

ОТЗЫВ

на диссертационную работу докторанта физико-технического факультета Карагандинского университета им. Е.А. Букетова специальности 6D060400 – Физика
Шалтакова С.Н.

Разработка научных основ и методов исследования теплофизических и структурных свойств металлических расплавов с целью повышения качества продукции

1 Актуальность темы исследования.

Исследований вязкости расплавленных систем, как их наиболее структурно-чувствительной характеристики, следует из необходимости более глубокого познания теории жидкого состояния и установления не только количественных, но и качественных закономерностей теории. Известно, что в области исследования структурных свойств твердых структур создан богатый для использования материал с применением квантовой физики и химии. Однако, о структуре жидких расплавленных систем этого сказать нельзя, в этом аспекте исследования с применением физики жидкого состояния, физической химии, математического и компьютерного моделирования, теории металлургических процессов являются актуальными.

Несомненно в области накопления и расширения структурно-динамических и термодинамических параметров состояния расплавов, в последнее десятилетия достигнут существенный прогресс, когда с развитием мощной вычислительной техники параллельно разрабатывались уникальные программные комплексы. В настоящее время компьютерное моделирование стало одним из наиболее совершенных инструментов для изучения и прогнозирования жидких расплавленных систем.

В связи с этим перед диссертантом поставлена задача разработки физико-математической модели движения расплава. Диссертантом представлено решение уравнений гидродинамики, для исследования которых применены корреляционные функции коэффициентов переноса, радиальная функция распределения атомов, межатомные потенциалы. Особое внимание уделено исследованию вязкости расплавленных систем, так как вязкость тесно связана с физическими параметрами уравнений гидродинамики расплавов и, как показано в данной работе, является определяющим фактором для окончательного решения уравнений Навье – Стокса.

Актуальность исследований очевидна, заключается в объективно назревшей необходимости внедрения физико-математических методов моделирования структурных свойств расплавленных металлов с целью разработки новых технологий и получения качественной продукции.

2 Степень обоснованности и достоверности результатов, выводов, заключения- сформулированных в диссертации.

Диссертация изложена на 111 странице текста, содержит 28 рисунков и 14 таблиц, состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованных источников из 134 наименований, 3 приложений.

В первом разделе проанализированы и исследованы уравнения гидродинамики, учитывающие диссипационные процессы в расплавах. Диссертантом получены формулы для расчета коэффициентов переноса (динамическая, объемная и сдвиговая вязкости, коэффициенты диффузии, теплопроводности, термодиффузии) через корреляционные функции. Вычисление этих величин, в случае расплавов, вызывает ряд трудноразрешимых проблем, затрагивающих атомно-молекулярную природу расплавленных систем. В связи с этим диссертантом приводятся различные подходы к вычислению корреляционных функций, а также их влияние на решение уравнений Навье – Стокса. В принципе, уравнения Навье – Стокса могут быть решены дробными методами, однако, нестационарность систем этих уравнений наталкивает исследователей на разные упрощенные методы. Это одна из проблем, но существует другая сторона данной задачи.

Во втором разделе предложены разработанные диссертантом физико-математические модели стационарных и нестационарных уравнений гидродинамики, методы аппроксимации уравнений гидродинамики. Установлено, что решение их сопровождается сложными проблемами. Для решения этих проблем выбран метод расщепления. При рассмотрении разностных схем расщепления для краевых задач выбор искомым функций определяется формой граничных условий. Диссертантом составлена компьютерная программа численного решения уравнений гидродинамики для металлических расплавов относительно коэффициентов переноса, в частности, объемной и сдвиговой вязкостей. Проведено тестирование программы по решению уравнения Пуассона для первой и второй краевых задач Дирихле.

В третьем разделе представлен разработанный автором метод компьютерного моделирования уравнений гидродинамики, как один из наиболее конструктивных способов изучения физических свойств расплавов. Это объясняется большим теоретическим и прикладным значением полученной информации относительно коэффициентов переноса, в частности, объемной и сдвиговой вязкостей. Причем основной задачей такой статистической теории расплавов является установление связи между свойствами молекул и межатомным потенциалом, а также между термодинамическими и кинетическими свойствами расплавленных систем. Автором работ получены расчетные показатели, график функции атомного распределения для жидкого олова и формула для вычисления полной энергии.

Построен алгоритм вычисления структурных свойств расплавленных систем с применением корреляционных функций и построена физико-

математическая модель течения расплава на линии непрерывной прокатки «Саусвайер – 2000» медной катанки. Изначально автор рассматривает процесс, когда расплав движется в «плоском канале», а в дальнейшем в «наклонном желобе». Вторая задача более сложная, при этом угол наклона нижнего желоба, равен $\angle \alpha = 3^\circ$. Численная схема и программа составлена в среде Visual C++ 6.0 (Си++) и выбран постоянный размер шагов $\Delta x = \Delta y = 0,02$, $\Delta t = 0,001$.

Мониторинг разработанной программы для вычисления профилей скоростей v и u движения расплава в плоском канале показывает, что во входной ячейке сетки в результате погрешности вычислений происходит 8-8,9% потери массы, 4,2-5,6% потери, если уменьшить размеры ячейки в 10 раз. При движении расплава максимальная скорость наблюдается на центральной линии течения, а рассчитанная скорость на 13-15% выше экспериментальной и составляет $\bar{v} = 0,63 \text{ м/с}$.

Диссертантом построено распределение скоростей течения в нижнем желобе при температурах, начиная с температуры кипения меди 1358К до температуры 1638К с постоянным шагом в 40К. Мониторинг полученных изотопов показал, что при более высоких температурах происходит тепловое разрыхление, структура расплава становится неоднородной. Следовательно, процесс становится технологически нецелесообразной, так как образуются механические дефекты промышленного образца.

Таким образом, предлагаемый авторами метод расчета течения медного расплава может быть использован в промышленном оборудовании при розливе меди из анодных печей, конвертеров, на линии непрерывного литья и прокатки медной катанки.

Во четвертом разделе диссертантом методами физико-химического анализа впервые определены основные свойства вязкости расплавленных систем с учетом степени ассоциации элементарных кластеров для Cu, Zn, Al, Sn, Pb, Fe. Проведен сравнительный анализ актуальных моделей вязкости расплавов и ее зависимости от температуры.

С целью предварительной проверки применимости концепции хаотизированных частиц для независимого обоснования диссертантом используется общеизвестные экспериментальные и аппроксимационные данные, относящиеся к наиболее представительным металлам – литию, цезию и серебру. С помощью известных уравнений рассчитана кинематическая вязкость, проведен сравнительный анализ полученных результатов и построены графики зависимости вязкости лития, цезия и серебра от температуры. На основании проведенного мониторинга четырех моделей на примере некоторых металлов первой группы точно определена модель, адекватно описывающего температурную зависимость. Проанализирована формула расчета вязкости для трех видов частиц, на всем интервале от точки плавления до точки кипения. Дальнейшие расчеты получены для меди, цинка, алюминия, олова и железа. Получены высокие значения коэффициентов корреляции для предлагаемой модели

вязкости, что указывает на их функциональный характер и рекомендованы расчетные алгоритмы для группы металлов.

Весь диссертационный материал систематизирован и изложен в рамках практико-ориентированного исследования. Объем и круг теоретического и эмпирического материала диссертационной работы определен характером источников исследования.

Поставленная цель исследования - разработка физико-математической модели уравнений гидродинамики; построение распределения профиля скоростей течения расплавленных систем – достигнута.

Поставленные задачи исследования - разработка и построение физико-математической модели уравнений гидродинамики расплавленных систем, обоснование корреляционных функций вязкости с точки зрения квантово-статистического метода, установление взаимосвязи корреляционных функций с функциями радиального распределения; построение численной схемы для решения уравнений гидродинамики и алгоритма регуляризации уравнений движения несжимаемого вязкого потока путем ε – аппроксимации – решены полностью.

Решением этих задач определяется место данной работы в решении научной проблемы по развитию исследований теплофизических характеристик расплавов. Докторантом полностью раскрыта тема работы, достигнута поставленная цель и на основании анализа возможностей программных средств, универсальных пакетов прикладных программ и численных методов авторам работ решены поставленные задачи.

3. Степень новизны научных результатов и выводов, сформулированных в диссертации.

Диссертантом разработан и представлен в диссертации новый алгоритм построения физико-математической модели течения несжимаемых расплавленных систем; разработана новая итерационная схема решения стационарных и нестационарных уравнений Навье – Стокса; построена схема распределения скоростей течения расплавленных систем и интегрирования уравнений гидродинамики, позволяющая прогнозировать и оптимизировать технологические параметры литья металлических расплавов; впервые с учетом степени ассоциации кластеров для Cu, Zn, Al, Sn, Pb, Fe определены основные свойства вязкости расплавленных систем.

Результаты диссертационных исследований сформулированы в разделах, описывающих научную новизну и практическую значимость работы, в заключении с указанием их теоретической и прикладной значимости и в виде выводов в каждой главе. Важно отметить, что мониторинг выполненных теоретических научных разработок, методов исследований устанавливает их обоснованность и достоверность сопоставлением результатов расчетов параметров течения расплава для

технологического оборудования линии непрерывной прокатки медной катанки Саусвайер - 2000.

О высокой степени научно-практической значимости и востребованности диссертационных исследований свидетельствует

- опубликование 3-х статей в журналах науко-метрической базы Scopus: «Archives of Control Sciences» с процентилем 71, «Eurasian Physical Technical journal» с процентилем 15, «Bulgarian Chemical Communications» с процентилем 15.

- опубликование 4-х статей в изданиях, рекомендованных КОКСОН МОН РК: Труды университета, Новости науки Казахстана и 2 статьи в Вестнике Карагандинского университета.

- опубликование 5-ти докладов в сборниках международных научно-практических конференций (с личным участием).

- получение патента №35062 «Инструментальный способ исследования сложного вещества на плотность» от 14.05.2021.

- получение СИС №2348 «Физико – математические вопросы гидродинамики расплавов» от 10 марта 2019г.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа Шалтакова С.Н. соответствует нормативным требованиям, предъявляемым к диссертациям PhD, а ее автор заслуживает присвоения степени доктора PhD по специальности **6D060400 – Физика**.

Научный консультант,
к.т.н., профессор

Б.Р. Нусупбеков

