



Березовский П.С., Родин А.С.

Проведение
оптимизационных расчётов
для магнитного компрессора
с использованием грида
персональных компьютеров,
управляемых системой
SARD

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Березовский П.С., Родин А.С. Проведение оптимизационных расчётов для магнитного компрессора с использованием грида персональных компьютеров, управляемых системой SARD // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2011. № 7. 31 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2011-7>

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Ордена Ленина Институт прикладной математики
им. М. В. Келдыша

П.С. Березовский, А.С. Родин

**Проведение оптимизационных расчётов для
магнитного компрессора с использованием грида
персональных компьютеров, управляемых
системой SARD**

Москва — 2011

УДК 519.68

П.С.Березовский, А.С.Родин. Проведение оптимизационных расчётов для магнитного компрессора с использованием грида персональных компьютеров, управляемых системой SARD.

Рассмотрена проблема оптимизации выходного импульса тока в магнитном компрессоре, работа которого основана на сжатии магнитного поля пластинчатым лайнером. На основе построенных математических и численных моделей работы компрессора проведено несколько серий вычислительных экспериментов, в которых варьировались различные входные параметры системы.

Применение грид-технологий для поддержки вычислительного процесса позволило в несколько раз сократить время моделирования путём использования периодов простоя (или незанятых ресурсов) персональных компьютеров. Представлены результаты вычислительных экспериментов и проведён их анализ.

Ключевые слова: грид, распределённые вычисления, некластеризованные ресурсы, разделяемые компьютеры, управление ресурсами, магнитный компрессор, пластинчатый лайнер, упругопластическое тело.

P.S.Berezovskiy, A.S.Rodin. Carrying out an optimization calculations for the magnetic compressor by means of grid of desktops under control of SARD system.

This work is devoted to the problem of optimization of output current pulse in magnetic compressor. The operation of compressor is based on the compression of a magnetic field by a plate liner. A number of calculations for different values of input parameters of system are carried out having used the mathematical and numerical models.

Application of grid-technologies for support of calculations has allowed reducing simulation time in several times by means of idle PC's computing power utilization. Results of computing experiments are presented and their analysis is carried out in this work.

Key words: grid, distributed computing, non-clustered resources, shared computers, resource management, magnetic compressor, plate liner, elastoplastic body.

Содержание

Содержание	3
1. Введение и постановка задачи	4
2. Математические и численные модели движения лайнера в магнитном компрессоре	7
3. Программа для расчёта движения лайнера	8
3.1. Описание программы для расчёта	8
3.2. Описание расчётной задачи	9
4. Применение технологии грида для поддержки выполнения серийных расчётов	11
4.1. Актуальность применения технологий грида	11
4.2. Система диспетчеризации заданий SARD	11
5. Выполнение расчётов на некластеризованных компьютерах под управлением системы SARD	14
5.1. Определение момента замыкания цепи лайнера	14
5.2. Влияние распределения плотности вещества в лайнере на выходной импульс	15
5.3. Влияние профиля индуктора на выходной импульс	20
6. Заключение	28
Список литературы	30

1. Введение и постановка задачи

Построение многокомпонентных физических установок сопряжено с множеством трудностей, одной из которых является определение характеристик компонентов установки, таких как геометрические размеры, свойства материала деталей, электрические характеристики, компоновка узлов и т.д. Часто компоненты системы разрабатываются одновременно и независимо друг от друга, что не даёт возможности на ранних стадиях проверять в действии работу всей системы в целом и оценивать её показатели. Поэтому основным средством получения необходимой информации является математическое моделирование работы системы и проведение серии экспериментов по определению оптимальных характеристик её компонентов.

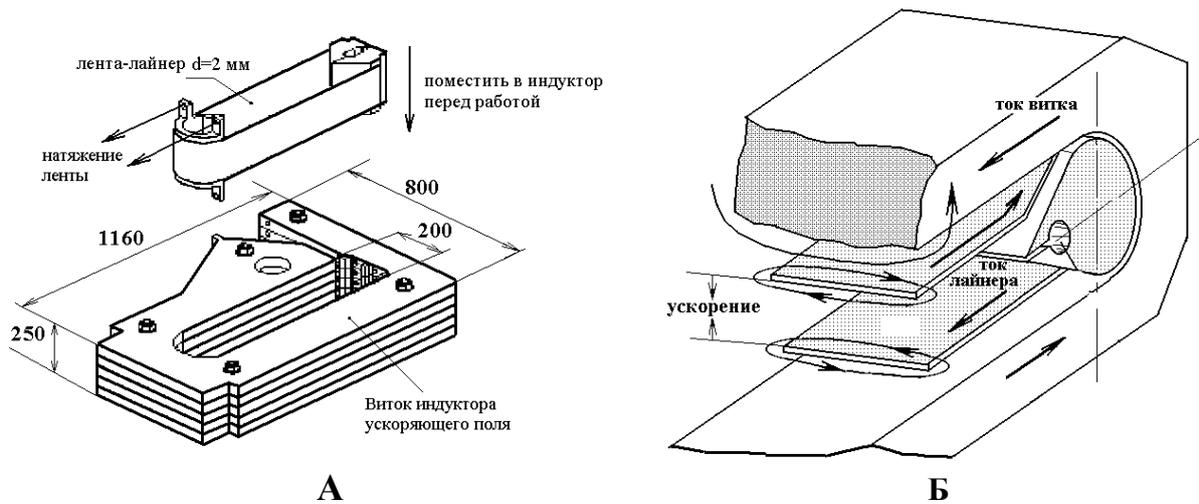


Рис. 1. А — конструкция ускорительного витка и лайнера (лайнер вынут из витка индуктора), Б — поперечное сечение генератора в собранном виде, указано направление протекания токов, направление ускорения лайнеров и конфигурация ускоряющего магнитного поля

Примером такого рода систем является установка «МОЛ» («Магнитный Обостритель Лайнер»), предназначенная для исследования работы всех ступеней модуля установки «Байкал» и генерации электрического импульса мегаджоульного уровня [1]. Для этой установки в ГНЦ РФ ТРИНИТИ разработан макет усилительного каскада мощности — магнитный

компрессор (МК), работа которого основана на сжатии магнитного потока лайнером, ускоренным электродинамическими силами до скорости 1 км/с [2], [3]. На рис. 1 приведены элементы устройства МК и его поперечное сечение.



Рис. 2. Фрагмент ленты лайнера после проведения экспериментального запуска МК

В ГНЦ РФ ТРИНИТИ на макете МК проведена серия экспериментальных запусков, однако имеющийся объём экспериментальных данных достаточно ограничен. Это связано с тем, что процесс ускорения лайнера занимает короткий промежуток времени (порядка сотни микросекунд), а в результате торможения большая часть ленты уничтожается (на рис. 2 показан уцелевший фрагмент лайнера, но чаще всего не остаётся даже таких фрагментов — вся лента превращается в порошок). На рис. 3.А и 3.Б приведены фотографии теневой киносъёмки [3], которые показывают, что ленты лайнера в продольном сечении двигаются параллельно друг другу. При этом профиль лайнера вплоть до момента сжатия магнитного поля остаётся относительно тонким, его видимая толщина по оценке не превышает 10 мм. Информация о движении лайнера в поперечном сечении получена по измерению «следов» ленты лайнера (рис. 3.В), падающей на клиновые скосы, расположенные в зоне закрепления концов ленты. Из

анализа «следов» следует, что границы деформируемой ленты в процессе ускорения заметно приближаются к средней плоскости витка. Такое сужение ленты может быть связано, например, с заворачиванием краёв лайнера, происходящим из-за естественного процесса «пинчевания» тока, однако эксперимент не позволяет сделать однозначного вывода о том, как именно происходит деформирование края лайнера.

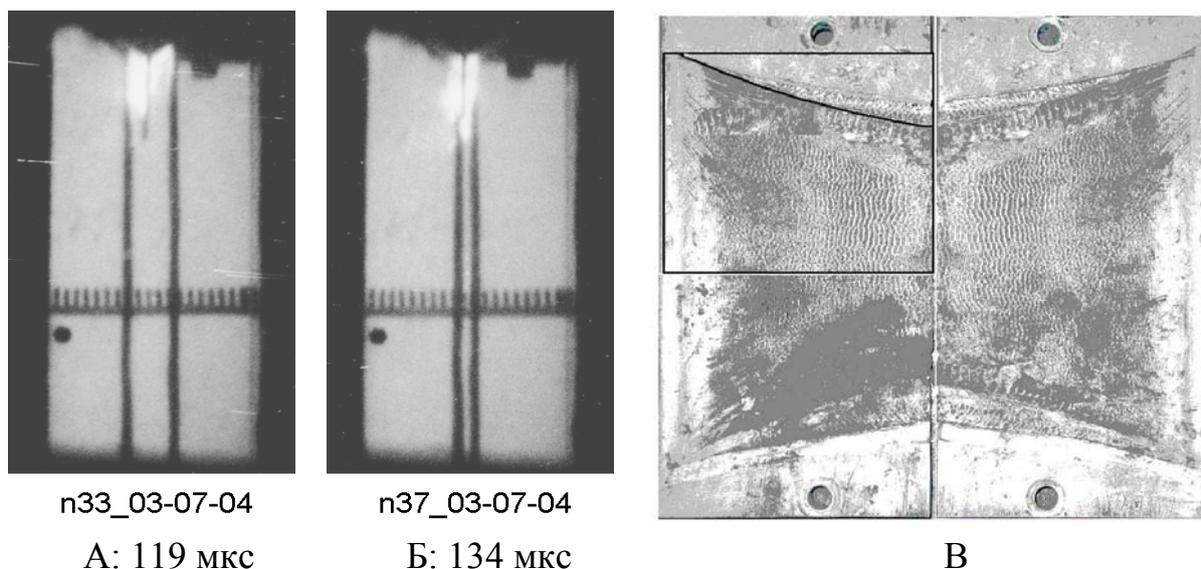


Рис. 3. А, Б — кадры теневой киносъемки лайнера; В — следы границы ленты, падающей на контактную наклонную поверхность в торце ускорителя

Между тем режим компрессии магнитного поля существенно зависит от геометрической формы зазора между пластинами в момент сжатия магнитного поля. Для короткого генерируемого импульса отдача кинетической энергии тонкого лайнера должна проводиться одновременно по всей его плоскости, поэтому важно знать динамику деформирования пластины в процессе её ускорения, особенно на стадии электромагнитного торможения лайнера. Поэтому одним из ключевых вопросов, стоящих перед создателями установки, является определение такого набора входных параметров устройства, при котором генерируемый на выходе импульс имеет оптимальные характеристики.

Математическое моделирование является практически единственным инструментом для получения более подробной информации о движении лайнера в магнитном компрессоре, а вычислительный эксперимент является

гибким и удобным инструментом для проведения оптимизационных расчётов с целью выбора наилучших значений параметров МК.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 09-01-00151) и гранта Президента РФ для ведущих научных школ (проект НШ-8129.2010.9).

Авторы выражают глубокую благодарность М.П. Галанину, А.П. Лотоцкому и В.Н. Коваленко за огромную помощь на всех этапах развития данной задачи.

2. Математические и численные модели движения лайнера в магнитном компрессоре

Для решения поставленной задачи в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН построены двумерные математические и численные модели, соответствующие продольному (рис. 4.А) и поперечному (рис. 4.Б) сечениям магнитного компрессора (лайнер, индуктор и относящиеся к ним элементы и величины помечены соответствующими индексами А и В). Эти модели подробно описаны в работах [2], [3], [4] и [5].

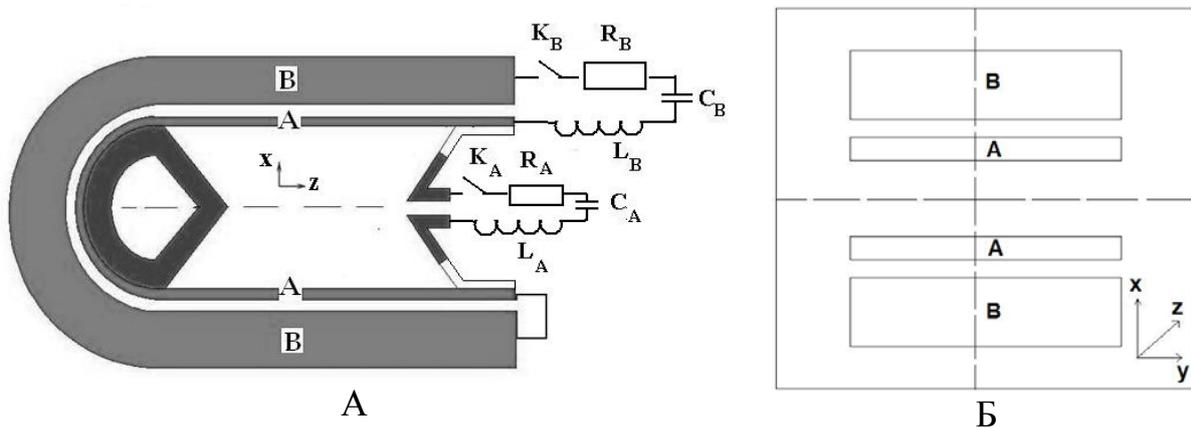


Рис. 4. Характерные схемы сечений пространственной области: А — плоскостью $y=\text{const}$ (показаны электротехнические цепи устройства); Б — плоскостью $z=\text{const}$

В связи с малым количеством экспериментальных данных рассмотрены различные математические модели движения лайнера, в которых он считается упругим телом, упругопластическим телом (соответствующая

модель описывает возникновение больших деформаций) или вязкой несжимаемой жидкостью.

На первом этапе исследования рассмотрен вопрос о соответствии построенных моделей известным экспериментальным данным. Результаты проведённых расчётов [5], [6] и [7] показали, что характеристики движения жидкого и упругопластического лайнера согласуются с имеющимися экспериментальными данными. Результаты модели упругого лайнера не соответствуют экспериментальным данным. В целом модель упругопластического лайнера наиболее адекватно описывает движение лайнера в магнитном компрессоре.

На основании приведённых результатов для дальнейших оптимизационных расчётов использована модель упругопластического лайнера. В данной работе рассмотрены расчёты только для поперечного сечения компрессора (именно это сечение определяет основную конфигурацию магнитного поля ускорителя).

3. Программа для расчёта движения лайнера

Для получения численных характеристик поведения лайнера с помощью математического моделирования разработан специальный программный комплекс. Входящие в состав комплекса программы позволяют получить характеристики движения ленты лайнера (поле перемещений и скоростей, распределение напряжений и деформаций и т.д.) в зависимости от её формы, материала, момента замыкания цепи и т.д.

3.1. Описание программы для расчёта

Построенные математические модели лайнера реализованы в виде двух приложений и набора файлов с данными. Первое приложение — основная программа расчёта, второе — вспомогательная программа Gridder2D [8] для перестроения сетки, вызываемая на каждом шаге работы основной

программы. Приложения могут выполняться практически на любом современном компьютере под управлением операционной системы семейства Windows. Размер исполняемого файла составляет около 500 КБ, а вместе с файлами конфигурации и входными данными размер пакета поставки не превышает 3 МБ.

В качестве входных данных основная программа получает набор файлов, в которых заданы геометрические размеры области, значения физических характеристик используемых материалов, исходные распределения электромагнитных полей в расчётной области, распределения скорости и температуры в пластине лайнера, а также значения других используемых величин.

В процессе работы программы на каждом шаге по времени после решения систем уравнений, соответствующих электромагнитной и кинематической частям задачи, в текстовые файлы записываются новые рассчитанные значения электромагнитных, скоростных и прочих характеристик, а также формируются файлы для анимации движения лайнера. После этого для перестроения сетки вызывается программа Gridder2D, по завершении работы которой основная программа начинает расчёт следующего шага по времени.

В результате работы программы также создаются файлы для построения графиков зависимости от времени интегральных параметров системы, в том числе график выходного импульса.

3.2. Описание расчётной задачи

Для дискретизации уравнений созданной математической модели применён метод конечных элементов с элементами первого порядка, для чего проводится триангуляция расчётной области. С целью оптимизации количества узлов в расчётной области осуществляется сгущение сетки вблизи лайнера. Под воздействием магнитного поля пластины лайнера двигаются навстречу друг другу, поэтому сетка в диэлектрической подобласти перестраивается на каждом шаге по времени. На рис. 5 приведена

сетка в части области для расчёта с упругопластическим лайнером в один из моментов времени.

Чтобы решить поставленную задачу оптимизации входных параметров устройства для получения более мощного выходного импульса, необходимо провести ряд экспериментов, варьируя значения исследуемых параметров. Это сопряжено с большими временными затратами, так как для получения информации о динамике изменения свойств системы необходимо проводить серию из 20–30 запусков. При этом однократный расчёт (выполнение программы при определённом наборе параметров) занимает от четырёх до восьми часов на современном персональном компьютере средней производительности.

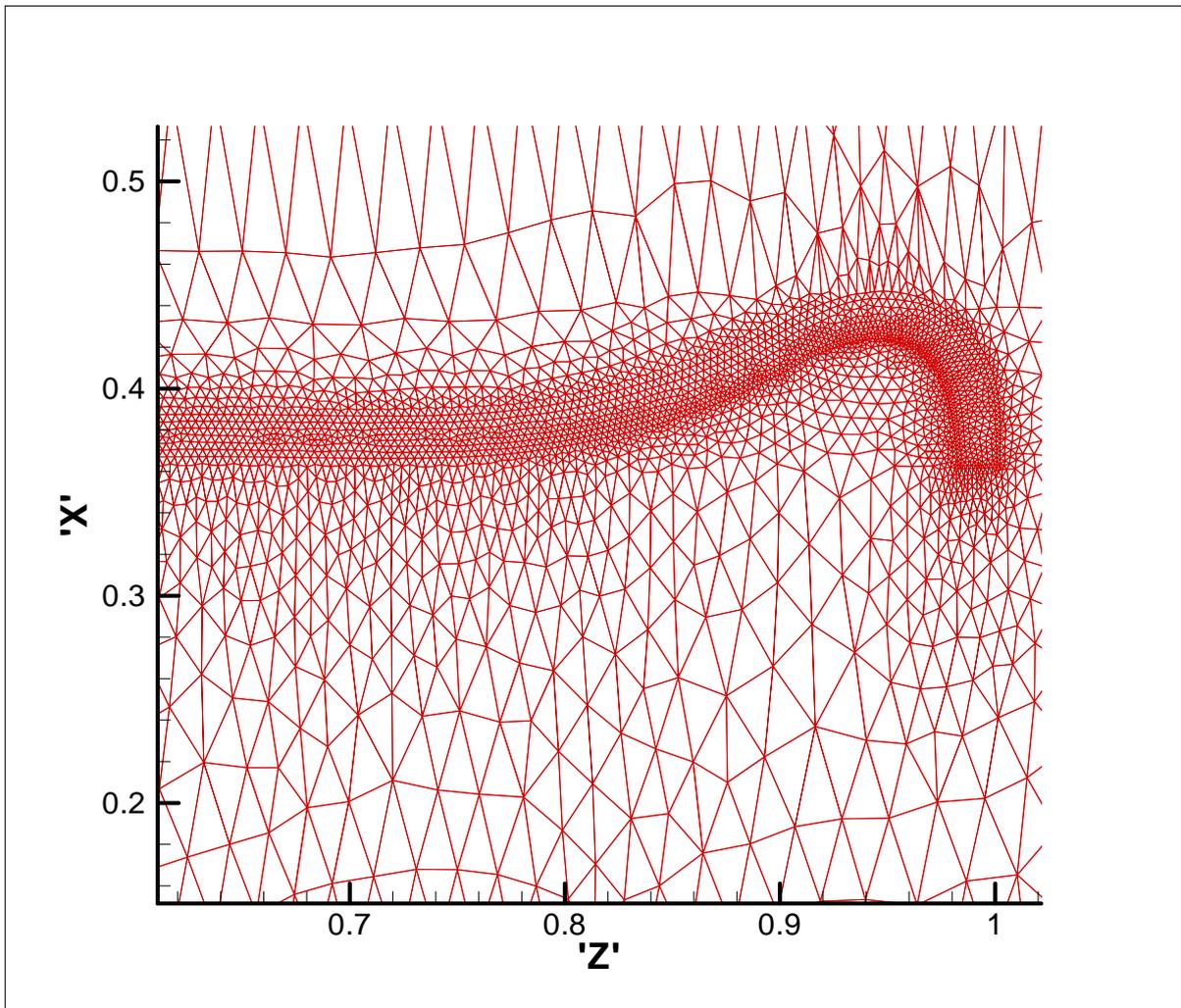


Рис. 5. Сетка в части расчётной области для расчёта с упругопластическим лайнером

Следует отметить, что задача расчёта движения ленты лайнера для одного набора значений параметров является сильно связанной, в частности, по причине перестроения сетки на каждом шаге по времени. В численных алгоритмах используются неявные (по времени) схемы, что затрудняет распараллеливание данных алгоритмов.

4. Применение технологии грида для поддержки выполнения серийных расчётов

4.1. Актуальность применения технологий грида

В связи с особенностями программы расчёта, отмеченными в предыдущем разделе, ускорение расчётов может быть достигнуто путём параллельного запуска программы моделирования с различными значениями исследуемого параметра на нескольких компьютерах. Кроме того, в зависимости от получаемых результатов в ходе вычислительного эксперимента разработчиками численных моделей и программного комплекса могут вноситься соответствующие изменения с целью учёта дополнительных свойств магнитного компрессора и поведения программы моделирования.

Для решения задачи многократных запусков программы с различными входными параметрами и контроля их выполнения использовалась система диспетчеризации заданий SARD (StandAlone Resource Dispatcher) [9]. Система SARD позволила провести необходимое количество серий экспериментов на множестве обычных персональных компьютеров, которые использовались совместно с их владельцами.

4.2. Система диспетчеризации заданий SARD

Система диспетчеризации SARD предназначена для объединения некластеризованных компьютеров в грид-инфраструктуры и управления заданиями, выполняющимися в режиме разделения ресурсов с владельцами исполнительных компьютеров. В работе [10] описана архитектура системы

диспетчеризации, которая состоит из трёх компонентов: диспетчера, агента и пользовательского интерфейса.

В соответствии с предложениями работы [11] исполнительные компьютеры ресурсной инфраструктуры не доступны пользователям непосредственно, поэтому внешний интерфейс доступа к ним сосредоточен в диспетчере. Диспетчер реализует интерфейсы доступа к сегменту грида с некластеризованными ресурсами, выполняя распределение заданий между зарегистрированными в нём компьютерами.

Диспетчер SARD представляет собой распределённую систему, реализованную на основе архитектурного стандарта грид OGSA (Open Grid Services Architecture) [12] в виде набора служб (рис. 6). Входящие в состав диспетчера службы реализуют функции по управлению потоком поступающих заданий, планированию и распределению очереди заданий по множеству исполнительных компьютеров, а также функции по доставке входных файлов с внешних хранилищ на исполнительные компьютеры и файлов результата с исполнительных компьютеров на внешние хранилища.

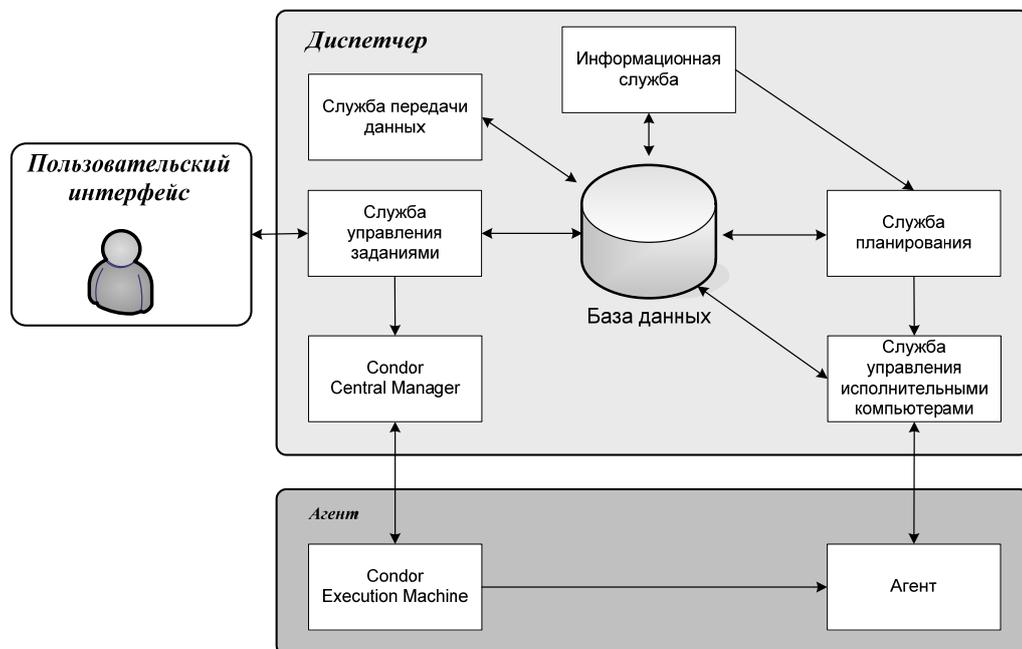


Рис. 6. Архитектура системы SARD

Диспетчер устанавливается на выделенный сервер в сегменте грида, и к нему подключается множество пространственно распределённых исполнительных компьютеров. Для обеспечения совместимости с существующими грид-системами диспетчер имеет стандартный интерфейс запуска заданий (аналогичный GRAM [13]).

Агент устанавливается на исполнительном компьютере и осуществляет разделение ресурсов между процессами владельца и заданиями.

С помощью пользовательского интерфейса система предоставляет возможность ввести новое задание, снять выполняющееся задание, а также получить информацию о состоянии задания, результаты выполнения и диагностику.

Задание в системе обрабатывается по следующей схеме. При вводе задания пользователь составляет его описание и выполняет команду запуска задания, передав ей в качестве параметра имя файла с описанием. Если описание составлено корректно, диспетчер регистрирует новое задание в системе, помещает его в очередь и возвращает уникальный идентификатор задания пользователю, с помощью которого он сможет отслеживать статус выполняющегося задания и управлять им. Затем планировщик системы осуществляет поиск подходящего исполнительного компьютера и, если такой компьютер свободен, сообщает агенту, установленному на исполнительном компьютере, о новом задании.

Основная функция агента — это управление заданием на стадии выполнения. Агент получает от диспетчера описание задания и скачивает с внешних хранилищ файлы задания. После этого агент формирует на компьютере исполнительную среду и запускает задание на выполнение, осуществляя контроль потребления ресурсов заданием и обеспечивая защиту конфигурации исполнительного компьютера, его владельца и файлов задания.

После завершения выполнения задания агент доставляет выходные файлы на внешние хранилища и информирует диспетчер о том, что он готов принять следующее задание.

5. Выполнение расчётов на некластеризованных компьютерах под управлением системы SARD

Система диспетчеризации заданий SARD использована при проведении оптимизационных расчётов для магнитного компрессора. Вычислительная инфраструктура состояла из десяти компьютеров производительностью от 250 до 750 Mflops под управлением ОС Windows различных версий. Сервер системы диспетчеризации располагался на выделенном компьютере под управлением ОС Linux.

Расчёты проводились с помощью трёх серий запусков. Первая серия была направлена на определение момента замыкания цепи лайнера, целью второй серии являлась оценка влияния распределения плотности вещества в пластине на движение лайнера и, наконец, в третьей серии расчётов исследовалась зависимость движения лайнера от геометрических параметров профиля индуктора. Далее будут подробно рассмотрены все три серии расчётов.

5.1. Определение момента замыкания цепи лайнера

В первой серии расчётов варьировался момент замыкания цепи лайнера t_A в диапазоне от 50 до 100 микросекунд (процесс ускорения лайнера занимает 120–130 микросекунд). Проведённые расчёты подтвердили, что оптимальным (относительно амплитуды выходного импульса) является значение $t_A=70$, которое и используется в экспериментальных запусках (это значение изначально рассчитано исходя из энергетических характеристик устройства). На рис. 7 показаны графики зависимости от времени тока в цепи лайнера для расчётов с различными t_A .

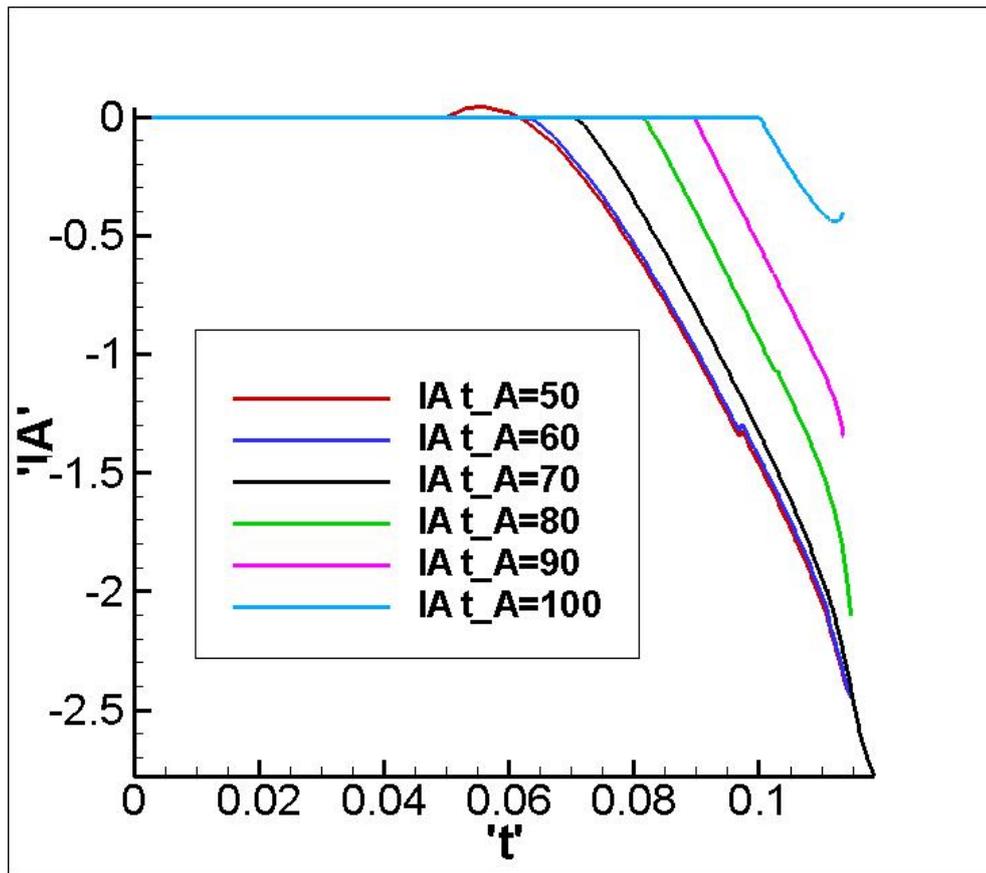


Рис. 7. Графики выходного импульса для различных моментов замыкания цепи лайнера

5.2. Влияние распределения плотности вещества в лайнере на выходной импульс

Во второй серии варьировалось распределение плотности вещества в пластине лайнера. В начальной постановке задачи пластина имела однородную плотность ρ_0 , в дальнейших расчётах принималось, что плотность меняется по линейному закону: в центре пластины плотность равна ρ_1 , на краях пластины плотность равна $\rho_1 * RO$. Значение RO в расчётах менялось от 0.1 до 10 (при этом значение плотности ρ_1 выбиралось таким образом, чтобы общая масса лайнера во всех расчётах совпадала с исходной массой). Во всех расчётах использована конфигурация компрессора с узким лайнером, т.е. ширина индуктора больше ширины лайнера.

Поперечное сечение компрессора (рис. 4.Б) имеет две оси симметрии, поэтому расчётная область соответствует одной четвёртой части всего сечения. Таким образом, моделируется движение половины одной ленты,

поэтому на всех рисунках, приведённых ниже, левый край является осью симметрии пластины.

Для расчётов в данной серии использовалась модифицированная кривая деформирования, которая задаёт более упругий материал (подробнее см. в [5]).

На рис. 8 показаны положения лайнера в различные моменты времени для исходного расчёта с постоянной плотностью вещества ($RO=1$). Из рисунка видно, что центральная часть пластины совершает практически плоскопараллельное движение, а край пластины под действием силы Лоренца загибается вниз и образует замкнутое кольцо, которое в свою очередь продолжает загибаться. При приближении к нижней границе расчётной области (сближении со встречной лентой) загнутый край лайнера начинает тормозиться сжатым магнитным полем.

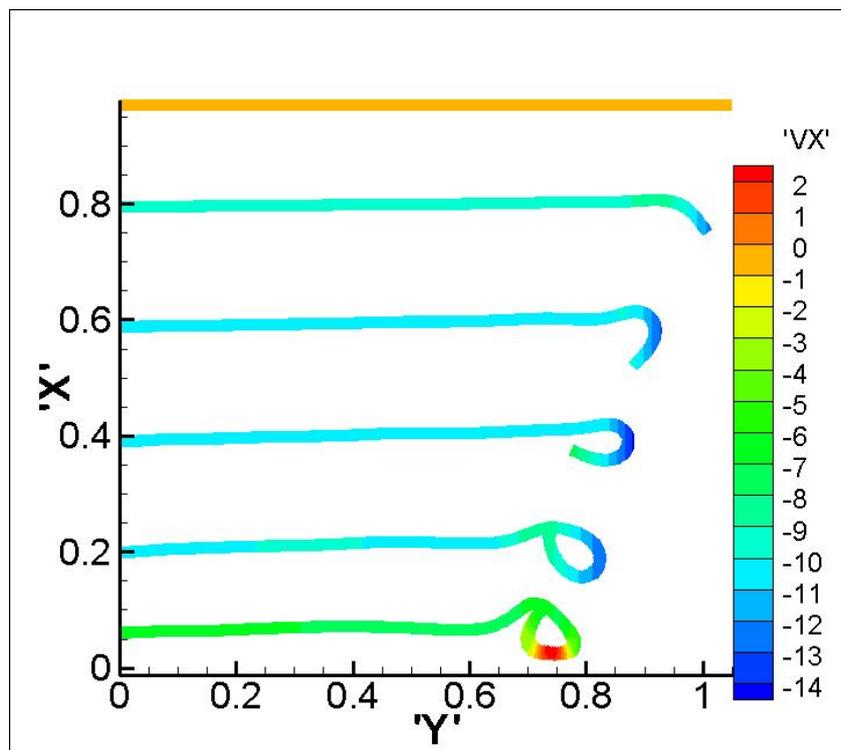


Рис. 8. Положения лайнера в моменты времени ($RO=1$): (сверху вниз) $t=0.0$, $t=0.046$, $t=0.066$, $t=0.084$, $t=0.102$, $t=0.118$

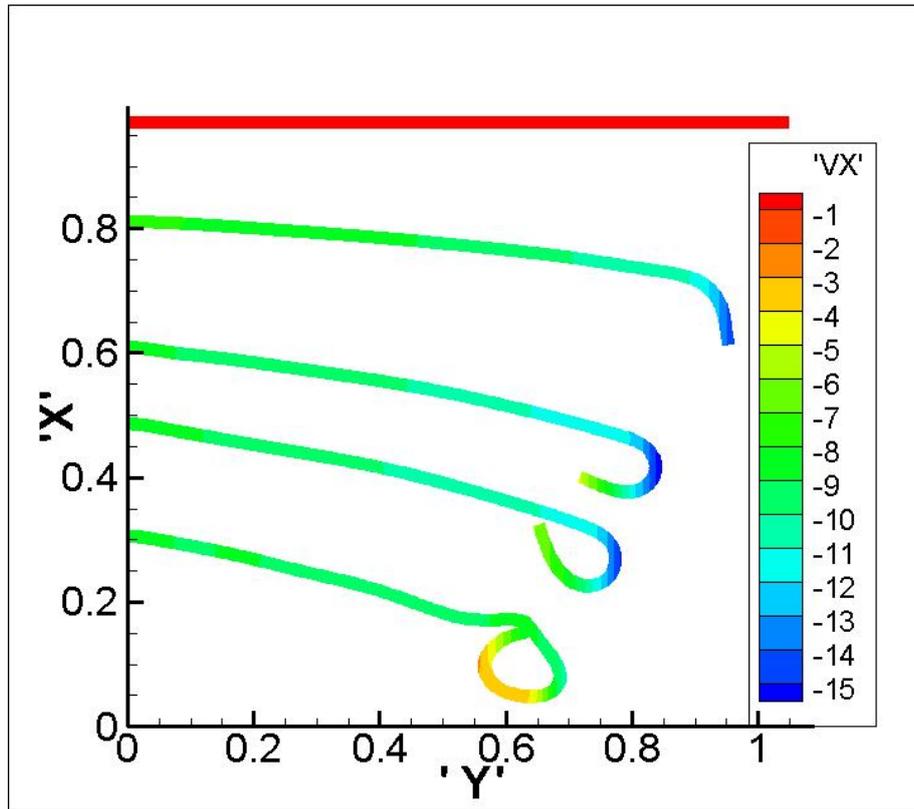


Рис. 9. Положения лайнера в моменты времени ($RO=0.1$): (сверху вниз) $t=0.0$, $t=0.050$, $t=0.074$, $t=0.088$, $t=0.102$, $t=0.108$

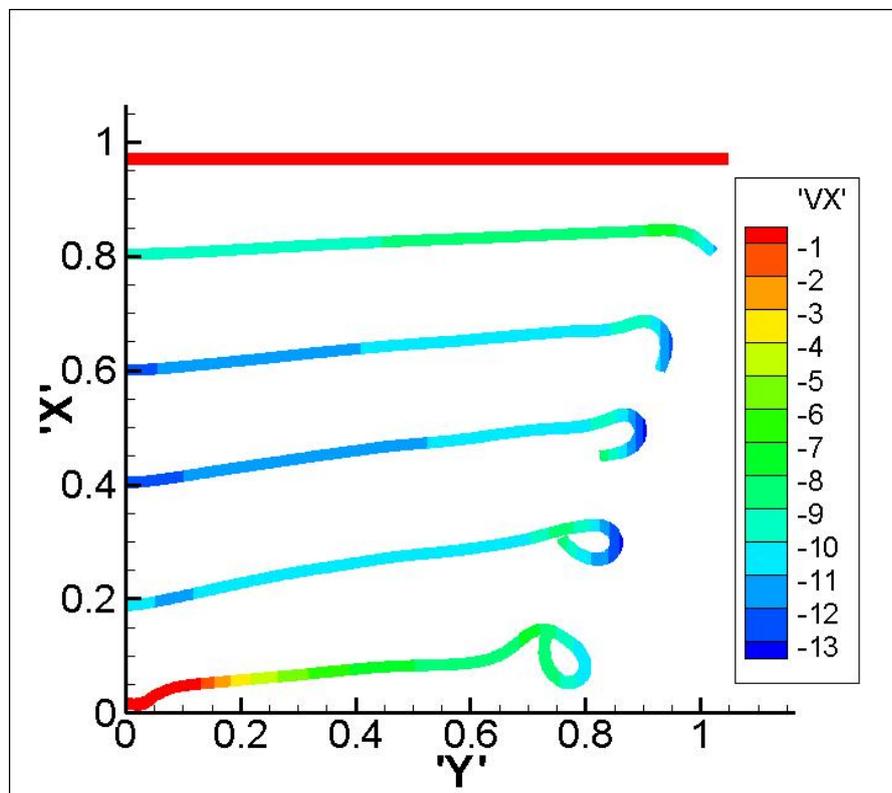


Рис. 10. Положения лайнера в моменты времени ($RO=2$): (сверху вниз) $t=0.0$, $t=0.042$, $t=0.060$, $t=0.076$, $t=0.092$, $t=0.118$

На рис. 9 показаны положения лайнера в различные моменты времени для расчёта, в котором плотность вещества на крае пластины в 10 раз меньше, чем в центре ($RO=0.1$). Из рисунка видно, что в данном варианте более легкий край лайнера начинает значительно опережать центральную часть и при этом он по-прежнему закручивается под действием электромагнитных сил.

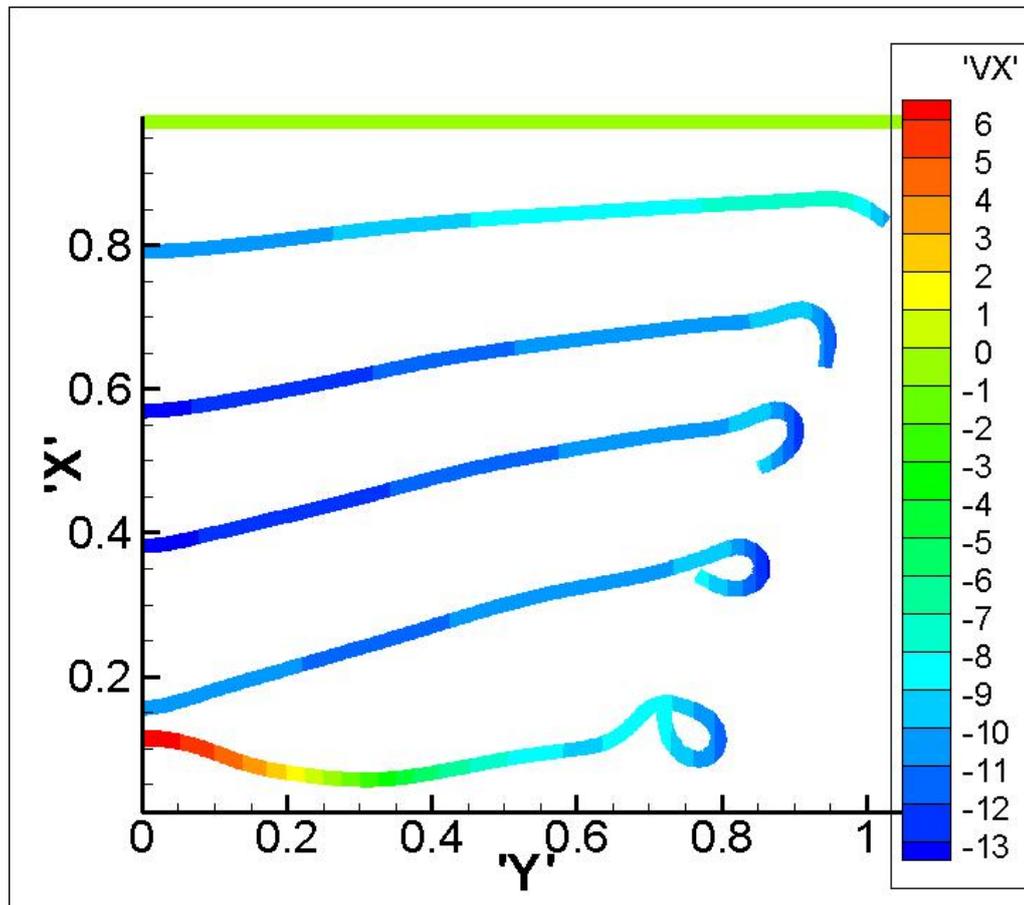


Рис. 11. Положения лайнера в моменты времени ($RO=4$): (сверху вниз) $t=0.0$, $t=0.040$, $t=0.058$, $t=0.072$, $t=0.090$, $t=0.112$

На рис. 10–12 показаны положения лайнера в расчётах, в которых плотность вещества на крае лайнера больше, чем в центре в 2, 4 и 10 раз соответственно. Это приводит к тому, что более тяжелый край почти с самого начала движения начинает отставать от центральной части, но при этом продолжает загибаться. Когда пластина подлетает к нижней части расчётной области (сближается со встречно летящей пластиной), в первую очередь тормозится уже центральная часть лайнера. Под действием сжатого

магнитного поля она отражается и начинает двигаться в противоположную сторону, в то время как край лайнера ещё движется вниз (к данному этапу движения относятся нижние положения лайнера на рис. 10–12). Чем больше разность плотностей вещества в центре и на крае пластины, тем больше промежуток времени между торможением центральной части и торможением края лайнера (в некоторых расчётах край лайнера достигал нижней части расчётной области).

На приведённых рисунках видно, что почти во всех расчётах форма лайнера значительно отличается от плоской. Цель данных расчётов заключалась в том, чтобы исследовать влияние формы лайнера на характеристики выходного импульса.

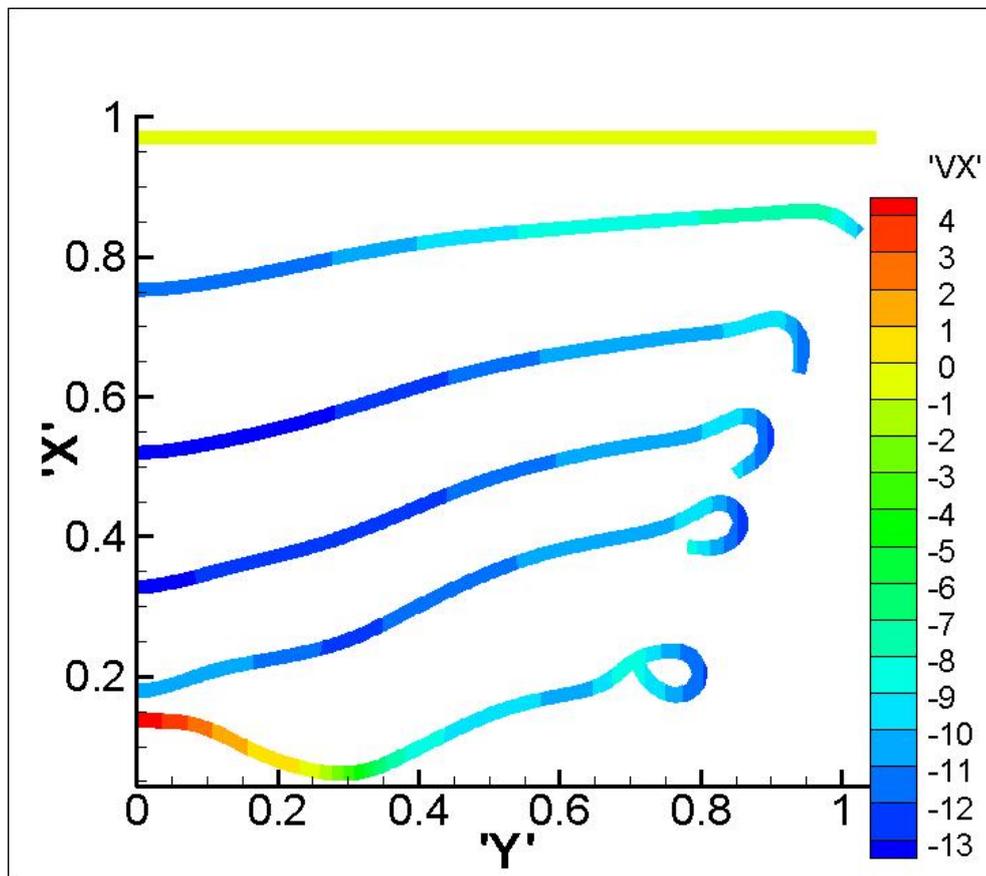


Рис. 12. Положения лайнера в моменты времени ($RO=10$): (сверху вниз) $t=0.0$, $t=0.040$, $t=0.058$, $t=0.072$, $t=0.084$, $t=0.104$

На рис. 13.А показаны графики зависимости от времени выходного импульса (полного тока в цепи лайнера) для различных значений RO (на рис. 13.Б приведён увеличенный фрагмент). Как видно из представленных

графиков, для выбранного диапазона значений входных параметров компрессора форма лайнера не оказывает определяющего влияния на характеристики выходного импульса: несмотря на значительные различия в форме пластины на этапе её торможения, амплитуда тока в цепи лайнера меняется в пределах 10%. В выбранном диапазоне распределения плотности вещества в пластине оптимальным оказалось значение $RO=4$ (см. рис. 13.Б), то есть плотность вещества на краях лайнера в четыре раза больше, чем плотность в центре пластины. В дальнейшем возможно использовать полученную информацию для определения оптимального начального профиля пластины (плотность вещества будет постоянной, но за счёт изогнутой формы край пластины будет тяжелее, чем центр).

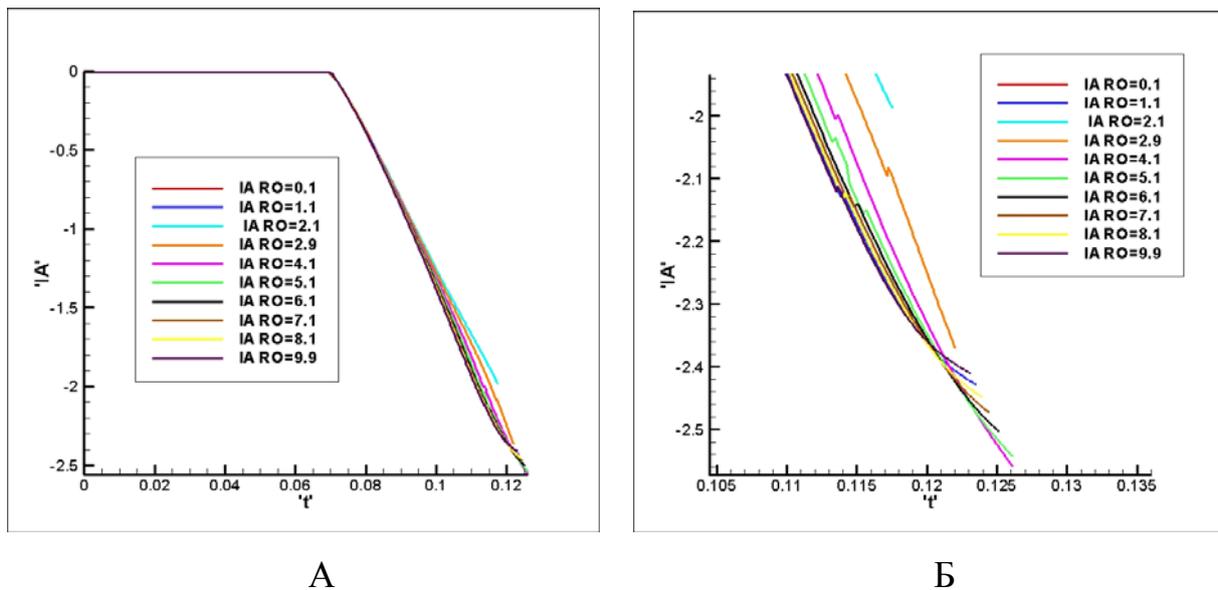


Рис. 13. Графики выходного импульса для различного распределения плотности в лайнере

5.3. Влияние профиля индуктора на выходной импульс

В данной серии расчётов рассматривался профилированный индуктор (идея об использовании такого профиля принадлежит А.П. Лотоцкому). Расчётная область, соответствующая одной четвёртой части поперечного сечения магнитного компрессора, показана на рис. 14. Здесь индексы А и В, как и раньше, обозначают лайнер и индуктор. Индексом С обозначена проводящая (медная) пластина, прикреплённая к нижней границе индуктора.

Исходя из результатов предыдущих расчётов, можно утверждать, что ток, текущий по индуктору и пластине, будет сосредоточен вблизи нижней границы пластины. Изменяя высоту пластины d_1 , расстояние d_2 между нижней границей пластины и верхней границей лайнера, а также величину d_3 , которая определяет, насколько полуширина пластины меньше полуширины лайнера, можно получить различные профили лайнера на этапе сжатия магнитного поля и различные параметры выходного импульса.

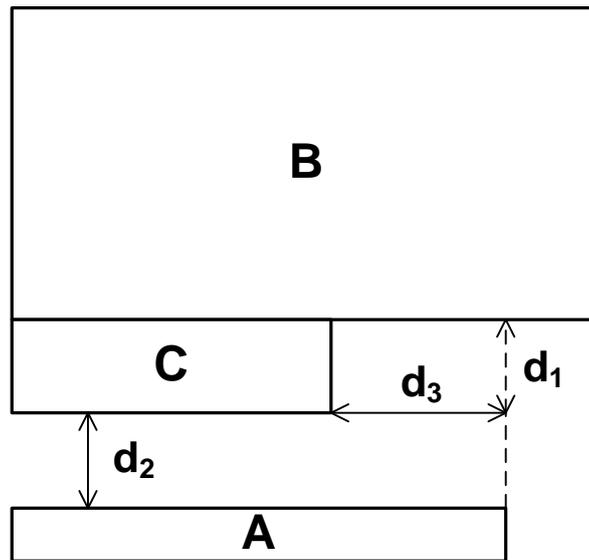


Рис. 14. Расчётная область с профилированным индуктором

В предыдущих расчётах полуширина индуктора равнялась 1.25, полуширина лайнера — 1.05. В данной серии использована модель упругопластического лайнера с экспериментальной кривой деформирования. Высота пластины d_1 во всех расчётах равна 0.05, значение d_3 меняется от 0, до 0.2 с шагом 0.02 (то есть полуширина пластины варьировалась от 1.05 до 0.85), d_2 принимает следующие значения: 0.02, 0.03, 0.04 и 0.05. Таким образом, всего проведено 44 расчёта. Ниже приведены результаты двух серий расчётов.

5.3.1. Расчёты с $d_2=0.02$

На рис. 15–17 показаны положения лайнера в расчётах, в которых значение d_3 бралось равным 0, 0.1 и 0.02 соответственно (цветовая шкала

соответствует вертикальной компоненте скорости). На рис. 15 видно, что когда полуширина пластины совпадает с полушириной лайнера, с самого начала движения край лайнера начинает опережать центральную часть. При сближении встречно летящих лент лайнера в первую очередь начинают тормозиться именно закрученные края. В какой-то момент времени между краями происходит контакт, после чего расчёт останавливался. Отметим, что при торможении краев лайнера они сминаются под действием силы Лоренца, поэтому итоговый профиль лайнера (рис. 15, $t=0.120$) является достаточно плоским, но процесс торможения всего лайнера всё равно получается неоднородным для различных его участков и поэтому затянутым по времени.

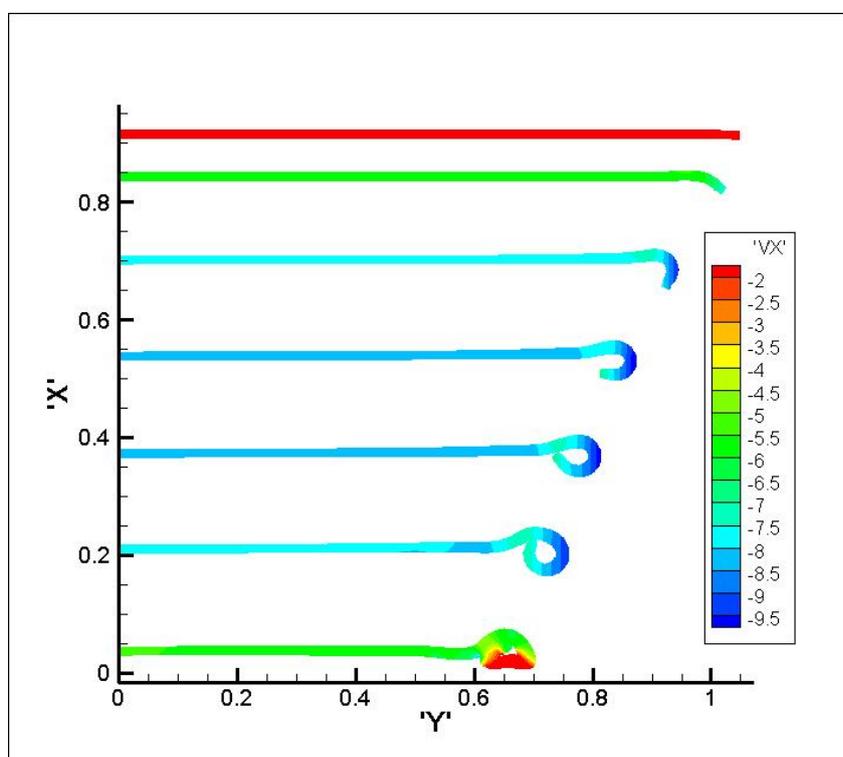


Рис. 15. Положения лайнера в моменты времени ($d_3=0$): (сверху вниз) $t=0.0$, $t=0.020$, $t=0.040$, $t=0.060$, $t=0.080$, $t=0.100$, $t=0.120$

В расчёте с $d_3=0.1$ (полуширина пластины меньше полуширины лайнера на 0.1) в начале движения край лайнера отстаёт от центра (рис. 16, $t=0.020$), но с какого-то момента времени начинает его опережать (рис. 16, $t=0.040$, $t=0.060$, $t=0.080$, $t=0.100$). В целом, если сравнивать рис. 15 и рис. 16, видно, что закрученный край лайнера для второго расчёта не так сильно опережает

центральную часть. Поэтому на этапе торможения край лайнера сминается силой Лоренца, итоговый профиль лайнера получается ещё более плоским.

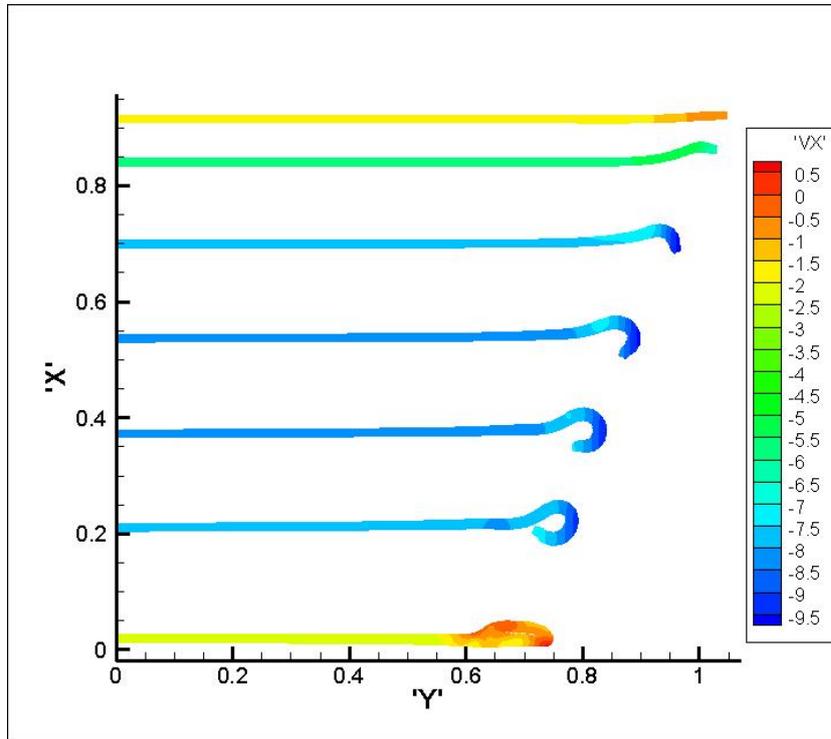


Рис. 16. Положения лайнера в моменты времени ($d_3=0.1$): (сверху вниз) $t=0.0$, $t=0.020$, $t=0.040$, $t=0.060$, $t=0.080$, $t=0.100$, $t=0.120$

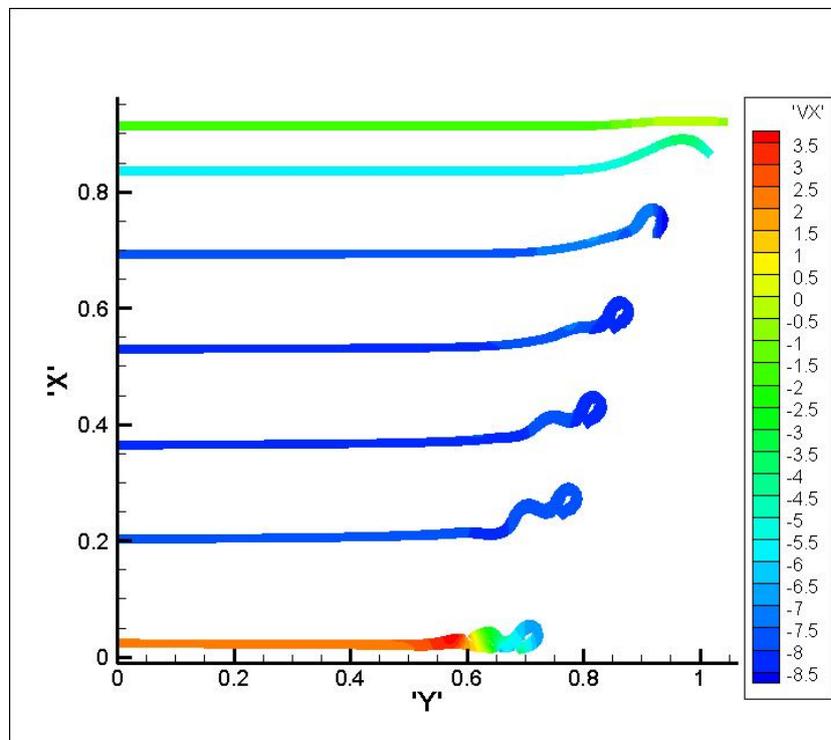


Рис. 17. Положения лайнера в моменты времени ($d_3=0.2$): (сверху вниз) $t=0.0$, $t=0.020$, $t=0.040$, $t=0.060$, $t=0.080$, $t=0.100$, $t=0.120$

В расчёте с $d_3=0.2$ (полуширина пластины меньше полуширины лайнера на 0.2) край лайнера в процессе движения значительно отстаёт от центра (рис. 17). В результате закручивание происходит в двух местах, общий профиль лайнера имеет более вычурный вид. На этапе торможения сначала тормозится центральная часть лайнера. Под действием сжатого магнитного поля она отражается вверх, а уже затем тормозится отставший край ленты, при этом происходит его контакт с краем второй ленты.

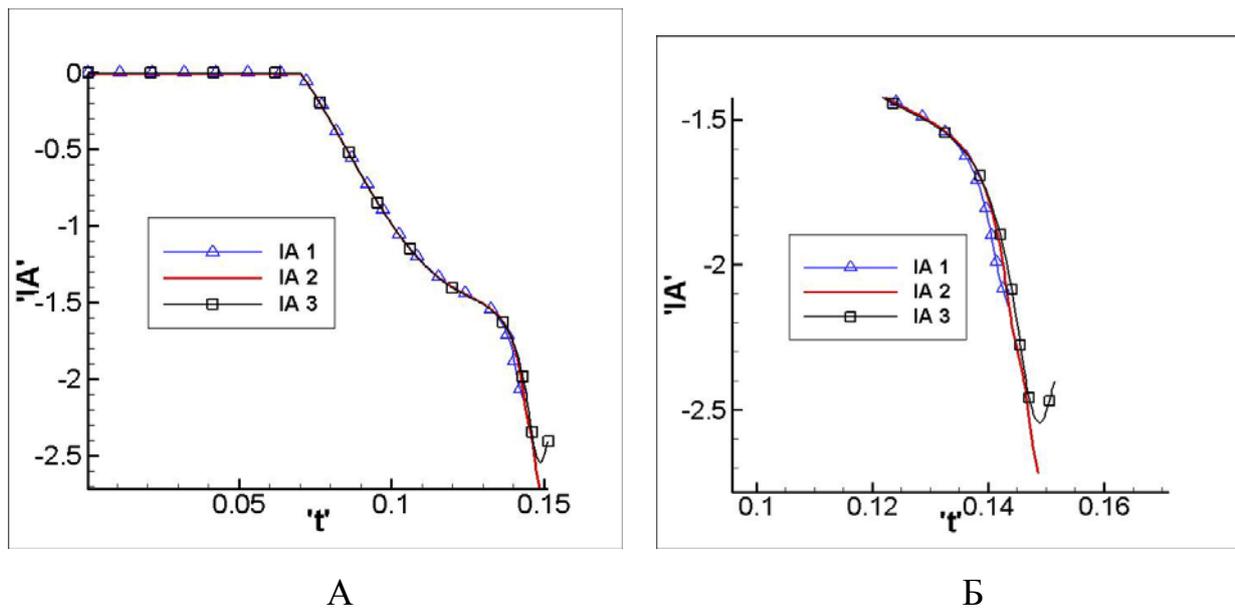


Рис. 18. Графики выходного импульса для расчётов с различной полушириной пластины: 1 — $d_3=0$, 2 — $d_3=0.1$, 3 — $d_3=0.2$.

На рис. 18.А показаны графики выходного импульса для трёх описанных выше расчётов (на рис. 18.Б показан увеличенный фрагмент). Видно, что максимальная амплитуда тока в цепи лайнера достигнута в расчёте с $d_3=0.1$, для которого профиль лайнера на этапе торможения имеет наиболее плоскую форму (рис. 16). Отметим, что данный расчёт остановлен в момент контакта двух лент лайнера ещё до достижения максимального сжатия магнитного поля, то есть реальная амплитуда выходного импульса должна быть ещё больше.

Для расчётов с другими значениями параметра d_3 получены промежуточные результаты относительно трёх приведённых расчётов.

5.3.2. Расчёты с $d_2=0.04$

Для расчётов с другими значениями d_2 (0.03, 0.04, 0.05) всегда наблюдалось отражение лайнера сжатым магнитным полем, то есть контакта между лентами лайнера не происходило. На рис. 19–21 показаны положения лайнера в расчётах, в которых $d_2=0.04$, а d_3 бралось равным 0, 0.1 и 0.02 соответственно (цветовая шкала соответствует вертикальной компоненте скорости).

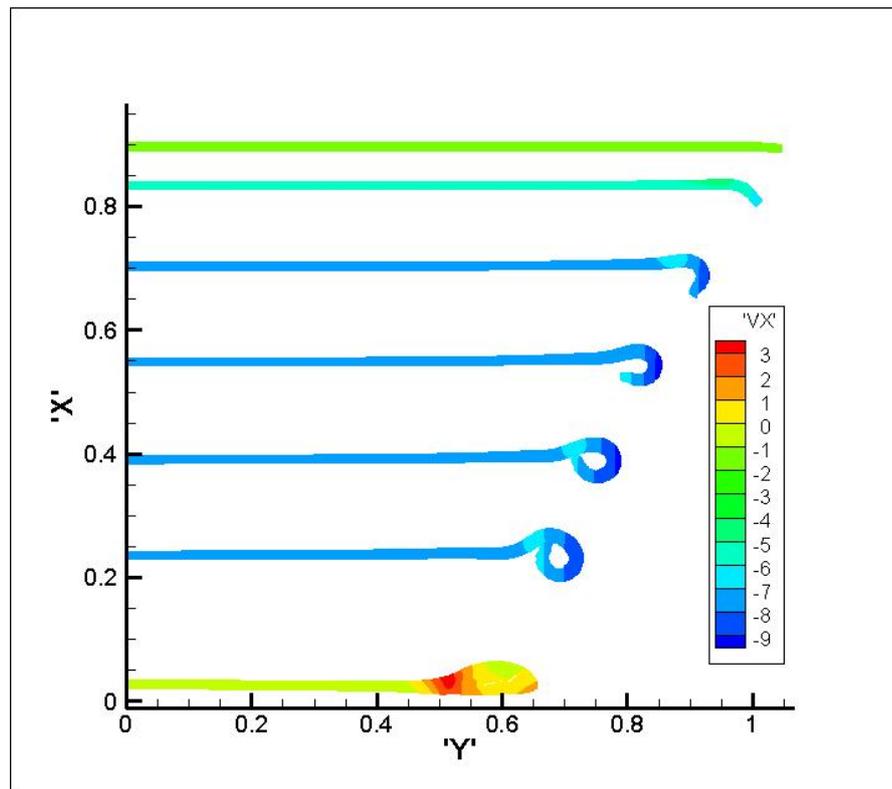


Рис. 19. Положения лайнера в моменты времени ($d_3=0$): (сверху вниз) $t=0.0$, $t=0.020$, $t=0.040$, $t=0.060$, $t=0.080$, $t=0.100$, $t=0.120$

По сравнению с предыдущим набором расчётов ($d_2=0.02$) лайнер в начальный момент времени располагается дальше от индуктора, поэтому создаваемое магнитное поле придаёт ему меньшее ускорение. Если сравнить рис. 16 и рис. 20 (в обоих расчётах $d_3=0.1$), то видно, что на втором рисунке край лайнера сильнее отстаёт от центральной части и в результате сильнее закручивается. Торможение начинается с центральной части, в момент времени $t=0.120$ итоговый профиль лайнера имеет сравнительно плоскую форму.

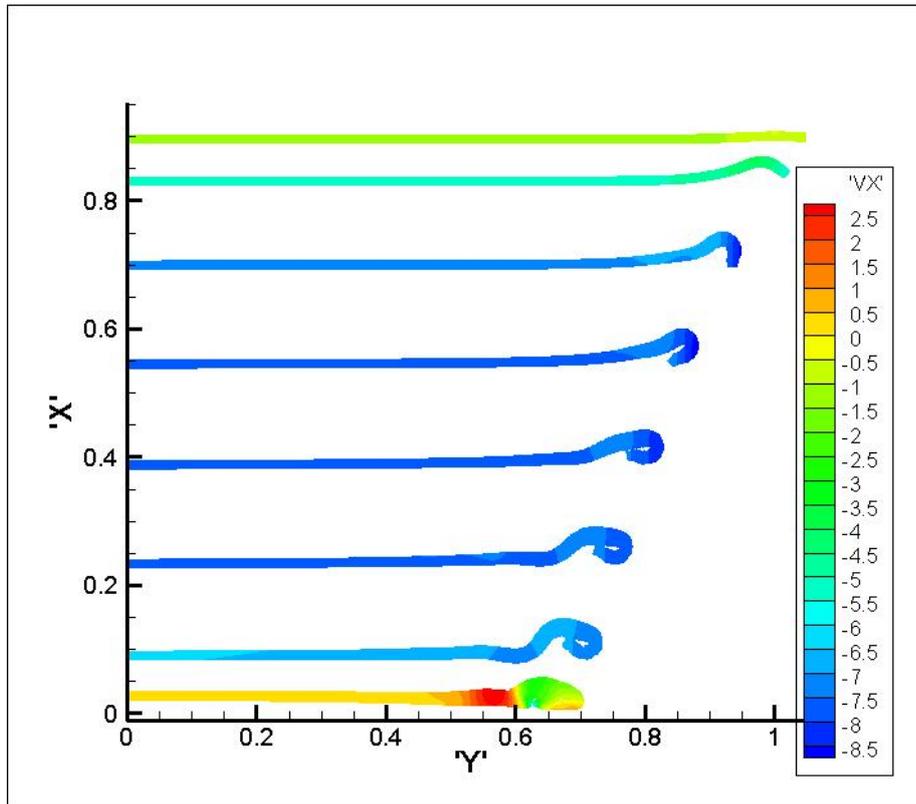


Рис. 20. Положения лайнера в моменты времени ($d_3=0.1$): (сверху вниз) $t=0.0$, $t=0.020$, $t=0.040$, $t=0.060$, $t=0.080$, $t=0.100$, $t=0.120$

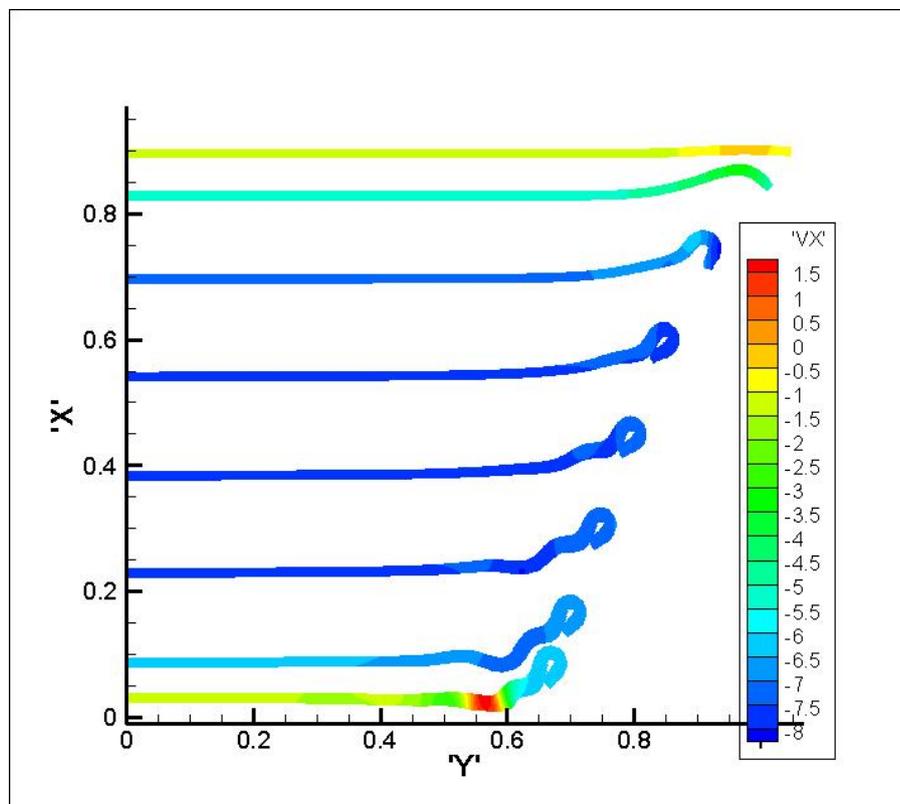


Рис. 21. Положения лайнера в моменты времени ($d_3=0.2$): (сверху вниз) $t=0.0$, $t=0.020$, $t=0.040$, $t=0.060$, $t=0.080$, $t=0.100$, $t=0.120$

Если сравнить рис. 17 и рис. 21 (в обоих расчётах $d_3=0.2$), то видно, что на втором рисунке край лайнера также сильнее отстаёт от центральной части, что приводит к увеличению общего времени торможения лайнера (торможение снова начинается с центральной части, а уже затем тормозятся края ленты).

На рис. 22.А показаны графики выходного импульса для трёх описанных выше расчётов (на рис. 22.Б показан увеличенный фрагмент). Видно, что максимальная амплитуда тока в цепи лайнера достигнута в расчёте с $d_3=0.1$, для которого профиль лайнера на этапе торможения имеет наиболее плоскую форму (рис. 20).

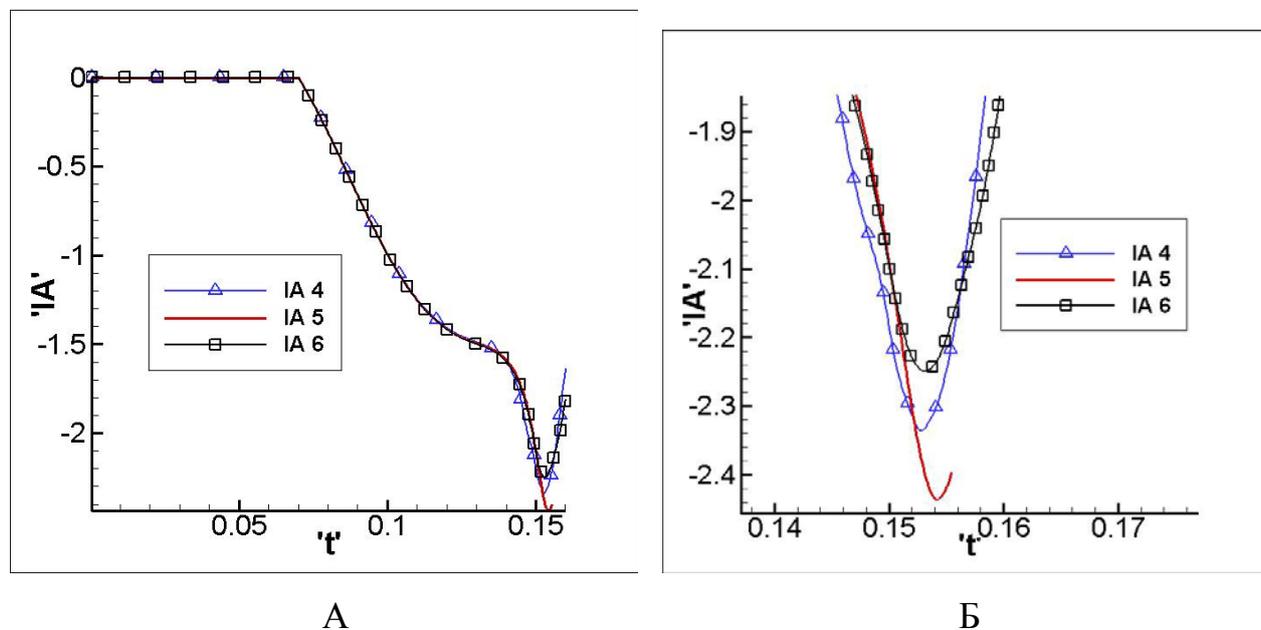


Рис. 22. Графики выходного импульса для расчётов с различной полушириной пластины:

4 — $d_3=0$, 5 — $d_3=0.1$, 6 — $d_3=0.2$

Для расчётов с другими значениями параметров d_2 и d_3 получены промежуточные результаты относительно приведённых расчётов.

Анализ полученных результатов приводит к выводу, что, как и в предыдущей серии расчётов, для выбранного диапазона значений входных параметров компрессора форма лайнера не оказывает определяющего влияния на характеристики выходного импульса: в одних расчётах в

результате торможения магнитным полем лента лайнера принимала форму, близкую к плоской, в других — процесс торможения различных участков лайнера происходил значительно более неоднородно, но во всех вариантах амплитуда тока в цепи лайнера менялась в пределах 10–12%.

6. Заключение

В работе рассмотрен магнитный компрессор, принцип действия которого основан на сжатии магнитного поля пластинчатым лайнером, ускоренным электродинамическими силами. Из-за недостатка экспериментальных данных основным средством получения необходимой информации является математическое моделирование. В работе приведён краткий обзор построенных математических и численных моделей, при этом модель упругопластического лайнера в целом наиболее адекватно описывает движение лайнера в магнитном компрессоре.

В работе рассмотрена задача оптимизации входных параметров компрессора с целью получения выходного импульса с наилучшими характеристиками. Подобная задача предполагает проведение достаточно большого числа вычислительных экспериментов и требует значительных затрат машинного времени при стандартном подходе, предполагающем последовательные запуски различных вариантов расчётов.

В то же время проведённые экспериментальные расчёты позволяют сделать вывод о существовании широкого класса задач вычислительного эксперимента и технических расчётов, для которых использование инфраструктуры из обычных компьютеров открывает новые возможности. Во-первых, во многих задачах математической физики применяется метод Монте-Карло, который допускает параллельное выполнение одного варианта на многих компьютерах. Во-вторых, можно параллельно производить расчёты для различных наборов исследуемых параметров.

В работе представлено несколько серий вычислительных экспериментов по определению оптимальных параметров магнитного компрессора. Для поддержки выполнения этих расчётов на множестве персональных компьютеров использована система диспетчеризации заданий для грида с некластеризованными ресурсами, которая позволила в несколько раз сократить общее время счёта путём параллельного запуска программы моделирования с различными значениями исследуемого параметра на нескольких компьютерах. При этом вычисления осуществлялись на обычных персональных компьютерах в режиме разделения ресурсов с их владельцами.

В первой серии расчётов варьировалось время замыкания цепи лайнера. Результаты данной серии подтвердили оптимальное значение момента замыкания цепи, рассчитанное исходя из энергетических характеристик устройства (для фиксированных иных параметров).

Во второй серии расчётов варьировалось распределение плотности вещества в пластине лайнера.

В третьей серии расчётов рассматривалось влияние различных профилей индуктора на выходные параметры устройства. Результаты данных расчётов позволили сделать два основных вывода.

Во-первых, изменение начального распределения плотности вещества в пластине лайнера и профиля индуктора оказывают значительное влияние на динамику деформирования лайнера. В частности, для определенного набора параметров край лайнера опережает центральную часть пластины, процесс торможения начинается именно с него, а для другого набора параметров наблюдается противоположная картина.

Во-вторых, для выбранного диапазона значений входных параметров компрессора (геометрические размеры и параметры внешних электрических цепей) форма лайнера на этапе сжатия магнитного поля не оказывает определяющего влияния на характеристики выходного импульса. Во всех

вариантах расчётов (в пределах одной серии) амплитуда тока в цепи лайнера менялась только в пределах 10–12%.

Анализ полученных результатов привёл к постановке задачи о поиске такого набора входных параметров компрессора, для которого форма лайнера оказывает существенное влияние на выходной импульс.

Список литературы

- [1]. Проект «Байкал». Отработка схемы генерации электрического импульса / Э.А. Азизов [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 2001. № 3. С. 3–17.
- [2]. Галанин М.П., Лотоцкий А.П. Математическое моделирование электродинамического ускорения плоских пластин в лабораторном генераторе // Математическое моделирование. 2003. Т. 15, № 3. С.3–29.
- [3]. М.П. Галанин, А.П. Лотоцкий. Моделирование разгона и торможения лайнера в устройствах обострения мощности // Радиотехника и электроника. 2005. Т. 50. №2. С. 256–264.
- [4]. Галанин М.П., Лотоцкий А.П., Родин А.С. Математическое моделирование электромагнитного ускорения лайнера с учетом его контакта с твердой поверхностью // Препринт № 59. Москва: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2008. 32 с.
- [5]. Родин А.С. Модель движения пластического лайнера в магнитном компрессоре и ее применение // Препринт № 50. Москва: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2009. 32 с.
- [6]. Галанин М.П., Лотоцкий А.П., Родин А.С., Щеглов И.А. Движение лайнера в поперечном сечении магнитного компрессора // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2010. №2. С. 65–84.
- [7]. Галанин М.П., Лотоцкий А.П., Родин А.С. Математическое моделирование движения лайнера в различных сечениях магнитного компрессора // Математическое моделирование. 2010. Т. 22, №10. С. 35–55.
- [8]. Щеглов И.А. Программа для триангуляции сложных двумерных областей Gridder2D // Препринт № 60. Москва: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2008. 32 с.
- [9]. П.С. Березовский. Реализация системы диспетчеризации заданий SARD в одноуровневом гриде // Препринт № 49. Москва: ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, 2010. 32 с.
- [10]. П.С. Березовский, В.Н. Коваленко. Состав и функции системы диспетчеризации заданий в гриде с некластеризованными ресурсами // Препринт № 67. Москва: ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, 2007. 29 с.

- [11]. П.С. Березовский, В.Н. Емельянов, В.Н. Коваленко, Э.С. Луховицкая. Механизмы управления разделяемыми компьютерами в гриде // Распределённые вычисления и Грид-технологии в науке и образовании: Труды 3-й международной конференции. Дубна: ОИЯИ, 2008. С. 303–306.
- [12]. I. Foster, C. Kesselman, J. Nick, S. Tuecke. The Physiology of the Grid: An Open Grid Services Architecture for Distributed Systems Integration. <http://www.globus.org/reseach/papers/ogsa.pdf>
- [13]. Служба управления заданиями GRAM
http://www.globus.org/grid_software/computation/gram.php