



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • [Электронная библиотека](#)

[Препринты ИПМ](#) • [Препринт № 5 за 2011 г.](#)



[Галанин М.П.](#), Крылов М.К.,  
Лотоцкий А.П., [Родин А.С.](#)

Математическое  
моделирование работы  
магнитного компрессора

**Рекомендуемая форма библиографической ссылки:** Математическое моделирование работы магнитного компрессора / М.П.Галанин [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2011. № 5. 30 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2011-5>

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

**М.П. Галанин, М.К. Крылов, А.П. Лотоцкий, А.С. Родин**

**Математическое моделирование работы  
магнитного компрессора**

**Москва — 2011**

**УДК 519.6**

***М.П.Галанин, М.К. Крылов, А.П.Лотоцкий, А.С.Родин.* Математическое моделирование работы магнитного компрессора.**

Рассмотрен магнитный компрессор, работа которого основана на сжатии магнитного поля пластинчатым лайнером, ускоренным электродинамическими силами до скорости порядка 1 км/с. Приведен обзор данных, полученных во время экспериментального запуска на макете магнитного компрессора. Показаны результаты моделирования движения лайнера в поперечном сечении компрессора с использованием различных моделей. Проведен сравнительный анализ результатов вычислительных и натурных экспериментов.

*Ключевые слова:* магнитный компрессор, импульс тока во внешней цепи, преобразование энергии, пластинчатый лайнер, упругопластическое тело.

***M.P.Galanin, M.K.Krylov, A.P.Lototskii, A.S.Rodin.* Mathematical modeling of magnetic compressor operation.**

The magnetic compressor is considered. The operation of this compressor is based on the compression of a magnetic field by a plain liner accelerated by electromagnetic forces to the velocity about 1 km/sec. The review of the experimental data is carried out. The results of modeling of liner motion in the compressor cross sections are demonstrated. The comparative analysis of the experimental and numerical data is done.

*Key words:* magnetic compressor, current pulse in the output circuit, energy transformation, plate liner, elastoplastic body.

## Содержание

<b>1. Сведения об установке и экспериментальные данные .....</b>	<b>4</b>
1.1. Принцип работы магнитного компрессора .....	4
1.2. Электротехнические параметры установки ПУМА и основные параметры компрессора МК.....	6
1.3. Экспериментальные данные .....	7
<b>2. Результаты математического моделирования для поперечной модели .....</b>	<b>12</b>
2.1. Расчет с упругопластическим лайнером.....	12
2.2. Расчет с жидким лайнером.....	20
2.3. Расчет с термоупругим лайнером.....	23
2.4. Сравнение результатов различных моделей и экспериментальных данных .....	25
<b>3. Заключение.....</b>	<b>29</b>
<b>Список литературы .....</b>	<b>30</b>

## 1. Сведения об установке и экспериментальные данные

### 1.1 Принцип работы магнитного компрессора

Магнитный Компрессор (МК) стенда МОЛ создается для обострения мощности индуктивных каскадов, большая величина которой необходима для питания Плазменного Переключателя Тока (ППТ) ввиду кратковременности сохранения его проводящего состояния [1]. Рабочий макет МК, присоединенный к коллектору источника питания «ПУМА», показан на рис.1.1.

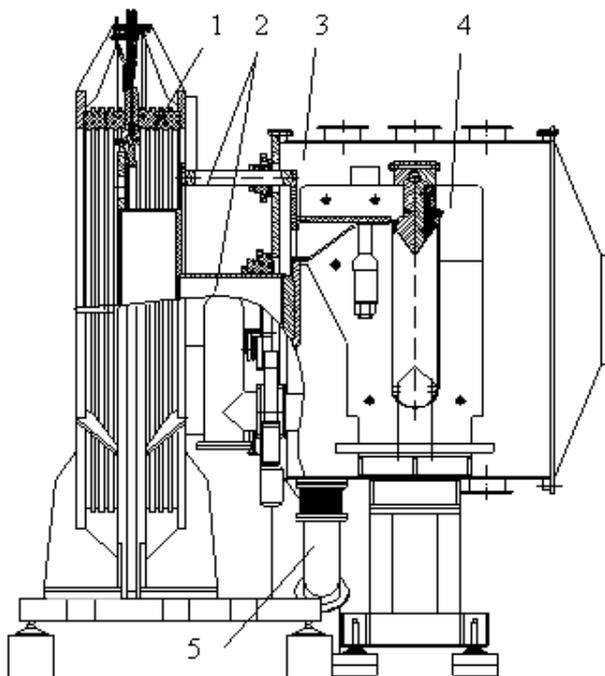


Рис. 1.1 Рабочий макет МК. 1-коллектор, 2-тоководы, 3-вакуумная камера, 4-ускоряющий виток, 5 – патрубок откачки.

Принцип действия МК – преобразование электромагнитной энергии входного контура и кинетической энергии разгоняемого плоского лайнера в энергию магнитного поля. Для обострения электрической мощности необходимо, чтобы база (длина) разгона была больше, чем база (длина) торможения движущейся оболочки под воздействием давления сжимаемого магнитного потока, связанного с нагрузочным контуром. Оба контура МК (контур разгона и контур сжатия) содержат общий элемент – лайнер. В отличие от общепринятого способа создания магнитного поля в сжимаемом контуре, электрическая схема и геометрия МК позволяет использовать для сжатия часть магнитного поля, перехватываемого из ускорительного контура лайнера. Для

этого лента лайнера включена в ускорительный контур последовательно с витком, а нагрузка (кольцевой виток) включается в цепь лайнера при его движении после достижения максимума тока в ускорителе. Этому моменту соответствует рис. 1.2, где изображена конструкция нагрузочного узла вместе с токовыми соединениями. Здесь также показаны две различные пространственные области витка МК (магнитный поток через контур ускорения –  $F_1(t)$ , магнитный поток через нагрузочный контур –  $F_2(t)$ ). Более подробное описание идеологии построения МК и выбора его геометрических характеристик содержится в [2].

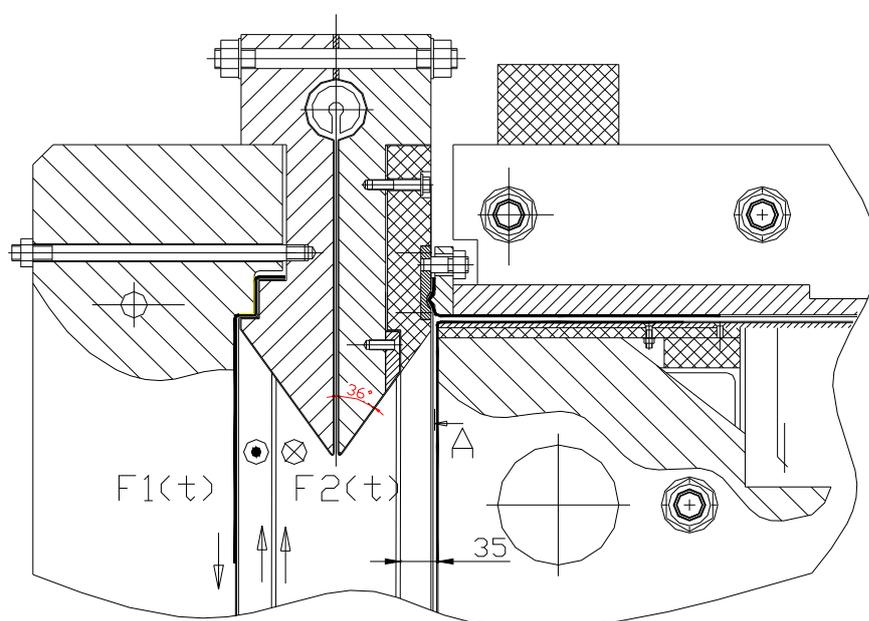


Рис. 1.2. Нагрузочный узел МК и токовые соединения линий ввода и вывода токов.

Токи питающего контура и токи нагрузки, протекающие через лайнер, можно разделить условным образом, как протекающие по внутренней и по внешней поверхностям лайнера. С точки зрения величины магнитных полей такое представление вполне допустимо при толщине пластин ( $d=1,5$  мм), малой по сравнению со всеми другими размерами. Толщина пластин соизмерима с глубиной токового скин-слоя. При замыкании контакта ток, текущий по внутренней стороне лайнера, обеспечивает удержание магнитного поля в области между лентами лайнера.

Величины  $F_1$ ,  $F_2$  пропорциональны значениям соответствующих токов и индуктивностей. Каждая из них в процессе работы МК (т.е. в эксперименте)

является переменной величиной. В эксперименте измеряются токи  $I_1(t)$  и  $I_2(t)$ . По измеренным величинам токов и индуктивностей контура может быть определена величина магнитного потока  $F_n$  через нагрузочный виток. Для выяснения полной картины происходящих процессов полезно также определить его относительную долю  $\delta F = F_n / F_2(t^*)$  от величины магнитного потока через нагрузочный контур в момент замыкания нагрузочной цепи  $t^*$ , определяемый перемещением лайнера на контактную пластину, показанную на рис. 1.2. Поскольку при этом контур сжатия динамически уменьшается по площади (схлопывается) и непосредственные измерения магнитного поля здесь невозможны (зондами или токовыми поясами), то величину магнитного потока необходимо рассчитывать, пользуясь геометрией расположения контакта, мгновенным значением тока лайнера и расчетным распределением магнитных полей в поперечном сечении компрессора. Такой расчет подразумевает самосогласованные распределения плотности токов по поверхностям витков и пластин лайнера, которые изменяются в процессе разгона. Как показано далее, при разгоне изменяется не только расстояние между токонесящими пластинами лайнера, но и (вследствие пластической деформации) их относительная ширина. Ширина приемного контура остается постоянной.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты № 09-01-00151 и № 10-08-01308).

## **1.2 Электротехнические параметры установки ПУМА и основные параметры компрессора МК**

Снаряженный виток перед экспериментом закрывался камерой, в которой предусмотрены диагностические окна и герметичные вводы для присоединения диагностических кабелей. Камера откачивалась до давления 0,25 бар, что обеспечивало снижение сопротивления воздуха при разгоне пластин лайнера.

### **Геометрические параметры МК.**

Длина прямого участка ускорения (в начальный момент времени) – 0,7 м.

Длина рабочей части лайнера, уложенной по поверхности витка, – 1,6 м

(перегиб в нижней зоне возврата ленты исключается).

Размер ускорительного окна витка – 200 мм.

Ширина витка – 250 мм.

Ширина ускоряемых пластин – 210 мм.

Начальный зазор между витком и плоскостью пластин лайнера – 5 мм.

Диаметр нагрузочного витка – 60 мм.

Угол наклона клина – 36 градусов.

Высота диэлектрической вставки на клине – 35 мм.

**Параметры входного контура МК.** Основной источник тока – конденсаторная батарея с емкостью 3 мФ и рабочим напряжением 32 кВ. Внутренняя индуктивность источника питания –  $2 \times 10^{-7}$  Гн, активное сопротивление контура – 1,2 мОм.

**Параметры выходного контура МК.** Начальное активное сопротивление лайнера – 0,1 мОм. Абсолютная величина магнитного потока через нагрузочный виток определяется величиной тока нагрузки. Одновитковый соленоид радиусом  $R = 0,030$  м и длиной  $l = 0,250$  м (ширина витка, см. рис. 1.2) имеет величину индуктивности  $L_1 = \mu_0 \pi R^2/l = 14,2$  нГн. Индуктивность щели, соединяющей зону сжатия потока, должна быть включена в нагрузку, так как при полном схлопывании пластин лайнера цепь нагрузки может в этом месте замыкаться накоротко лайнером. Величина индуктивности щели с зазором  $\Delta x = 0,0055$  м, длиной  $\Delta z = 0,315$  м и шириной, равной ширине витка, составляет  $L_2 = \mu_0 \Delta z \Delta x/l = 8,7$  нГн. Таким образом, полная индуктивность нагрузочного контура в нашем случае составляет  $L_n = L_1 + L_2 = 22,9$  нГн. При величине тока нагрузки 3,8 МА магнитный поток в нем составит  $F_n = L_n I_n = 8,7 \cdot 10^{-2}$  Вб.

### 1.3 Экспериментальные данные.

На рис. 1.3 показаны фрагмент кинограммы скоростной фотосъемки ленты лайнера. Качество полученных фотографий позволяет определить начало ускорения ленты и максимальную скорость лент перед началом интенсивного

торможения. Интервал времени между кадрами – 3,5 мкс. В линейке вертикальных меток расстояние между соседними штрихами – 0,5 см. Скорость лайнера в рассматриваемые моменты времени составляет около 780 м/с (скорость определяется по смещению пластин на соседних фрагментах кинограммы). Для приведенных кадров расстояние между пластинами составляет (для первого кадра) около 7 см (в начальный момент времени – около 20 см). Максимальная скорость перед торможением – 868 м/с.

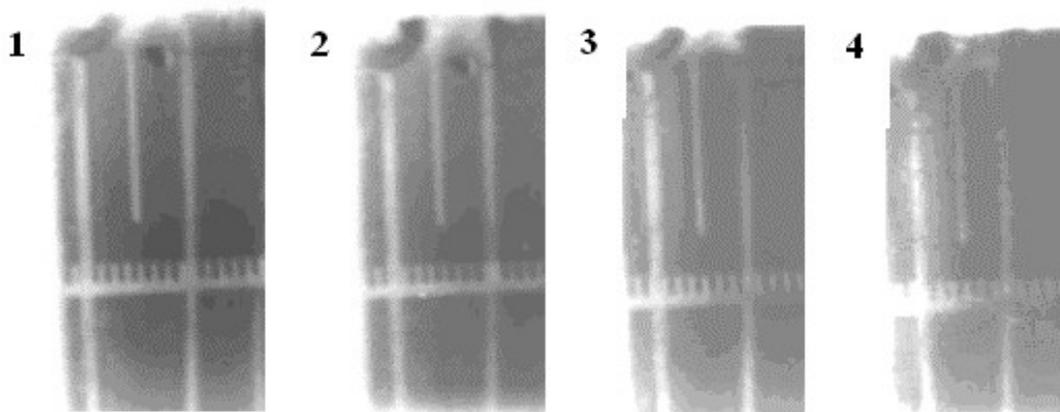


Рис. 1.3. Фрагмент кинограммы (4 кадра) встречного перемещения лент лайнера перед интенсивным торможением.



Рис. 1.4. Фотография следа лайнера на контактной пластине.

На рис. 1.4 показаны следы ленты, оставленные при разгоне на торцевом контактном узле, замыкающем цепь нагрузки.

На фото рис. 1.4 отчетливо видно уменьшение начальной ширины ленты (равной 21 см) в процессе разгона. Эффективная ширина ленты в момент касания контактной пластины равна  $17 \text{ см} \pm 1 \text{ мм}$ . Эта ширина в значительной мере определяет геометрическую конфигурацию нагрузочного контура, а значит и величину магнитного потока через соответствующую область. В конце процесса сжатия магнитного поля ширина лайнера уменьшается до 13 см. Край следа оставляет более глубокий отпечаток на медной облицовке, что позволяет предположить, что на краях ленты существуют некие утолщения по сравнению с центральной частью. Эффект, показанный на рис. 1.4, качественно и количественно воспроизводим в проведенных экспериментах.

На рис. 1.5 показаны магнитные силовые линии вблизи витка и лайнера в момент включения цепи лайнера (построенные с помощью программы F-75). Магнитное поле, создаваемое ускорительным витком и лайнером, разделяется на две составляющие, как ранее было показано на рис.1.2. Большая часть поля огибает тело витка и замыкается снаружи, а меньшая часть поля огибает пластину лайнера (эта вторая часть магнитного потока сжимается в ходе дальнейшего движения пластин лайнера).

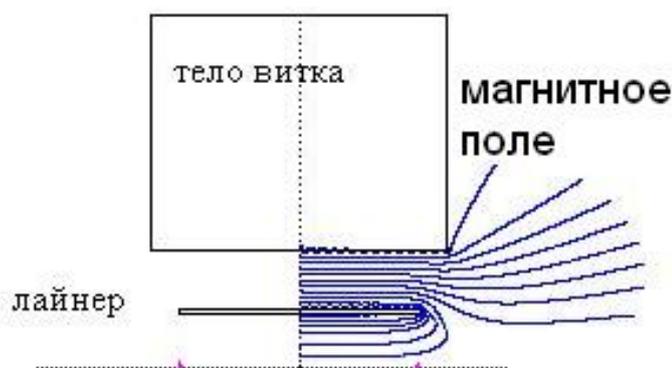


Рис. 1.5. Поперечное сечение витка МК (половина сечения) и конфигурация магнитного поля при перемещении лайнера на стадии ускорения.

Расстояние  $D^*=35 \text{ мм}$  на рис. 1.2 от пластины лайнера до витка соответствует соприкосновению ленты с контактной пластиной нагрузочного контура. В этот момент электрический контур системы переключается (по

терминологии [2]) из «активной» в «пассивную» схему, замыкая цепь лайнера. Это сопровождается изменением магнитной конфигурации системы витков-лайнера.

При выборе расстояния  $0 < D^* < D_{\max} = 10$  см, задающего момент замыкания контура нагрузки, учитывается абсолютная величина мгновенного значения тока в контуре, определяемая не только емкостным разрядом источника питания на виток, но и ускорением лайнера, зависящим от величины индуктивной составляющей падения напряжения на витке:

$$U_1 + U_V = L \frac{dI_{\text{уск}}}{dt} + I_{\text{уск}} \frac{dL}{dt}. \quad \text{Поэтому без привлечения динамических}$$

характеристик ускорения лайнера выбор точки  $D^* = 35$  мм еще не определяет однозначно искомую величину магнитного потока через нагрузочный контур  $F^*$ . Для ее нахождения использованы данные, полученные в проведенных экспериментах с нагрузочным витком.

На рис. 1.6 показаны осциллограммы токов  $I_V$  витка и  $I_H$  нагрузки, а также напряжение на конденсаторной батарее питания ускорительного витка установки МК «ПУМА».

Видно, что величина тока нагрузки достигла амплитудного значения 3,8 МА в момент времени  $t = 150$  мкс. По данным осциллограммы можно сделать оценку величины магнитного потока в нагрузочном витке. Ток в данном витке становится отличным от нуля с момента  $t^* = 70$  мкс. Если замыкать цепь лайнера позже, то величина магнитного потока в нагрузочном витке будет меньше, т.к. в последующие моменты времени до  $t = 95$  мкс величина тока  $I_V$ , создающего магнитное поле резко убывает. Рассчитаем магнитный поток  $F_2(t^*)$  в момент замыкания цепи лайнера. В этот момент времени значение тока  $I_V = 1,6$  МА, значение индуктивности на единицу длины  $L / l_z = 1,6 \cdot 10^{-7}$  Гн/м, длина рабочей зоны лайнера  $l_z = 0,7 - 2 * 0,035 / \text{tg } 36^\circ = 0,6$  м. В итоге получаем следующее значение магнитного потока:

$$F_2(t^*) = L / l_z * I_V * l_z = 1,6 \cdot 10^{-7} * 1,6 \cdot 10^6 * 0,6 = 15,36 \cdot 10^{-2} \text{ Вб.}$$

Таким образом, отношение значения магнитного потока через нагрузочный виток в момент максимального сжатия магнитного поля к значению магнитного потока через нагрузочный контур в момент замыкания цепи лайнера равно следующей величине:

$$\delta F = F_n / F_2(t^*) = 8,7 / 15,36 = 0,564.$$

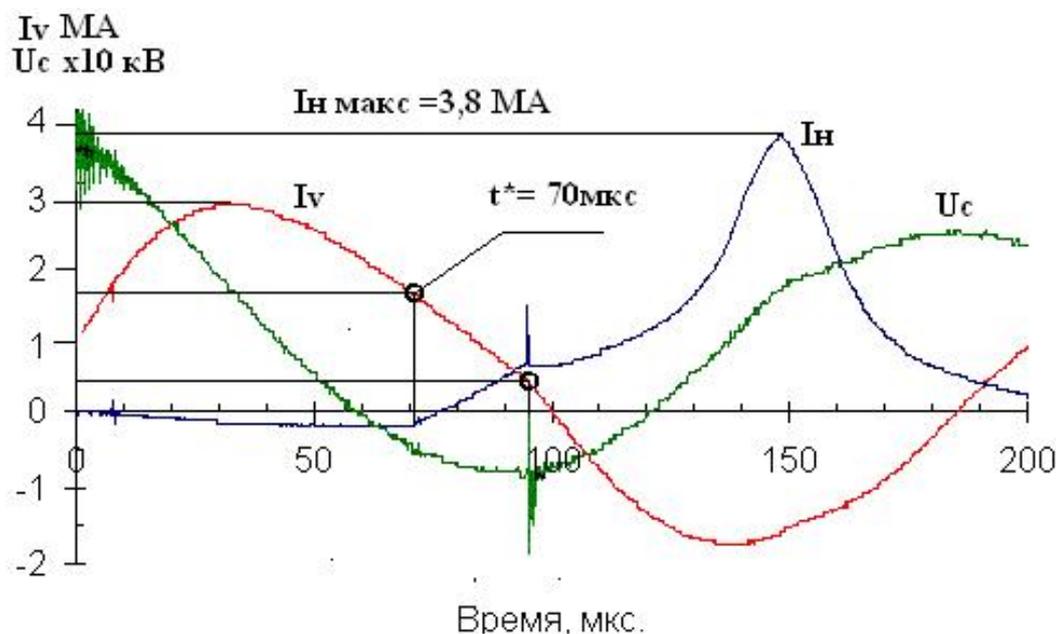


Рис. 1.6. Осциллограммы токов  $I_v$  ускорителя,  $I_n$  нагрузочного витка и напряжения на емкостном накопителе  $U_c$ .

Симметричность нарастания и спада тока в нагрузочном витке, скорее всего, свидетельствует об отражении пластин лайнера друг от друга. По сделанным оценкам активное сопротивление ленты лайнера, нагретой током во время всего процесса ускорения и сжатия, не должно превышать величины  $R=2 \cdot 10^{-4}$  Ом. Поэтому постоянная спада тока  $L_n/R$  должна составлять не менее  $10^{-4}$  с. Характерное время удвоения и спада тока в реальном эксперименте имеет практически на порядок меньшую величину. Факт сильного отражения пластин подтверждается фотографией облицовки витка, приведенной на фото (рис. 1.7). Облицовка, выполненная из медного листа, пробита при ударе разлетающихся пластин.

Это свидетельствует о «сохранении» части магнитного поля между пластинами в момент максимального сжатия. Как видно по фотографии следов на рис. 1.4, ширина пластин лайнера к концу процесса сжатия становится

равной 13 см, т.е. уменьшается почти в два раза по сравнению с начальной шириной. В то же время ширина щели токоподвода к нагрузке не меняется, поэтому плотность тока по лайнеру в поперечном направлении практически вдвое превышает плотность тока в нагрузке. Соответственно, плотность энергии магнитного поля, оставшегося между пластинами лайнера, должна вчетверо превышать плотность энергии, выведенной в нагрузку. Возможность более эффективного использования энергии сжатого магнитного поля в настоящее время исследуется.



Рис. 1.7. Фото пробитой медной облицовки, первоначально уложенной на внутренней поверхности витка.

## **2. Результаты математического моделирования для поперечной модели**

Математические модели движения лайнера в поперечном сечении магнитного компрессора в приближениях термоупругого тела, упругопластического тела и вязкой несжимаемой жидкости подробно разобраны в работах [3-5].

### **2.1. Расчет с упругопластическим лайнером**

На рис. 2.1 показаны положения лайнера в различные моменты времени (половина одной ленты, расстояния нормированы на величину 10 см, время – на величину 1 мс). Оттенками серого показана вертикальная компонента скорости

(нормирована на величину 100 м/с). При приближении лайнера к нижней части расчетной области (сближении со второй лентой) лайнер тормозится сжатым магнитным полем и начинает двигаться в противоположном направлении (рис. 2.1.Б). Расчет останавливался, когда лайнер достигал границы ускорительного витка.

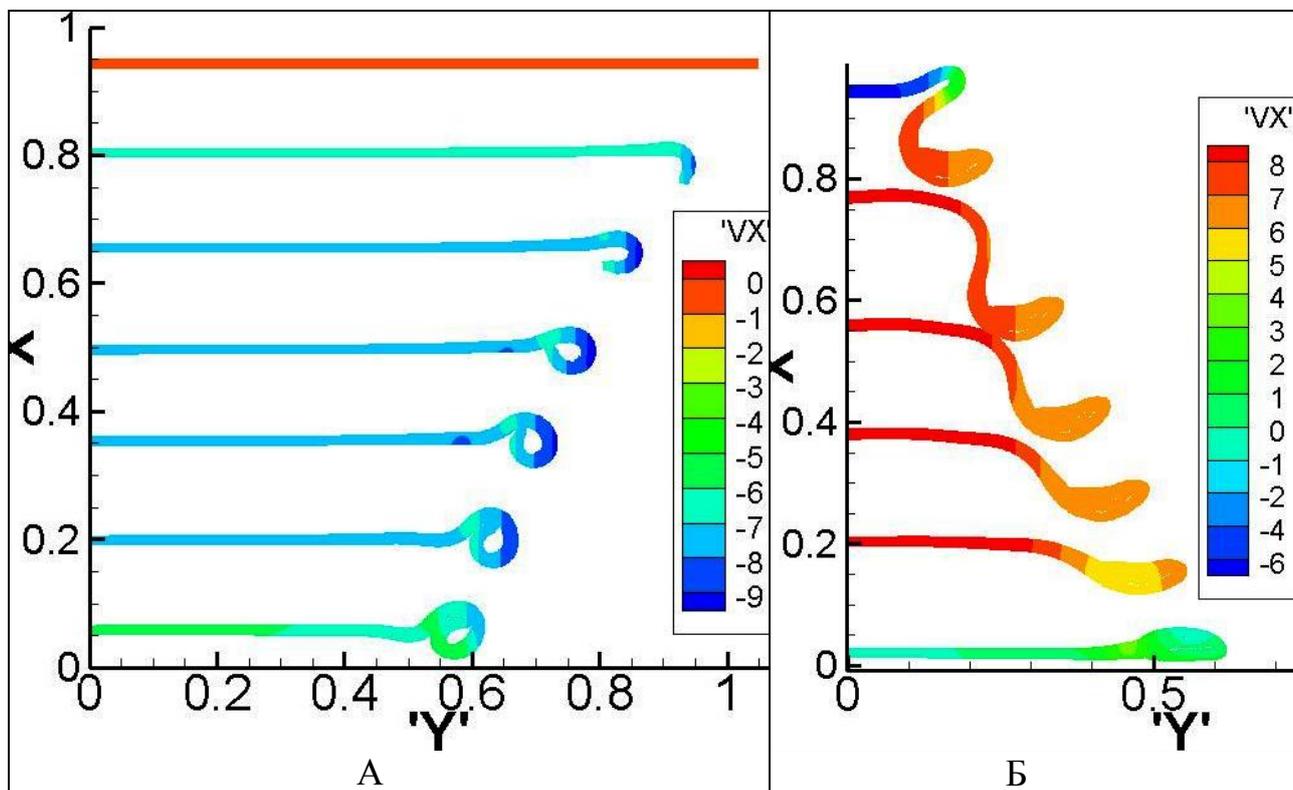
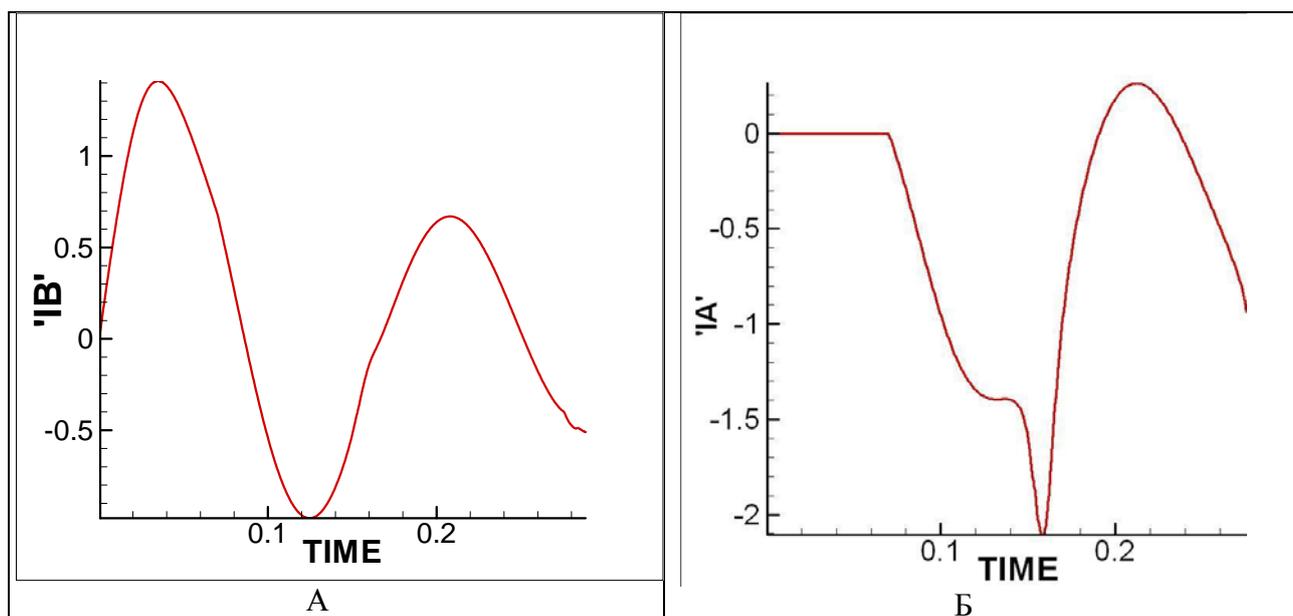
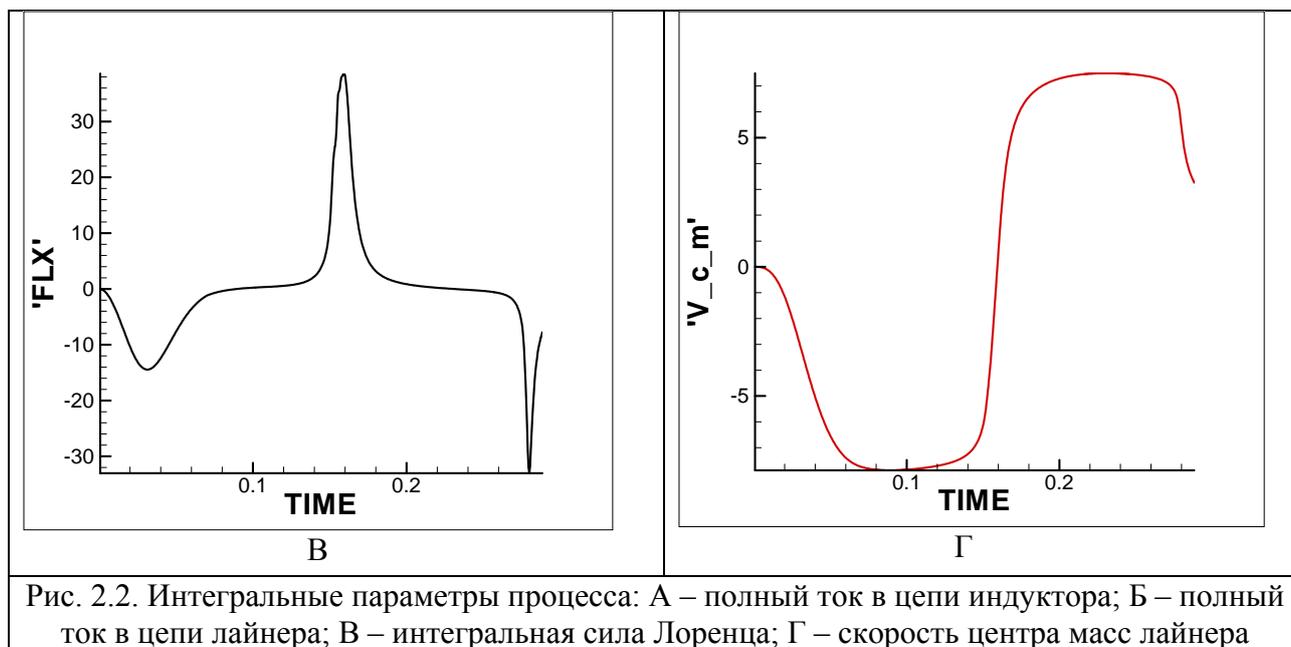


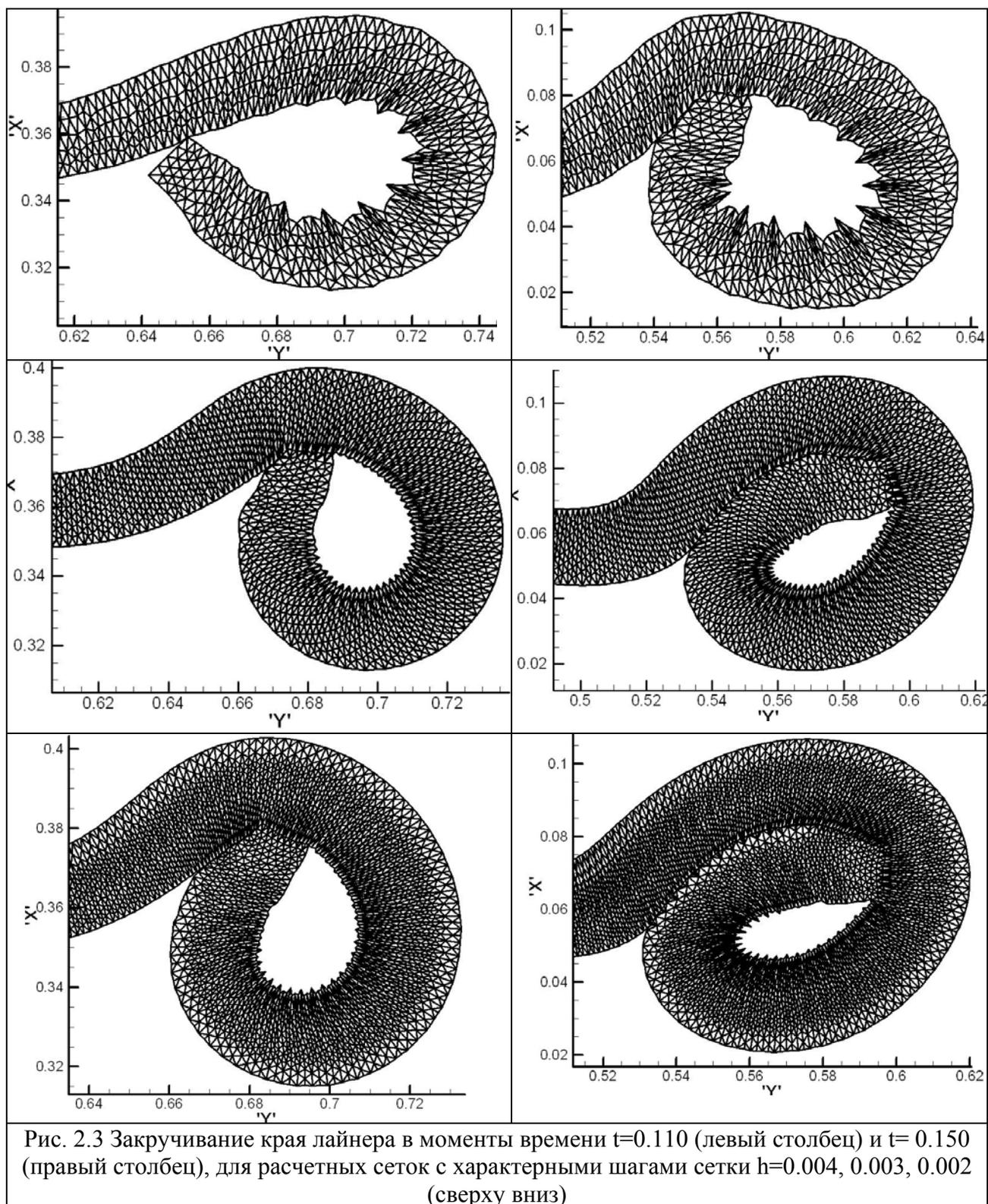
Рис. 2.1. Положения упругопластического лайнера: А – движение сверху вниз ( $t=0$ ,  $t=0.052$ ,  $t=0.072$ ,  $t=0.092$ ,  $t=0.110$ ,  $t=0.130$ ,  $t=0.150$ ); Б – движение снизу вверх ( $t=0.170$ ,  $t=0.200$ ,  $t=0.220$ ,  $t=0.240$ ,  $t=0.264$ ,  $t=0.300$ )





На рис. 2.2 показаны графики зависимостей от времени интегральных параметров расчета (слева направо, сверху вниз): полные токи в цепях индуктора и лайнера (нормированы на величину 2 МА), интегральная сила Лоренца (нормирована на величину 400 кН) и скорость центра масс (вертикальная компонента) лайнера.

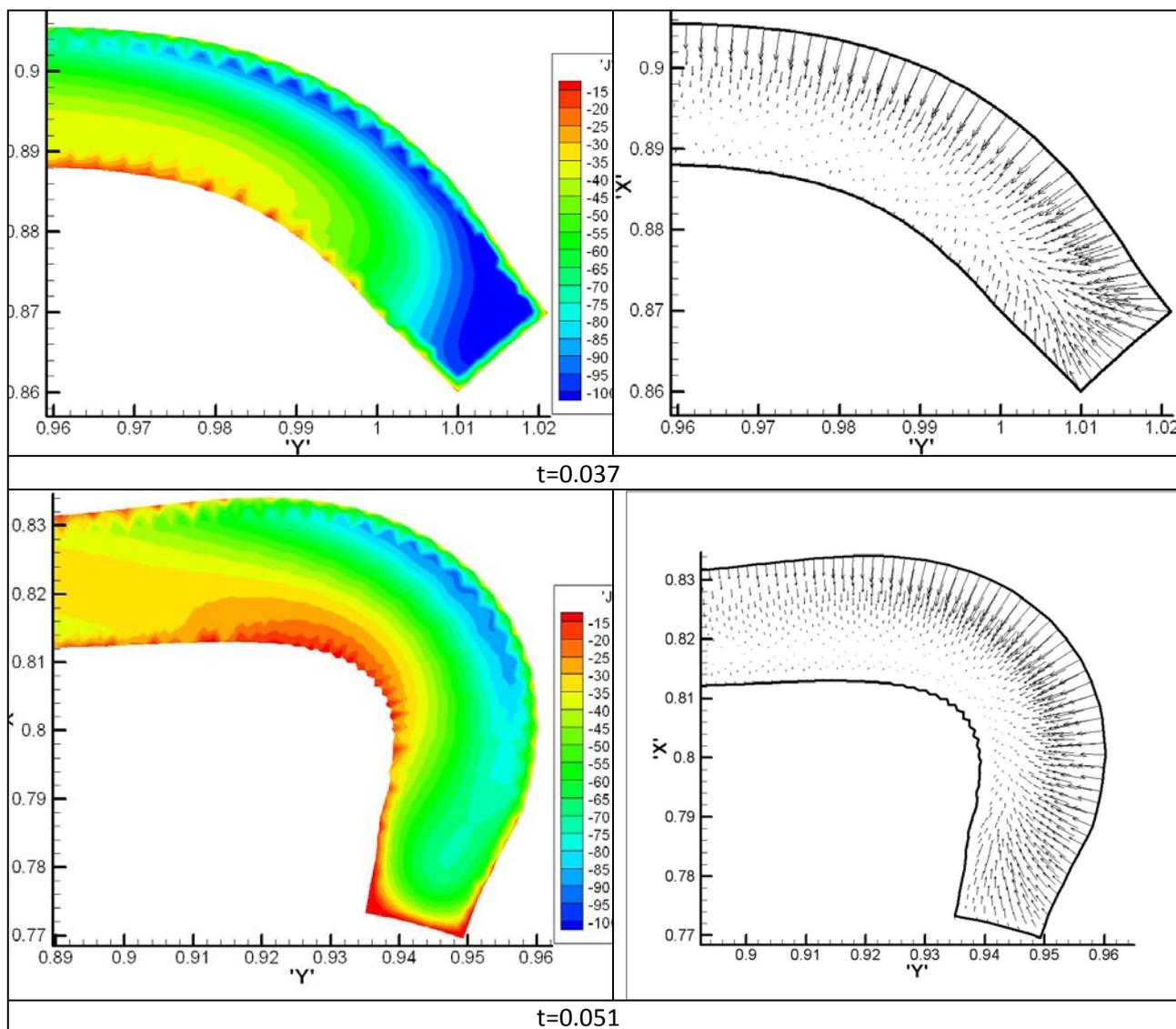
Особый интерес при моделировании движения лайнера в поперечном сечении вызывает процесс закручивания края ленты лайнера. В проведенных расчетах контакт различных участков ленты лайнера учитывался следующим образом: когда узел сетки лайнера (с номером  $i$ ) в результате перемещения оказывался внутри другого участка ленты (в треугольнике с номером  $it$ ), то производилась локальная перестройка сетки. При этом треугольник  $it$  разбивался на 2 новых треугольника, одной из вершин которых являлся узел с номером  $i$ . Поскольку на каждом шаге по времени сетка в диэлектрических подобластях строилась заново, то при учете взаимных пересечений участков лайнера отслеживалось образование замкнутых диэлектрических подобластей. Таким образом, триангуляция проводилась в многосвязной области с динамически изменяющимися границами. На данный момент построенный алгоритм не обеспечивает правильного учета всех возможных контактов и в некоторых расчетах происходили сбой и вынужденная остановка программы. Сейчас ведется работа над дальнейшим усовершенствованием алгоритма.

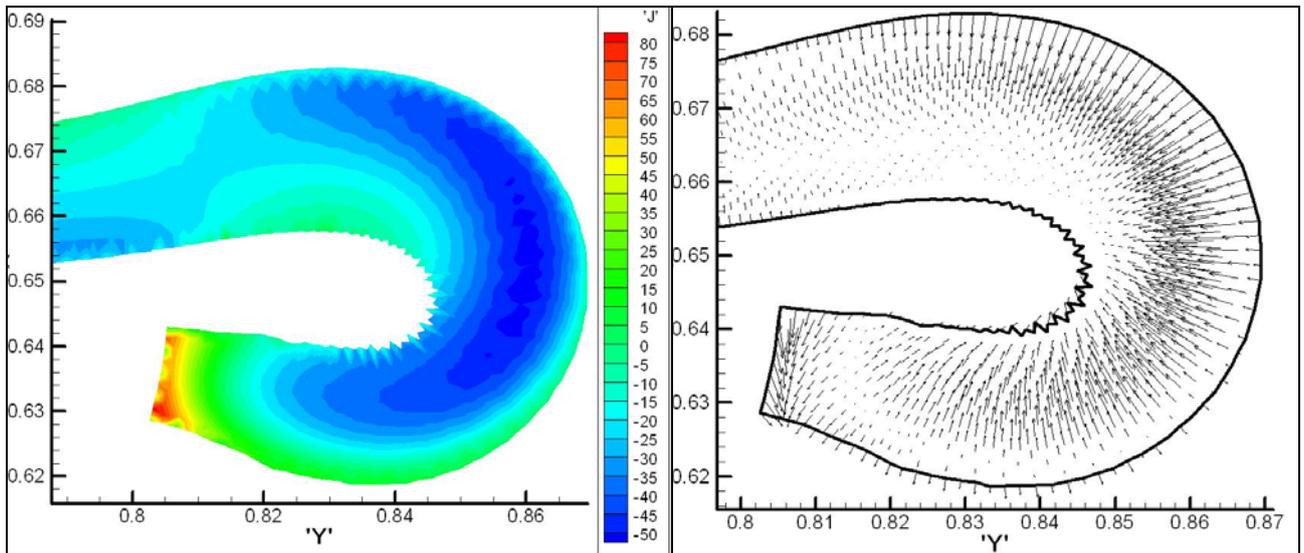


Расчетные результаты процесса закручивания края лайнера зависят от выбранного шага сетки. На рис. 2.3 приведены сетки на крае лайнера для двух моментов времени и трех шагов начальной триангуляции. Видно, что результаты первого (шаг сетки 0.004) расчета существенно отличаются от результатов второго (шаг сетки 0.003). Это объясняется тем, что первая сетка

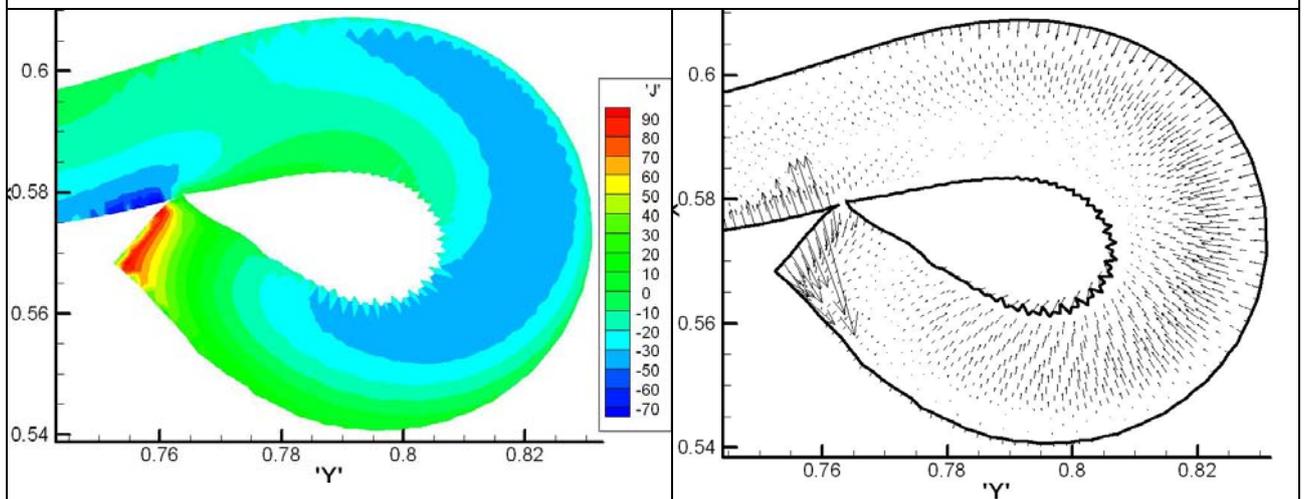
является очень грубой и явно вносит в результаты моделирования существенные численные искажения. Однако результаты второго и третьего (шаг сетки 0.002) расчета уже обладают значительным сходством, хотя некоторые количественные расхождения по-прежнему присутствуют.

Результаты моделирования показали, что в процессе движения край лайнера заворачивается внутрь и к началу процесса торможения образует двойной виток. Чтобы прояснить физическую суть данного явления, на рис. 2.4 приведены распределения плотности тока (нормированы на величину  $200 \text{ A/cm}^2$ ) и вектора силы Лоренца на крае лайнера. Из приведенных рисунков видно, что на крае лайнера концентрируется максимальная плотность тока, и в результате взаимодействия тока с магнитным полем формируется сила Лоренца ( $\mathbf{f} = [\mathbf{j} \times \mathbf{H}] = (-jH_y, jH_x, 0)$ ), которая загибает края лайнера вниз ( $t=0.037$ ).

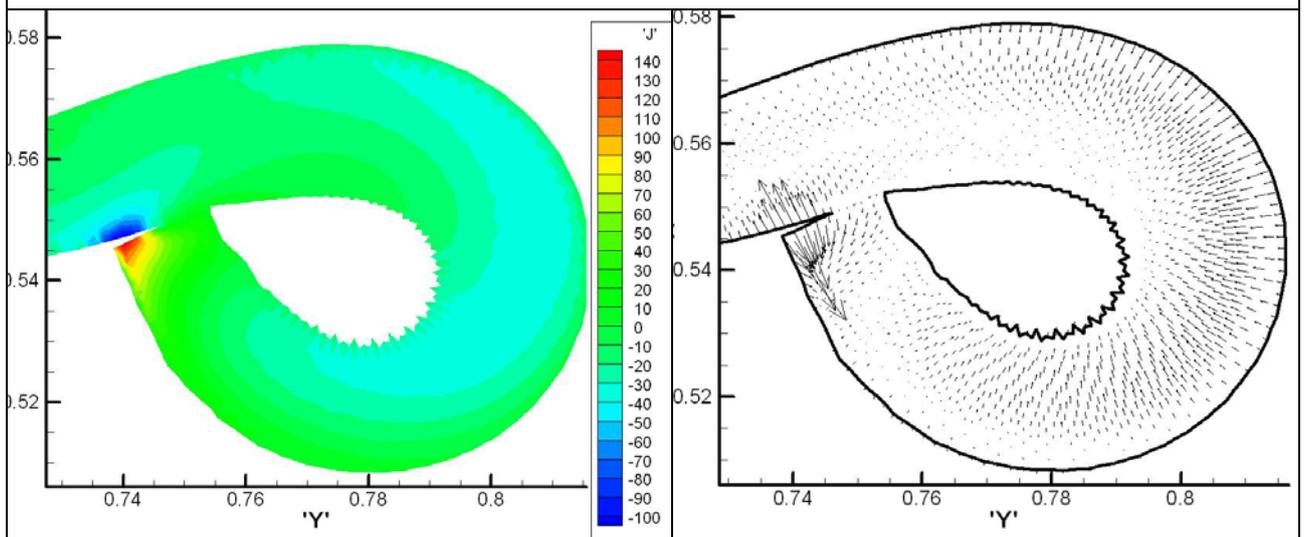




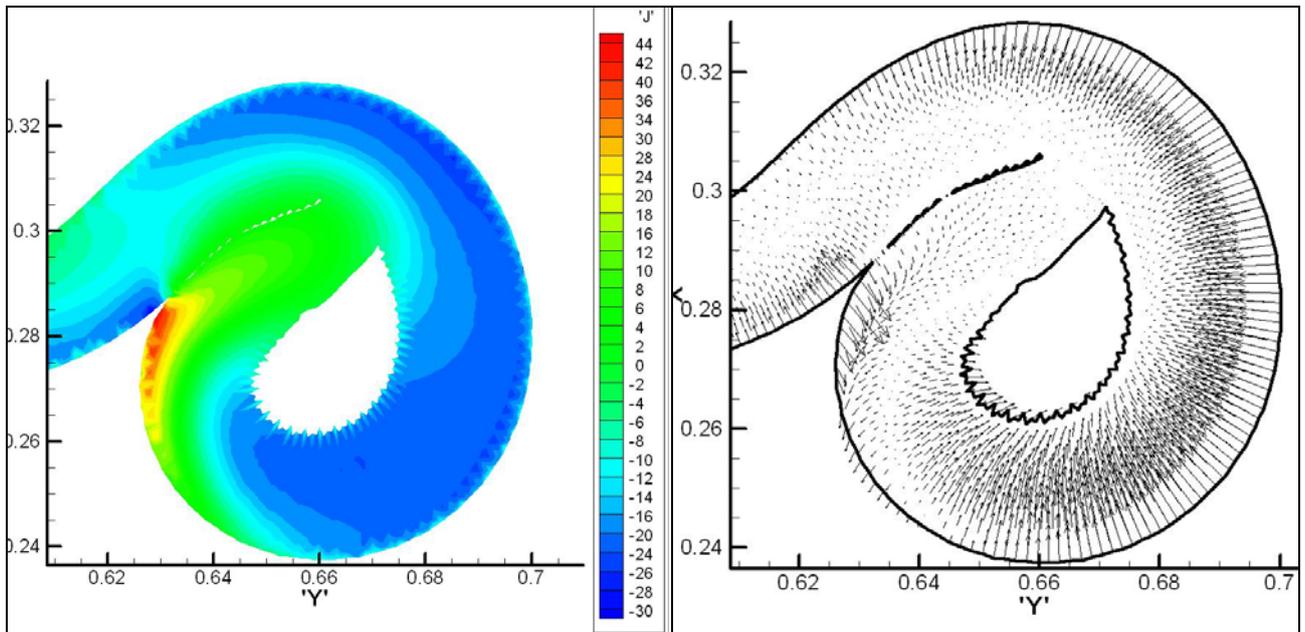
$t=0.072$



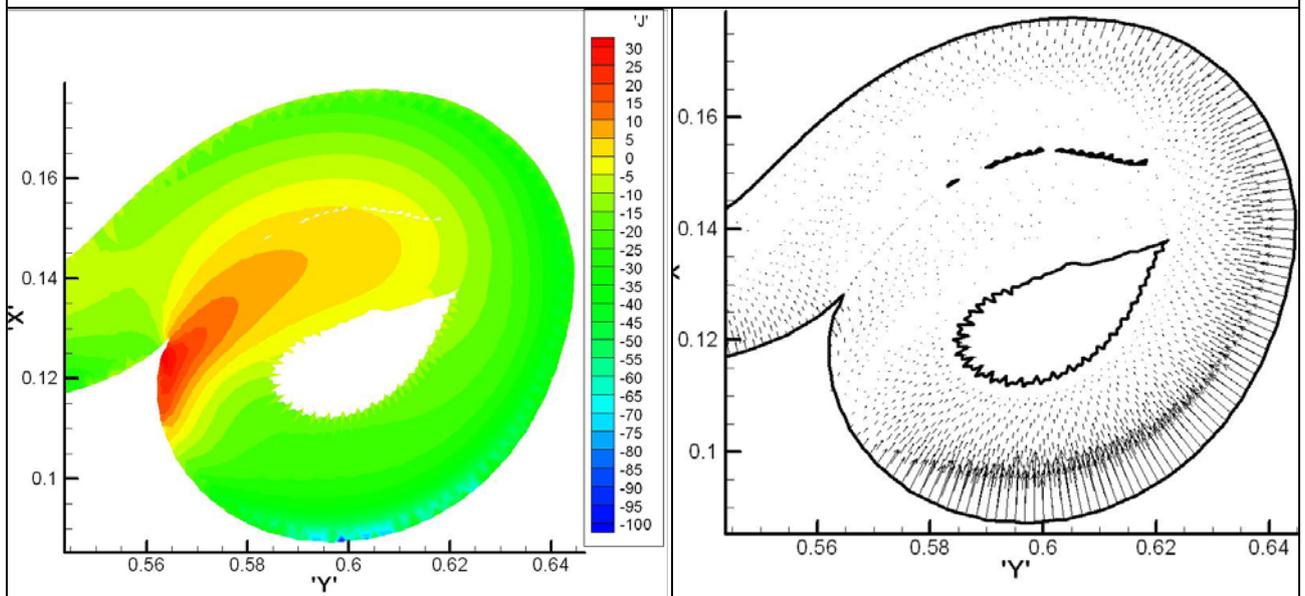
$t=0.081$



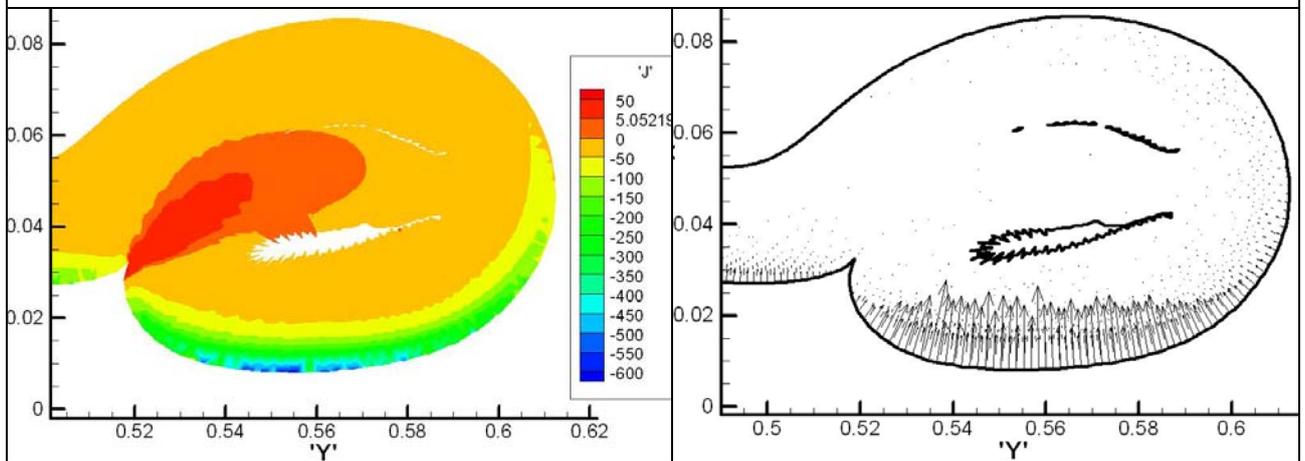
$t=0.085$



$t=0.120$



$t=0.141$

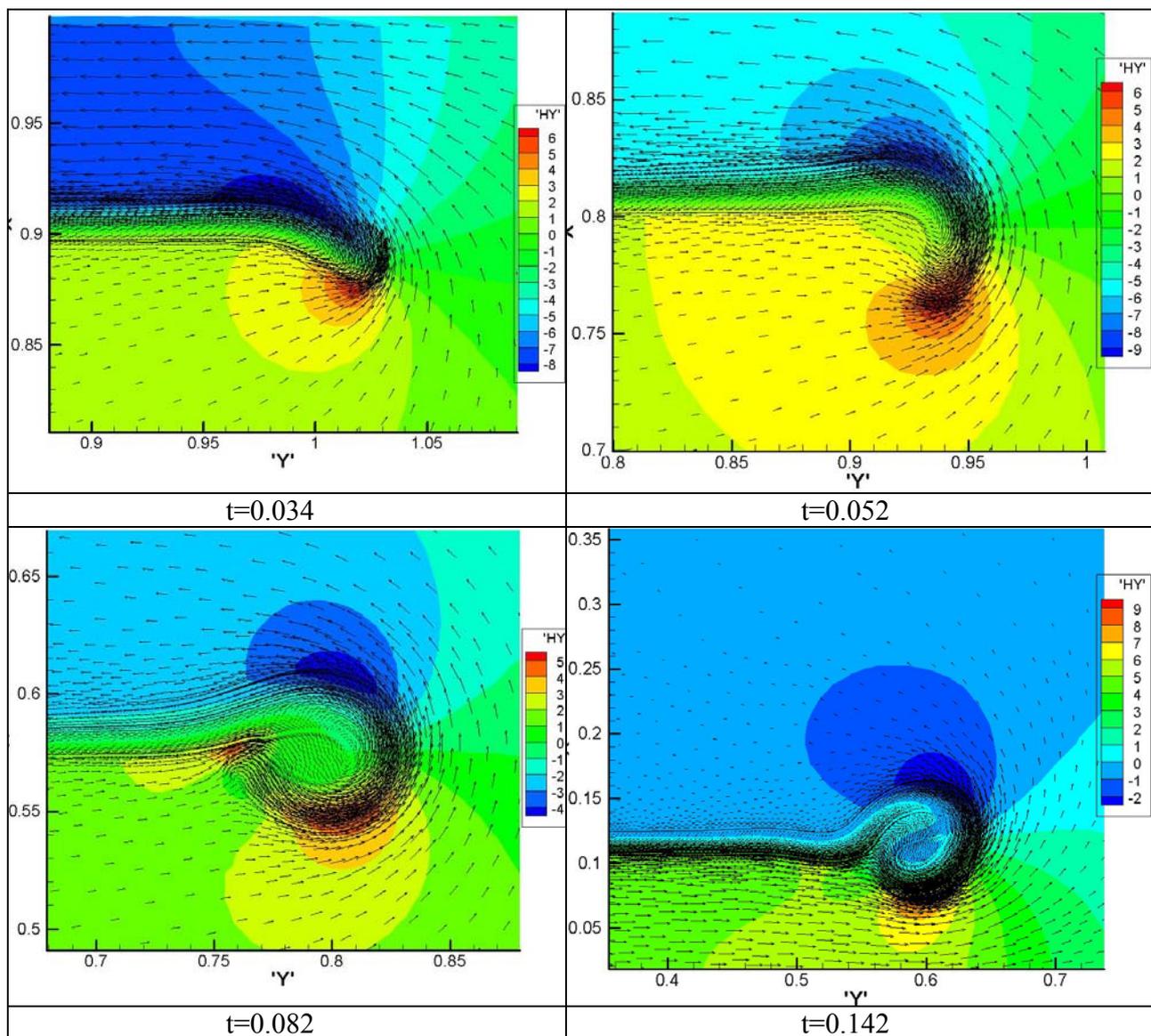


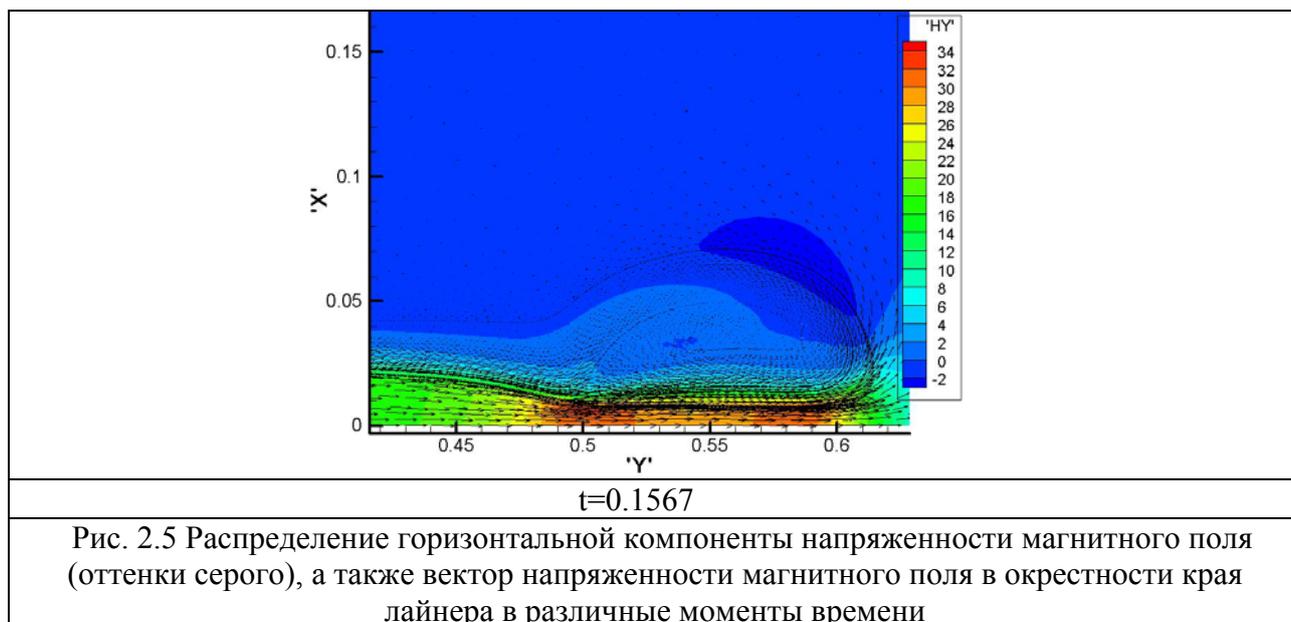
$t=0.148$

Рис. 2.4. Распределение плотности тока (левый столбец) и вектор силы Лоренца на крае лайнера в различные моменты времени

Когда, закручиваясь, лайнер образует замкнутый контур, наблюдается следующее явление: плотности тока на сближающихся участках имеют разный знак, сила Лоренца препятствует их дальнейшему сближению. Под действием сил инерции контакт все-таки происходит, но внутренняя область первоначально имеет миндалевидную форму ( $t=0.081$ ).

Образовавшийся замкнутый контур продолжает закручиваться под действием силы Лоренца ( $t=0.120$ ). На этапе торможения лайнера максимальная плотность тока сосредоточена в тонком слое, расположенном в нижней части утолщения на крае ленты ( $t=0.141$ ). Формирующаяся сила Лоренца сначала тормозит и сминает закрученный край, а потом останавливает и толкает вверх центральную часть ленты ( $t=0.148$ ).





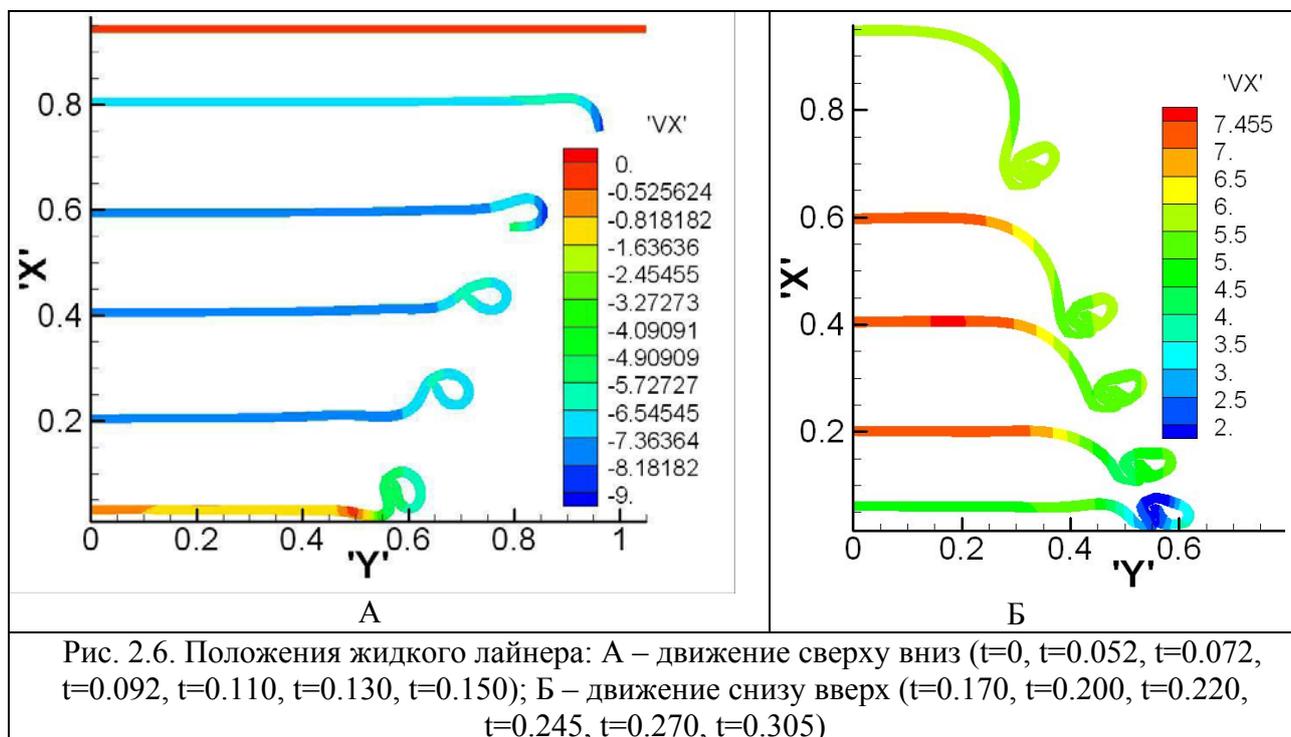
На рис. 2.5 показано распределение вектора напряженности магнитного поля вблизи края лайнера (оттенками серого показана горизонтальная компонента, нормированная на величину 20000 Гаусс (соответствует 2 Тс)).

Из рисунков видно, что магнитное поле, огибая лайнер, меняет направление (знак). На заключительном этапе сжатия магнитного поля наряду с уменьшением площади области, заключенной между лентами лайнера, наблюдается значительный рост амплитуды магнитного поля.

## 2.2 Расчет с жидким лайнером

На рис. 2.6 показаны положения лайнера в различные моменты времени (половина одной ленты). Оттенками серого показана вертикальная компонента скорости. В целом движение жидкого лайнера имеет значительные сходства с движением упругопластического лайнера на рис. 2.1. Но имеются следующие различия: в модели жидкого лайнера закручивающийся край ленты (механизм закручивания тот же) сначала опережает центральную часть ( $t=0.052$ ,  $t=0.072$ ), но в дальнейшем начинает от нее отставать ( $t=0.110$ ,  $t=0.130$ ,  $t=0.150$ ), в то время как в модели пластического лайнера край ленты опережает центр вплоть до отражения лайнера. Поэтому при сближении пластин сначала происходит торможение центральной части лайнера, она отражается вверх, а уже потом тормозятся сближающиеся края ленты. В результате в данной модели закрученные края ленты не расплющиваются так сильно, как в модели

упругопластического лайнера, а при дальнейшем движении продолжают закручиваться, но уже против часовой стрелки. Расчет останавливался, когда лайнер достигал нижней границы индуктора.



На рис. 2.7 показаны зависимости от времени различных видов энергии (энергия нормирована на 40 кДж), характеризующие этапы ускорения и торможения лайнера (движение в обратном направлении на этих графиках не показано). Используются следующие обозначения:

$$E_{-H} = \int_V \frac{1}{8\pi} H^2 dS - \text{энергия магнитного поля во всей расчетной области};$$

$$E_{-H\_A} = \int_{V_A} \frac{1}{8\pi} H^2 dS - \text{энергия магнитного поля в лайнере};$$

$$E_{-H\_SI} = \int_{V_{SI}} \frac{1}{8\pi} H^2 dS - \text{энергия магнитного поля в области между}$$

пластинами лайнера;

$$E_{-IA} = \frac{1}{2} L_A I_A^2 - \text{энергия в катушке индуктивности в цепи лайнера};$$

$$E_{-UA} = \frac{1}{2} C_A U_A^2 - \text{энергия на обкладках конденсатора в цепи лайнера};$$

$E_{-IB}, E_{-UB}$  – аналогичные энергии для цепи индуктора;

$$E_I = E_{IA} + E_{IB}, \quad E_U = E_{UA} + E_{UB};$$

$$E_K = \int_{V_A} \frac{1}{2} \rho v^2 dG - \text{кинетическая энергия лайнера};$$

$$E_T = \int_V \rho c_E (T - T_0) dG - \text{внутренняя энергия лайнера (в данном случае}$$

тепловая);

$$E_D = \int_0^t (R_A I_A^2 + R_B I_B^2) dt - \text{потери энергии на сопротивлениях во внешних}$$

электрических цепях;

$$E_{ALL} = E_H + E_I + E_U + E_K + E_T - \text{суммарная энергия системы.}$$

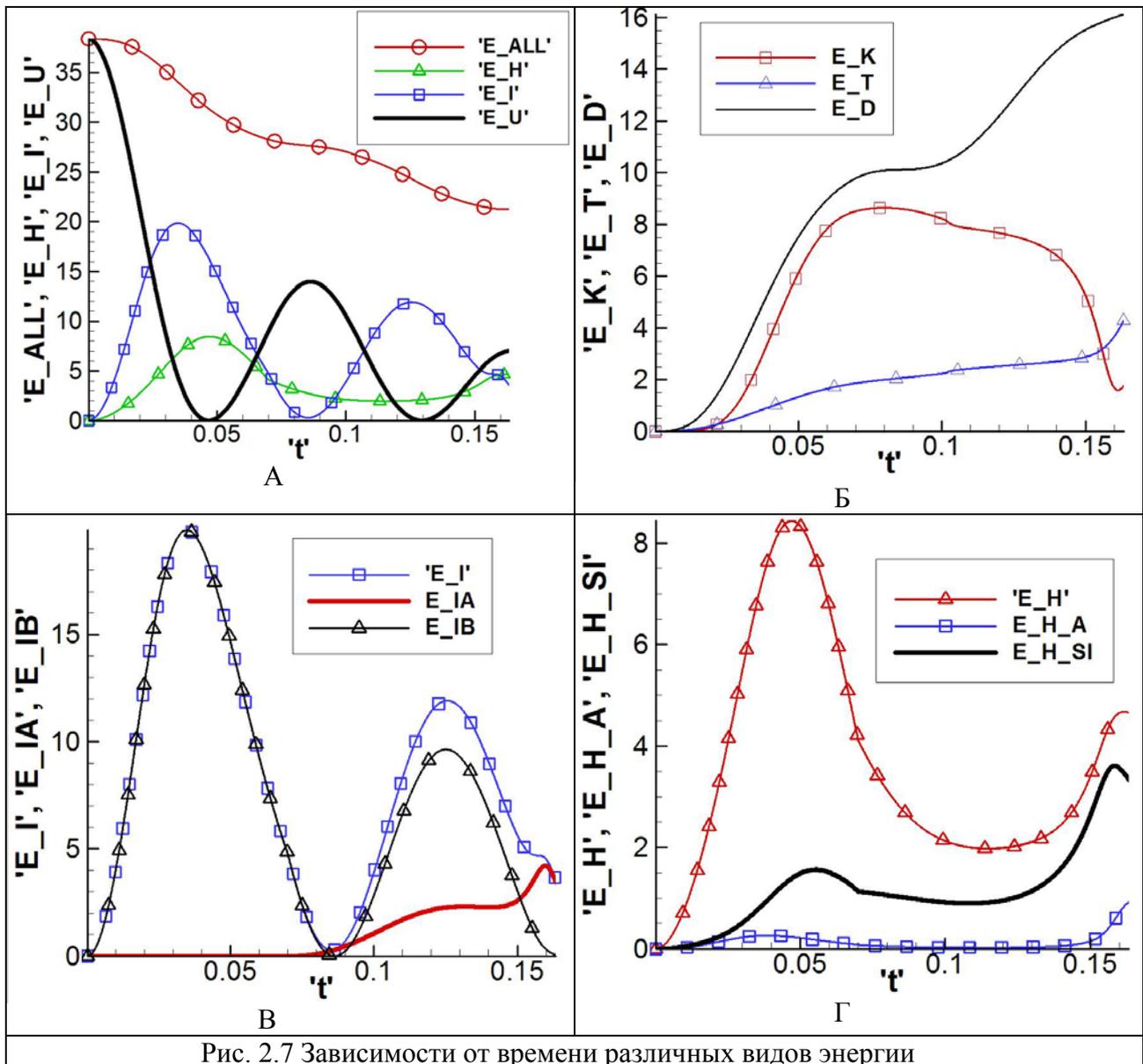


Рис. 2.7 Зависимости от времени различных видов энергии

Из графиков видно, что в начальный момент на обкладках конденсатора в цепи индуктора запасено 1.6 МДж. В дальнейшем эта энергия переходит в энергию в катушке индуктивности, энергию магнитного поля, а также в кинетическую и внутреннюю энергию лайнера. Отметим, что тепловые потери на сопротивлениях во внешних цепях (640 кДж, по расчетам А.П. Лотоцкого - 615 кДж) значительно превышают максимальные значения магнитной (335 кДж) и кинетической энергий (345 кДж, по расчетам А.П. Лотоцкого - 418 кДж), а на этапе торможения большая часть энергии магнитного поля (185 кДж во всей области ) сосредоточена в области между лентами лайнера (145 кДж, в самом лайнере - 38 кДж). Отметим, что графики энергии магнитного поля не включают энергию магнитного поля в нагрузке, которая описана соответствующим графиком энергии в цепи лайнера.

### 2.3. Расчет с термоупругим лайнером

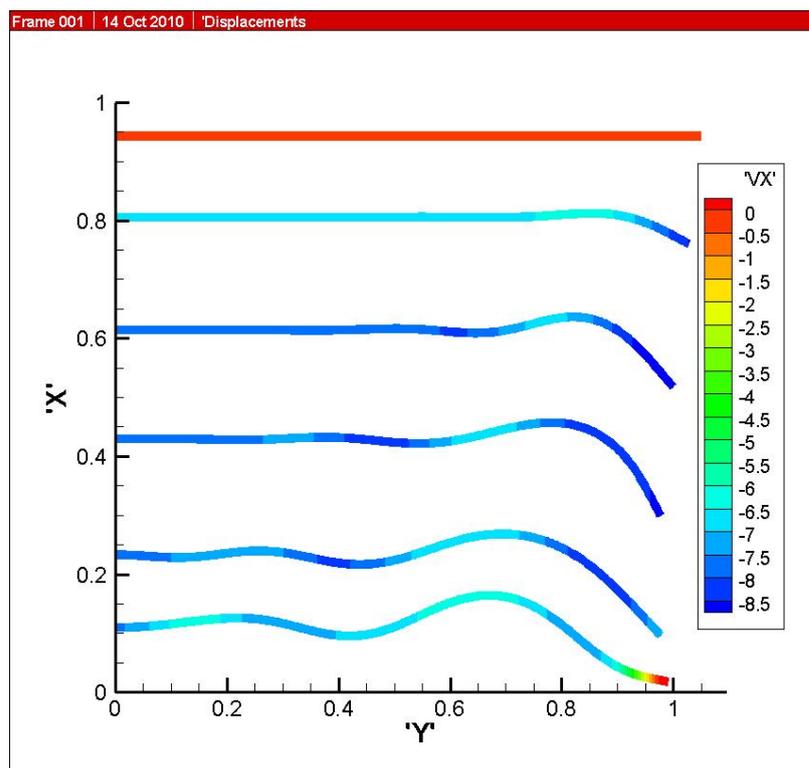


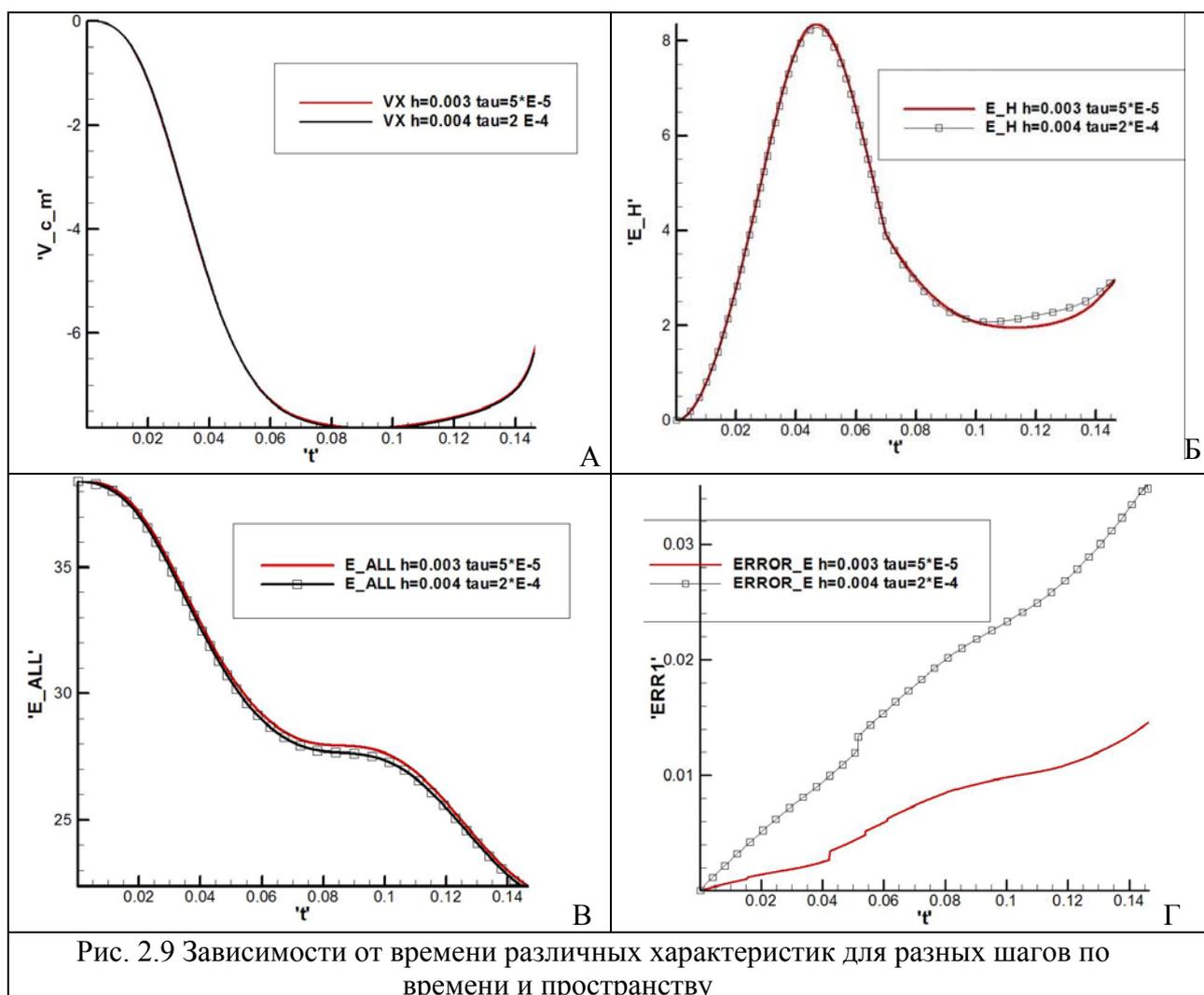
Рис. 2.8. Положения термоупругого лайнера в различные моменты времени

На рис. 2.8 показаны положения термоупругого лайнера в различные моменты времени (половина одной ленты). В данном расчете под действием электромагнитных сил край лайнера, на котором сосредоточена максимальная

плотность тока, значительно опережает центральную часть пластины, по которой бегут упругие волны. В конце расчета край ленты достиг нижней части расчетной области (произошел контакт с краем второй ленты), после чего расчет был остановлен. Таким образом, в отличие от предыдущих моделей в данном расчете отражения пластин не произошло.

На рис. 2.9 показаны зависимости различных интегральных параметров от выбранного шага дискретизации по времени ( $\tau$ ) и шага триангуляции ( $h$ ): рис. 2.9.А - скорость центра масс лайнера; рис. 2.9.Б - магнитная энергия во всей области; рис. 2.9.В - суммарная энергия; рис. 2.9.Г - накопленная численная ошибка (относительная) при выполнении дискретных аналогов закона сохранения энергии

$$Error(t) = (E_{ALL}(t) - E_{ALL}(0) + \int_0^t (R_A I_A^2 + R_B I_B^2) d\tau) / E_{ALL}(t).$$



Из графиков видно, что для двух расчетов (в первом расчете шаг по времени  $\tau = 0.0002$ , шаг сетки в лайнере -  $h = 0.004$ ; во втором расчете -  $\tau = 0.00005$ ,  $h = 0.003$ ) интегральные характеристика отличаются незначительно, а суммарная ошибка баланса энергии для второго расчета более чем в 2 раза меньше, чем для первого расчета.

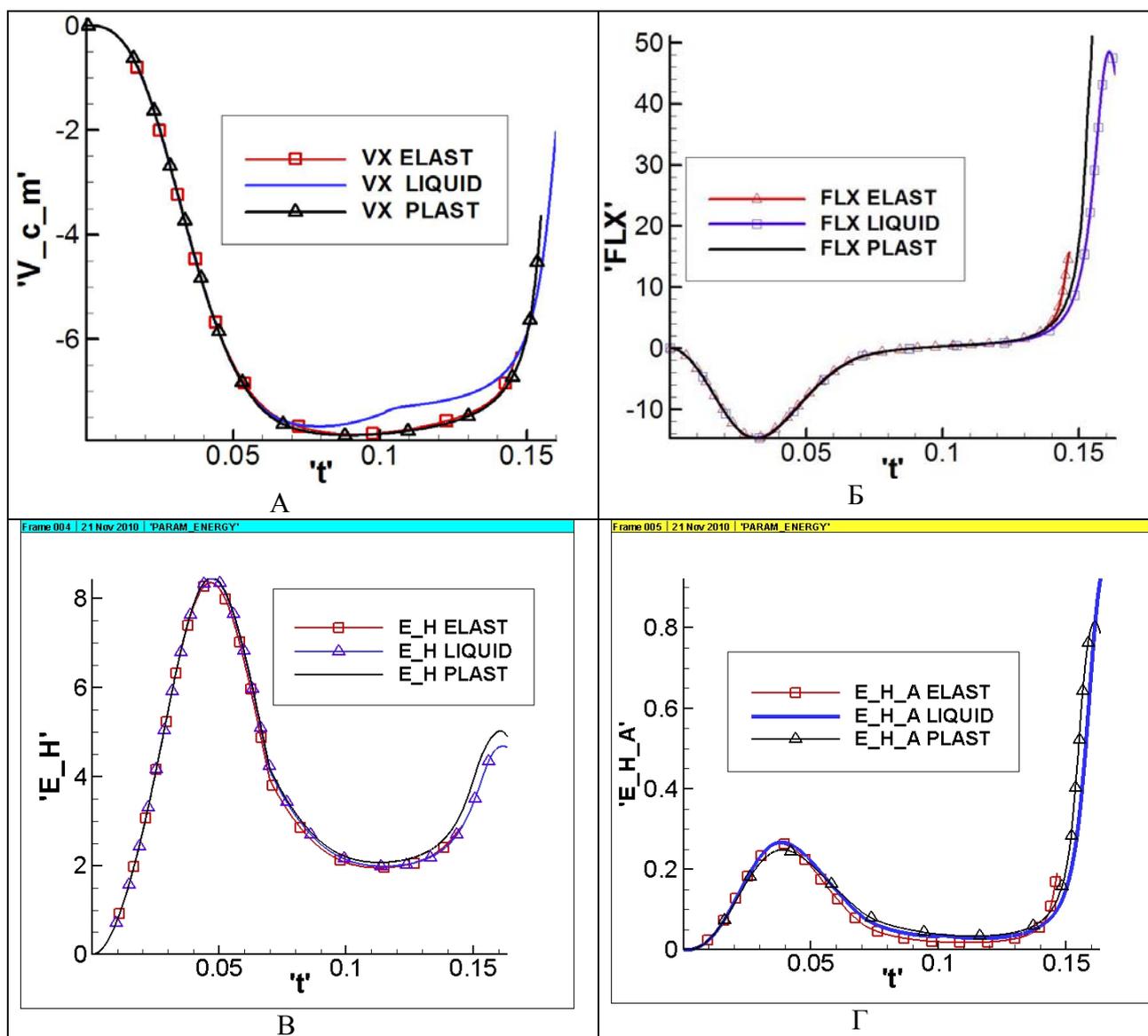
#### **2.4. Сравнение результатов различных моделей и экспериментальных данных**

Сравним полученные результаты численных расчетов (с использованием 3-х моделей материала лайнера) с экспериментальными данными, изложенными в параграфе 1.

В момент замыкания цепи лайнера эффективная полуширина лайнера в эксперименте составляла 85 мм ( $t=70$  мкс), а в конце процесса торможения - 65 мм ( $t=150$  мкс) (из анализа следа лайнера на клине, рис. 1.4). Для модели упругопластического лайнера полуширина ленты в соответствующие моменты имеет следующие значения:  $l_y = 87.5$  мм ( $t=70$  мкс),  $l_y = 61.5$  мм ( $t=158$  мкс); для модели жидкого лайнера полуширина ленты в соответствующие моменты имеет следующие значения:  $l_y = 89.5$  мм ( $t=70$  мкс),  $l_y = 62.5$  мм ( $t=162$  мкс). Поскольку в данных моделях на краях лайнера имеются утолщения, то это объясняет более глубокий отпечаток края лайнера на клине. Для модели термоупругого лайнера на всем протяжении расчета полуширина лайнера не отличалась от начальной (105 мм) более, чем на 5-7 мм.

На рис. 2.10.А-Б показаны интегральные характеристики для 3-х моделей: видно, что скорости центра масс лайнера для термоупругой и упругопластической модели хорошо совпадают, а скорость жидкого лайнера, начиная с какого-то момента времени, отличается от них в меньшую (по модулю) сторону. В момент времени  $t=0.111$ , когда расстояние между пластинами лайнера составляет 35 мм, скорость центра масс упругопластического лайнера - 777 м/с, скорость жидкого лайнера - 726 м/с, в эксперименте скорость лайнера - 780 м/с. В то же время в эксперименте максимальная скорость составляла - 868 м/с, в то время как максимальная

скорость центра масс для упругопластического лайнера за все время расчета - 785 м/с, а максимальная скорость жидкого лайнера - 763 м/с. Т.е. построенные модели описывают скорость центра масс лайнера с погрешностью около 10%. Возможно, это связано с тем, что в моделях поперечного сечения компрессора длина лайнера вдоль оси z считается постоянной в течение всего расчета, а на самом деле из-за контакта с клиньями, расположенными в торцах устройства, протяженность прямолинейного участка ленты в конце этапа ускорения почти в 2 раза меньше начальной длины рабочего участка ленты. С другой стороны, различие может быть обусловлено ошибкой определения экспериментальной скорости. Графики интегральной ускоряющей силы для 3-х моделей хорошо совпадают на этапе ускорения лайнера, но начинают заметно отличаться на этапе торможения.



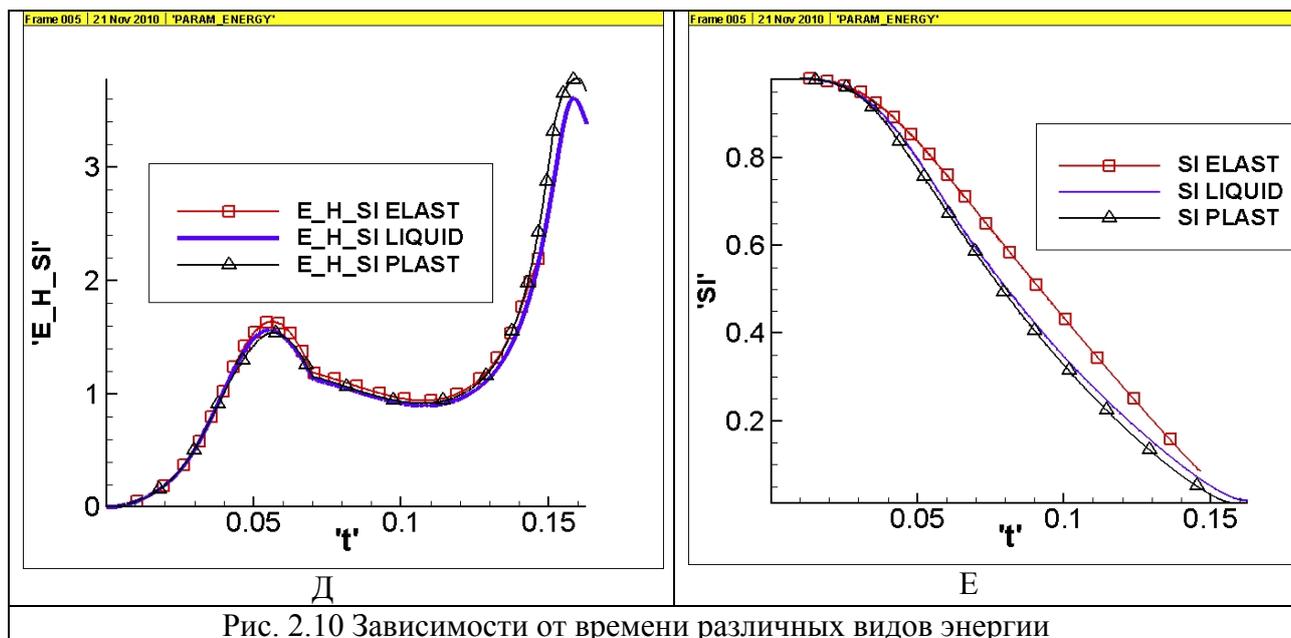


Рис. 2.10 Зависимости от времени различных видов энергии

Как показывают графики, энергия магнитного поля во всей области (на рис. 2.10.В), в лайнере (на рис. 2.10.Г) и в области между лентами лайнера (на рис. 2.10.Д) для трех моделей практически совпадают, но в момент максимального торможения соответствующие энергии для упругопластического лайнера несколько больше (для упругого лайнера расчет останавливался раньше).

На рис. 2.10.Е показаны графики зависимости от времени площади области между лентами лайнера (в поперечном сечении). Из графиков видно, что данная площадь незначительно отличается для жидкого и упругопластического лайнера (для упругого лайнера площадь больше).

На рис. 2.11 показаны графики выходного импульса: для упругопластического лайнера максимальная амплитуда тока - 4.28 МА ( $t=158$  мкс), для жидкого лайнера - 3.85 МА ( $t=160$  мкс), для упругого лайнера - 3.52 МА ( $t=147$  мкс, затем расчет остановлен), в эксперименте - 3.8 МА ( $t=150$  мкс).

В момент максимального сжатия профиль упругопластического лайнера является более плоским, чем профиль жидкого лайнера (рис. 2.1.Б и рис. 2.6.Б), поэтому импульс в соответствующем расчете получился больше. С другой стороны, в модели упругопластического лайнера пока не учтена температура.

Амплитуда тока в цепи индуктора и в эксперименте и в расчетах составляла - 2.8 МА.

Для расчета с упругопластическим лайнером энергия, выведенная в нагрузочный виток (на момент максимального сжатия магнитного поля) равна  $E_{IA} = \frac{1}{2} L_A I_A^2 = 211$  кДж (в эксперименте –166 кДж), а энергия магнитного поля в области между лентами лайнера на данный момент времени составила 156 кДж. Поэтому можно предположить, что если придать лайнеру большее ускорение, чтобы произошло схлопывание пластин, то можно получить выходной импульс с большей амплитудой.

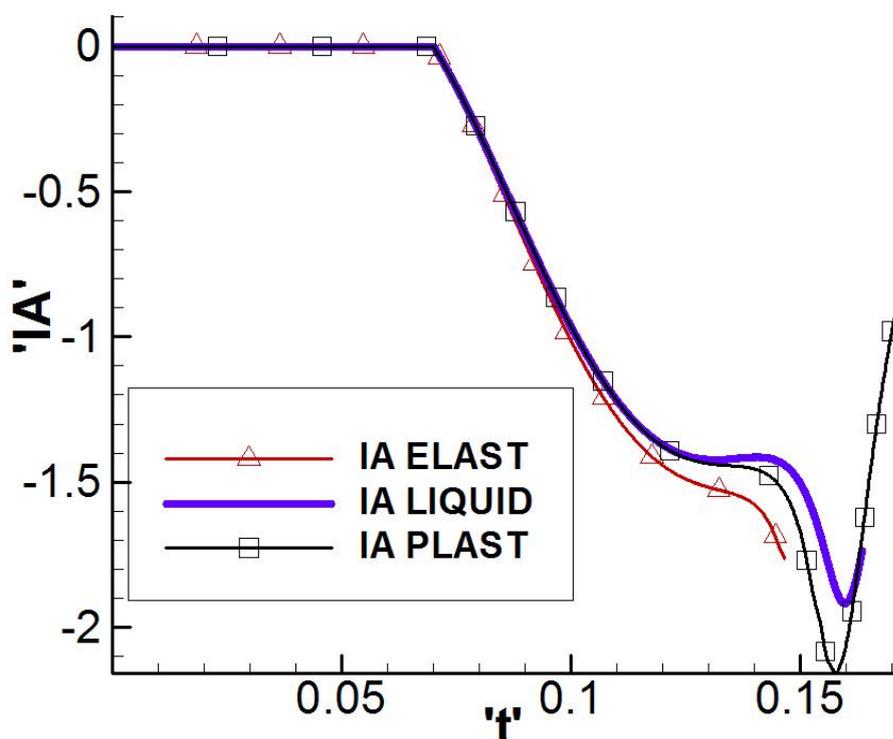


Рис. 2.11. Выходной импульс в цепи лайнера для различных моделей

При сравнении графиков тока в цепи лайнера рис. 2.11 с экспериментальной кривой тока в нагрузке, показанной на рис. 1.6, видно, что их форма несколько различается. На расчетной кривой видна первая полуволна, максимум которой приходится на момент  $t=120$  мкс ( $t=0.12$ ), соответствующий амплитудному значению полуволны обратного тока в ускорительной системе (тока питающей емкости). В эксперименте ток емкости через лайнер (и нагрузку) в момент изменения знака (перехода через ноль) обрывается, так как пластина лайнера при нулевом токе оказывается свободной от ускоряющего магнитного поля и не прижатой к поверхности призмы. Это приводит к скольжению ленты по поверхности, ее локальному растяжению и физическому

обрыву в районе диэлектрической вставки на рис.1.2. По-видимому, ток витка при дальнейшем нарастании напряжения обратной полярности замыкается по окружающему газу. Экспериментальная кривая тока в этот момент демонстрирует характерный «излом» или скачкообразное уменьшение индуктивности контура. Об этом также свидетельствует сильная подсветка диагностического окна, видимая на кинограмме (рис. 1.3). Обрыв лайнера, концы которого движутся по инерции и прилегают к контактам выводам нагрузочного витка, тем не менее не препятствует происходящему сжатию магнитного поля. Но в результате в экспериментальных данных вклад емкостного источника в величину тока нагрузки отсутствует, в отличие от расчетов по рассмотренным моделям.

### **3. Заключение**

В работе рассмотрен магнитный компрессор, работающий по принципу обратимого преобразования электромагнитной энергии входного контура и кинетической энергии разгоняемого лайнера в энергию магнитного поля. Приведен обзор данных, полученных во время экспериментов на макете МК, осуществленных в ГНЦ РФ ТРИНИТИ. Показаны результаты вычислительных экспериментов, в которых для моделирования движения лайнера в поперечном сечении МК использовались приближения термоупругого тела, упругопластического тела и вязкой несжимаемой жидкости. Проведен сравнительный анализ полученных численных результатов с экспериментальными данными. Показано, что модели упругопластического и жидкого лайнера позволяют получить результаты, отличающиеся от экспериментальных на 5-10%. Дальнейшее развитие работ (расчетных и экспериментальных) будут направлены на устранение некоторых из наблюдаемых несоответствий и поиск усовершенствований в МК системе, которые позволят улучшить характеристики исследуемого обострителя мощности.

## 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. 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.
3. Родин А.С. Модель движения пластического лайнера в магнитном компрессоре и ее применение. М., 2009. 32 с. (Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, № 50).
4. М.П. Галанин, А.П. Лотоцкий, А.С. Родин, И.А. Щеглов. Движение лайнера в магнитном компрессоре: сравнение моделей упругого, жидкого и пластического лайнера. М., 2009. 31 с. (Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, № 58).
5. М.П. Галанин, А.П. Лотоцкий, А.С. Родин, И.А. Щеглов. Движение лайнера в поперечном сечении магнитного компрессора // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2010. №2. С. 65-84.