

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОТЕКАНИЯ ТОКА В СТРУЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩЕЙ ЖИДКОСТИ

Хайруллин Ирек Ханифович,

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО

Уфимский государственный авиационный технический университет

ferro2015@yandex.ru

Камалов ФилюсАслямович,

аспирант, ФГБОУ ВПО Уфимский государственный

авиационный технический университет

gprs2010@yandex.ru

Аннотация. Данная работа посвящена исследованию процессов, происходящих при протекании тока в струе электропроводящей жидкости. Моделирование проведено с использованием программной среды, которая использует метод конечных элементов. Сформулированы допущения, принимаемые при моделировании. Представлены описания расчетной модели, начальных и граничных условий для осуществления процесса моделирования. Получена картина магнитного поля в струе жидкости. В двух проекциях показано распределение сжимающих усилий в струе. Представлены кривые изменения радиальной составляющей электромагнитных сил и давления вдоль поперечного сечения струи при разных значениях тока в ней.

Ключевые слова: Магнетогидродинамический (МГД) канал, струя электропроводящей жидкости, сжимающие усилия.

SIMULATION MODELING FLOW OF CONDUCTING INCOMPRESSIBLE FLUID IN CYLINDRICAL MAGNETOHYDRODYNAMIC CHANNELS

Khayrullin I.H.

Doctor of Technical Sciences, Professor, FGBOU VPO Ufa State Aviation Technical University

Kamalov F.A.

Postgraduate, FGBOU VPO Ufa State Aviation Technical University

Abstract. The article is devoted to research of the processes occurring with leakage a current in the jet of conducting fluid. Simulation is made with usage of programm medium which uses a finite-element method. The assumptions accepted at simulation are formulated. Descriptions of a computational model, initial and boundary conditions for realisation of process of simulation are presented. The magnetic field pattern in a jet of fluid is gained. In two projections distribution of compressing loads in a jet of fluid is visually displayed. Curve changes of a radial component of electromagnetic forces and pressure along cross-section section of a jet are presented at different values of a current in it.

Keywords: Magnetohydrodynamic (MHD) channels, a jet of conducting fluid, compressing loads.

В настоящее время известны магнетогидродинамические (МГД) машины различного назначения, к которым относятся МГД-генераторы электрической энергии, МГД-насосы, МГД-ускорители плазменных сред, компрессоры и дроссели [1]. Среди них наибольшее распространение получили МГД-насосы. Согласно [1], они могут подразделяться на кондукционные, индукционные, линейные, цилиндрические, дисковые, коаксиаль-

ные, спиральные и др. В частности, в работе [2] рассмотрен индукционный цилиндрический насос без внутреннего сердечника. Этот насос не имеет внутреннего сердечника, и рабочий канал в нем представляет собой трубку круглого сечения. Также известны МГД-устройства, например [3,4], где проводником электрического тока является струя электропроводящей жидкости. Основной функциональной частью таких устройств является струя

электропроводящей жидкости, которая служит токопроводящим каналом. Данные устройства можно отнести к МГД-устройствам, когда угол наклона его внешней стенки к оси близка или равен нулю. В отличие от аналогичных устройств, внешней стенкой канала является окружающий воздух. Данные устройства представлены как отдельные технические решения, и отсутствуют исследования, в частности, процессов, возникающих при взаимодействии тока в струе с ее собственным магнитным полем.

В данное время во всех областях науки и техники для исследований физических процессов и явлений применяются компьютерные системы моделирования. Одним из таких систем является программный пакет COMSOL Multiphysics, которая основана на методе конечных элементов.

Таким образом, разработка компьютерной модели процессов, возникающих при протекании электрического тока в струе электропроводящей жидкости, и их исследование, представляет научный и практический интерес.

Моделирование процесса протекания тока в струе электропроводящей жидкости, является сложной задачей, который требует много вычислительного времени и ресурсов. К тому же, реальная струя имеет три существенно различные фазы истечения в окружающую среду: а) область непрерывного истечения струи; б) область распада струи; в) область движения капельно-воздушной смеси. С учетом данных условий, целесообразно рассматривать первую фазу истечения струи. Модель первой фазы истечения струи представляет собой цилиндрический участок, в котором течет электропроводящая жидкость.

По аналогии с [5], под электропроводящей жидкостью будет подразумеваться расплавы металлов, жидкие электролиты, различные суспензии.

Для составления расчетной модели приняты следующие допущения:

- на рассматриваемом участке струи жидкость является сплошной и неразрывной, отсутствуют краевые гидродинамические эффекты;
- жидкость является несжимаемой;
- стенки канала являются магнитно- и электрически изолированными;
- среда является изотропной и принимается, что $\mu=1$, $\epsilon=1$.

Известно, при течении жидкости в круглой трубе максимальная скорость находится на оси трубы [6].

У стенок трубы скорость равна нулю, т.к. частицы жидкости покрывают внутреннюю поверхность трубопровода тонким неподвижным слоем. От стенок трубы к ее оси скорости нарастают плавно. График распределения скоростей по поперечному сечению потока представляет собой параболоид вращения, а сечение параболоида осевой плоскостью - квадратичную параболу [6] (рис.1, а). В струе жидкости имеет место аналогичная картина [6] (рис. 1, б).

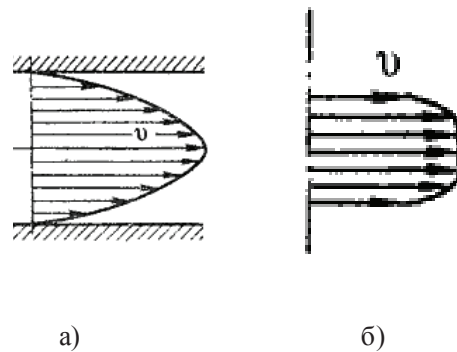


Рисунок 1. Графики распределения скоростей по поперечному сечению потока жидкости в трубе (а) и струи жидкости (б)

Исходя из вышесказанного, целесообразно принять условие, что скорость течения на границе раздела сред «жидкость – воздух» $u = v = 0$. Учет внешнего трения производится путем введения коэффициента проскальзывания $0 \leq c \leq 1$, который используется в граничных условиях на стенке трубы [7].

Исходные параметры для моделирования приведены в таблице.

Таблица

Параметры моделирования

Параметр	Значение
Значение тока в струе, А	0.4
Скорость потока, м/с	0,001
Электропроводность жидкости, См/м	100

Создание модели струи и последующее его разбиение на конечные элементы осуществлялось встроенными средствами используемой программы. Для построения 3D модели использован цилиндр диаметром 10 мм и длиной 100 мм. Материалом расчетной области струи принята вода. Свойства

материала приняты согласно встроенный библиотеке материалов Comsol. Ток в струе протекает в осевом направлении.

На рис. 2 представлена конечно-элементная модель струи. Ось струи жидкости для модели совпадает с осью X принятой системы координат.

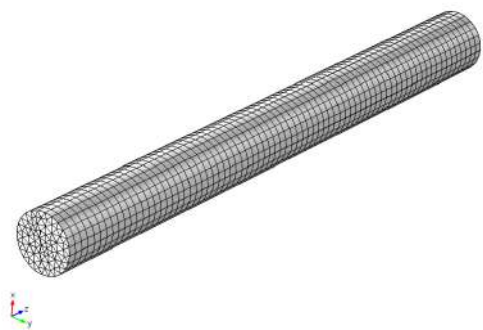


Рисунок 2. Конечно-элементная модель струи (окружающий воздух не показан)

Результаты моделирования для первой фазы истечения струи представлены ниже. На рис. 3 показано распределение векторов магнитного поля в струе, которое образуется при протекании тока. На рис. 4, 5 в двух проекциях приведено распределение сжимающих усилий в струе.

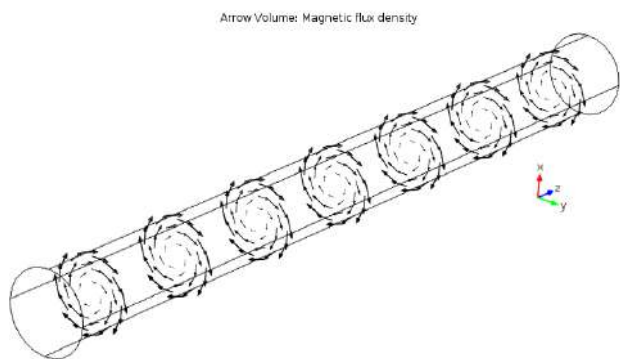


Рисунок 3. Распределения векторов магнитного поля в струе

Ток, протекающий в струе в продольном направлении, создает магнитное поле, диаграмма распределения силовых линий которого приведена на рис. 3. Стрелками показаны направление векторов индукции магнитного поля \vec{B} . При взаимодействии магнитного поля с протекающим током в струе образуются сжимающие усилия, которые направлены к его оси (рис. 4, 5). Также стоит отметить, что приведенные выше рисунки подтверждают,

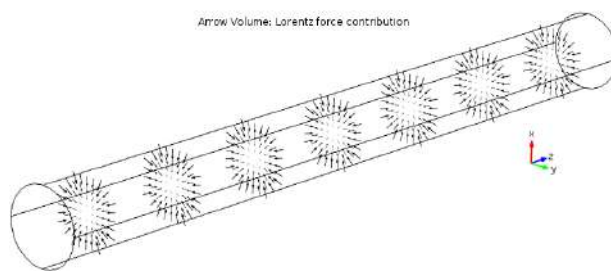


Рисунок 4. Диаграмма распределения векторов сжимающих усилий (сил Лоренца) в струе

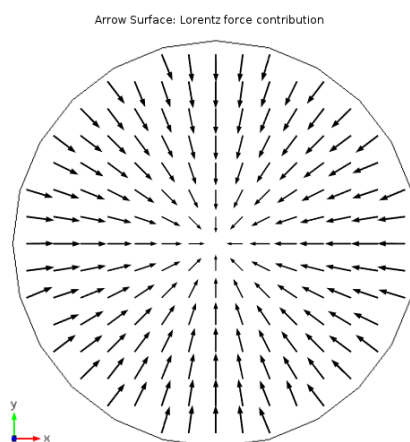


Рисунок 5. Диаграмма распределения векторов сжимающих усилий (сил Лоренца) в поперечном сечении струи

что построенная модель полностью адекватна. К примеру, распределение магнитное индукции (рис. 3) является именно таким, каким он должен быть согласно правилу «буравчика».

С помощью данной модели струи было проведено исследование влияния величины тока в струе на величину радиальной составляющей электромагнитных сил в струе и на гидродинамические параметры струи, в частности на давление в струе.

На рис. 6 приведены сравнительные кривые изменения вдоль поперечного сечения струи радиальной составляющей электромагнитных сил при токах в струе 0 А, 2 А и 4 А.

На рис. 7 приведены сравнительные кривые изменения давления вдоль поперечного сечения струи при токах 0 А, 2 А и 4 А. Симметричность модели позволяет привести кривые для половины модели струи.

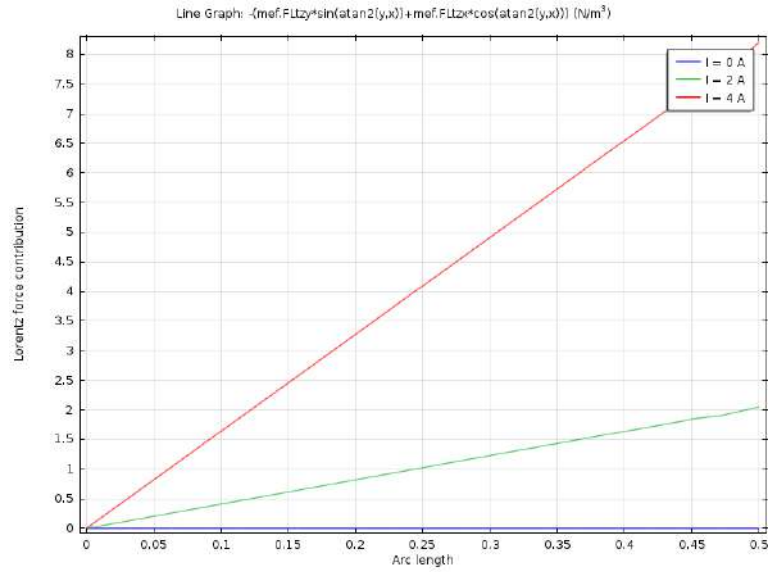


Рисунок 6. Сравнительные кривые изменения радиальной составляющей электромагнитных сил вдоль поперечного сечения струи при токах в струе 0 А, 2 А и 4 А

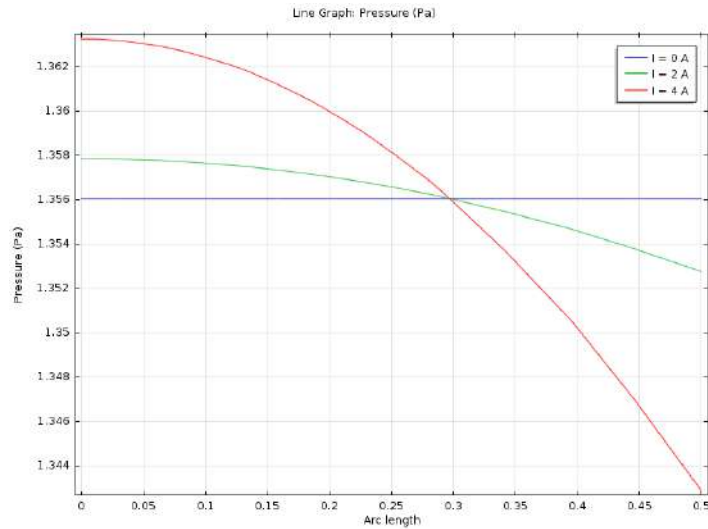


Рисунок 7. Сравнительные кривые изменения давления вдоль поперечного сечения струи при токах 0 А, 2 А и 4 А

На рис. 6 видно, что при нулевом токе электромагнитные силы в струе отсутствуют. При токах в струе 2 А и 4 А радиальная составляющая электромагнитных сил прямо пропорционально увеличиваются. При отсутствии в струе тока (кривая I = 0 А на рис. 7), давление вдоль поперечного сечения

струи постоянна, и при увеличении тока (кривые I = 2 А и I = 4 А на рис. 7) давление в центре струи под действием электромагнитных сил увеличивается, а вблизи к поверхности струи падает.

Таким образом, можно сделать общий вывод, что полученные результаты моделирования процессов,

происходящих при протекании в струе электропроводящей жидкости, в целом согласуются с теорией, в частности, с теоретическими выкладками, приведенными в работе [8]. Установлено, что электромагнитные силы, возникающие при протекании тока, прямо пропорционально зависят от значения этого тока, а также, что давление в струе имеет также зависимость от тока, протекающего в ней. Причем при увеличении тока значение давления в центре струи увеличивается, а вблизи к поверхности струи падает.

С использованием специализированной программной среды COMSOL Multiphysics выполнено исследование процессов, происходящих при протекании тока в струе электропроводящей жидкости. Разработана компьютерная модель связанных задач из областей гидродинамики и электротехники. Установлено, что полученные результаты в достаточной степени согласуются с теорией. Разработанная модель может быть применена при разработке и исследовании соответствующих МГД-устройств, где проводником электрического тока являются жидкие электролиты, ионизированный газ, расплавы металлов.

Список литературы

1. Кирко И. М., Кирко Г. Е. Магнитная гидродинамика. Современное видение проблем. - М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». Ижевский Институт компьютерных исследований, 2009. - 632 с.
2. Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом. - Л.: Энергия, 1970. - 271 с.
3. Патент РФ №2370720, F41B 015/04. Электрошокер/ Хайруллин И.Х., Исмагилов Ф.Р., Камалов Ф.А. – Оpubл. 20.10.2009. - Бюл. №29. – 5 с.
4. Patent US №5625525, F41B 9/00, F41B 015/04. Portable electromagnetic stun device and method/ Peter G., Wild, Jr., Norbert C. - Оpubл. 29.04.1997. - Бюл. №08/273571. - 8с.
5. Черняк В. Г., Суетин П. Е. Механика сплошных сред: Учеб. пособ.: Для вузов. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 352 с.
6. Башта Т.М., Руднев С.С., Некрасов Б.Б. и др. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: Учебник. 2-е изд., перераб. - М.: Машиностроение, 1982. - 423 с.
7. Зайцев А.В., Пеленко Ф.В. Моделирование течения вязкой жидкости в трубе/ Электронный научный журнал «Процессы и аппараты пищевых производств» - №1, 2012 – с. 163-168
8. Хайруллин И.Х. Электрогидродинамические процессы в струе электропроводящей жидкости при протекании тока/ И.Х. Хайруллин, Ф.А. Камалов// Вестник ВГТУ. – 2011. – Т. 7, №5. – С. 150-152.