УДК 539.3

Численное моделирование поведения трехслойной прямоугольной пластины при вертикальном ударе о жидкость

Крупенин А. М.*, Мартиросов М. И.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

**e-mail: zeus-russ@yandex.ru*

Аннотация

Статья посвящена численному изучению поведения трехслойной симметричной по толщине прямоугольной пластины со сплошным изотропным заполнителем при вертикальном ударном взаимодействии с идеальной сжимаемой жидкостью (водой). Скорость начального взаимодействия считается малой по сравнению со скоростью звука в жидкости. Изучается начальный этап взаимодействия, когда гидродинамические силы и давления достигают максимальных значений. Проводится параметрический анализ относительно скорости взаимодействия. Учитывается влияние на динамику пластины гравитационных сил. Задача решается в связной плоскосимметричной постановке.

Ключевые слова: удар, трехслойная пластина, взаимодействие с жидкостью, численное моделирование

Введение

Рассматривается начальный этап ударного взаимодействия симметричной по толщине трехслойной прямоугольной пластины со сплошным изотропным заполнителем при вертикальном ударе о воду.

В современныхавиационных, ракетных и космических системах применяются транспортные средства и аппараты, вступающие в ударное взаимодействие с жидкостью в процессе эксплуатации или на аварийных режимах работы (экранопланы, спускаемые капсулы и платформы с грузами, гидросамолеты).

Для эффективного проектирование подобных конструкций необходимо учитывать различные эффекты взаимодействия их с жидкостью и применять современные решения, способствующие сохранению прочности и надежности при уменьшении массы(слоистые конструкции, композиционные материалы). Сложный характер движения жидкости в сочетании с нелинейным поведением материалов конструкции исключает возможность аналитического решения поставленной проблемы.

В общем случае задачи взаимодействия конструкций с жидкостью крайне сложны. В прошлом исследователи пользовались упрощенными математическими моделями. Главное упрощение состояло в разделении задачи на две самостоятельных (не связная постановка): взаимодействия абсолютно твердого тела с жидкостью и исследование напряженно-деформированного состояния конструкции под действием гидродинамических нагрузок. Решения, полученные подобным образом, не могут описать всех нюансов процесса ударного взаимодействия, но позволяют получить важные для экспериментального исследования и практического применения результаты.

В статье приводится консервативное решение (без учета воздушной прослойки между пластиной и жидкостью) задачи ударного взаимодействия трехслойной пластины (которая может служить модельным представлением днища, взаимодействующих с водойаппаратов) с жидкостью в связной постановке.На основе его показаны некоторые закономерности и особенности изменения динамических характеристик пластины, которые необходимо учитывать при проектировании подобных конструкций.

Применительно к рассматриваемому вопросу можно привести следующие, полученные ранее, результаты. В работе [1] М. В. Келдыш исследовал задачу об ударе жесткой пластины шириной $2a$о несжимаемую жидкость конечной глубины h. Им было показано, что при $h > 5a$влияние дна уже незначительно.

При ударе затупленных тел о поверхность жидкости, граница контакта будет расширяться со сверхзвуковой скоростью. В таких условиях необходимо учитывать сжимаемость жидкости.

В работе [2] приводится решения задачи удара пластины бесконечного размаха шириной *2а*о полупространство занятое идеальной сжимаемой жидкостью. При решении задачи предполагается, что нет перетекания жидкости на верхнюю поверхность пластины, и граничные условия на пластине и свободной поверхности сносятся на неподвижную горизонтальную плоскостью. Такая линеаризация граничных условий возможна в интервале времени:

$0 < t \leq \frac{2a}{c}$, где c – скорость звука в жидкости.

Сегодня, благодаря бурному развитию вычислительной техники,возможно рассматривать сложные задачи в полной постановке и численно исследовать их, учитывая множество различных факторов.

Метод решения

Численное моделирование рассматриваемой задачи проводилось в программном продукте ANSYSAUTODYN, результаты обрабатывались в пакете Mathcad 14.

В программном комплексе ANSYSAUTODYN используется явный метод интегрирования уравнений. Разрешающие соотношения в лагранжевыхдекартовых координатах представляют собой:

Уравнение сохранения массы:

$$\frac{\rho_0 V_0}{V} = \frac{m}{V},$$

где введены следующие обозначения:

ρ_0, V_0 – начальная плотность и начальный объем,

m, V – текущая масса и текущий объем.

Уравнения сохранения количества движения:

$$\rho\ddot{x} = b_x + \frac{\partial\sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial\sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial\sigma_{xz}}{\partial z};$$

$$\rho\ddot{y} = b_y + \frac{\partial\sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial\sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial\sigma_{yz}}{\partial z};$$

$$\rho\ddot{z} = b_z + \frac{\partial\sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial\sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial\sigma_{zz}}{\partial z};$$

где σ_{ij} – тензор напряжений,

b_i – компоненты объемных сил,

x, y, z – компоненты перемещений в соответствующих направлениях.

Уравнение сохранения энергии:

$$\dot{e} = \frac{1}{\rho}\left(\sigma_{xx}\dot{\varepsilon}_{xx} + \sigma_{yy}\dot{\varepsilon}_{yy} + \sigma_{zz}\dot{\varepsilon}_{zz} + 2\sigma_{xy}\dot{\varepsilon}_{xy} + 2\sigma_{xz}\dot{\varepsilon}_{xz} + 2\sigma_{yz}\dot{\varepsilon}_{yz}\right);$$

где e – удельная энергия,

ε_{ij} – тензор деформаций.

Точкой традиционно обозначается частная производная по времени.

В общем случае материалы имеют сложный отклик на динамическую нагрузку. В ANSYSAUTODYN модель материала разбивается на три части: уравнение состояния, которое выражает изменение объема и описывается шаровым тензором, модель прочности, которая выражает изменение формы и описывается девиатором, и модель разрушения.

$\sigma_i = -p + s_i$;

p – гидростатическое давление,

$$p = -\frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3);$$

s_i – девиатор тензора напряжений.

В качестве уравнения состояния в работе принято соотношение:

$p = K\mu$;

где p – гидростатическое давление,

σ_i – главные напряжения,

K – мгновенный модуль объемной деформации,

μ – сжатие,

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1;$$

ρ – плотность,

ρ_0 – начальная плотность.

В качестве модели прочности принято соотношение:

$$ds_i = 2G\left(d\varepsilon_i - \frac{dV}{3V}\right);$$

где G – модуль сдвига,

V – объем.

Вместе они являются эквивалентом закона Гука.

Для несущих слоев использован материал Д16Т, а для заполнителя фторопласт-4. Характеристики материалов, приведенные в таблице 1, взяты из [3].

Таблица 1

Характеристики	Д16Т	Фторопласт-4
K,МПа	$0.9214\cdot10^5$	4700
G, МПа	$0.3075\cdot10^5$	90
$\rho,\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	2700	2150

Для моделирования воды использовалась стандартная модель сжимаемой жидкости, заложенная в ANSYSAUTODYN.

Верификация модели

Для верификации расчетной модели, проводилось сравнение с экспериментом.

В статье [4] авторами исследовались ускорения, действующие на конические и шаровые сегменты тонких оболочек при их падении на воду. Данные, для шарового сегмента радиуса R = 203 мм, представлены в таблице 2. Здесь:

W –вес сегмента вместе с акселерометром,

v_0 – начальная скорость,

n – максимальное ускорение (в доляxg),

g – ускорение свободного падения,

t – времядостижения максимального ускорения.

Таблица 2

R, мм	W, кг	v_0, м/с	n,g	t,мс
203	1.374	4.74	51.8	1.43

Для моделирования удара шарового сегмента строилась осесимметричная модель (рисунок 1). В работе [4] не указаны характеристики используемого материала, указано лишь, что модели изготовлены из ацетатного полимера. Характеристики материала подбирались исходя из геометрии модели и средних характеристик для данного класса материалов и приведены в таблице 3.

Таблица 3

Характеристики	Ацетатный полимер
K,МПа	117
$\rho, \frac{кг}{м^3}$	1800

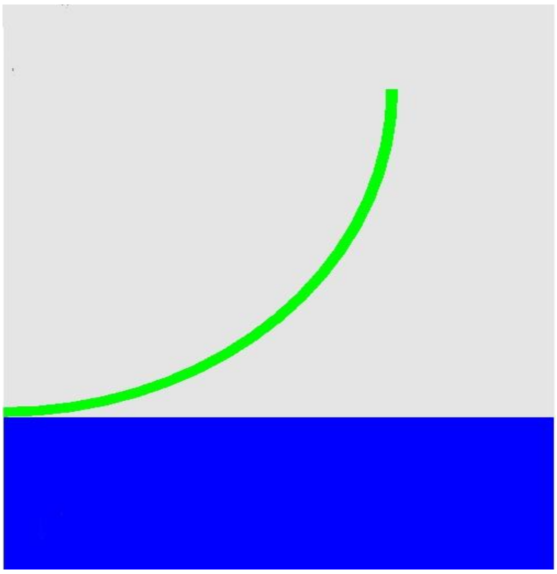


Рис.1 Осесимметричная модель шарового сегмента

В таблице 4 приведены результаты расчета с учетом гравитационных сил и без них в сравнении с экспериментом. Расхождение можно объяснить неточностью моделирования, несмотря на это видно, что без учета гравитационных сил результат имеет слишком большое расхождение с экспериментом.

Таблица 4

	Эксперимент	Без гравитации	С гравитацией
n,g	51.8	90	30
t,мс	1.43	0.03	1.46

Постановка задачи и результаты

Трехслойная симметричная по толщине прямоугольная пластина (рисунок 2) шириной $2a$ падает вертикально на идеальную сжимаемую жидкость. Толщина несущих слоев:h_1иh_2, толщина слоя заполнителя:h_3.

Пластина свободно падает на жидкость (граничные условия по краям свободные).Моделированный объем жидкости составляет *5а*в глубинуи *4а* в ширину.

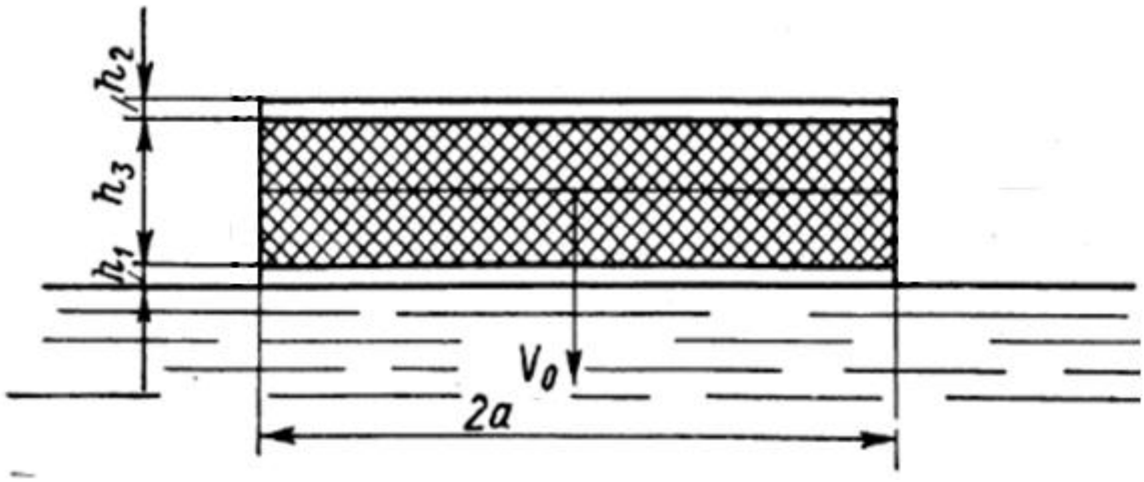


Рис. 2Модель трехслойной симметричной по толщине пластины в начальный момент взаимодействия с жидкостью

Расчет проводился при $2a=500$ *мм*, $h_1=h_2=2$ *мм*, $h_3=6$ *мм*.

На рисунке 3 представлен фрагмент конечно элементной модели. Несущие слои моделировались по 2 элемента в толщину. Слой заполнителя моделировался 6-ю элементами. Для обеспечения надежной сходимости, размер элементов моделирующих жидкость должен быть в 2 раза меньше размера элементов моделирующих пластину. Количество элементов моделирующих пластину 2500. Количество элементов моделирующих жидкость 1500000.

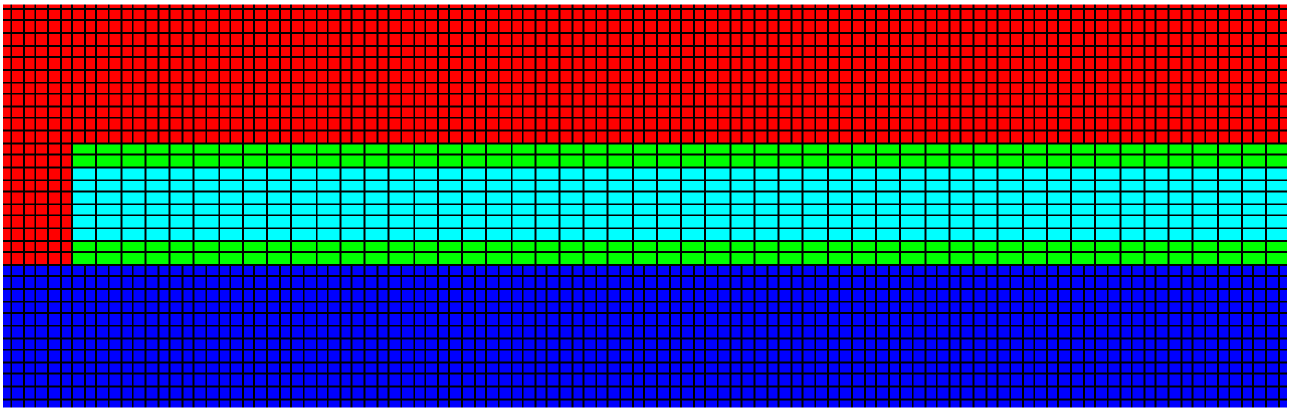


Рис. 3 Фрагмент конечно элементной модели

На рисунке 4 представлены контрольные точки, в которых снимались показания. Точка 1 соответствует центру пластины в первом несущем слое, в ней снимались перемещения и скорость. Точка 2 располагается приблизительно в 50 мм от центра пластины, соответствует месту максимальных напряжений, находится в первом несущем слое.Точка 3 располагается в приблизительно 50 мм от края пластины, соответствует месту максимальных ускорений, находится в первом несущем слое.

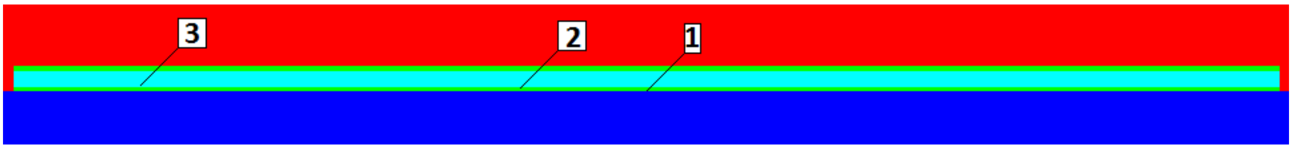
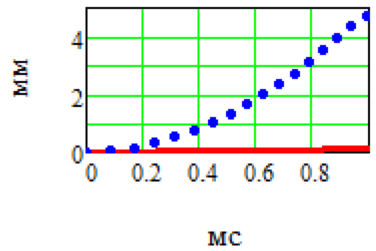
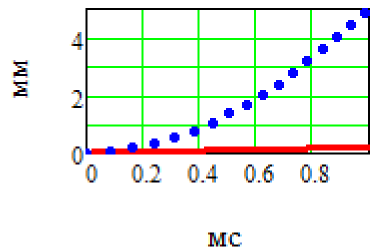
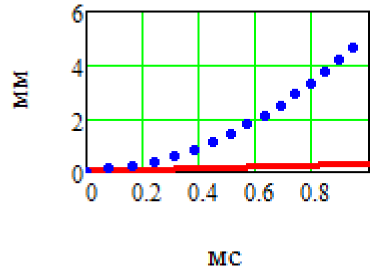
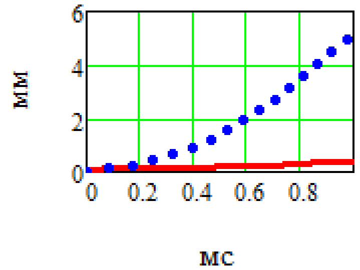


Рис. 4 Контрольные точки

В таблицах 5-13 приведены результаты расчетов.Сплошной линией показаны результаты без учета гравитационных сил, точками – с учетом гравитационных сил.

В таблицах 5-8 для разных начальных скоростей погружения в зависимости от времени приведены соответственно перемещения, скорости, ускорения и напряжения (по Мизесу).Видно, что гравитационные силы сильно влияют на перемещения и скорости и почти не влияют на ускорения и напряжения.

Таблица 5

Начальная скорость	Зависимость перемещений от времени
v_0 = *1м/с*	
v_0 = *3м/с*	
v_0 = *5м/с*	
v_0 = *7м/с*	

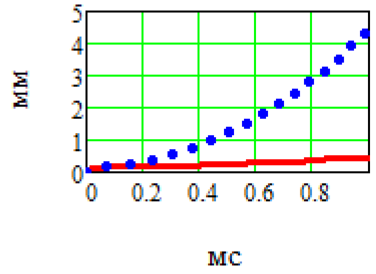
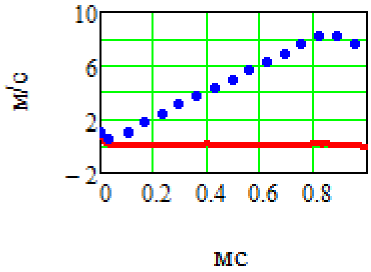
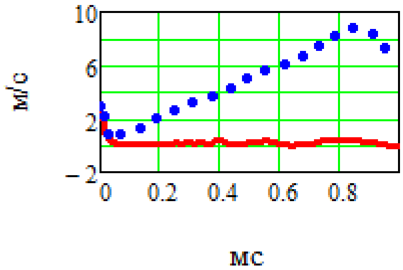
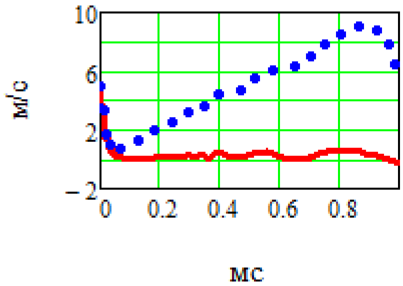
v_0 = *10м/с*	

Таблица 6

Начальная скорость	Зависимость скорости от времени
v_0 = *1м/с*	
v_0 = *3м/с*	
v_0 = *5м/с*	

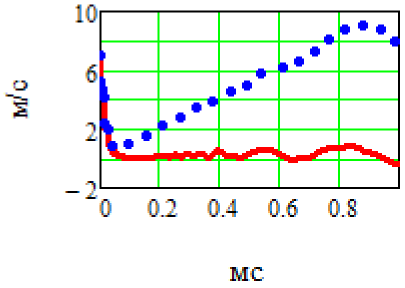
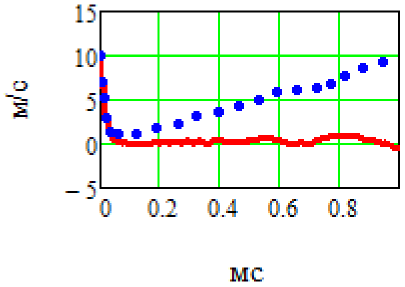
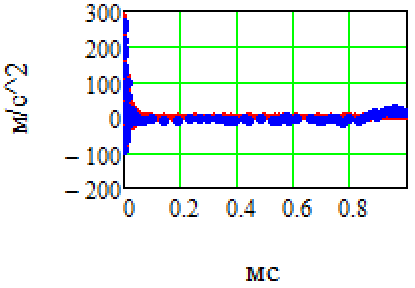
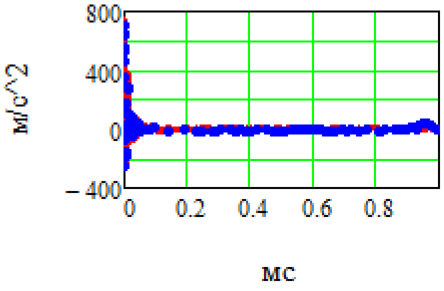
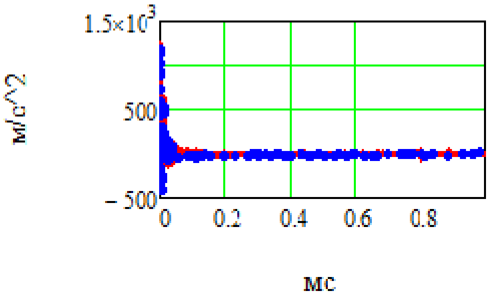
v_0 = 7*м/с*	
v_0 = 10*м/с*	

Таблица 7

Начальная скорость	Зависимость ускорений от времени
v_0 = 1*м/с*	
v_0 = 3*м/с*	
v_0 = 5*м/с*	

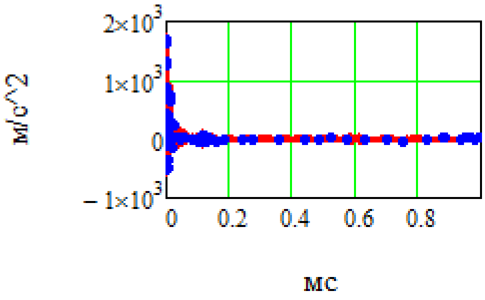
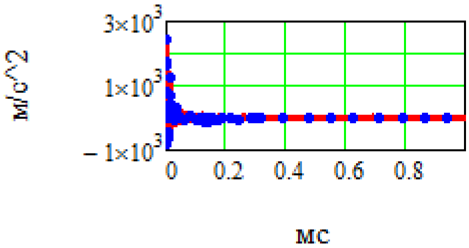
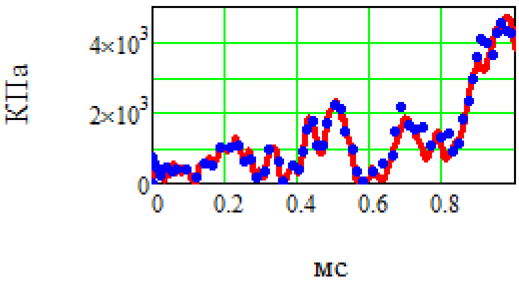
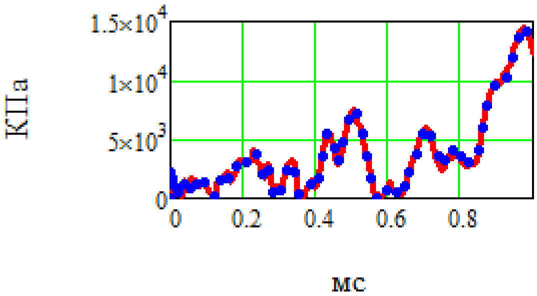
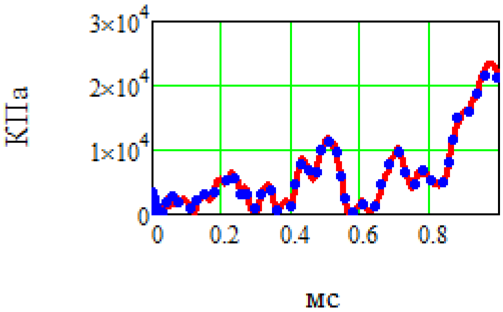
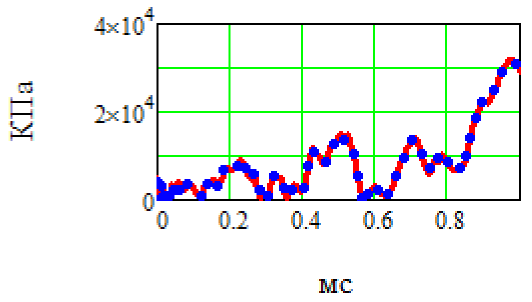
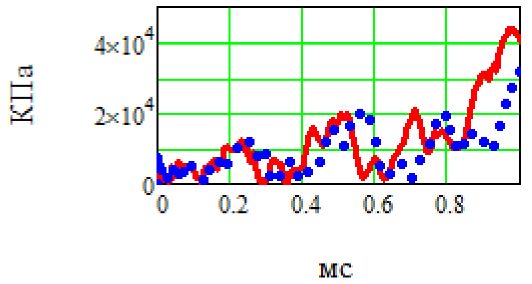
$v_0 = 7м/с$	
$v_0 = 10м/с$	

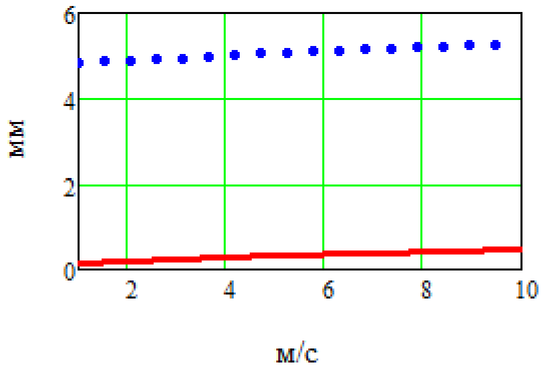
Таблица 8

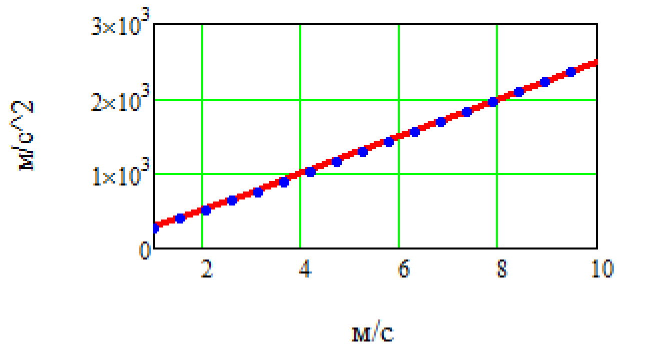
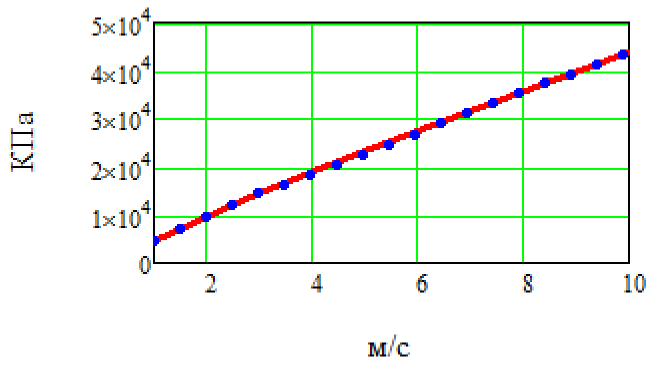
Начальная скорость	Зависимость напряжений от времени
$v_0 = 1м/с$	
$v_0 = 3м/с$	
$v_0 = 5м/с$	

$v_0 = 7м/с$	
$v_0 = 10м/с$	

В таблице 9 приведены зависимости влияния начальной скорости погружения на максимальные перемещения, ускорения и напряжения. Видно, что на рассмотренном участке начальных скоростей, перемещения, ускорения и напряжения имеют линейную зависимость.

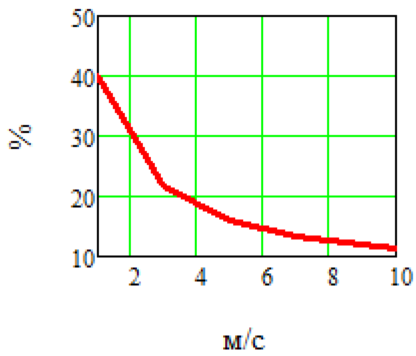
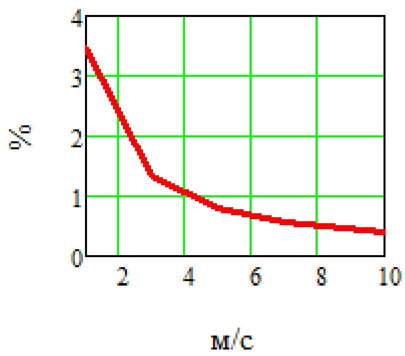
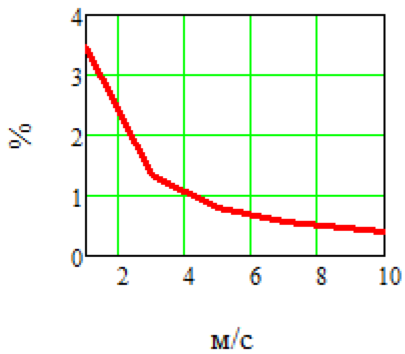
Таблица 9

Влияние начальной скорости на максимальное перемещения	

Влияние начальной скорости на максимальное ускорение	
Влияние начальной скорости на максимальное напряжение	

В таблице 10 в зависимости от начальной скорости приведены графикивлияния гравитационных сил на перемещения, ускорения и напряжения. Видно, что влияние гравитационных сил быстро убывает с увеличением начальной скорости взаимодействия, таким образом, на более высоких начальных скоростях ими можно пренебречь.

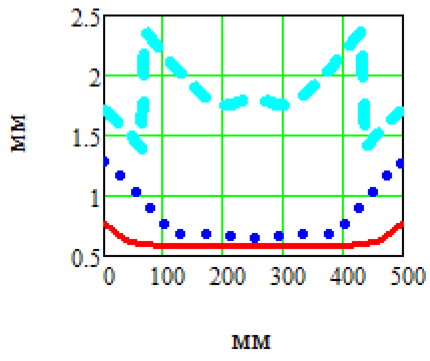
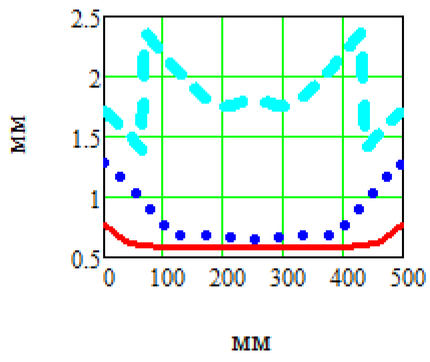
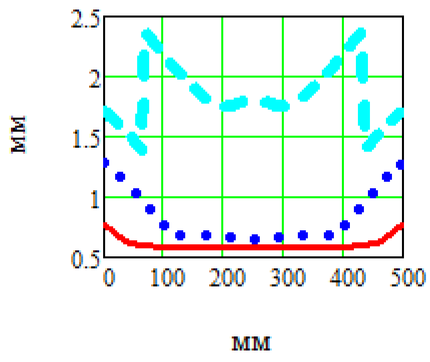
Таблица 10

Влияние гравитационных сил на перемещение в зависимости от начальной скорости	
Влияние гравитационных сил на максимальное ускорение в зависимости от начальной скорости	
Влияние гравитационных сил на максимальные напряжения в зависимости от начальной скорости	

Втаблица 11-13 приведены зависимости прогибов, скоростей и напряжений по ширине пластины по слоям, для разных моментов времени: сплошной линией при $t = 0.1мс$, точка при $t = 0.5мс$ и пунктиром при $t = 1мс$.

В таблице 11 приведены зависимости прогибов по ширине пластины по слоям. Как видно, значения прогибов для слоев одинаковы.

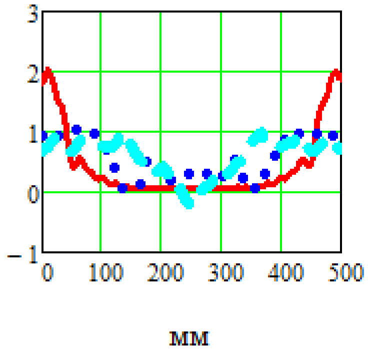
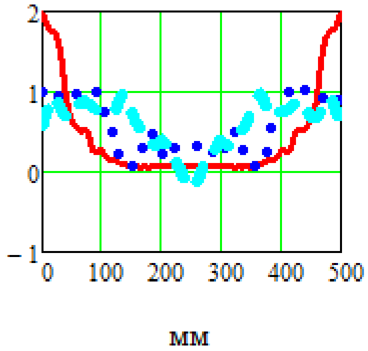
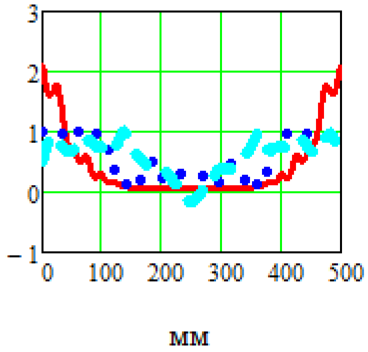
Таблица 11

Слой	Зависимость прогибов по ширине пластины
Первый несущий	
Заполнитель	
Второй несущий	

В таблице 12 приведены зависимости скоростей по ширине пластины по слоям. Видно, что значения скоростей для слоев одинаковы.

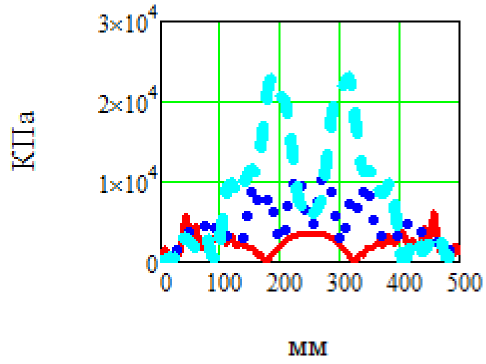
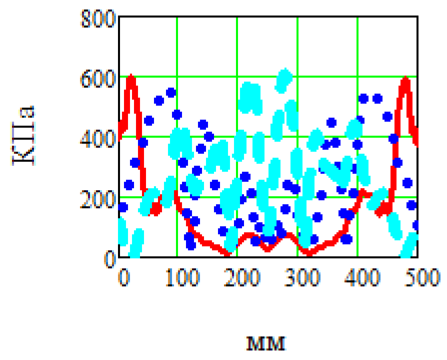
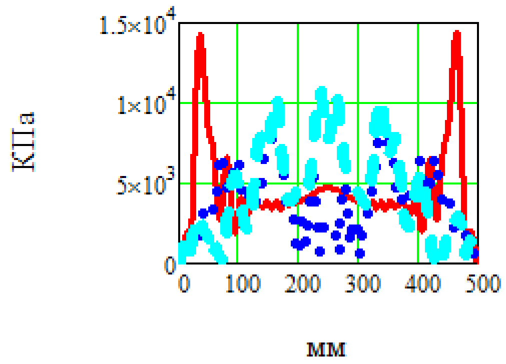
Таблица 12

Слой	Зависимость скорости по ширине пластины

Первый несущий	
Заполнитель	
Второй несущий	

В таблице 13 приведены зависимости напряжений по ширине пластины по слоям. Видно, что значения напряжений в первом несущем слое возрастают со временем и достигают максимума ближе к концу рассматриваемого временного участка. Во втором слое напряжения достигают максимума в начальный момент времени. В заполнителе максимальные напряжения постоянны, смещаясь со временем от краев к центру пластины.

Таблица 13

Слой	Зависимость напряжений по ширине пластины
Первый несущий	
Заполнитель	
Второй несущий	

Заключение

В работе рассмотрено влияние начальной скорости погружения и гравитационных сил на динамические характеристики погружающегося в жидкость тела. Решение получено для вертикального удара о жидкость прямоугольной симметричной по толщине пластины со сплошным изотропным заполнителем в плоскосимметричной связной постановке.

В результате получено, что влияние гравитационных сил зависит как от начальной скорости тела, так и от геометрии модели. При увеличении начальной скорости взаимодействия влияние гравитации на динамические характеристики быстро убывает.

На рассмотренном участке скоростей начального взаимодействия зависимости перемещений, скоростей, ускорений и напряжений от начальной скорости линейны.

Максимальные напряжения возникают в первом несущем слое приблизительно в 50 мм от центра пластины ($\sim \frac{1}{5}a$). Напряжения в заполнителе на порядок меньше напряжений в несущих слоях, что позволяет применять для него более легкие и менее прочные материалы. Максимальные напряжения во втором несущем слое в полтора раза меньше максимальных напряжений в первом, что позволяет внести в конструкцию асимметрию по толщине.

В заключении следует отметить, что приведенный расчет выступает в качестве консервативной оценки. Учет воздушной прослойки между падающей пластиной и свободной поверхностью жидкости и второй вязкости жидкостисделает переход воздух-жидкость более плавным, что, как следствие, приведет к снижению максимальных напряжений и ускорений, а такжеперераспределению динамических характеристик по времени и координате.

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, мероприятие 1.1 по теме «Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров в области конструирования летательных аппаратов и авиационных материалов», госконтракт № 02.740.11.0504 от 16.03.2010 г. и Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ 12-01-00566_а, 11-01-00540_а).

Библиографический список

1.Келдыш М. В. Удар пластины о воду, имеющую конечную глубину// Труды ЦАГИ, 1935. Вып. 152. С. 13-20.

2.Горшков А. Г., Григолюк Э. И. Взаимодействие упругих конструкций с жидкостью (удар и погружение). СПб.:Судостроение. 1976. 200с.

3.Горшков А. Г., Старовойтов Э. И., Яровая А. В. Механика слоистых вязкоупругопластических элементов конструкций. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 576 с.

4.Hirano Yoichi, Miura Koryo. Water impact accelerations of axially symmetric bodies.— J. Spacecraft and Rockets, 1970, vol.7, № 6, P. 762-764.