

Ю.А.Воробьев, Н.В.Нечипорук, А.Ю.Воробьев, О.В.Трифонов, Н.Н.Скалыга
Национальный аэрокосмический университет им. М.С. Жуковского "ХАИ"
Луцкий национальный технический университет
МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИКИ ПНЕВМОИМПУЛЬСНОГО РУЧНОГО
ИНСТРУМЕНТА В СИСТЕМЕ ANSYS CFX И LS-DYNA

В статье рассмотрены вопросы моделирования в программных продуктах ANSYS CFX и LS-DYNA. Энергетические характеристики пневмоимпульсного ручного инструмента в большой степени определяются газодинамическими процессами, происходящими в каналах и трактах устройства. Поэтому создание математической модели, позволяющей комплексно описывать указанные процессы, является особо актуальным, т.к. позволит корректно прогнозировать энергию единичного удара с учетом всех факторов, определяющих поведение бойка и обжимки пневмоинструмента.

Ключевые слова: пневмоимпульсный ручной инструмент, энергетические характеристики, газодинамические процессы, моделирование

Рис 11. Форм 4. Лит 8.

Ю.А.Воробйов, М.В.Нечипорук, О.Ю.Воробйов, О.В.Трифонов, М.М. Скалига
МОДЕЛЮВАННЯ ГАЗОДИНАМІКИ ПНЕВМОІМПУЛЬСНОГО РУЧНОГО
ІНСТРУМЕНТУ В СИСТЕМІ ANSYS CFX І LS - DYNA

У статті розглянуто питання моделювання в програмних продуктах ANSYS CFX і LS-DYNA. Енергетичні характеристики пневмоімпульсного ручного інструмента у великій мірі визначаються газодинамічними процесами, що відбуваються в каналах і трактах пристрою. Тому створення математичної моделі, що дозволяє комплексно описувати вказані процеси, є особливо актуальним, тому що дозволить коректно прогнозувати енергію одиничного удару з урахуванням усіх факторів, що визначають поведінку бойка і обтискувача пневмоінструменту.

Ключові слова: пневмоімпульсний ручний інструмент, енергетичні характеристики, газодинамічні процеси, моделювання

Yu.Vorobyov, N.Nechyporuk, A.Vorobyov, O.Tryfonov, N.Skalyga
SIMULATION OF GAS DYNAMICS PROCESSES INSIDE HAND-HELD PNEUMATIC
IMPULSE TOOLS IN ANSYS CFX AND LS-DYNA

The article discusses simulation of gas dynamics processes inside hand-held pneumatic impulse tools in ANSYS CFX and LS-DYNA. Energy characteristics of hand-held pneumatic impulse tools are largely determined by the gas-dynamic processes in channels and paths of the device. Therefore, the creation of a mathematical model which allows to describe these processes is particularly urgent.

Keywords: pneumatic impulse hand tools, energy characteristics, gas dynamics, simulation.

Постановка проблемы. Современная продукция машиностроительных отраслей (летательные аппараты, автомобили, железнодорожный и водный транспорт и др.) характеризуется непрерывным усложнением конструкции изделий, постоянно растущими требованиями к их надежности, качеству и технико-экономическими показателями. Ее создание сопровождается автоматизацией процессов проектирования, конструирования и технической подготовки производства. Однако, не смотря на это, большое количество соединений при сборке авиационных и других наукоемких конструкций производится при помощи ручного инструмента, ввиду сложности реализации автоматизации из-за геометрических ограничений и сложности подходов при выполнении соединений. Поэтому, задача проектирования и создания ручного инструмента с учетом ограничений, связанных с особенностью зоны выполнения соединения является актуальной. Более того, на сегодня не существует эффективной методики для выполнения подобного рода проектирования.

Целью работы является разработка методики проектирования ручного пневмоимпульсного инструмента как части проблемно-ориентированного комплекса [1] оборудования для сборке авиационной техники на основе применения современных CAD/CAE-систем компьютерного моделирования.

Описание применяемых математических моделей при моделировании газодинамических процессов в пневмоимпульсном инструменте.

Для численного исследования поставленной задачи использована система уравнений

©Ю.А.Воробьев, Н.В.Нечипорук, А.Ю.Воробьев, О.В.Трифонов, Н.Н.Скалыга

Навье-Стокса [4], включающая в себя законы сохранения массы, импульса и энергии нестационарного пространственного течения в декартовой системе координат ($x_i, i = 1, 2, 3$):

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k) = 0, \\ \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = S_i, \\ \frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} ((\rho E + P)u_k + q_k - \tau_{ik} u_i) = S_k u_k + Q_H, \end{cases} \quad (1)$$

где u_i – компоненты вектора скорости газа; ρ, p – плотность и давление газа; S_i – внешние объемные силы; E – полная энергия единичной массы газа; Q_H – теплота, выделяемая в единичном объеме газа; τ_{ik} – тензор вязких сдвиговых напряжений; q_i – тепловой поток.

Течение газа, безусловно, будет иметь ярко выраженный турбулентный характер. Очевидно, что непосредственное решение трехмерных нестационарных уравнений Навье-Стокса с использованием пространственных сеток вполне применимо для описания всех существенных течений, в том числе пространственно-временных неоднородностей. Однако, не менее очевидно и то, что для его численной реализации необходимо использовать очень мелкие сетки, количество узлов которых должно резко увеличиваться с ростом числа Рейнольдса.

В настоящей работе использованы уравнения SST-модели турбулентности [2, 3], показывающей высокую точность при моделировании пристеночных течений.

В этой модели для задания значения турбулентной вязкости использовано выражение:

$$\mu_T = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega; \Omega F_2)} \quad (2)$$

где $F_2 = \tanh(\arg_2^2)$; $\arg_2 = \max\left(2 \frac{\sqrt{k}}{0,09 \omega y}; \frac{500 \nu}{y^2 \omega}\right)$ – функция, которая равна единице для

пограничного слоя и нулю для свободных слоев; $\Omega = (\partial u / \partial n)$ – производная скорости течения по направлению нормали к стенке.

Для определения кинетической энергии и ее диссипации использованы уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i k) &= \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_i} \left((\mu_l + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right), \\ \frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i \omega) &= \frac{\gamma \rho}{\mu_m} \tau_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left((\mu_l + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right) + \\ &+ 2 \rho (1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\beta, \beta^*, \sigma_k, \sigma_\omega$ – эмпирические константы, вычисляемые по формуле $\varphi = F_1 \varphi_1 + (1 - F_1) \varphi_2$, φ_1, φ_2 – соответствующие эмпирические коэффициенты $k - \varepsilon$ и $k - \omega$ моделей турбулентности.

При решении задач с деформируемыми областями, искажение сетки конечных элементов (КЭ) приводит к появлению вырожденных КЭ или существенному ухудшению их качества. Периодическая перестройка сетки КЭ для расчетной области – очень важная часть анализа, включающего в себя существенные перемещения границ расчетной области и деформации сетки КЭ.

Поэтому для получения адекватного результата решаемой задачи необходима интеграция цикла перестройки сетки КЭ в общий цикл решения задачи.

Разгон бойка является сложным многофакторным процессом, на протекание которого существенное влияние оказывают как параметры газовой среды, так и связанные с конструктивными особенностями инструмента условия истечения газа. Как было отмечено выше, такой процесс описывают численно с использованием системы уравнений Навье-Стокса, решение которой производят с использованием метода конечных элементов. Решение подобного рода задачи со сложной пространственной геометрией требует больших затрат вычислительных ресурсов,

что усугубляется необходимостью перестраивать сету конечных элементов в режиме реального времени при ухудшении ее качества во время расчета. В связи с этим, предложено два подхода для решения задачи газодинамики пневмоимпульсного инструмента с учетом движения бойка:

1. мультиконфигурационный подход в плоской осесимметричной постановке;
2. осесимметричный подход с выделением элементарного сектора и применением механизма автоматической перестройки сетки конечных элементов.

Мультиконфигурационный подход при решении задач с подвижными границами

Расчетная область представляет собой плоскую зону, которая соответствует сечению импульсного молотка плоскостью, проходящей через ось симметрии (рис. 1). Объектом исследования является перемещение и разгон бойка под воздействием перепада давлений в забойковой и предбойковой полостях.

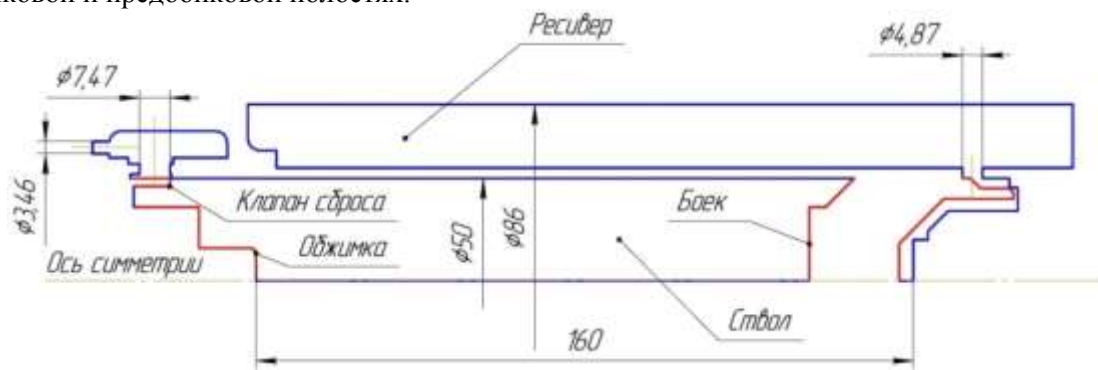


Рис.1. Геометрия расчетной области

Принято, что в момент времени перед открытием клапана сброса в стволе и ресивере находится воздух при температуре 300 К и начальным давлением 0,5 МПа. Давление окружающей среды принято 0,1 МПа, температура – 300 К. Предполагалось, что открытие клапана сброса осуществляется за 0,01 с. Масса бойка – 0,139 кг.

Моделирование проводили для случаев с различным соотношением объема хода бойка V_x к объему ресивера V_p . Также исследовали влияния условий истечения газа на скорость и энергию бойка.

Мультиконфигурационный подход предполагает наличие нескольких конфигураций расчетной области в зависимости от положения бойка по ходу решения задачи. В рассматриваемом случае было использовано 7 конфигураций, которые соответствовали ходу бойка на 0,001; 0,008; 0,028; 0,058 и 0,088 м. На рисунке 2 показаны некоторые из них. В пределах конкретной конфигурации происходит деформация расчетной сетки КЭ со скоростью, характерной мгновенной скорости бойка. При этом переключение на новую сетку происходит автоматически при достижении перемещения бойка на заданное расстояние. Максимальное количество ячеек сетки конечных элементов составила 15643.

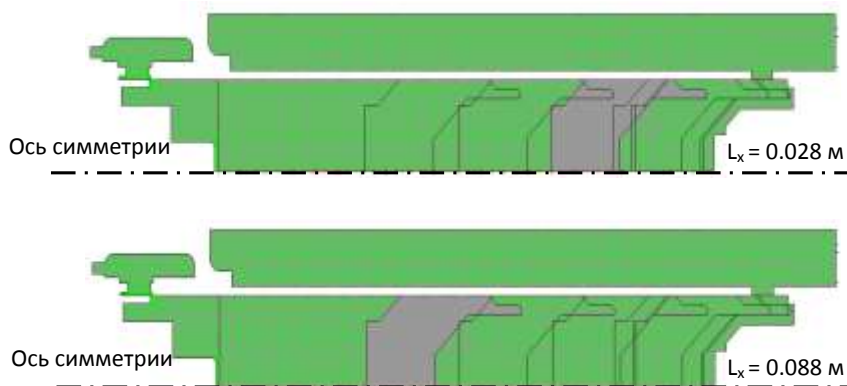
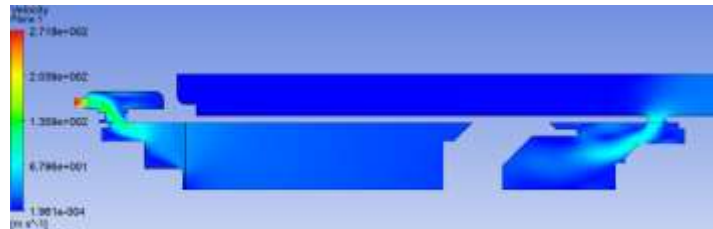


Рис. 2. Конфигурации расчетной области в зависимости от положения бойка

Поля распределения скоростей газа, полученные по результатам моделирования, показаны на

рисунке 3.

Результаты моделирования показывают, что с увеличением соотношения, скорость и энергия бойка уменьшаются, а при $V_x/V_p=2$ и более, наблюдается торможение бойка. Так при прохождении бойком 0,135 м, что эквивалентно $2,7d_6$, его скорость достигает пикового значения в 14 м/с после чего начинает снижаться. С увеличением диаметра отверстий выхода на передней крышке молотка МПИ-90М также наблюдается начало торможения бойка при прохождении расстояния 0,135 м, но при этом максимальная скорость достигает 19 м/с. Сводный график по результатам моделирования для различных случаев показан на рисунке 4. Время расчета для каждого отдельного случая составило не более 1 часа и зависит от размеров расчетной области.



0,0094 с



0,01439 с

Рис. 3. Поля скоростей течения газа

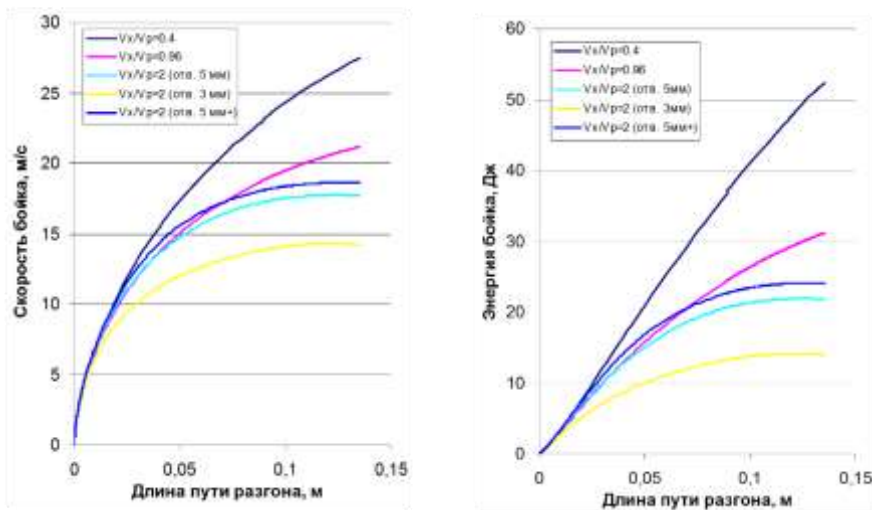


Рис. 4. Сравнение скорости и энергии бойка для различных случаев

Осесимметричный подход с выделением элементарного сектора

Расчетная область представляет собой сектор. Для возможности построения сектора, с регулярным расположением отверстий, исходная геометрия инструмента была изменена с целью обеспечения одинакового количества отверстий в зоне выхода газа на передней крышке, в зоне перетекания газа при открытии клапана сброса и в зоне перетекания газа из ресивера в забойковую полость. Пересчет размеров отверстий проводился с соблюдением эквивалентности общей площади проходного сечения отверстий в оригинальной и измененной геометрии инструмента. Угол сектора с одним рядом отверстий составил $17,14^\circ$.

©Ю.А.Воробьев, Н.В.Нечипорук, А.Ю.Воробьев, О.В.Трифонов, Н.Н.Скалыга

Для сравнения производительности вычислений было рассмотрено две расчетных области, которые отличались количеством рядов отверстий: 3 ряда (рисунок 5, а) и 1 ряд (рисунок 5, б).

Начальные и граничные условия аналогичны, как и при решении задачи в 2D-постановке.

Для реализации поставленной задачи, был применен механизм автоматической перестройки сетки конечных элементов, который показан на рисунке 6.

График изменения скорости бойка с увеличением его хода для случаев с различными секторами показан на рисунке 7. Максимальная относительная погрешность составила 4%. При этом время вычислений было сокращено с 13 до 6 часов, что подтверждает целесообразность применение сектора с меньшим углом для ускорения проведения вычислений, что связано с существенным сокращением количества ячеек сетки КЭ. Так, для сектора с тремя рядами отверстий расчетная сетка состоит из 263326 ячеек, а сектор с одним рядом отверстий – из 102359 ячеек. На рисунке 8 показано сравнение результатов моделирования с теоретическими данными [1].

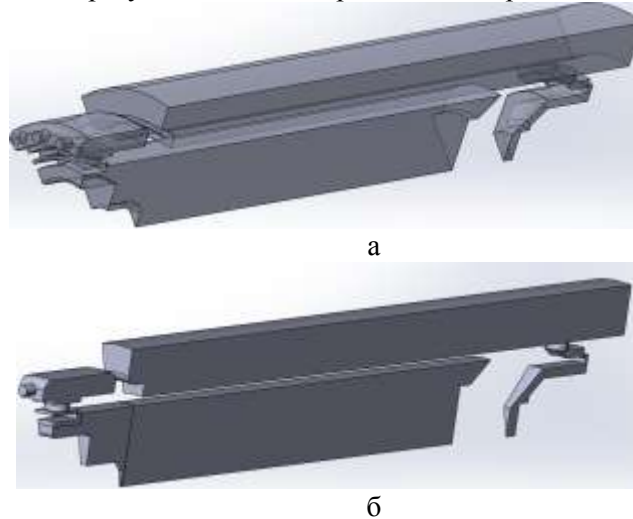


Рис. 5. Геометрия расчетной области в виде элементарного сектора



Рис. 6. Интеграция цикла перестройки сетки КЭ в общий цикл решения задачи

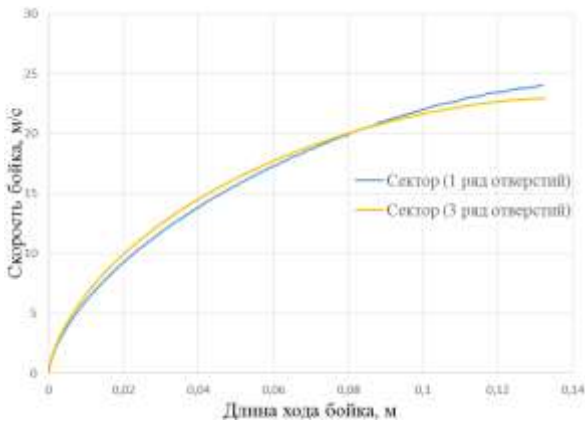


Рис. 7. Сравнение скорости бойка при различной геометрии расчетной области

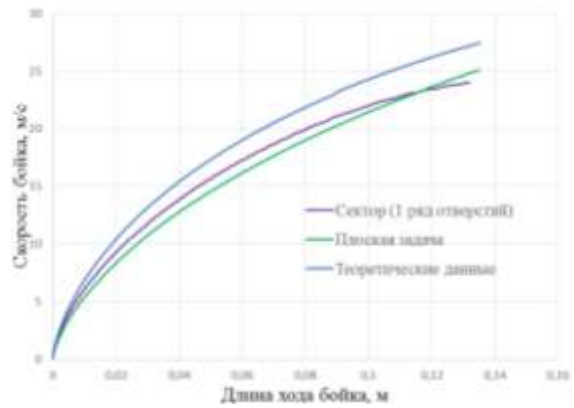


Рис. 8. Сравнение результатов моделирования с известными теоретическими данными

Моделирование работы пневмоимпульсного устройства в системе LS-DYNA

Задачей данной работы была проверка возможности использования программного продукта LS-DYNA для моделирования пневмоимпульсного молотка. Основные процессы, которые необходимо отобразить в ходе моделирования, следующие:

- стравливание воздуха из ресивера через предбойковую область в окружающую среду;
- движение бойка под действием газодинамических сил;
- движение клапана быстрого сброса давления под действием газодинамических сил;
- передача энергии бойка обжимке в процессе соударения;
- оценка влияния уплотнительных колец на движение бойка, обжимки и клапана.

Для моделирования выше перечисленных процессов необходимо решить сложную газодинамическую задачу с учетом взаимодействия газов с твердыми телами. В работе **Ошибка! Источник ссылки не найден.** представлено сравнение ламинарного и турбулентного течений для однотипной задачи, максимальная погрешность составила 2%. Таким образом, для выполнения этого моделирования был выбран конечно-элементный решатель LS-DYNA, позволяющий смоделировать все необходимые процессы в ламинарном течении. В работах [6, 7] также описано использование этого программного продукта для моделирования пневмонических пистолетов.

В силу осесимметричности модели в работе была использована осесимметричная постановка задачи в двухмерном пространстве. КЭ-модель вместе с граничными условиями представлена на рисунке 9. Общее количество элементов – 12410.

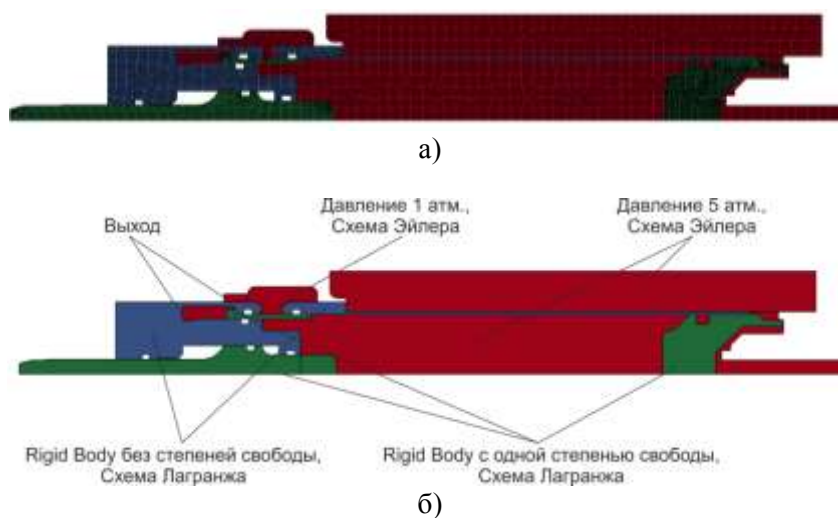


Рис. 9. Рассматриваемая модель молотка: а) КЭ-модель; б) граничные условия

Для моделирования ресивера, предбойковой области и области сброса воздуха использовалась эйлеровская схема. В силу маленького давления в ресивере была использована модель идеального газа. Давление задавалось через температуру с учетом уравнения идеального газа:

$$p = \rho(C_p - C_v)T, \quad (4)$$

где p – давление газа; ρ – плотность газа, $\rho = 1,25 \text{ кг/м}^3$; C_p – удельная теплоемкость газа при постоянном давлении; $C_p = 1010 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; C_v – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме, $C_v = 718 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; T – температура газа.

Скорость течения газа на границах равна нулю (ЕВС=1). Давление окружающей среды – 0,1 МПа.

Боек, обжимка, клапан быстрого сброса, ствол и гайка были смоделированы как абсолютно жесткие тела с лагранжевой схемой элемента. Материал клапана быстрого сброса – сталь, материал остальных элементов – титановый сплав ВТ22. Ствол и гайка были использованы для моделирования соударения бойка с ними и для моделирования трения уплотнительных колец об эти поверхности. Эти элементы полностью зафиксированы в пространстве, в то время как клапан быстрого сброса, боек и обжимка имеют одну степень свободы вдоль ствола. Массы бойка и обжимки равны каждая 139 г.

Все элементы смоделированы как осесимметричные тела.

Для моделирования уплотнительных колец использовалась модель гиперупругого материала Муни-Ривлина с двумя параметрами, функция плотности энергии деформации описывается следующим уравнением [3]:

$$W = A(I - 3) + B(II - 3) + C(III^{-2} - 1) + D(III - 1)^2 \quad (4)$$

где $C = 0,5A + B$; $D = \frac{A(5\theta - 2) - B(11\theta - 5)}{2(1 - 2\theta)}$; θ – коэффициент Пуассона; $G = 2(A + B)$ – модуль сдвига; I, II, III – инварианты правого тензора деформации Каши-Грина.

В данной работе использовалась неогуковая модель материала с коэффициентом Пуассона 0,495 и коэффициентами $A = \frac{G}{2}, B = 0$. В таком случае модуль сдвига равен половине модуля упругости ($G = E/(2 + 2\theta)$), который был выбран равным 7 МПа в соответствии с твердостью по Шору равной 65 [8].

Коэффициент трения был выбран равным $\mu = 0,07$ для неопреновой резины в скудной смазке маслом при 18°C [8]. После первого соударения бойка с обжимкой ($t = 17,7$ мс), боек за счет разницы давлений в оставшейся и пройденной областей предбойковой полости продолжает движение. Обжимка после вскоре соударяется с корпусом молотка ($t = 18,4$ мс), после чего начинает движение в обратную сторону. После этого следует еще одно соударение бойка и обжимки ($t = 19$ мс) с последующей скоростью обжимки 2,38 м/с. Картина распределения давлений и скоростей показана на рисунке 10.

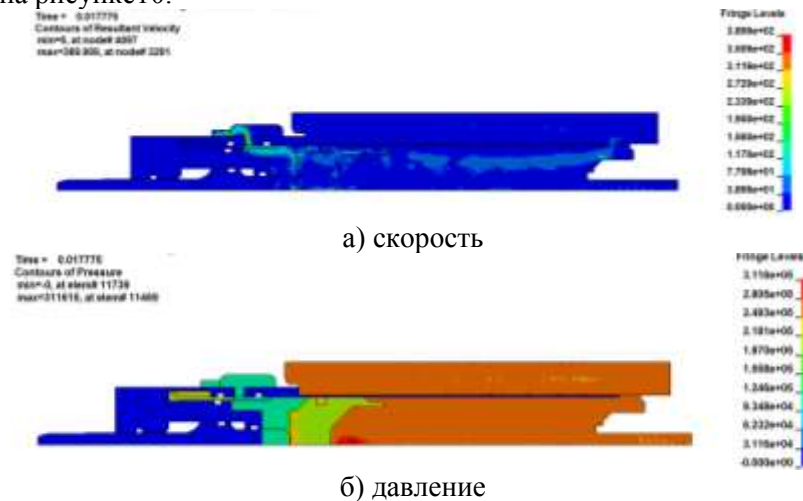


Рис. 10. Картина распределения давлений и скоростей

Проведем сравнение результатов моделирования в ANSYS CFX и LS-DYNA. Как указывалось выше, решатель ANSYS CFX позволяет получить решение поставленной задачи только до момента соударения бойка и обжимки. Поэтому проведем сравнение результатов лишь на этапе движения бойка на участке разгона (рисунок 11).

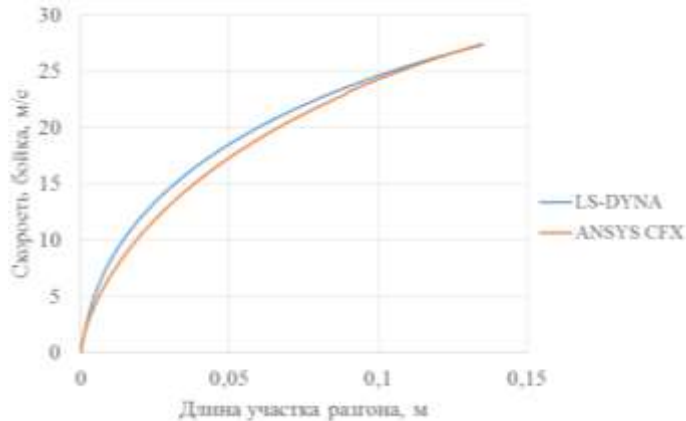


Рис. 11. Сравнение результатов моделирования в ANSYS CFX и LS-DYNA

Сравнение результатов моделирования в ANSYS CFX и LS-DYNA показывает, что на момент касания бойка и обжимки, обе системы показали практически идентичный результаты. Относительное отклонение составляет 0,4%. Это подтверждает возможность использования LS-DYNA для расчета газодинамических процессов в пневмоимпульсном инструменте с учетом воздействия газового потока на твердые подвижные тела.

Выводы

1. Показано, что увеличение соотношения V_x/V_p с 0,4 до 2 приводит к снижению скорости бойка с 28 до 14 м/с и энергии удара с 52 до 14 Дж. При $V_x/V_p=2$ наблюдается появление участка торможения, который начинается после прохождения бойком расстояния, эквивалентному $2,7d_6$. Увеличение диаметра отверстий на выходе из передней крышки молотка с 3 до 5 мм позволяет увеличить скорость бойка с 14 до 19 м/с энергию удара с 14 до 24 Дж.

2. Проведено моделирование с различной геометрией расчетной области: двухмерная постановка, сектор с тремя рядами отверстий и сектор с одним рядом отверстий. Время расчета для сектора с тремя рядами отверстий составило 13 часов; для сектора с одним рядом отверстий – 6 часов; для плоской задачи – 1 час. При этом максимальная относительная погрешность результатов в случае использования 2D-геометрии и сектора не превышает 5%. Таким образом, для проведения проектировочных расчетов целесообразно использовать 2D-постановку, т.к. существенно сокращается время выполнения вычислений. После завершения проектирования, целесообразно выполнить проверочный расчет, используя уже геометрию в виде сектора.

3. Проведено сравнение результатов моделирования с известными теоретическими данными. Максимальная относительная погрешность составила 12%, что связано с большим количеством допущений, принятых при теоретических расчетах и которых удалось избежать при моделировании.

4. Сравнение результатов моделирования в ANSYS CFX и LS-DYNA подтверждает возможность использования LS-DYNA для расчета газодинамических процессов в пневмоимпульсном инструменте с учетом воздействия газового потока на твердые подвижные тела. Относительное отклонение составляет 0,4%.

1. Король В.Н. Современные тенденции технологической модернизации производства гражданских самолетов [Текст] / В.Н. Король, В.А. Матвиенко // Технологические системы. – 2013. – Вып. 1(62). – С. 42 – 48.
2. Исследование и разработка технологических процессов и пневмоимпульсных устройств для выполнения клепально-сборочных работ в условиях серийного производства: отчет о НИР (промежуточ.) / ХАИ; науч. рук. Кушнаренко С.Г., отв. исп. Чистяк В.Г., исп. Воробьев Ю.А., Цыганов В.П., Несолёный В.С. – Х., ХАИ, 1988. – 56 с. – ГР №01860123606. – Инв. №02.88.0041988.
3. Лепетов, В.А., Резиновые технические изделия [Текст] : учеб. пособие / В.А. Лепетов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во «Химия», 1965. – 472 с.
4. Menter, F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineer-ing applications [Текст] / F.R. Menter // AIAA-Journal – 1994. – № 32(8). – P. 269 – 289.
5. Menter, F.R. A scale-adaptive simulation model for turbulent flow predic-tions [Текст] / F.R. Menter, M. Kuntz, R. Bender. // AIAA Paper 2003-0767, 2003. – 40 p.
6. F. Plassard et. al, Analysis of a single stage compressed gas launcher behavior: from breech opening to sabot separation, 8 Европейская конференция LS-Dyna, Страсбург, 2011.
7. M. Seidl et. al, Modeling internal gas flows in a single stage gas gun using Eulerian/Lagrangian coupling in LS-Dyna, 9 Европейская конференция LS-Dyna, Манчестер, 2013.
8. J. Kunz, M. Studer, Determining the modulus of elasticity in compression via the Shore A hardness, Kunststoffe international, выпуск 6, 2006, p. 92-96.

Стаття надійшла до редакції 10.04.2014

©Ю.А.Воробьев, Н.В.Нечипорук, А.Ю.Воробьев, О.В.Трифонов, Н.Н.Скалыга