сохранить пластическую деформацию без разрушения, составляет примерно 30 см.

При расчёте деформации тонкой пластины важно отсутствие её резонансного усиления. Таким образом, необходимо изучить собственные частоты резонатора. На рис. 5 представлены результаты модального анализа тонкой пластины в пакете COMSOL MULTIPHYSICS.

Из рис. 5 можно сделать вывод, что вынужденная частота колебаний пластины вследствие взаимодействия с ударной волной не должна лежать в окрестности 173 Гц.

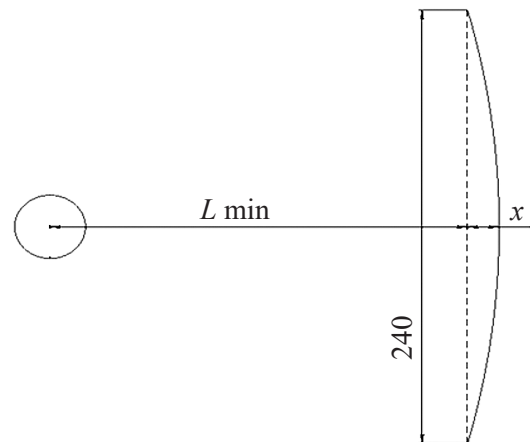


Рис. 3. Схема эксперимента, где  $x$  — амплитуда деформации пластины;  $L \min$  — минимальное безопасное расстояние до источника взрыва

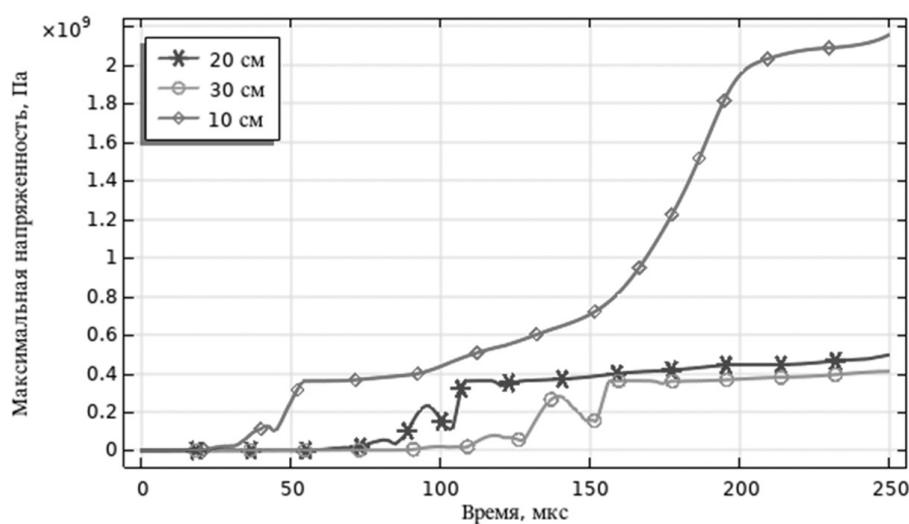


Рис. 4. Временная зависимость амплитуды механической напряженности

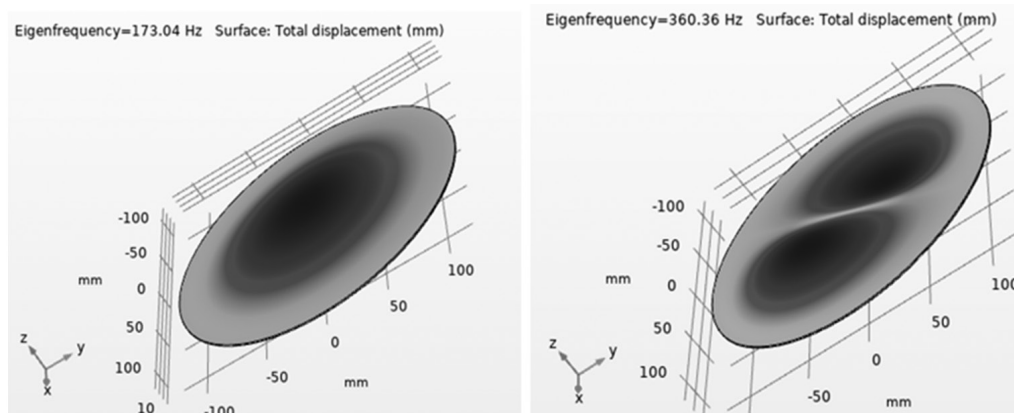


Рис. 5. Две первые собственные частоты предлагаемого датчика давления

На рис. 6 представлены значения амплитуды деформации пластины, находящейся на различных расстояниях от источника взрыва.

Из графиков, представленных на рис. 6, можно заметить отсутствие колебательного процесса. Конечный небольшой спад амплитуды обусловлен исчезновением упругой деформации после прохождения волны давления. Отсутствие вибрации во многом обусловлено демпфирующими свойствами окружающей среды, учтёнными в математической модели [9].

На рис. 7 можно видеть, что рассчитанная деформация совпадает по форме с предсказанной модальным анализом.

Результатом постобработки численных экспериментов является зависимость амплитуды остаточной деформации пластины от расстояния до источника взрыва, которая представлена на рис. 8.

Таким образом, закреплённая стальная пластина радиусом 120 мм и толщиной 1 мм может служить простым датчиком давления с широким диапазоном измерений.

## Выводы

Создана динамическая математическая модель взаимодействия металлической пластины с ударной волной вследствие электрогидравлического эффекта.

Определены величины и формы теоретически возбуждаемых мод пластины.

Показана возможность использования закреплённой тонкой металлической пластины в качестве простого датчика давления.

Рассчитано минимальное расстояние для размещения датчика относительно источника взрыва.

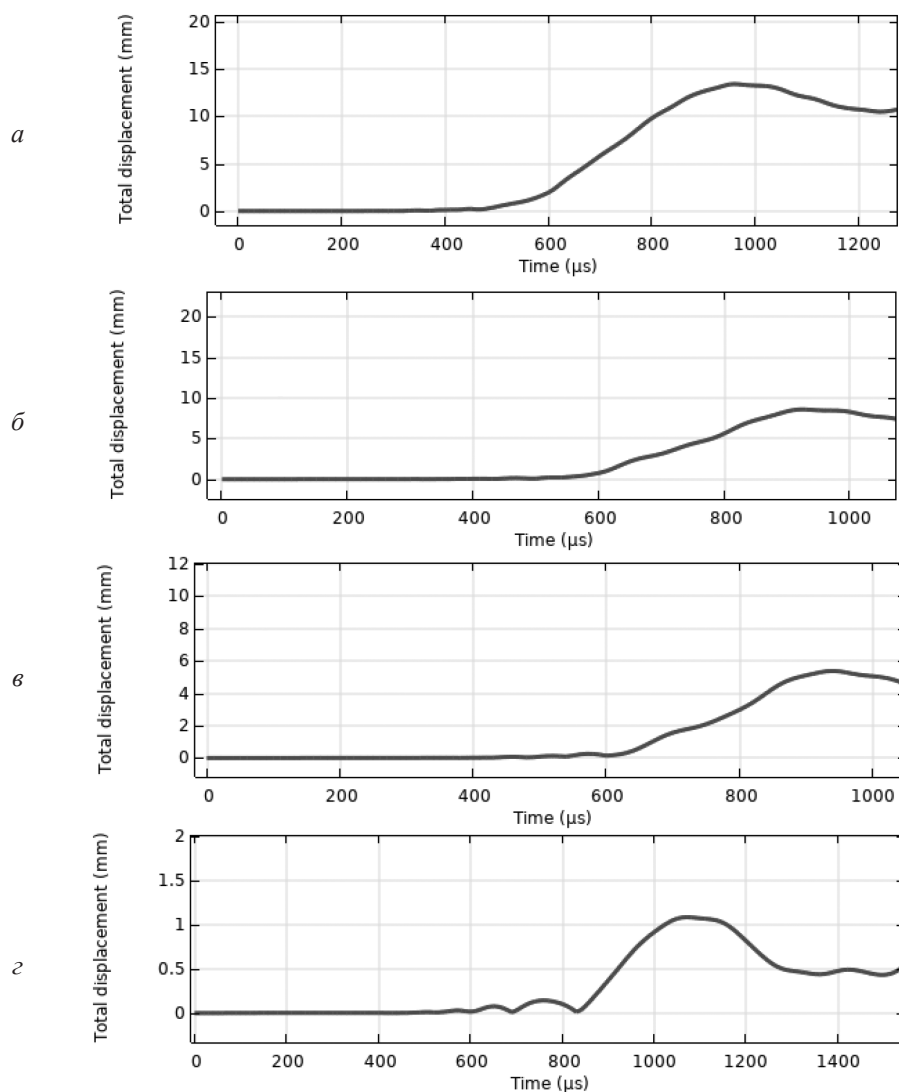


Рис. 6. Зависимость амплитуды прогиба пластины от времени при различном удалении от источника взрыва (см): а — 70; б — 80; в — 90; г — 130

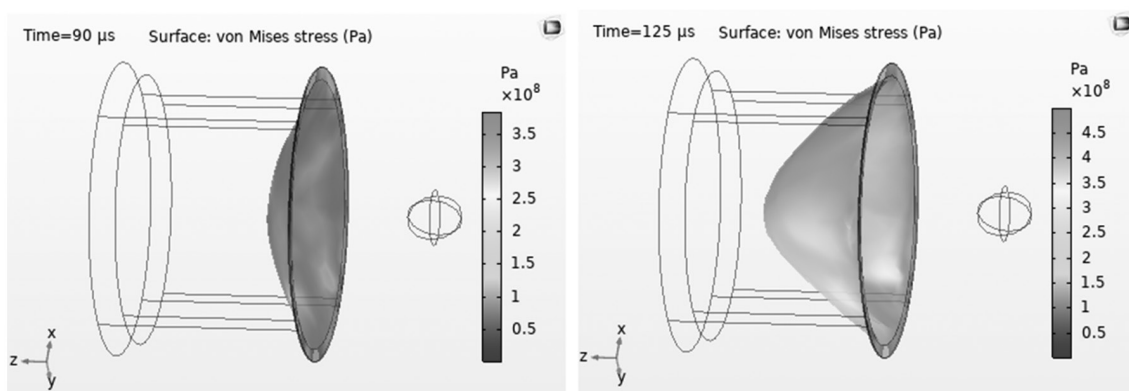


Рис. 7. Развитие пластической деформации в тонкой пластине на 90 и 125 мкс после взрыва (коэффициент масштабирования деформации 50)

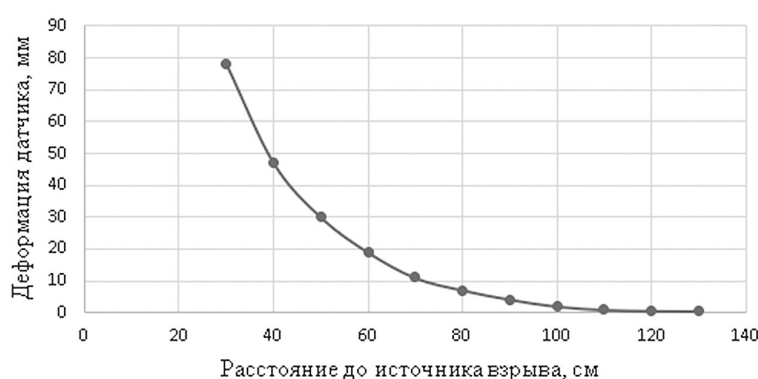


Рис. 8. Зависимость остаточной деформации пластины от расстояния до источника взрыва

### Литература

1. <https://emis-kip.ru/ru/company/sob/articles/printsip-raboty-datchikov-davleniya/>
2. <https://piezo.ucoz.ru/index/0-29>
3. <https://mymcu.ru/articles/kak-rabotayut-analogo-tsifrovie-preobrazovateli-chto-mozhno-uznat-iz-spetsifikatsii-na-atstp.html>
4. Enrique Casarejos «Finite Element Simulation for Analysing the Design and Testing of an energy Absorption System», 2016. [www.mdpi.com/journal/materials](http://www.mdpi.com/journal/materials)
5. Карзова М.М., Юлдашев П.В., Росницкий П.Б. и др. Численные подходы к описанию нелинейных ультразвуковых полей медицинских диагностических датчиков // Известия РАН. 2017. Том 81. № 8. С. 1028–1033.
6. Дж. Уизем. Линейные и нелинейные волны. — М.: Мир, 1977. 624 с.
7. Нелинейные волны [Текст]: Пер. с англ. / У.Д. Хейес, С.А. Тау, К.М. Дафермос и др.; Под ред. С. Лейбовича и А. Сибасса; Под ред. акад. А.В. Гапонова и д-ра физ.-мат. наук Л.А. Островского. — Москва: Мир, 1977. 319 с.
8. Джеймс Лайтхилл. Волны в жидкостях. — М.: Мир, 1981. 598 с.
9. <https://www.comsol.ru/blogs/damping-in-structural-dynamics-theory-and-sources/>

### References

1. <https://emis-kip.ru/ru/company/sob/articles/printsip-raboty-datchikov-davleniya/>
2. <https://piezo.ucoz.ru/index/0-29>
3. <https://mymcu.ru/articles/kak-rabotayut-analogo-tsifrovie-preobrazovateli-chto-mozhno-uznat-iz-spetsifikatsii-na-atstp.html>
4. Enrique Casarejos «Finite Element Simulation for Analyzing the Design and Testing of an energy Absorption System», 2016. [www.mdpi.com/journal/materials](http://www.mdpi.com/journal/materials)
5. Karzova M.M., Yuldashev P.V., Rosnitsky P.B., Khokhlova V.A. Numerical approaches to the description of nonlinear ultrasonic fields of medical diagnostic sensors. *Izvestiya RAN*. 2017. Vol. 81. № 8. P. 1028–1033.
6. J. Whitham. *Linear and non-linear waves*. — M.: Mir, 1977. 624 p.
7. *Nonlinear waves* [Text]: Per. from English. / W.D. Hayes, S.A. Tau, K.M. Dafermos and other]; Ed. S. Leibovich and A. Sibass; Ed. acad. A.V. Gaponov and Dr. Phys.-Math. Sciences L.A. Ostrovsky. — Moscow: Mir, 1977. 319 p.
8. James Lighthill *Waves in liquids*. — M.: Mir, 1981. 598 p.
9. <https://www.comsol.ru/blogs/damping-in-structural-dynamics-theory-and-sources/>