

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Синькова Константина Федоровича
«Развитие гидродинамических моделей многофазных течений в трубопроводах»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Моделирование течений многофазных жидкостей в трубопроводах является востребованной задачей во многих областях научных исследований и промышленных приложениях. Можно, например, упомянуть проблемы, связанные с безопасностью ядерных реакторов, а также с добычей и транспортировкой углеводородов в нефтегазовой индустрии. Основы теории многофазных течений были положены в середине прошлого века, и до сих пор это направление механики жидкостей активно развивается как в области построения фундаментальных моделей и их исследования, так и решения практических прикладных задач. В настоящее время имеется целый ряд коммерческих программ, используемых для предсказательного моделирования газожидкостных течений в длинных трубопроводах, но, тем не менее, имеется большое число вопросов, требующих дальнейших исследований. Задачи, связанные с переносом частиц потоком жидкости в трубах также востребованы в нефтегазовой промышленности, и особое внимание уделяется здесь описанию процессов, в которых компоненты смеси имеют сложную реологию.

Исследование, представленное в диссертации К. Ф. Синькова, сочетает в себе теоретическую формулировку и исследование моделей течений смесей жидкости и газа и жидкости и твердых частиц, разработку численных методов решения определяющих уравнений сформулированных моделей, и решение тестовых задач, демонстрирующих применимость моделей к решению конкретных проблем. Таким образом, можно заключить, что тема диссертационной работы, несомненно, является актуальной.

Диссертация состоит из введения, двух глав, заключения, списка литературы и двух приложений.

Во **введении** обоснованы актуальность, новизна и практическая значимость исследования. Сформулированы также цели и задачи работы, положения, выносимые на защиту, и описана структура диссертации.

Первая глава изучает модель дрейфа для нестационарных газожидкостных течений в длинных трубопроводах. В первом разделе приведен обзор литературы и известных результатов, относящихся к модели дрейфа. Во втором разделе получены условия, при которых асимптотические уравнения модели дрейфа в двух формулировках следуют из законов сохранения, исследованы характеристические свойства системы уравнений модели дрейфа и установлены условия на замыкающие соотношения, обеспечивающие гиперболичность системы в диапазоне параметров, интересном с практической точки зрения. В заключительном, третьем разделе главы на примере опубликованных в литературе экспериментальных данных проведено численное исследование пробкового режима газожидкостного течения в W-образном трубопроводе.

Результаты первой главы представляют практический интерес для создания промышленных симуляторов одномерных нестационарных двухфазных течений. Установленные условия, при которых модель дрейфа следует из законов сохранения, позволяют очертить область применимости симуляторов, основанных на данной модели. Условия гиперболичности, полученные в работе, ограничивают класс замыкающих соотношений, допускающий корректную постановку задачи Коши, и указывают область практических задач, которые могут быть корректно решены с помощью симуляторов, основанных на модели дрейфа. Численное исследование задачи о течении в трубе W-образной конфигурации демонстрирует, что модель дрейфа может применяться для описания пробковых течений в трубах сложной геометрии. Показано, что можно подобрать настроечные параметры модели для воспроизведения качественных особенностей пробкового течения и с хорошей точностью достичь количественного соответствия экспериментальных данных.

Во **второй главе** рассматриваются задачи, связанные с переносом частиц потоком жидкости в трубопроводах. В первом разделе приведен обзор литературы по гидравлическому транспорту. Во втором разделе предложена модель нахождения распределения твердой фазы по сечению для течения в трубе суспензии осаждающихся частиц. В третьем разделе построена осесимметричная стационарная модель транспорта и

перехода в пластическое состояние пронизаемого упругого тела, переносимого в вертикальной трубе потоком несжимаемой вязкой жидкости со степенной реологией. Для случая концентрического транспорта нейтрально-плавучей капсулы в ньютоновской жидкости и турбулентном режиме течения проведено обобщение известной модели на случай больших чисел Рейнольдса.

Модели переноса частиц, предложенные в диссертации, могут быть использованы при проектировании систем гидравлического транспорта в трубах для определения перепадов давления и скорости движения тел при подобном методе транспортировки. Проведено параметрическое исследование, позволяющие оценить влияние условий эксплуатации и свойств несущей жидкости на характеристики процесса. Изучена зависимость предельного радиуса длинного цилиндрического тела от предельного сдвигового напряжения материала скелета, при котором скелет полностью остается в упругом состоянии. Предложенное обобщение модели транспорта капсулы в турбулентном режиме течения, позволяет, в отличие от известных моделей, опирающихся на степенные профили скорости в зазоре, справедливые только для определенных значений чисел Рейнольдса, определить коэффициент сопротивления и скорость движения капсулы для сколь угодно больших чисел Рейнольдса. Предсказания модели хорошо согласуются с экспериментом.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

В **приложениях А и В** соответственно приведены используемые в работе замыкающие соотношения модели дрейфа и описаны аналитические решения двух задач полученные автором для верификации численного алгоритма решения уравнений модели дрейфа.

Результаты диссертационной работы получены на основе современной теории механики многофазных течений и методологии разработки численных методов решения дифференциальных уравнений. Полученные модели и вычислительные методы и программы верифицированы на тестовых задачах. Автор проводит сравнение полученных результатов с известными и полученными им аналитическими решениями и экспериментальными данными. Результаты работы являются новыми, их обоснованность и достоверность не вызывает сомнений.

По тексту и содержанию диссертации имеется несколько **замечаний**:

1. Используемые в работе численные методы описаны недостаточно полно, мало внимания уделено обоснованию выбора метода SIMPLE и описанию дискретизации отдельных уравнений (раздел 1.3). Недостаточно подробно описан способ получения уравнения для поправки давления.
2. Раздел 1.4 о пробковом режиме течения следовало бы дополнить более подробным анализом результатов моделирования и выяснением причин, по которым точность результатов моделирования варьируется в зависимости от условий эксперимента.
3. Полученные в разделе 2.3.1 решения сопоставляются с известными для некоторых частных случаев в литературе результатами. Прямая верификация построенной модели на основе экспериментальных данных в этой части работы отсутствует. Следовало бы привести сравнение результатов расчетов по предложенной модели гидравлического транспорта с измерениями в лабораторных трубопроводах.

Указанные замечания носят рекомендательный характер и не умаляют общей положительной оценки и высокого научного уровня работы. Результаты работы докладывались на российских и международных конференциях и опубликованы в 13 научных работах, в том числе в 2 статьях в журналах из списка ВАК РФ.

Диссертационная работа Константина Федоровича Синькова «Развитие гидродинамических моделей многофазных течений в трубопроводах» является законченной научно-исследовательской работой. Содержание автореферата достаточно полно отражает результаты, изложенные в диссертации. Диссертация полностью соответствует специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы и отвечает требованиям Министерства образования и науки РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, установленным «Положением о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным Постановлением правительства РФ от 24.09.2013 № 842. Автор диссертации Синьков Константин Федорович безусловно заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент, д.ф.-м.н.

главный научный сотрудник лаборатории Дифференциальных уравнений и смежных
вопросов анализа ИМ СО РАН,

«10» октября 2016 г.



 Е.И. Роменский

Подпись д.ф.-м.н., главного научного сотрудника лаборатории Дифференциальных
уравнений и смежных вопросов анализа ИМ СО РАН Роменского Е.И. заверяю

Руководитель организационного отдела ИМ СО РАН



Н.З. Киндалева

Роменский Евгений Игоревич

д.ф.-м.н., профессор,

главный научный сотрудник лаборатории Дифференциальных
уравнений и смежных вопросов анализа

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Института математики им. С.Л. Соболева Сибирского отделения

РАН; <http://www.math.nsc.ru/>,

Адрес: Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, дом 4.

Телефон: +7(383)3297657

Эл. почта: evrom@math.nsc.ru