

УДК 519.6:539.3

Исследование волновых процессов при ударе мягкого тела о жесткую преграду на основе метода сглаженных частиц

С. П. Светличный

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

В статье рассматривается численное моделирование задачи о фронтальном ударе мягкого тела массой 1 кг, соударяющегося с жесткой преградой на скорости 100 м/с, с использованием метода сглаженных частиц. Рассчитаны поля распределения давления, плотности и скорости в мягком теле для различных моментов времени. Поля исследуемых физических величин являются нестационарными по времени и обладают пространственной неоднородностью. Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о волновой природе этих полей.

Ключевые слова: метод сглаженных частиц, удар, мягкое тело, численное моделирование.

В статі розглядається чисельне моделювання задачі про фронтальний удар м'якого тіла масою 1 кг, при зіткненні його з жорсткою перешкодою на швидкості 100 м / с, з використанням методу згладжених частинок. Розраховані поля розподілу тиску, густини і швидкості в м'якому тілі для різних моментів часу. Поля фізичних величин які досліджуються є нестационарними за часом і мають просторову неоднорідність. Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок про хвильову природу цих полів.

Ключові слова: метод згладжених частинок, удар, м'яке тіло, чисельне моделювання.

The paper presents the numerical analysis of normal impact of 1 kg soft body impacting a rigid target at a speed of 100 m/s by using smoothed particle hydrodynamics method. The fields of pressure, density and velocity distributions in the soft body for different time have been calculated. The fields of the physical parameters being analyzed are transient and have spatial inhomogeneity. Analysis of the obtained results allows us to make a conclusion about the wave nature of these fields.

Key words: smooth particle hydrodynamics, impact, soft body, numerical simulation.

Задача исследования ударных процессов в деформируемых сплошных средах является актуальной прикладной задачей механики сплошных сред. Традиционно решение данной задачи получают двумя методами: экспериментальным и расчетным с привлечением средств численного моделирования. Численное моделирование является удобным и эффективным средством для решения подобного класса задач. Одним из мотивов, побудившим к использованию средств численного моделирования для решения данной задачи явился тот факт, что результаты экспериментальных исследований с применением имитаторов показывают сильный разброс данных и отсутствие повторяемости данных при одинаковых условиях.

В данной статье рассматривается задача о соударении тела птицы с жесткой преградой. Используя методы численного моделирования, исследуются процессы, сопровождающие удар птицы о жесткую преграду. Статья является продолжением работы по разработке и верификации численной модели мягкого тела. Основные результаты описаны в работе [1]. Моделирование ударных

процессов связано с созданием или выбором адекватных математических моделей различной степени сложности, описывающих движение и деформирование мягкого тела. В работах по численному моделированию соударения мягкого тела с жесткой или деформируемой преградой использовались как сеточные методы с применением стационарных и адаптивных лагранжевых сеток, совмещенный Лагранж Эйлеровый подход (метод ALE), так и бессеточные [2, 3]. Среди бессеточных методов наиболее развитым является метод сглаженных частиц (метод SPH). Численное решение задачи об ударе мягкого тела по жесткой преграде с использованием сеточных методов сопряжено с рядом технических и теоретических трудностей, например необходимость периодического перестроения расчетной сетки и др. В частности в работе [1] показано, что применение метода конечных элементов не обеспечивает приемлемой точности решения даже при малом шаге дискретизации. Кроме того данному методу свойственны патологии, связанные с вырождением и сильным искажением расчетной сетки в зоне, где имеет место большие конечные деформации. В то время как расчетная модель мягкого тела, построенная на основе метода SPH, лишена выше перечисленных недостатков и является более эффективной в вычислительном плане, поскольку позволяет достичь требуемой точности решения при существенно меньшем количестве частиц в модели.

1. Постановка задачи

Рассмотрено численное решение задачи о соударении птицы массой m , движущейся под углом 90° (фронтальный удар) к поверхности абсолютно жесткой преграды со скоростью V_0 . На рис. 1 показана расчетная схема задачи. В работе [4] показано, при скоростях $V_0 \geq 100$ м/с поведение птицы при ударе описывают с позиций гидродинамики, моделируя ее в виде цилиндрического столба жидкости, обладающего низкой прочностью. Преграду моделируем как толстостенную плиту цилиндрической формы с соотношением диаметра к толщине равным 10. Модель мягкого тела представляет собой цилиндрический объем с соотношением длины к диаметру ($A=L/D$) равным двум. Размеры модели мягкого тела заданной массы (длина L и диаметр D) определены из условия размещения заданной массы, имеющей среднестатистическую плотность, внутри цилиндрического объема. Поведение мягкого тела при ударе описывается следующими функциями: $\rho(x, t)$ – плотность, $v(x, t)$ – вектор скорости, $\sigma(x, t)$ – тензор напряжений и $u(x, t)$ – удельная внутренняя энергия. Данные функции входят в качестве независимых параметров в основные уравнения механики сплошных сред: уравнение неразрывности, уравнение изменения количества движения и уравнение сохранения энергии. Математическая запись этих уравнений, а также граничные, контактные и начальные условия описаны в работе [1]. Поведение мягкого тела при ударе описано уравнением состояния $p=p(\rho)$ [5]:

$$p = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3, \text{ где } \mu = \rho/\rho_0 - 1 \text{ – коэффициент конденсации; } C_0 = 0, C_1 = \rho_0 c_0^2, C_2 = (2k - 1)C_1, C_3 = (k - 1)(3k - 1)C_1 \text{ – параметры уравнения}$$

состояния; $k = 2$ – экспериментальная константа; $c_0 = 1482,9$ м/с – скорость звука в воде.

Ниже приведены числовые значения параметров модели.

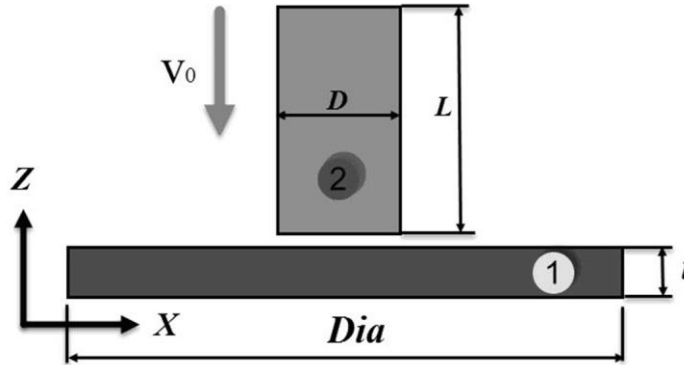


Рис. 1 – Расчетная схема задачи

Масса птицы $m=1$ кг, скорость соударения $V_0=100$ м/с. Геометрические параметры для жесткой преграды: $Dia=438$ мм, $t=43,8$ мм; для мягкого тела: $D=87,6$ мм, $L=175$ мм. Физико-механические свойства жесткой преграды: $\rho=4450$ кг/м³, $E=100$ ГПа, $\nu=0,3$; мягкого тела: $\rho=950$ кг/м³, $E=1$ ГПа, $\nu=0,3$. Параметры уравнения состояния мягкого тела: $C_1=2089$ МПа, $C_2=6267,1$ МПа, $C_3=10445,2$ МПа, $P_c=-1 \times 10^{-12}$ Па, $TEROD=10$, $CEROD=0,001$.

Решение трехмерной нелинейной динамической задачи о соударении мягкого тела с жесткой преградой получено при помощи системы LS-DYNA, в которой реализована явная схема интегрирования по времени [5].

Расчетная сетка для модели жесткой преграды состоит из 418 узлов и 192 3-D 8-узловых гексаэдральных элементов твердого деформируемого тела с одноточечной схемой интегрирования [5]. Модель мягкого тела описана набором из 9213 SPH элементов с равномерным шагом между дискретными частицами.

Контактное взаимодействие мягкого тела с преградой описано моделью Automatic Node-to-Surface с применением метода штрафов для расчета контактных усилий [5].

Время протекания процесса принято равным 1,5 мс и определялось как время необходимое для полной осадки цилиндрического объема с учетом коэффициента запаса равного 0,9, т.е согласно соотношению: $T = 0,9L/V_0$. Для интегрирования по времени выбрана схема первого порядка [5]. Шаг интегрирования определен следующим образом: $\delta t = C_{CFL} \text{Min}_i \left(\frac{h_i}{c_i + v_i} \right)$, где

C_{CFL} – константа Куранта-Фридрикса-Леви, h_i – длина сглаживания, на которой определяются свойства частицы, c_i – скорость звука, v_i – скорость частицы.

2. Результаты численного исследования.

На рис. 2 показано изменение давления в точке торможения при ударе мягкого тела о жесткую преграду. Результат представлен в безразмерном виде. Нормирование величин давления и времени выполнено следующим образом:

нормированное время: $T_0 = t/T$ – отношение текущего времени к времени протекания процесса; нормированное давление: $\bar{P}_{sh} = \frac{P_{sh}}{\rho_0 V_0^2 / 2}$.



Рис. 2. Распределение давления в точке торможения при ударе мягкого тела о жесткую преграду

Анализируя результат, приведенный на рис. 2 отметим следующее: характер изменения давления по времени представляет импульс давления. Можно выделить два участка на кривой, а именно участок, соответствующий активной фазе удара и участок установившегося течения. Для первого участка характерно резкое нарастание давления за короткий промежуток времени, после чего следует спад давления, связанный с распространением волны разряжения в мягком теле. Второй участок более длительный по времени и характеризуется постоянством величины давления с незначительными осцилляциями. Величина установившегося давления в два раза выше значения давления торможения, полученного аналитически с помощью выражения: $P_{st} = \rho_0 V_0^2 / 2$.

Получены и проанализированы поля распределения давления, плотности и вертикальной составляющей вектора скорости в мягком теле для различных моментов времени. На рис. 3 и 4 показан характер распределения поля давлений в продольном и поперечном сечениях мягкого тела для промежутков времени, соответствующих активной фазе удара.

Анализируя поле давлений, отметим следующее: в процессе взаимодействия мягкого тела с преградой формируется поле давлений с развитой волновой структурой. На начальном этапе формируется узкая по высоте и распределенная по всему поперечному сечению область сжатия, которая примыкает к границе пятна контакта. Давление в этой области максимально и продолжает расти в течение первых 14 мкс после контакта мягкого тела с жесткой преградой, что соответствует активной фазе удара.

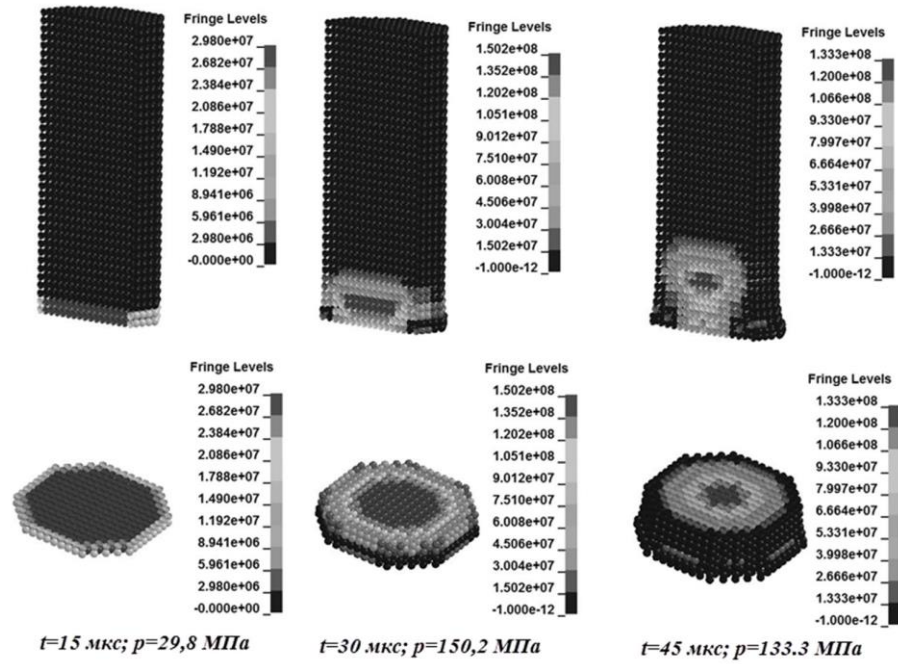


Рис. 3. Характер распределения поля давлений в мягком теле

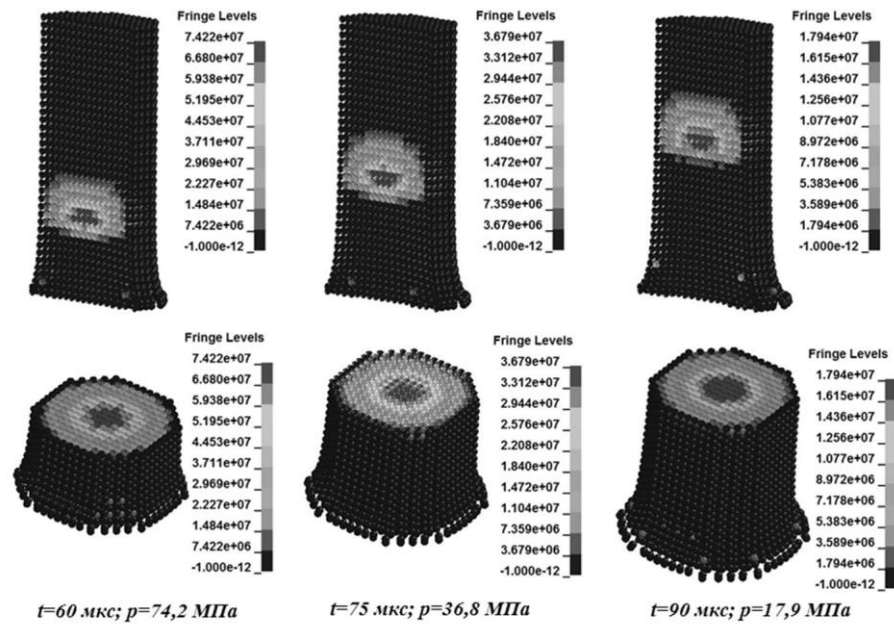


Рис. 4. Характер распределения поля давлений в мягком теле

В определенный момент времени волна давления отходит от границы пятна контакта и взаимодействует со свободной поверхностью. При этом образуется волна разрежения, распространяющаяся от свободной поверхности к центру.

Свободная поверхность начинает деформироваться. Область сжатия представляет собой грибовидную структуру, которая отделяясь от границы контакта, перемещается вдоль мягкого тела в направлении верхнего основания. По мере подхода волны разряжения к центру наблюдается спад давления и после фазы активного удара наступает этап установившегося течения, для которого характерна стабилизация давления в мягком теле.

На рис. 5 показан характер изменения плотности в мягком теле. В начальный момент времени в зоне, примыкающей к границе пятна контакта, формируется локализованная область сжатия, в которой плотность среды выше первоначального значения. Следует отметить, что плотность в области сжатия меняется не так резко, как давление. Изменение плотности в этой области зависит от степени сжатия.

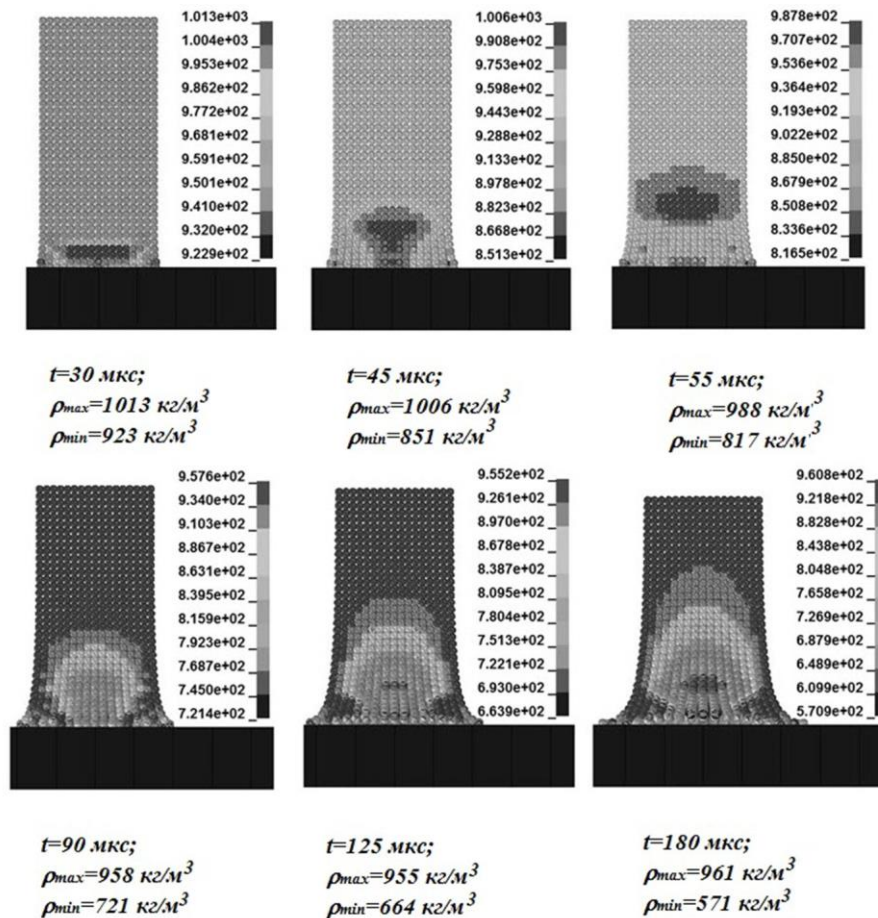


Рис. 5. Характер изменения плотности в мягком теле

Далее по мере развития процесса деформирования область сжатия, имеющая грибовидную форму, отделяется от границы контакта и смещается внутрь мягкого тела. При этом на свободных поверхностях формируется область разряжения, в которой плотность среды ниже первоначального значения. По

мере распространения волны разряжения в мягком теле формируется развитая область разряжения, охватывающая значительный объем мягкого тела.

На рис. 6 показано поле распределения вертикальной составляющей вектора скорости в мягком теле для различных моментов времени.

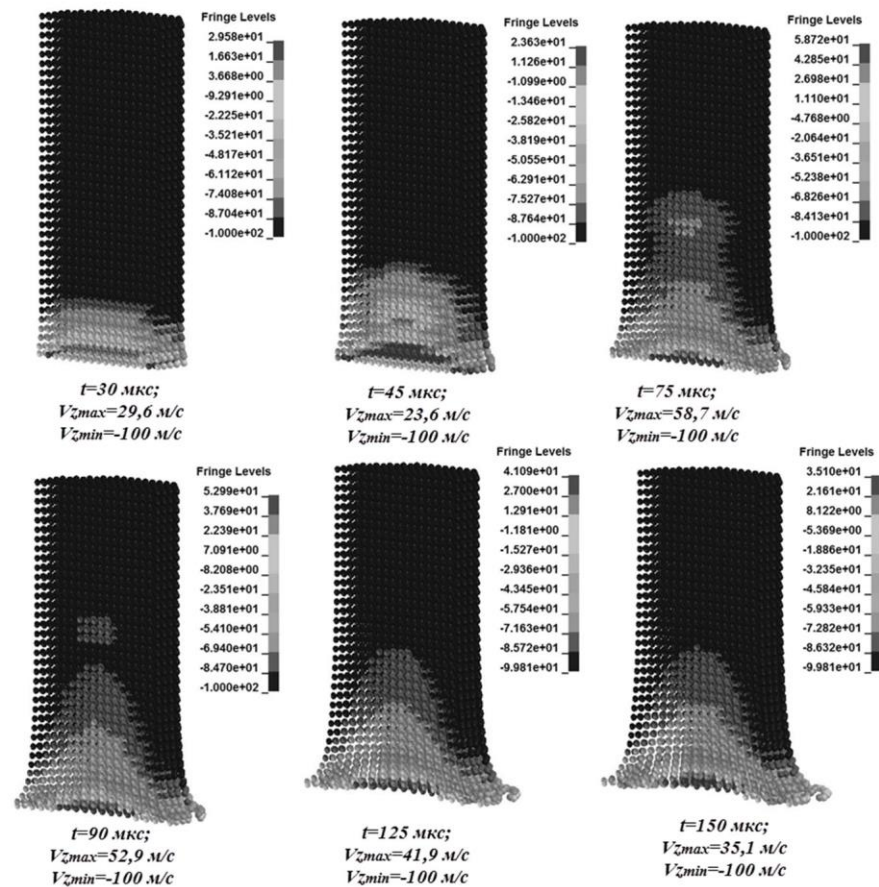


Рис. 6. Характер изменения вертикальной скорости Vz в мягком теле

В результате соударения мягкого тела с преградой происходит резкое торможение частиц, примыкающих к границе пятна контакта. При этом остальные частицы продолжают двигаться по инерции с неизменной начальной скоростью.

Исследован характер изменения вертикальной составляющей вектора скорости в характерных точках мягкого тела. Положение характерных точек, в которых определяется скорость, показано на рис. 7.

На рис. 8 показан характер изменения скорости частиц в характерных точках мягкого тела в течение полного времени протекания процесса. На рис. 9 показан характер изменения скорости частиц мягкого тела в течение первых 60 микросекунд после соударения.

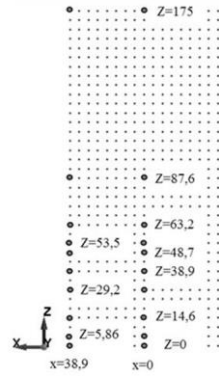


Рис. 7. Положение характерных точек

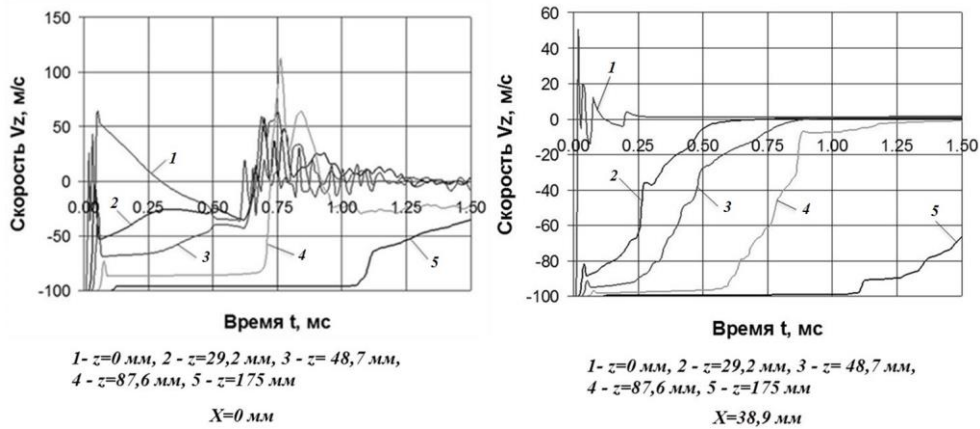


Рис. 8. Характер изменения скорости частиц в характерных точках мягкого тела

Анализируя полученные кривые можно отметить следующее: в течение первых 10...30 микросекунд после соударения скорость рассматриваемых частиц мягкого тела меняется резко, после чего следует переходной процесс, сопровождающийся серией осцилляций с последующим переходом к этапу установившегося движения, характеризующемуся постоянством значения скорости.

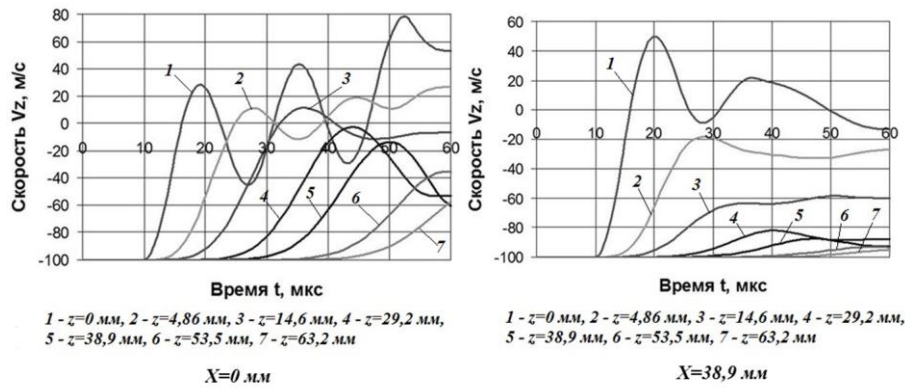


Рис. 9. Характер изменения скорости частиц в характерных точках мягкого тела (активная фаза удара)

Поле скоростей нестационарное по времени и переменное по пространственным координатам. По мере удаления частицы от точки торможения амплитуда колебаний вектора скорости уменьшается. Также имеет место сдвиг по фазе.

Проанализирован характер изменения скорости перемещения частиц (см. рис. 10), расположенных на свободной поверхности мягкого тела (в сечении $x=38,6$ мм, $y=0$), а также изменение радиальной скорости частиц, расположенных в плоскости симметрии мягкого тела в сечении $z=0$ (см. рис. 11).

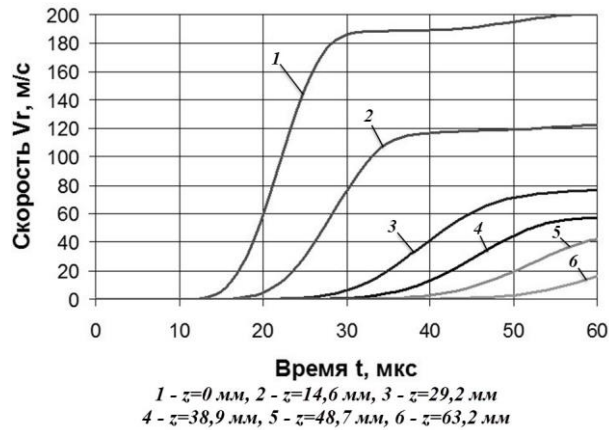


Рис. 10. Скорость перемещения свободной поверхности мягкого тела

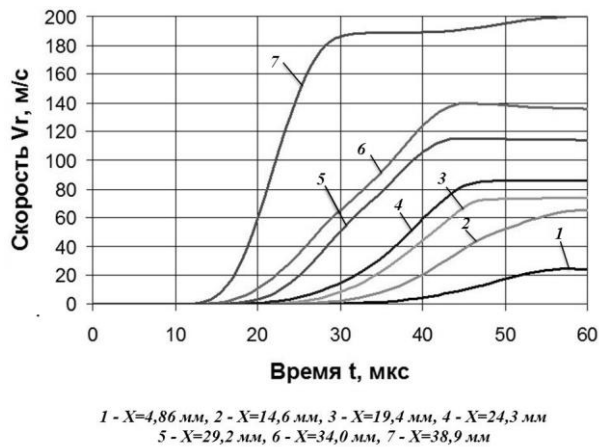


Рис. 11. Изменение радиальной скорости частиц мягкого тела по радиусу в сечении $z=0$

Анализируя полученные кривые, отметим следующее: в момент контакта мягкого тела с преградой частицы, расположенные на свободной поверхности мягкого тела разгоняются в радиальном направлении, при этом значение радиальной скорости меняется резко за короткий промежуток времени. Далее скорость движения частицы в радиальном направлении остается неизменной. Расчетным путем установлено, что скорость установившегося движения частиц, расположенных на периферии, в два раза больше скорости соударения. По мере

удаления частицы от точки контакта в осевом направлении характер распределения скорости перемещения свободной поверхности становится плавным. В свою очередь тенденция изменения радиальной скорости частиц в радиальном направлении прямо противоположна. По мере удаления частицы от точки торможения характер распределения скорости становится более резким.

3. Выводы

С помощью бессеточного метода сглаженных частиц получено численное решение задачи о соударении мягкого тела массой 1 кг с жесткой преградой. Исследованы волновые процессы, сопровождающие удар мягкого тела и построены поля распределения давления, плотности и скорости в мягком теле для различных моментов времени. Поля исследуемых физических величин являются нестационарными по времени и обладают пространственной неоднородностью. При ударе мягкого тела о жесткую преграду в мягком теле наблюдается распространение и взаимодействие ударных волн и волн разряжения друг с другом и со свободными поверхностями. Расчетным путем установлено, что радиальная скорость частиц мягкого тела, расположенных на свободной поверхности в зоне контакта на этапе установившегося течения в 2 раза превышает скорость удара.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ванин В. А., Светличный С. П. Численное исследование взаимодействия тела птицы с преградой на основе сеточного и бессеточного методов // Вестник НТУ «ХПИ». Математическое моделирование в техники и технологиях – Харьков. – 2016. – № 16 (1188). – С. 5–15.
2. Lavoie M-A., Gakwaya A., Nejad Ensan M., Zimcik D.G. Review of existing numerical methods and validation procedure available for bird strike modeling // International Conference on Computer Engineering and Systems. – 2007. – vol. 2. – No. 4. – pp. 111–118.
3. Ryabov A.A., Romanov V.I., Kukanov S.S., Shmotin Y.N., Chupin P.V. Fan blade bird strike analysis using Lagrangian, SPH and ALE approaches // 6th European LS-DYNA Users' Conference. – 2007. – Режим доступа: <http://www.dynalook.com/european-conf-2007>.
4. Wilbeck J. S. Impact Behavior of Low Strength Projectiles: Technical report / University of Dayton Research Institute. – Ohio, Jule 1978. – 129 p.
5. Hallquist J. O. LS-DYNA. Theory Manual. – Livermore: LSTC, 2006. – 680 p.