

УДК 539.3

Численное исследование нестационарного взаимодействия круговой слоистой пластины с поверхностью воды

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 круговой пластины со сплошным изотропным наполнителем при вертикальном ударном взаимодействии с идеальной сжимаемой жидкостью (водой). Скорость начального взаимодействия считается малой по сравнению со скоростью звука в жидкости. Изучается начальный этап погружения. Когда гидродинамические силы и давления достигают максимальных значений. Проводится параметрический анализ относительно начальной скорости взаимодействия. Учитывается влияние на динамику пластины гравитационных сил и воздушной прослойки между пластиной и жидкостью. Задача решается в связной осесимметричной постановке.

Ключевые слова: удар, круговая пластина, взаимодействие с жидкостью, численное моделирование.

Введение

В современных авиационных, 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).

Применительно к рассматриваемому вопросу можно привести следующие, полученные другими авторами, результаты. В работе [1] исследована задача об ударе круглого диска радиуса a о несжимаемую жидкость бесконечной глубины и конечной глубины h . Там показано, что при $h > 1.1a$ влияние дна незначительно.

При ударе затупленных тел о поверхность жидкости, граница контакта будет расширяться со сверхзвуковой скоростью. В таких условиях необходимо учитывать сжимаемость жидкости [2].

В работе [3] показано для диска, падающего в цилиндрический бассейн, что при $R > 2a$ влияние стенок незначительно.

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

В статье рассматривается вертикальный удар трехслойной симметричной по толщине пластины об идеальную сжимаемую жидкость (воду). Исследуются динамические характеристики пластины в зависимости от скорости соударения с водой.

Постановка задачи

Трехслойная симметричная по толщине круговая пластина (рисунок 1) диаметром $2a$ вертикально падает на сжимаемую жидкость. Толщина несущих слоев: h_1 и h_2 , толщина заполнителя: h_3 . Пластина свободно падает на жидкость (граничные условия на краю свободные).

Численное моделирование рассматриваемой задачи проводилось в программном продукте ANSYS AUTODYN, результаты обрабатывались в пакете Mathcad 14. Описание метода и верификация проведена в работе [4].

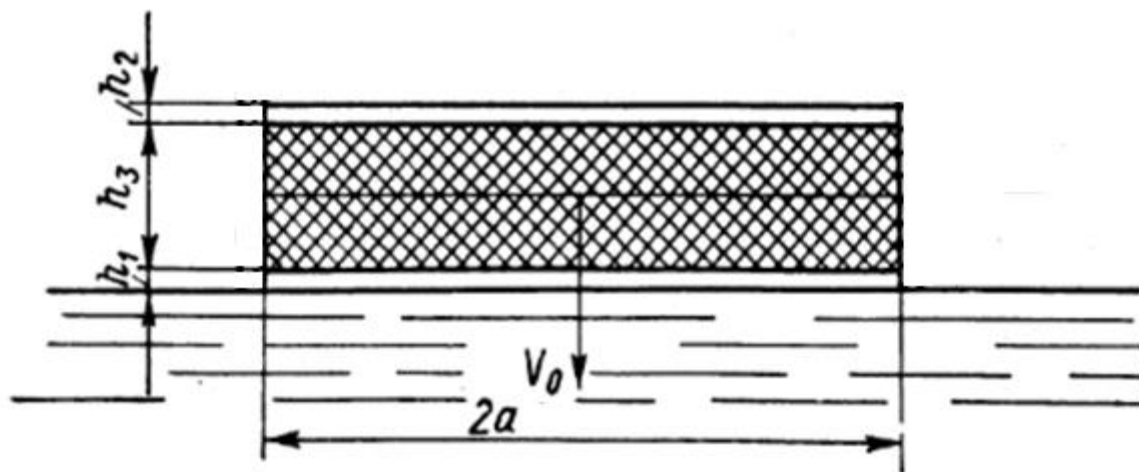


Рис. 1 Модель трехслойной симметричной по толщине пластины в начальный момент взаимодействия с жидкостью

Моделирование проводилось в осесимметричной постановке. Расчет проводился при $a = 1000$ мм, $h_1 = h_2 = 40$ мм, $h_3 = 120$ мм. Моделируемый объем бассейна составляет 2000 мм в ширину и 1600 мм в высоту. Воздушный зазор между пластиной и поверхностью воды в начальный момент времени составляет 100 мм. Пластина моделировалась элементами Лагранжа, а бассейн элементами Эйлера. Размер элемента пластины 10 мм, размер элемента бассейна 5 мм. Количество

элементов, моделирующих пластину, 2000. Количество элементов, моделирующих жидкость, 128000. На нижней границе бассейна использовалось условие свободного убегания волн, что соответствует случаю бесконечной глубины.

На рисунке 2 представлен фрагмент конечно элементной модели.

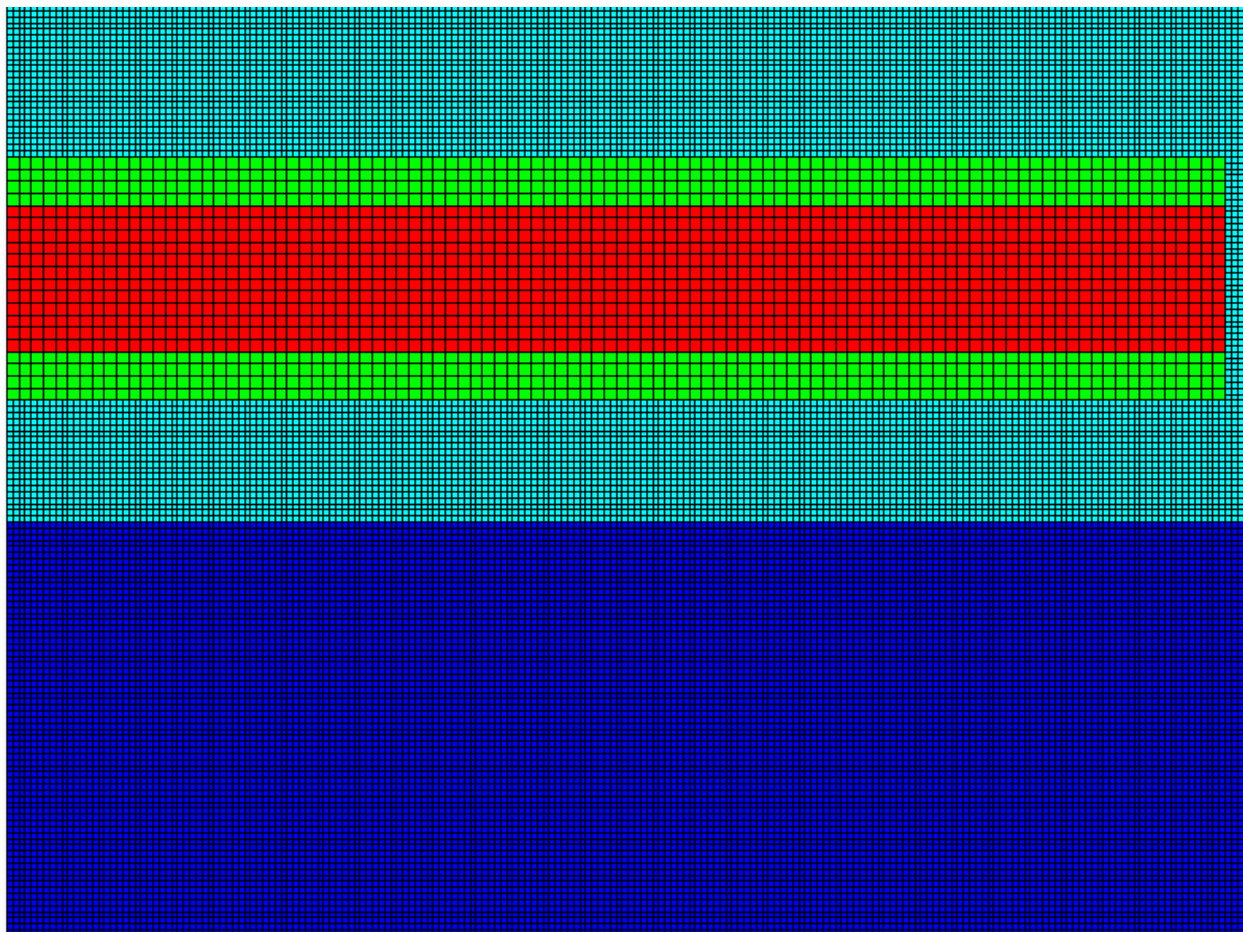


Рис. 2 Фрагмент конечно элементной модели

Для несущих слоев использован материал Д16Т, а для заполнителя фторопласт-4. Характеристики материалов, приведенные в таблице 1, взяты из [5].

Таблица 1

Характеристики	Д16Т	Фторопласт-4
K , МПа	$0.9214 \cdot 10^5$	4700
G , МПа	$0.3075 \cdot 10^5$	90
ρ , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	2700	2150

Расчет проводился для ряда начальных скоростей, которые сведены в таблицу

2. Для случая без учета воздушной прослойки начальная скорость совпадает со скоростью соударения. Расчет скорости, перемещений и времени падения проводился по формулам, полученным в [4]:

$$v(x) = \sqrt{-k^2} t g(-\arccos(e^{-b(C_2-x)})); \quad (1)$$

$$t(x) = \frac{\sqrt{-k^2} C_1 + \arccos(e^{-b(C_2-x)})}{b\sqrt{-k^2}}; \quad (2)$$

$$x(t) = \frac{1}{b} \ln \left(\cos \left(\sqrt{-k^2} (C_1 - bt) \right) \right) + C_2; \quad (3)$$

где

$$C_1 = \frac{1}{\sqrt{-k^2}} \operatorname{arctg} \left(\frac{v_0}{\sqrt{-k^2}} \right);$$

$$C_2 = x_0 - \frac{1}{b} \ln \left(\cos \left(\operatorname{arctg} \left(\frac{v_0}{\sqrt{-k^2}} \right) \right) \right);$$

$$k^2 = \frac{g}{b};$$

$$b = C_x \frac{\rho_{air} S}{2M};$$

$g = 9.81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения,

$C_x = 1$ – коэффициент сопротивления воздуха,

$M = 848.23 \text{ кг}$ – масса пластины,

$S = 3.142 \text{ м}^2$ – площадь пластины в плане,

$\rho_{air} = 1.225 \text{ кг/м}^3$ – плотность воздуха,

v_0 – начальная скорость,

x_0 – начальное перемещение.

Таблица 2

Номер эксперимента	Начальная скорость, м/с	Скорость соударения, м/с	Время падения, мс
1	5	5.191	19.624
2	7	7.137	14.147
3	9	9.106	11.046
4	10	10.095	9.953
5	12	12.079	8.306
6	13	13.072	7.671
7	14	14.067	7.126
8	17	17.054	5.873
9	19	19.047	5.257
10	20	20.044	4.994
11	30	30.026	3.332
12	50	50.008	2.000
13	100	99.987	1.000

Результаты

На рисунке 3 изображены перемещения пластины по формуле (3), которая не учитывает увеличения плотности воздуха перед поверхностью воды и колебаний пластины, и расчетные перемещения в центре пластины. Из рисунка видно, что на этапе падения расчетные перемещения совпадают с полученными по формуле (3), с точностью до колебаний пластины. Однако, при приближении к поверхности воды, расчетная кривая резко отклоняется, это связано с повышением плотности воздуха в воздушной прослойке между пластиной и поверхностью воды.

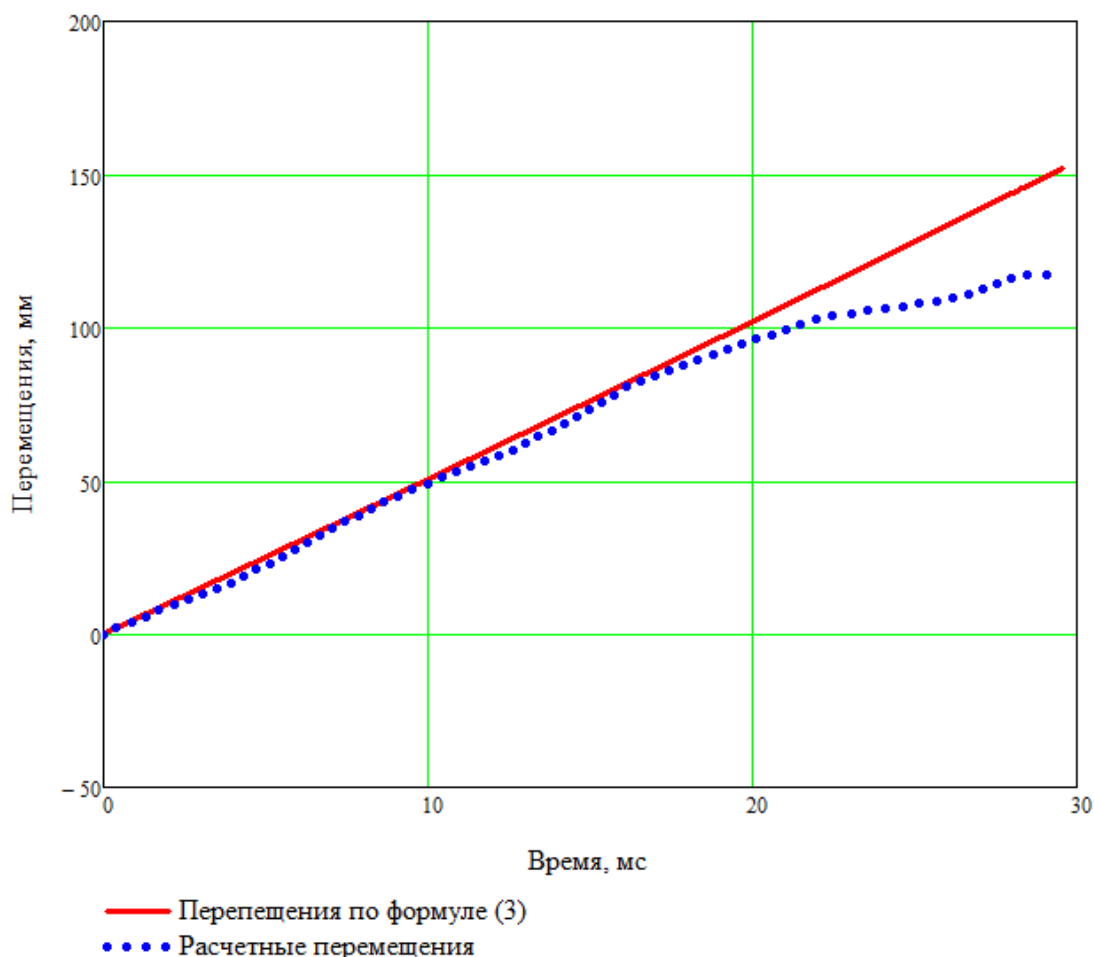


Рис. 3 Сравнение расчетных перемещений и перемещений по формуле (3)

Результаты моделирования сведены в таблицу 3. На рисунке 4 представлено сравнение давлений в центре пластины с учетом воздушной прослойки и без нее. На рисунке 5 показана зависимость давлений в центре пластины от времени.

Из рисунка 4 видно, что на малых начальных скоростях давления в центре пластины с учетом воздушной прослойки претерпевают скачки, это связано с колебаниями пластины и поверхности воды до удара, что приводит к перераспределению давлений по поверхности пластины.

Из случая без учета воздушной прослойки видно, что давления зависят от скорости соударения линейно. Из рисунка также видно, что влияние воздушной прослойки уменьшается с ростом скорости.

Таблица 3

Номер эксперимента	Начальная скорость, м/с	Максимальные давления с учетом воздушной прослойки, КПа	Максимальные давления без учета воздушной прослойки, КПа
1	5	1083	2292.2
2	7	1426	3213.0
3	9	1234	4138.0
4	10	1311	4602.1
5	12	2706	5531.0
6	13	4066	5996.5
7	14	4973	6462.9
8	17	5920	7865.6
9	19	6307	8803.5
10	20	6636	9273.3
11	30	8589	14002
12	50	17880	32649
13	100	47660	48646

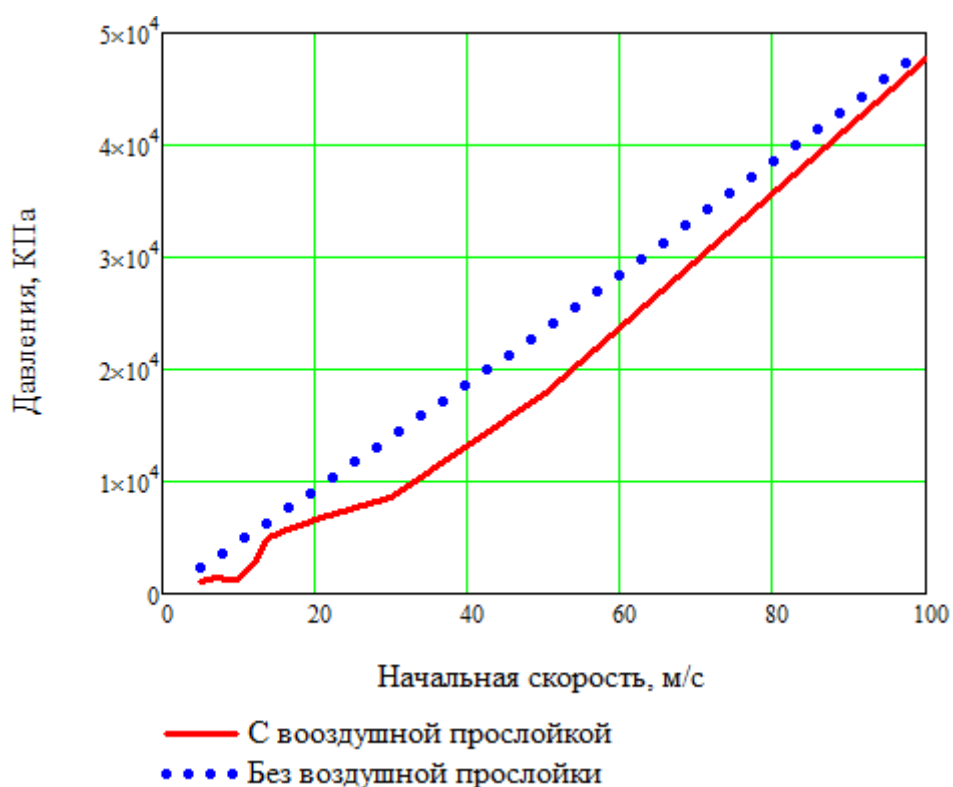


Рис. 4 Сравнение давлений в центре пластины с воздушной прослойкой и без

нее

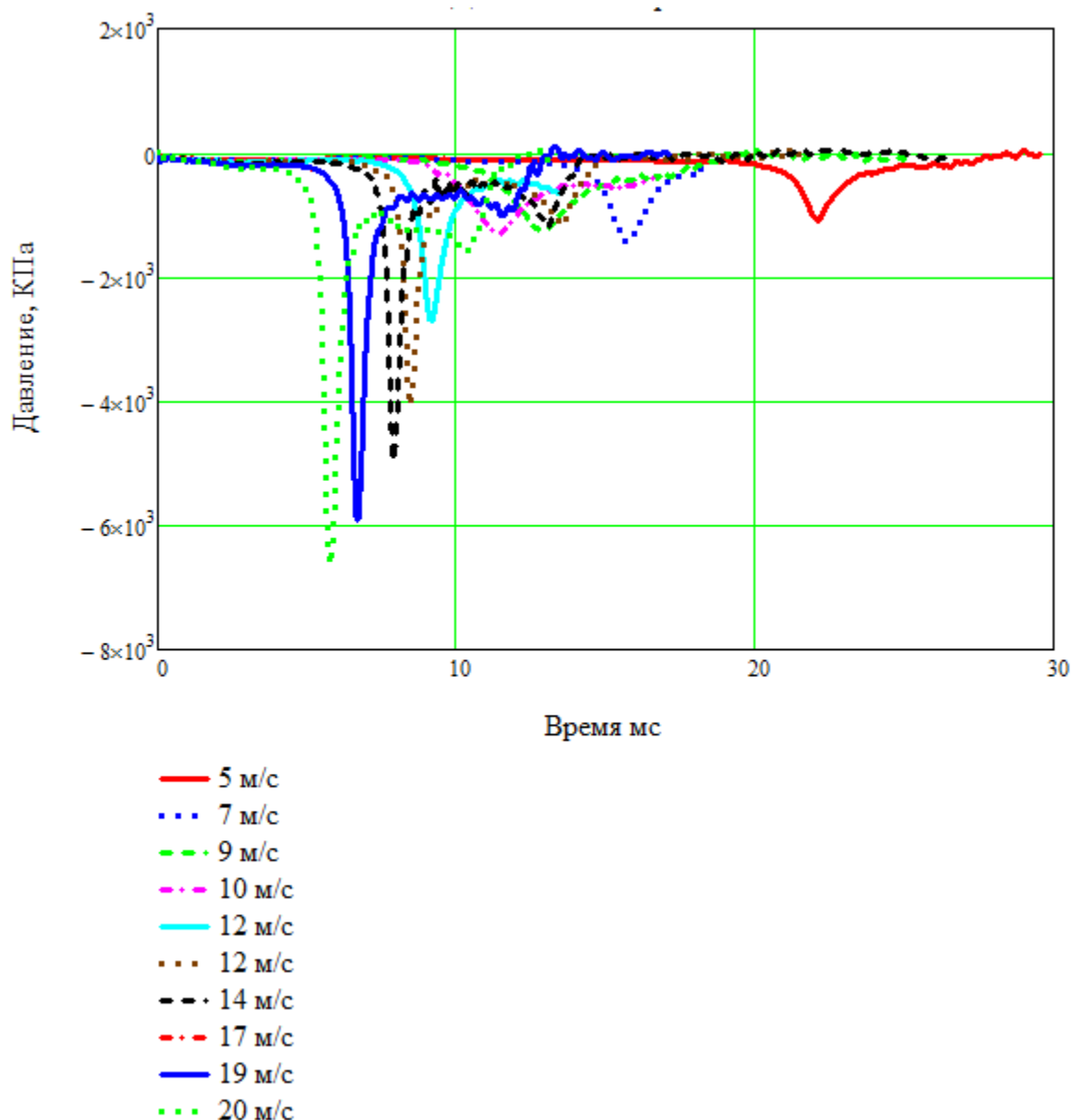


Рис. 5 Давление в центре пластины от времени

На рисунках 6-8 приведены прогибы, скорости и ускорения пластины по координате для случая с учетом воздушной прослойки и начальной скорости падения 5 м/с, для разных временных слоев. На рисунках 9-11 приведены прогибы, скорости и ускорения по времени на краю пластины для случая с учетом воздушной прослойки и начальной скорости падения 5 м/с.

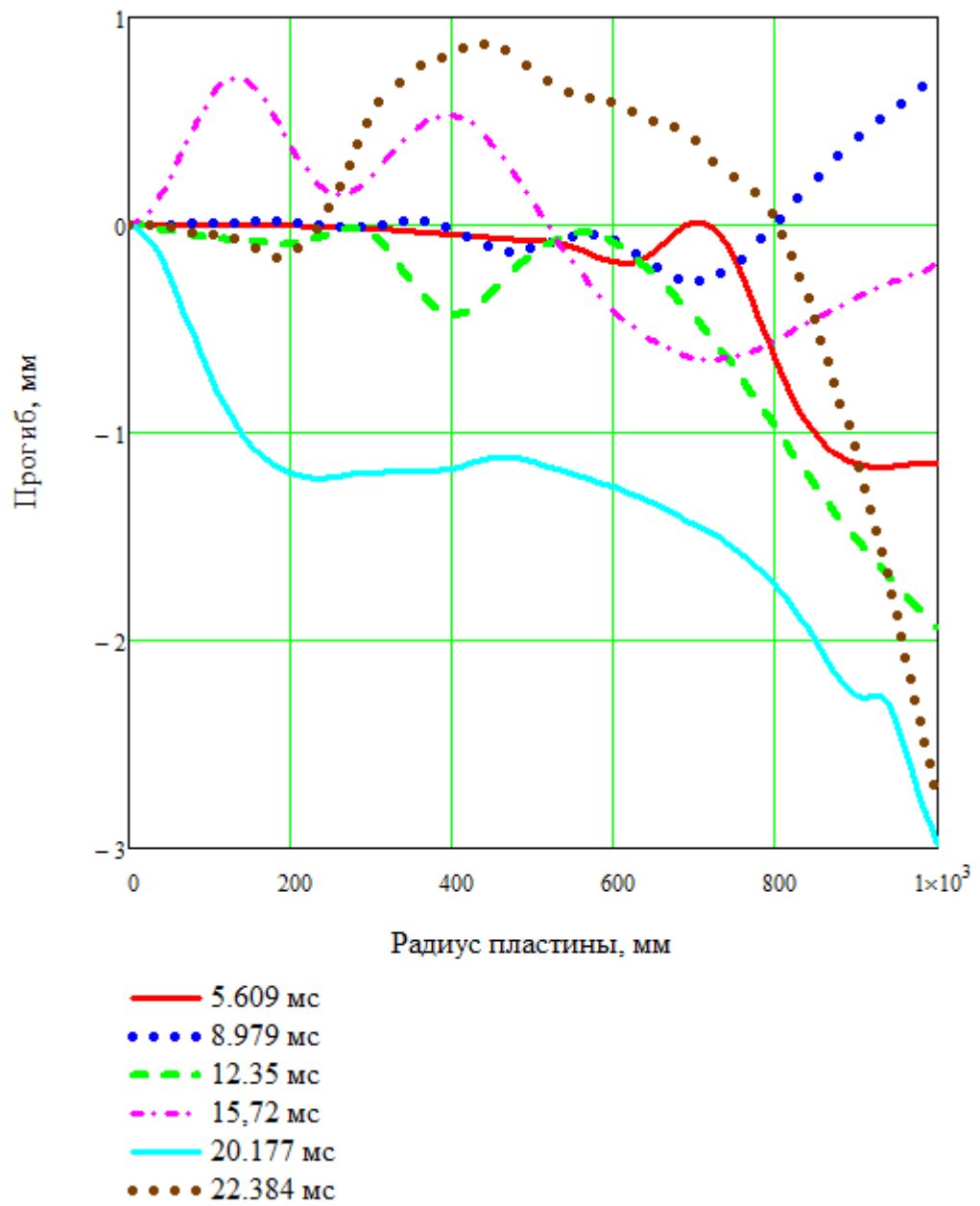


Рис. 6 Прогиб пластины от радиуса для начальной скорости 5 м/с

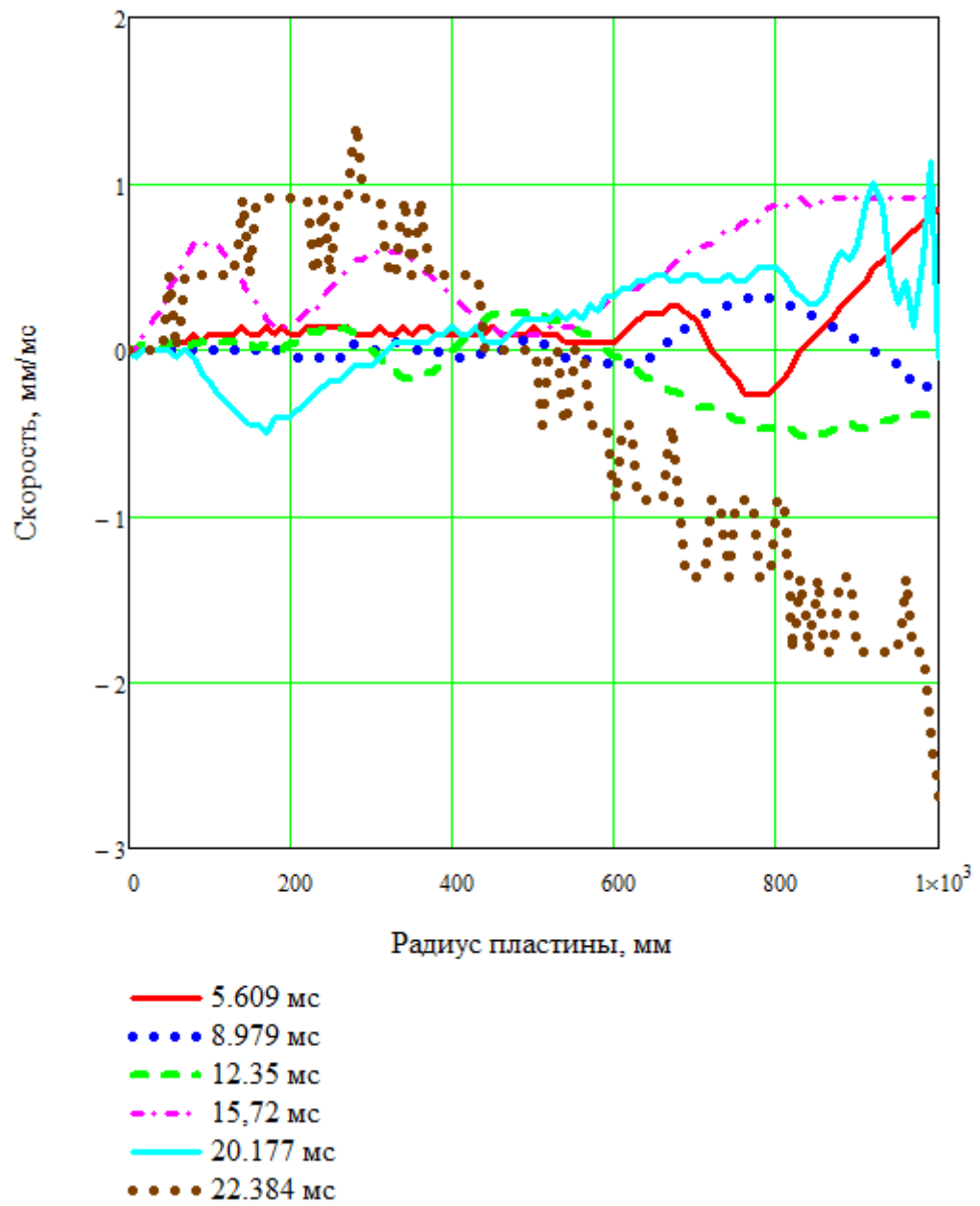


Рис. 7 Скорость пластины от радиуса для начальной скорости 5 м/с

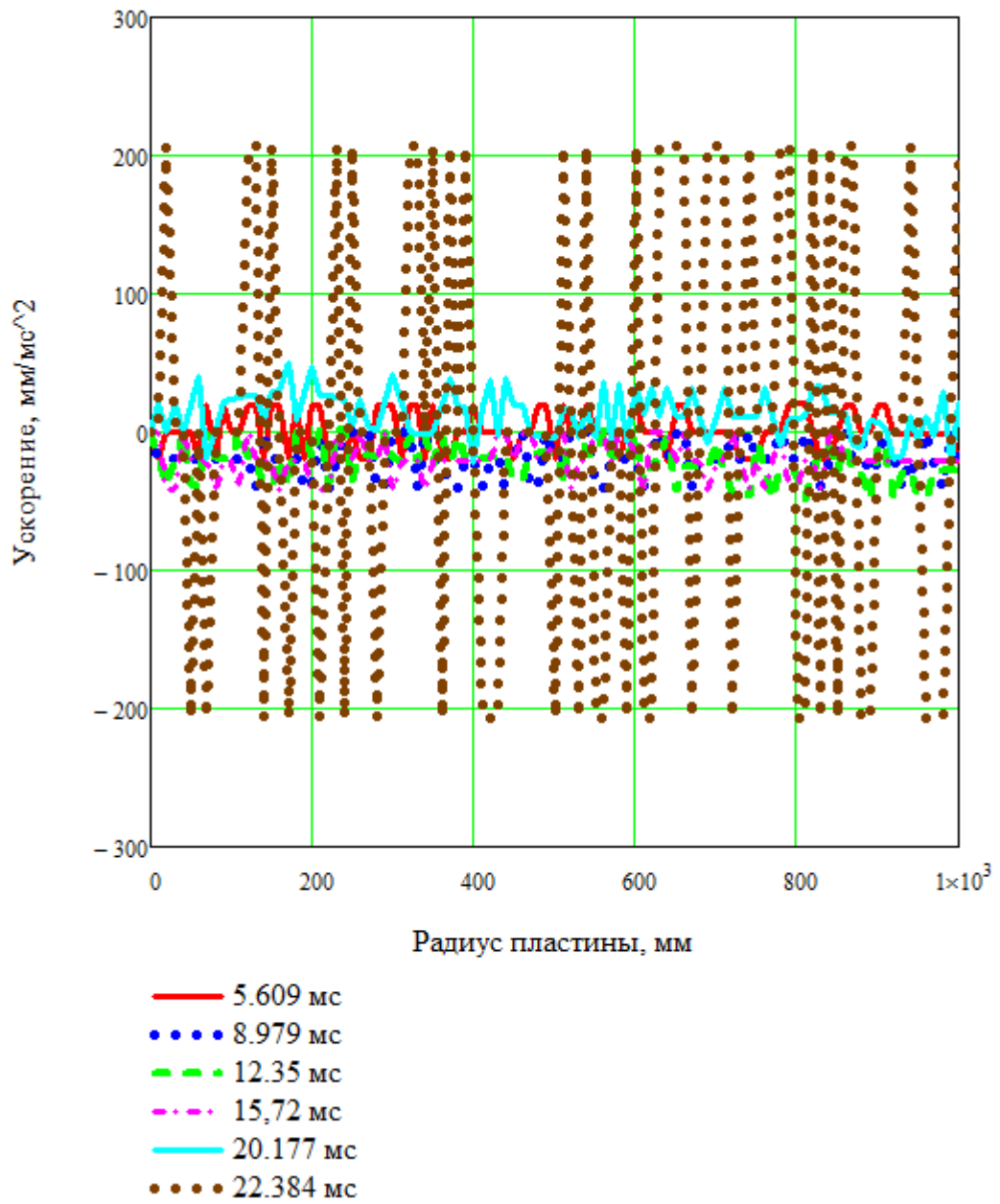


Рис. 8 Ускорение пластины от радиуса для начальной скорости 5 м/с

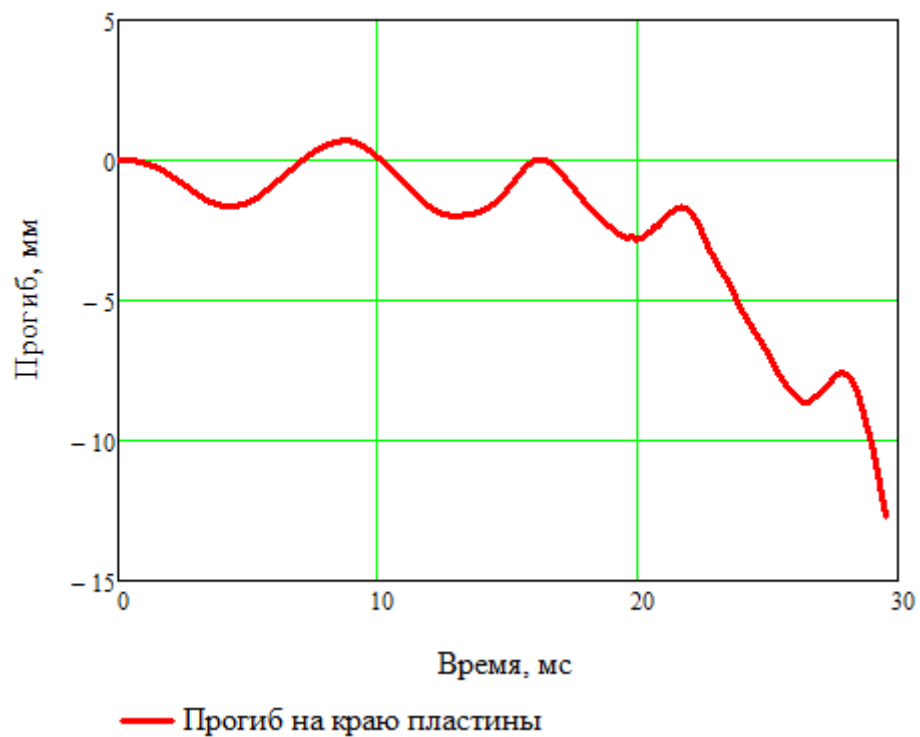


Рис. 9 Прогиб от времени

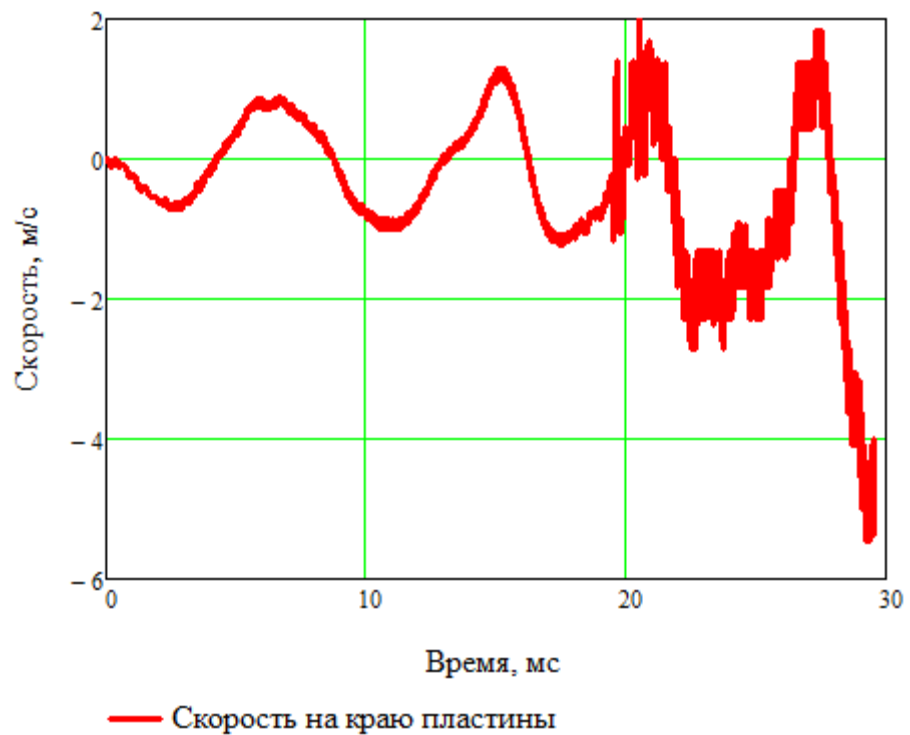


Рис. 10 Скорость от времени

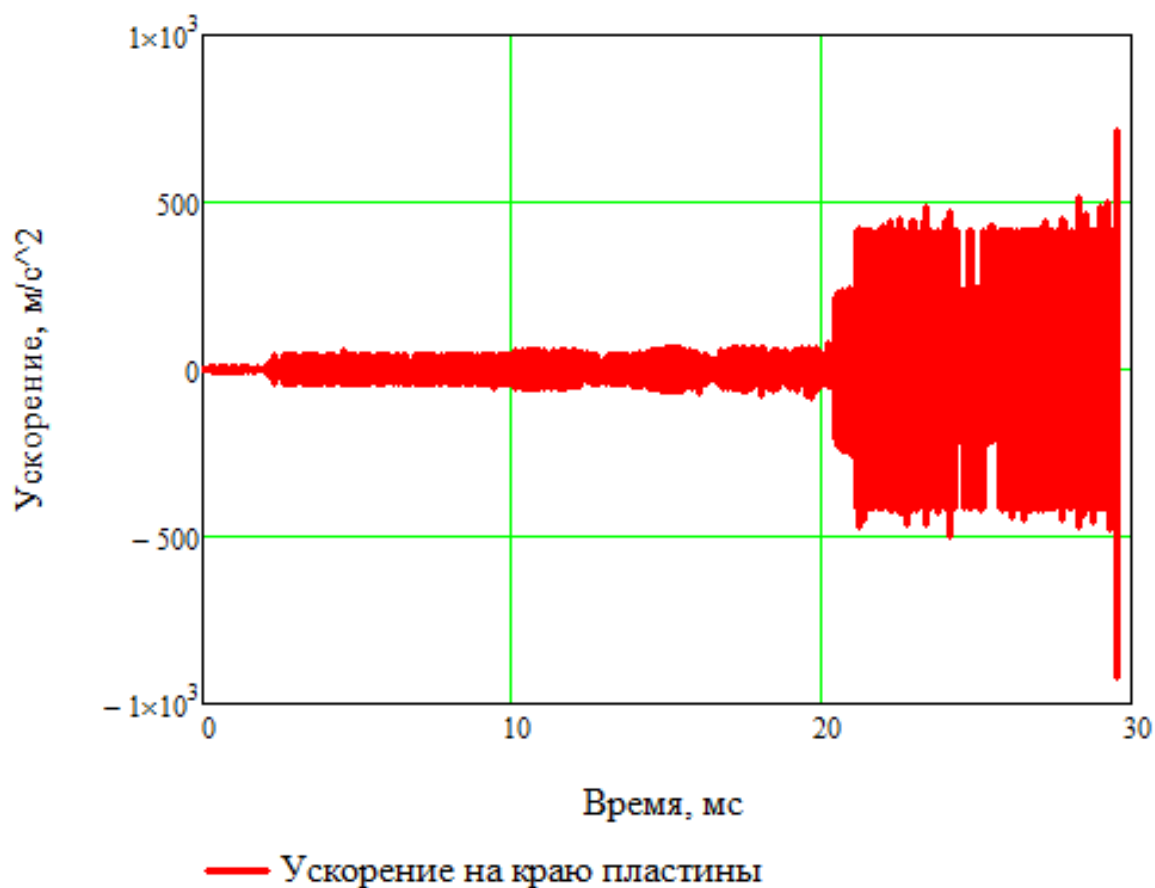


Рис. 11 Ускорение от времени

В таблице 4 и на рисунке 12 представлены максимальные напряжения по Мизесу в зависимости от начальной скорости пластины. Максимальные напряжения возникают в центре пластины на поверхности соприкосновения с жидкостью.

Из рисунка видно, что с учетом воздушной прослойки напряжения претерпевают скачки, это связано с колебаниями пластины и поверхности воды, что в свою очередь вызывает перераспределение полей давлений по поверхности пластины и напряжений. В дальнейших исследованиях необходимо соотнести изменение полей давлений и напряжений с формами колебаний поверхности пластины и воды.

Также видно, что, если воздушную прослойку не учитывать, напряжения зависят от начальной скорости пластины линейно.

Таблица 4

Номер эксперимента	Начальная скорость, м/с	Максимальные напряжения по Мизесу с учетом воздушной прослойки, КПа	Максимальные напряжения по Мизесу без учета воздушной прослойки, КПа
1	5	1172.1	1052.5
2	7	968.14	1491.1
3	9	1576.1	1915.7
4	10	1980.2	2128.1
5	12	1995.3	2551.4
6	13	2136.0	2762.8
7	14	2405.5	2974.1
8	17	3013.4	3606.5
9	19	3487.9	4026.9
10	20	3874.6	4236.6
11	30	3878.2	6320.3
12	50	7896.1	10421
13	100	19612	20196

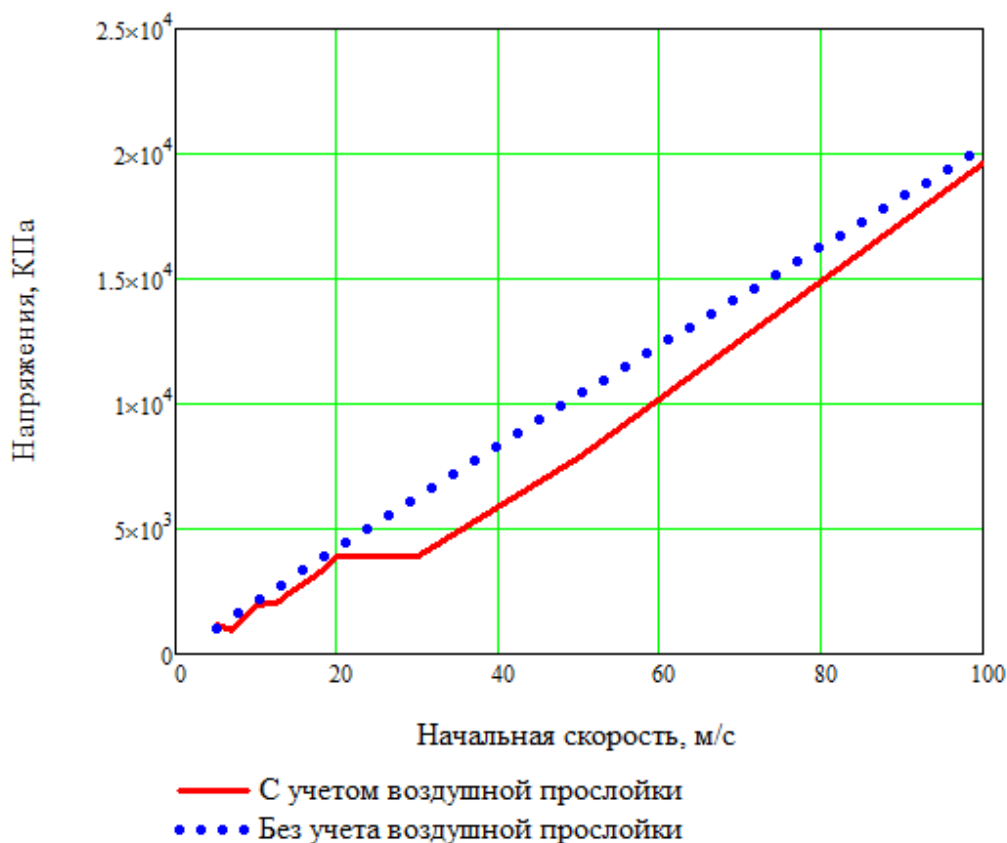


Рис.12 Максимальные напряжения в зависимости от начальной скорости
пластины

Заключение

В работе проведено численное моделирование вертикального удара круговой трехслойной пластины о воду в осесимметричной связной постановке. Рассмотрено влияние на гидродинамические давления скорости начального взаимодействия пластины и жидкости, а также влияние воздушной прослойки на величину максимальных гидродинамических давлений и напряжений.

Максимальные напряжения возникают в центре пластины на поверхности соприкосновения с жидкостью. Гидродинамические давления и максимальные напряжения зависят от скорости взаимодействия по линейному закону.

Влияние воздушной прослойки существенно сказывается только на малых скоростях взаимодействия. При увеличении скоростей взаимодействия влияние воздушной прослойки уменьшается.

В дальнейшем необходимо провести анализ влияние колебаний пластины и поверхности воды на распределение давлений и напряжений

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 14-01-00480_a, 14-01-04290_a).

Библиографический список

1. Ворович И. И., Юдович В. И. Удар круглого диска о жидкость конечной глубины // Прикладная математика и механика. 1957. Т. 21 № 4. с. 525-532.
2. Горшков А. Г., Григолюк Э. И., Взаимодействие упругих конструкций с жидкостью (удар и погружение). - СПб.: Судостроение, 1976. - 200 с.
3. Бородачев Н. М., Бородачева Ф. Н. Об учете влияния стенок при ударе круглого диска о жидкость // Журнал Механика твердого тела. 1967. № 1. с. 177-182.
4. Крупенин А. М., Мартиросов М. И. Верификация численной модели взаимодействия прямоугольной пластины с поверхностью воды // Электронный журнал «Труды МАИ», 2014, выпуск №75: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=49676> (дата публикации 09.06.2014)
5. Горшков А. Г., Старовойтов Э. И., Яровая А. В. Механика слоистых вязкоупругопластических элементов конструкций. -М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. - 576 с.