

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Душкин Е.А., Хацаюк М.Ю.,
научный руководитель канд. техн. наук Хацаюк М.Ю.
Сибирский федеральный университет

В данной работе рассмотрены способы моделирования магнитогидродинамических процессов в жидком металле с учетом динамики свободной поверхности. Описывается метод перераспределения материальных констант для применения несвязанных программных пакетов. Рассмотрена область применения данного моделирования и некоторые результаты, полученные при моделировании данным методом.

I. Введение.

Проведение физического эксперимента, при проектировании металлургических установок, с целью выявления оптимальных параметров и режимов работы, связано с известной дороговизной оборудования и является, чаще всего, не рентабельно.

С появлением новых методов решения физических задач, а также с ростом производительности вычислительных систем появилась возможность уйти от постановки дорогостоящего эксперимента в сторону численных методов моделирования. Такое моделирование позволяет с достаточной точностью определить характеристики проектируемого оборудования на начальном этапе.

При проектировании магнитогидродинамического оборудования, с формированием свободной поверхности электромагнитным полем, связанных программных средств моделирования уже не достаточно, поэтому предлагается рассмотреть возможность применения не связанных программных средств, методов их взаимодействия и результаты моделирования.

II. Область применения.

Моделирование связанных физических процессов актуально в тех случаях, когда изменение одной физической величины влияет на изменение других физических величин, что в свою очередь влияет на сам источник изменений. В металлургии данная ситуация появляется при работе электротехнологических установок воздействующих на жидкий металл. Как правило, эти ситуации возникают при попадании свободной поверхности в зону концентрации электромагнитного поля, что в свою очередь вызывает изменение конфигурации электромагнитного поля и взаимный процесс с изменением геометрии свободной поверхности. Технологий при которых возникает данная ситуация достаточно много:

1. Индукционная плавка в холодном тигле;
2. Плавка во взвешенном состоянии;
3. Вертикальная и горизонтальная зонная плавка;
4. Литье в электромагнитный кристаллизатор.

Одновременно с этим, существуют МГД устройства, в который гидродинамическое поле скоростей так же влияет на конфигурацию электромагнитного поля ($Re_m \gg 1$). Как правило, это индукционные устройства, создающие бегущее или

вращающееся электромагнитное поле. При таком взаимном влиянии требуется постоянный перерасчет электромагнитных и гидродинамических процессов.

III. Особенность применения несвязанных программных пакетов.

Моделирование электромагнитных процессов в жидком металле требует учитывать несколько связанных физических процессов: электромагнитные, тепловые и гидродинамические. При этом каждая из этих задач решается различными методами и реализована в разных программах. Электромагнитная задача, достаточно точно, решается с применением метода конечных элементов, а остальные задачи с применением метода конечных объемов. Данные методы реализованы в программных продуктах: FLUX, Maxvel, ANSYS, Autodesk Simulation, STAR-CD, OpenFOAM и т.д.

При применении несвязанных программных пакетов для моделирования, в представлении связанных физических процессов, требуется выполнение каждого программного пакета на каждом шаге временной шкалы. Для этого применяют циклический запуск пакетов с применением определенных механизмов: стандартное пакетное выполнение, применение внутренних инструментов программ моделирования. Особо нужно отметить, что время выполнения одного шага итерации определяется только гидродинамической задачей.

Одним из способов данной реализации был представлен в работе SERGEJS SPITANS, ANDRIS JAKOVICS, EGBERT BAAKE, и BERNARD NACKE “Numerical Modeling of Free Surface Dynamics of Melt in an Alternate Electromagnetic Field: Part I. Implementation and Verification of Model”. Задачи реализованы с применением программных пакетов – ANSYS Classic и ANSYS CFX. В данной работе использовался механизм запуска программ с применением стандартного пакетного режима операционной системы. Для взаимодействия программ, при подготовке электромагнитной задачи, производилась реконструкция сетки на основе точечного распределения на свободной поверхности, полученного в решении гидродинамической задачи.

В данной статье предлагается рассмотреть другой способ взаимодействия программных пакетов. Во первых, решение задач осуществляется с использованием регулярной сетки, что позволяет выполнить подготовку электромагнитной задачи с применением перераспределения материальных констант в элементах (проводимость) при фиксированной сетке. Во вторых, решение гидродинамической задачи осуществляется программным пакетом ANSYS Fluent, так как данный пакет имеет расширенный внутренний механизм запуска дополнительных промежуточных функций.

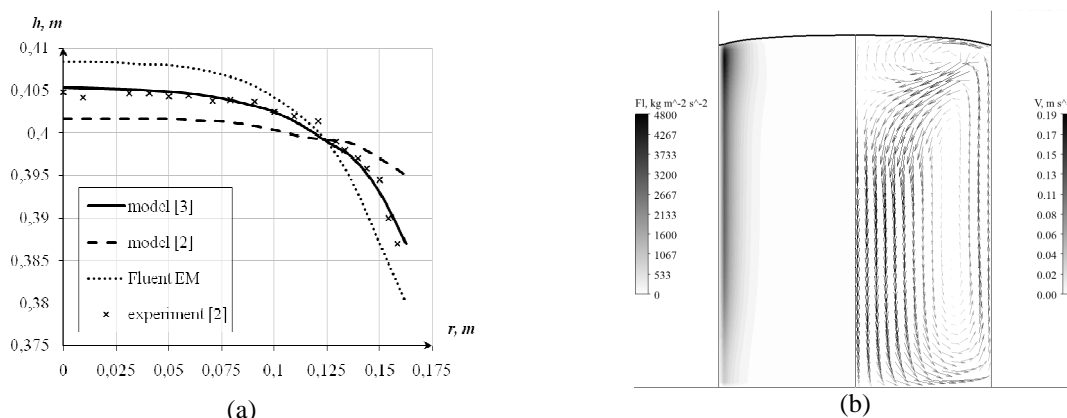


Рис. 1. Сравнение поверхности металла в результате моделирования и эксперимента (а), и визуализация результатов полученных на разработанной модели (б).

Для проверки описанных методов моделирования была выполнена верификация данных полученных при моделировании и постановке эксперимента, при плавке в холодном тигле, см. Рис. 1.

Сравнение результатов моделирования свободной поверхности, полученных с помощью предложенной модели, показало достаточную точность (отклонение от эксперимента менее 5%).

IV. Моделирование динамики свободной поверхности.

Моделирование гидродинамических (МГД) процессов с учетом динамики свободной поверхности, как было указано выше, возможно двумя методами. Рассмотрим результаты моделирования с применением метода перераспределения материальных констант в элементах.

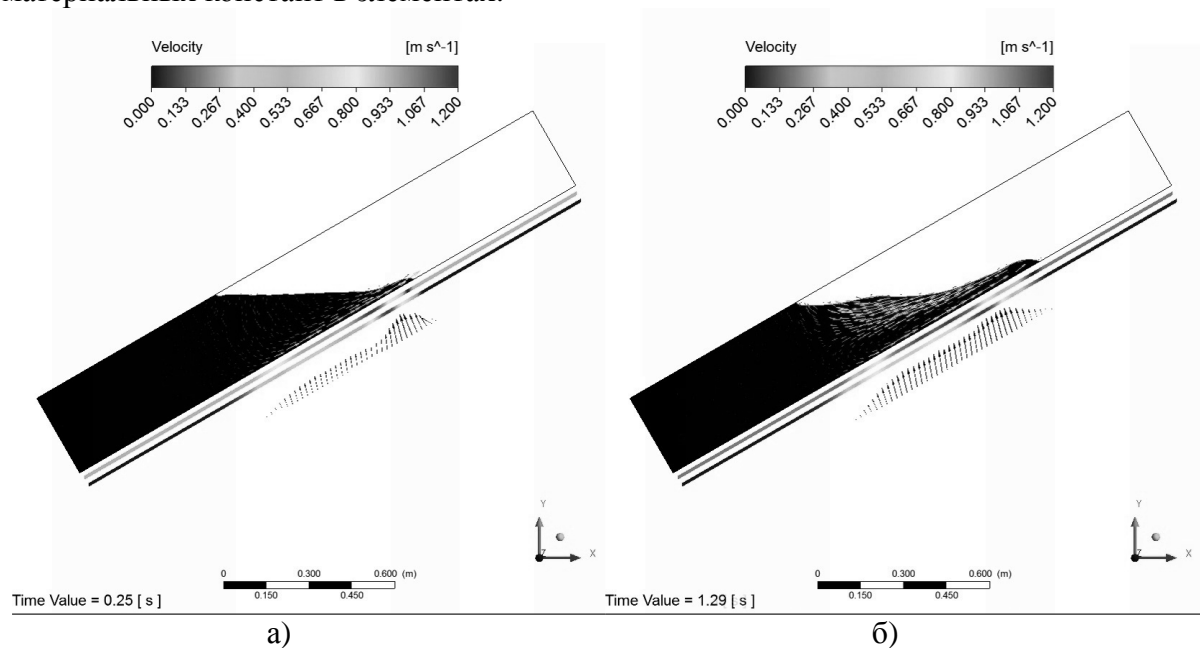
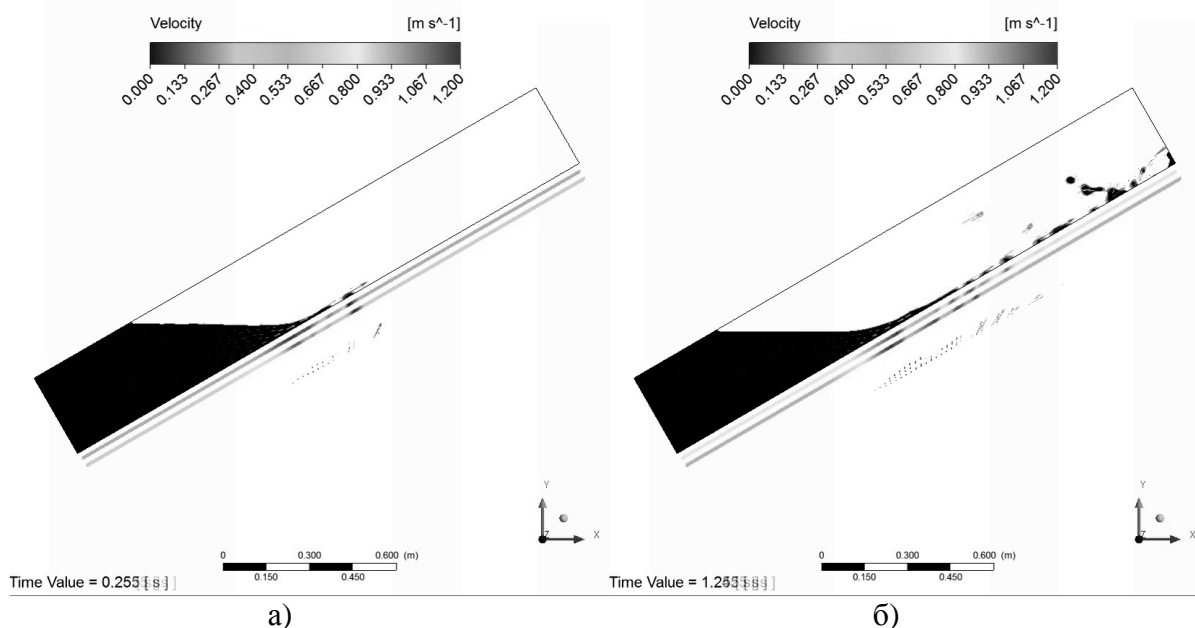


Рис.2. Движение металла в МГД дозаторе: а) ~0,25 с, б) ~1,25 с.

На Рис.2 показаны результаты моделирования подъема жидкого металла по наклонной плоскости за счет действия на него бегущего электромагнитного поля линейной индукционной машины. Такие эффекты используются при дозировании жидкого металла из стационарных печей. Под металлом видно векторное поле электромагнитных сил действующих на поверхности жидкого металла, а в самом металле векторное поле скорости жидкости. На данной модели можно провести проверку ряда характеристик дозатора, расположение его в пространстве, а также различные режимы работы.



а)

б)

Рис.3. Движение металла в МГД дозаторе.
 Низкий уровень металла: а) ~0,25 с, б) ~1,25 с.

Рассмотрим один из режимов работы данного дозатора, например снижение уровня металла. На Рис.3. видно, что в результате низкого уровня металла, дозатор выбрасывает жидкий металл, разделяя его на капли. Для решения данной проблемы требуется изменения ряда характеристик МГД дозатора.

Стоит заметить, что в связи с большим количеством отдельных капель, в данном случае моделирования, метод зарубежных коллег не подходит, в связи с проблемой идентификации областей ограниченных полученными поверхностями.

V. Заключение.

Показан новый метод математического моделирования с учетом динамики свободной поверхности. Данный метод примечателен тем, что учитываются все связанные физические процессы, в том числе и поле скоростей в электромагнитном поле, что отсутствует в модели зарубежных коллег.

Применение такого инструмента открывает широкие возможности для инженерных решений при проектировании современного литейного оборудования, например: установок для непрерывного литья слитков малого поперечного сечения (диаметром 5–15 мм) в электромагнитном поле, плавки в холодном тигле для получения сплавов высокого качества, МГД дозаторов для разлива металла в формы и т.п.

Тем не менее, математическое моделирование не исключает полного отказа от эксперимента, но значительно снижает материальные и временные затраты на данный этап разработки.