

---

УДК 539.3

Воробьев Ю.С., Чернобрышко М.В.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫХ  
ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДАПТИВНЫХ  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МЕТОДОВ**

**Введение.**

При исследовании прочности плит значительный интерес представляет анализ напряженного состояния при воздействии ударно-волновой нагрузки [1]. Такие задачи возникают при анализе прочностной надежности морских платформ и прибрежных защитных сооружений, которые подвергаются воздействиям как гидродинамического,

так и ударно-волнового характера.

Исследовалось два варианта нагружения: воздействие ударной волны избыточного давления в воздушной среде и воздействие гидродинамической нагрузки. В обоих случаях рассматривалась плита длиной 10 м, шириной 3 м и толщиной 0,5 м. Материал плиты характеризуется следующими свойствами:  $\rho=2400 \text{ кг/м}^3$ ,  $\nu=0,3$ ,  $E=104 \text{ МПа}$ .

### **1. Адаптивный конечно-разностный метод.**

Как правило, поставленная задача в общем виде решается на основе вариационных методов исследования с использованием метода конечных элементов [2]. Однако, при исследовании конкретных задач особо важно учитывать неравномерность распределения нагрузки как по поверхности плиты, так и во времени. При этом деформационные процессы в плите неоднородны. Зоны упруго-пластических деформаций локализованы, и их границы изменяются во времени.

Решение задачи проводится на основе метода конечных разностей [3] с использованием вложенной прямоугольной сетки [4]. Такой подход позволяет снизить погрешность при линейризации задачи в локальных зонах упругопластического деформирования [5]. В качестве критерия контроля погрешности по шагу во времени выбираем локальную погрешность решения:

$$e = \|U - u\|, \quad (1)$$

где  $U$  – точное, а  $u$  – приближенное решения для выбранного момента времени  $t_{k+1}$ , при условии, что для предыдущего момента времени  $t_k$  эти решения совпадают. При этом получаем для фиксированного  $t_{k+1}$  массив локальных погрешностей  $e_{\tau,h}$ . Контроль величин  $e_{\tau,h}$  позволяет путем половинного деления конечно-разностной сетки определять величины  $e_{\tau/2,h}$  и  $e_{\tau,h/2}$ , и тем самым корректировать максимальную погрешность вычислений, согласно (1).

### **2. Анализ прочности плиты при воздействии ударной волны в воздушной среде.**

Реакция плиты на импульсную нагрузку исследовалась на основе численного эксперимента [6] воздействия фронта ударной волны на плиту. В результате расчетов определялась поверхность избыточного давления, которое воздействует на конструкцию в заданный интервал времени. Дальнейшая обработка результатов позволяет построить поверхность максимальных значений избыточного давления для всей плоскости  $xy$  исследуемой плиты (рис. 1).

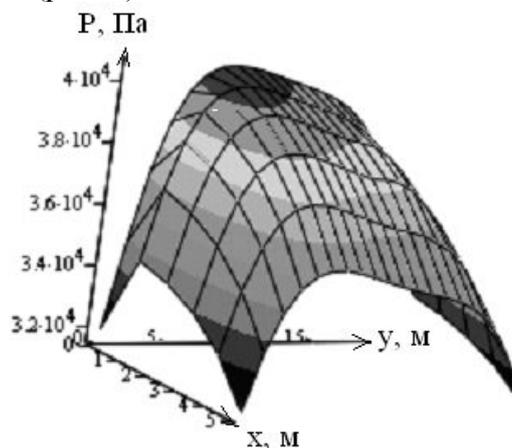


Рисунок 1 – Поверхность избыточного давления

Анализ поверхности, построенной по максимальным значениям избыточного давления на каждую исходную ячейку исследуемой конструкции, позволяет сделать вывод о достаточной гладкости функции  $P(y, x)$ . В силу этого, для дальнейшего исследования в задаче о прочности и целостности элементов строительного сооружения при ударно-волновом воздействии достаточно определить максимальный элемент поверхности и координаты ячейки приложения этой величины.

Рассматривался случай, когда численное значение максимальной нагрузки соответствовало величине 0,4 атмосферы или  $0,4 \times 101325 = 40530$  Па. Максимальная нагрузка достигалась в точке с координатами  $(y, x) = (0.25 \text{ м}, 0.82 \text{ м})$ . Рассматривались перемещение (рис. 2) и интенсивность напряжений (рис. 3) в заданной точке.

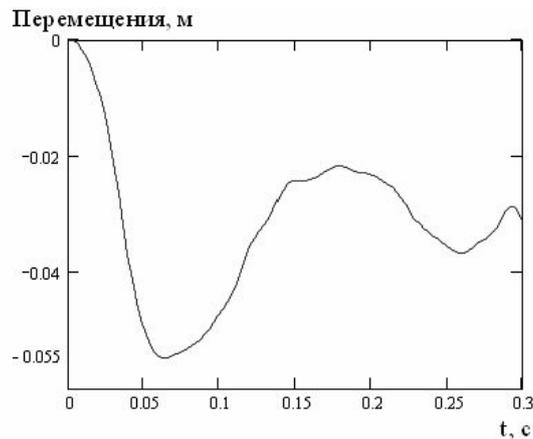


Рисунок 2 – Перемещения при импульсном нагружении

Анализ рис. 2 и 3 позволяет сделать вывод о затухании волнового процесса в плите с течением времени. Однако, максимальная величина интенсивности напряжения, равная 181 МПа, свидетельствует о большой вероятности разрушения конструкции в искомой точке, что может повлиять на целостность плиты в целом.

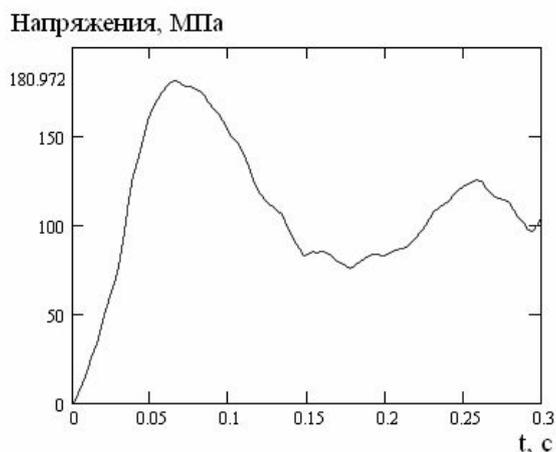


Рисунок 3 – Интенсивность напряжений при импульсном нагружении

### **3. Анализ прочности плиты при гидродинамическом воздействии.**

При исследовании воздействия гидродинамической нагрузки на плиту в качестве нагрузки выбирались экспериментальные данные по нахату уединенной волны на вертикальную стенку. В качестве вертикальной стены рассматривалась описанная вы-

ше плита. Результаты эксперимента были получены в рамках данного проекта в работах Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (ИГиЛ), Института вычислительной техники СО РАН (ИВТ) и Кемеровского государственного университета (КемГУ) [7].

На рис. 4 представлены результаты для гидродинамической нагрузки  $F / (\rho g h^2)$ , действующей на вертикальную стенку, и значения безразмерного гидродинамического давления  $P / (\rho g h)$  в угловой точке, где  $\rho$  - плотность жидкости,  $h$  - глубина жидкости вдали от волны,  $g$  - ускорение свободного падения. Уединенная волна с начальной амплитудой  $a/h = 0,5$  набегает на вертикальную стенку, которая располагалась на расстоянии  $x/h = 15$  от начального положения вершины волны. Отметим, что во все моменты времени максимальное значение давления на вертикальной стенке достигается в угловой точке. Кривым 1 и 2 показаны результаты, полученные в ИГиЛ, кривыми 3 и 4 – в КемГУ, кривая 5 показывает распределение гидродинамического давления, полученного в ИВТ (значения для давления в угловой точке не определялись).

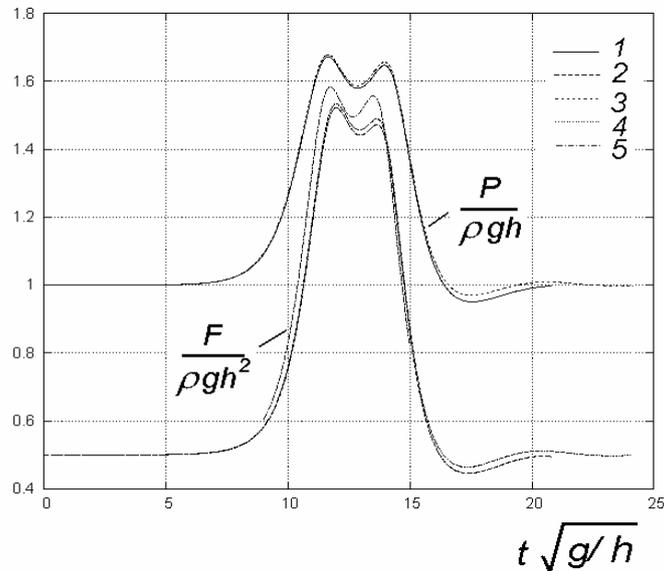


Рисунок 4 – Гидродинамические нагрузки на плиту

Видно, что имеется достаточно хорошее согласие с численными расчетами, выполненными в ИГиЛ СО РАН и КемГУ, как для гидродинамической силы, так и для давления в угловой точке. Значения для гидродинамической силы, полученные в ИВТ СО РАН, несколько отличаются, что может быть связано с погрешностями счета.

Анализ результатов, представленных на рис. 4 позволил определить максимальное расчетное значение гидродинамической нагрузки, зависящее от глубины слоя жидкости. Величина  $P = 16\,667h$  Па использовалась для прочностных расчетов определения напряженно-деформированного состояния плиты. Исследовались перемещения и интенсивности напряжений для плит при  $h=1$  м,  $h=2$  м и  $h=3$  м. Сравнивались максимальные величины.

На рис. 5 и 6 представлены перемещения и интенсивности напряжений для глубины  $h=1$  м.

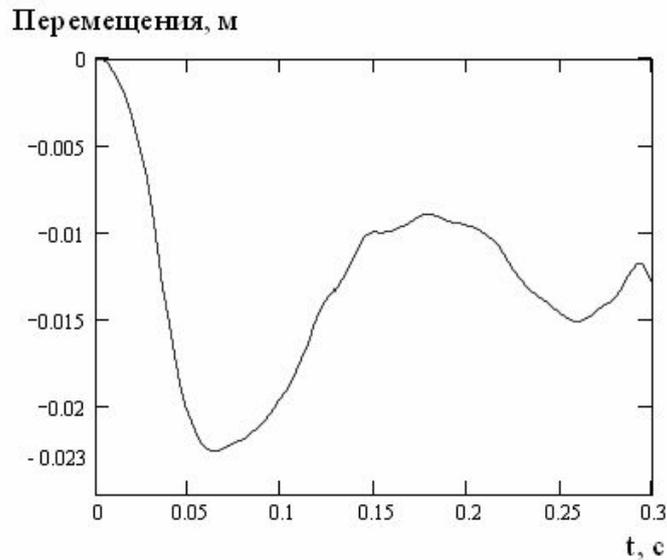


Рисунок 5 – Перемещения при гидродинамической нагрузке для глубины  $h=1$  м

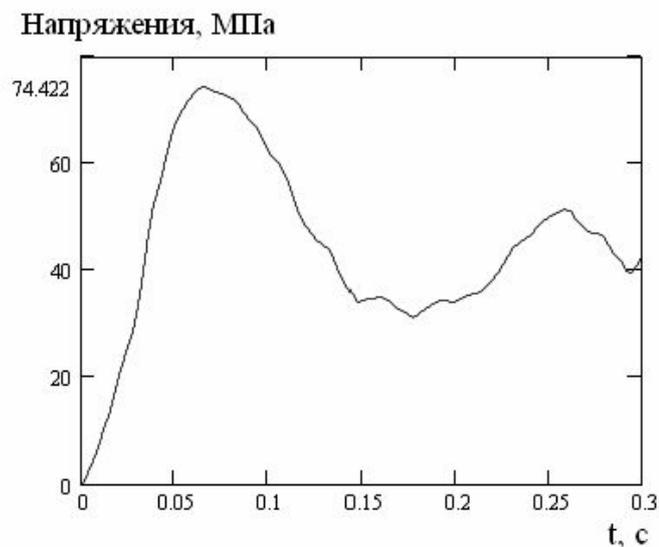


Рисунок 6 – Интенсивность напряжений при гидродинамической нагрузке для глубины  $h=1$  м

Анализ графиков показывает, что для глубины  $h=1$  м величина гидродинамической нагрузки не является критичной. Полученные численные значения величин свидетельствуют о том, что исследуемая плита будет претерпевать упругие деформации и сохранит свою целостность.

На рис. 7 и 8 представлены перемещения и интенсивности напряжений для глубины  $h=2$  м. Анализ графиков показывает, что для глубины  $h=2$  м по сравнению с глубиной  $h=1$  м не только величина гидродинамической нагрузки, а и величины перемещения и интенсивности напряжений увеличились на 50 %. Однако, абсолютные значения этих величин еще недостаточны для разрушения конструкции.

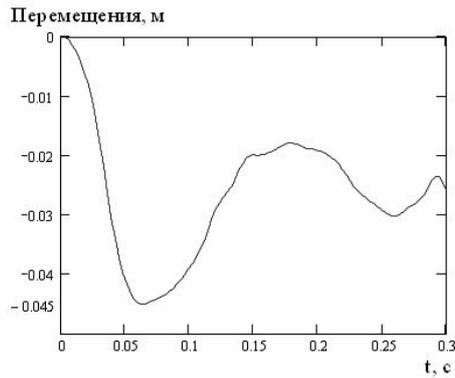


Рисунок 7 – Перемещения при гидродинамической нагрузке для глубины  $h=2$  м

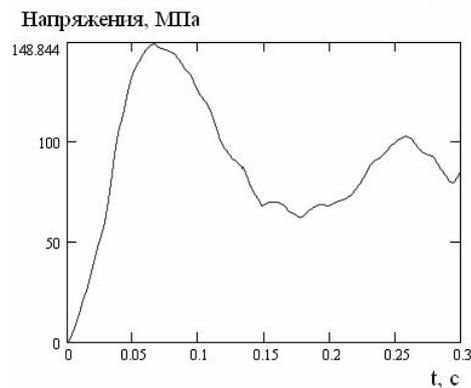


Рисунок 8 – Интенсивность напряжений при гидродинамической нагрузке для глубины  $h=2$  м

На рис. 9 и 10 представлены перемещения и интенсивности напряжений для глубины  $h=3$  м. Анализ графиков показывает, что для глубины  $h=3$  м по сравнению с глубиной  $h=1$  м величины перемещения и интенсивности напряжений увеличились примерно на 34 %, а по сравнению с глубиной  $h=2$  м – на 67 %. Абсолютные значения этих величин превысили значения, полученные при расчете импульсного деформирования плиты, что позволяет сделать вывод о частичном разрушении конструкции.

Таким образом, использование результатов расчетов соисполнителей проекта позволило провести исследования динамики элементов морских сооружений под действием ударно-волновых нагрузок на новом уровне и получить ряд новых результатов.

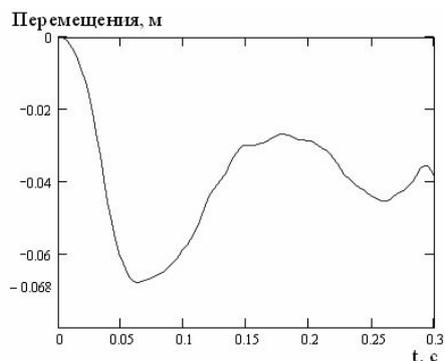


Рисунок 9 – Перемещения при гидродинамической нагрузке для глубины  $h=3$  м

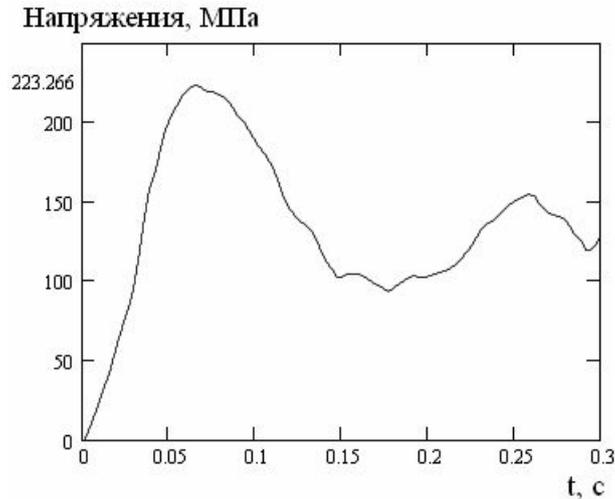


Рисунок 10 – Інтенсивність напружень при гідродинамічній навантаженні для глибини  $h=3$  м

### **Висновки.**

Представлена методика дозволяє визначити напружено-деформоване стан плити під дією реальної ударно-хвильової або гідродинамічної навантаження, а також зробити висновки про ступінь руйнування конструкції. Розв'язання задачі проводиться на основі адаптивного кінцево-розностного методу.

Робота виконана при підтримці спільного проекту "Чисельне моделювання нестационарного взаємодія складних еластичних конструкцій з рідиною або газом" фундаментальних досліджень учених установ НАН України і Сибірського відділення РАН.

Література: 1. Вороб'єв Ю.С., Чернобрышко М.В., Ярышко А.В. Динаміка ребрих елементів конструкцій при ударно-хвильовому впливі // Тези доповідей Міжнар. наук.-техн. конф. «Актуальні проблеми механіки суцільного середовища і міцності конструкцій». – Дніпропетровськ, 2007. – С. 246 - 248. 2. Флетчер К. Висновкові методи в динаміці рідин: В 2-х т.: Т.2.: Пер. С англ. – М.: Мир, 1991. – 552 с. 3. Вороб'єв Ю.С., Чернобрышко М.В. Об особливостях моделювання ударно-імпульсного навантаження оболонок і пластин. Механіка та машинобудування. – 2006.- № 1 - С. 39 - 45. 4. Лук'яненко С.О. Адаптивні обчислювальні методи моделювання об'єктів з розподіленими параметрами. – Київ: Політехніка, 2004. – 234 с. 5. Чернобрышко М.В. О применимости упрощенных математических моделей для расчетов конструкций при импульсном деформировании // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве. Тр. 11-й МНТК. - Харьков, 2005.- С.264 – 266. 6. Ю.С. Вороб'єв, М.В. Чернобрышко, Л. Крушка Особенности численного анализа скоростного деформирования элементов конструкций под действием локальных импульсных нагрузок. // IX Konferencja Naukowo-Techniczna «Programy MES w komputerowym wspomaganiu analizu, projektowania i wytwarzania», Warsaw (Poland), 2005.- P.545-551. 7. Стурова И.В. Влияние переменной глубины жидкости на нестационарное поведение упругой пластины, плавающей на мелководье // Проблемы механики сплошных сред и физики взрыва: Тез. докл. Всерос. конф., посвященной 50-летию Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН. – 2007. – С. 158-159.

Воробйов Ю.С., Чернобривко М.В.

МОДЕЛЮВАННЯ ВИСОКОШВИДКІСНИХ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ  
З ВИКОРИСТАННЯМ АДАПТИВНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ МЕТОДІВ

У роботі досліджується міцність плит під дією ударної волни зі збитковим тиском у повітряному середовищі та при гідродинамічному навантаженні. Проводиться аналіз напружено-деформованого стану, на підставі якого надаються висновки про пошкодження конструкції. Розрахунки проводяться з використанням адаптивних обчислювальних методів.

Vorobiev Y.S., Chernobryvko M.V.

MODELLING HIGH-SPEED DEFORMATION PROCESSES  
WITH USE ADAPTIVE COMPUTING METHODS

In work durability of plates under action of a shock wave of superfluous pressure in the air environment and hydrodynamical loading is investigated. The analysis tensely - deformed conditions on the basis of which conclusions about integrity of a design are done is carried out. Calculations are carried out with use of adaptive computing methods.

---