

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МЕХАНИКИ  
им. А.Ю. ИШЛИНСКОГО  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИПМех РАН)**

пр. Вернадского, д.101, к.1, г. Москва . 119526  
Тел. (495) 434-00-17 Факс 8-499-739-95-31  
ОКПО 02699323, ОГРН 1037739426735  
ИНН/КПП 7729138338/772901001

**УТВЕРЖДАЮ**  
Директор ФГБУН ИПМех РАН  
акад. РАН, д. ф.-м. н., профессор

31.10.2016 № 11504/01-21412-57



С. Т. Суржиков

На № \_\_\_\_\_

31.10. 2016 г.

### ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук на диссертационную работу *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*.

Интерес к моделированию многофазных течений в трубах вызван большим количеством прикладных задач в различных отраслях промышленности, связанных с такими течениями. В диссертации Синькова Константина Федоровича рассматриваются модели газожидкостных течений, течений суспензий осаждающихся частиц и гидравлического транспорта твердых тел в трубопроводах. Тема исследования актуальна к примеру для нефтегазовой отрасли, где газожидкостные течения в трубах широко распространены. Прогресс в моделировании таких течений продолжается в настоящее время как в направлении построения моделей, так и создания инструментов моделирования и решения частных прикладных задач. Задачи о гидравлическом транспорте и переносе твердых примесей в трубах также встречаются в нефтегазовых приложениях, при этом на практике в качестве несущей среды используются не только ньютоновские, но и жидкости со сложным реологическим поведением.

## **Содержание диссертации.**

Диссертация состоит из введения, двух глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Общий объем составляет 130 страниц, в работе приведены 25 рисунков и 7 таблиц, в списке литературы содержится 129 наименований.

**Во введении** представлены обоснование актуальности и новизны, практической значимости исследования, цели и задачи работы, положения, выносимые на защиту, и описание структуры диссертации.

**Первая глава** посвящена модели дрейфа для нестационарных газожидкостных течений в длинных трубопроводах. В первом разделе приведен литературный обзор, обозначено место, занимаемое моделью дрейфа в ряду различных моделей газожидкостных течений в трубах, отмечены известные результаты о математических свойствах системы уравнений модели дрейфа и описан класс прикладных задач о пробковом режиме течения, вызванном геометрией трубопровода.

Во втором разделе приведен последовательный вывод модели дрейфа из законов сохранения, записанных в многоконтинуальном приближении, для частной постановки о пузырьковом режиме течения и получены условия, при которых она может быть получена как асимптотический законов сохранения. Найденные условия позволяют установить область применимости модели дрейфа. Исследованы характеристические свойства системы уравнений модели и установлены требования к замыкающему соотношению для проскальзывания фаз, гарантирующие гиперболичность системы и корректную постановку начально-краевой задачи для нее в области параметров, встречающейся на практике.

В заключительной разделе главы численно исследуется задача о пробковом режиме газожидкостного течения в W-образном трубопроводе. Приведено краткое описание алгоритма численного решения уравнений и сравнение результатов расчетов с аналитическими решениями тестовых задач, полученными автором. Подробно рассмотрен вопрос сеточной сходимости численных решений. Путем подбора параметров замыкающего соотношения модели дрейфа достигается совпадение

результатов моделирования с экспериментом. Предсказательные возможности модели дрейфа с измененными параметрами замыкающего соотношения проверяются сравнением с экспериментальными данными, не использованными при подборе.

Результаты первой главы могут быть использованы на практике при создании программ симуляторов нестационарных газожидкостных течений в скважинах и трубопроводах.

**Во второй главе** рассматриваются задачи, связанные с переносом твердой фазы потоком жидкости в трубах. В первом разделе приведен обзор литературы по гидравлическому транспорту. Во втором разделе предлагается модель образования осадка при течении осаждающейся суспензии в трубе. В третьем разделе построена полуаналитическая осесимметричная стационарная модель гидравлического транспорта проницаемого упругого тела, переносимого в вертикальной трубе вязкой степенной жидкостью. Проведено исследование зависимости перепада давления и скорости движения тела от определяющих параметров задачи. Предполагается, что напряжения в твердом скелете тела сравнимы с его предельным сдвиговым напряжением, и исследуется зависимость предельного радиуса тела, при котором не начинается пластическое течение скелета от предельного сдвигового напряжения, общего расхода, плавучести тела и свойств несущей жидкости.

Приведено обобщение известной модели концентрического транспорта нейтрально-плавучей капсулы в ньютоновской жидкости и турбулентном режиме течения в зазоре на случай высоких чисел Рейнольдса. Проведено сравнение и получено хорошее согласие результатов расчетов с экспериментальными данными.

Предлагаемые в работе модели могут быть использованы при проектировании систем гидравлического транспорта в трубах.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

**В приложения** вынесены описания замыкающих соотношений модели дрейфа и аналитические решения, построенные автором для верификации реализации численного алгоритма решения уравнений модели дрейфа.

Полученные результаты являются новыми, их достоверность не вызывает сомнений. Обоснованность положений и выводов в диссертационной работе обеспечена использованием классических моделей механики сплошных сред. Для численного решения уравнений рассматриваемых моделей используются хорошо апробированные алгоритмы, отдельное внимание уделено тестированию разработанных реализаций алгоритмов и сходимости численных решений по сетке. Автор проводит сравнение полученных результатов с известными и полученными им аналитическими решениями и экспериментальными данными. Выводы сформулированы в соответствии с решением задач, рассматриваемых в диссертационной работе.

### **Замечания по диссертации:**

1. Раздел 1.3 следовало бы дополнить количественным анализом сравнения результатов численных расчетов с аналитическими решениями тестовых задач, как это было сделано для сравнения с экспериментальными данными в разделе 1.4. Описание рис. 1.6 и 1.7, на которых представлено сравнение с аналитическими решениями, недостаточно подробно.
2. В подписи к рис. 2.6, на котором приведено сравнение результатов расчетов с опубликованными данными, приведен только диапазон значений индекса течения и не указано, с каким шагом индекс течения меняется для изображенного семейства кривых.
3. В разделе 2.3 не рассматривается влияние возможного наклона трубы по отношению к направлению силы тяжести на характеристики транспорта тела. При движении отрицательно плавучего тела в наклонной трубе может иметь место контакт со стенкой трубы, что приведет к значительному изменению распределения напряжений и, соответственно, условий, при которых скелет не будет переходить в пластическое состояние.

## **Заключение.**

Диссертация Синькова К. Ф. является законченной, актуальной и достоверной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Научные положения и результаты работы опубликованы в 13 научных трудах, в том числе в 2 статьях в журналах из списка ВАК РФ. Работа грамотно и аккуратно оформлена, автореферат верно отражает содержание диссертации.

Указанные замечания носят скорее рекомендательный характер и не снижают ценности и высокой оценки работы.

Результаты работы могут быть востребованы в фундаментальных и прикладных исследованиях в РГУНГ им. И. М. Губкина, ИГ им. М. А. Лаврентьева СО РАН, ИТ им. С. С. Кутателадзе СО РАН, проектных организациях нефтегазовой отрасли и других институтах, занимающихся смежной тематикой.

Диссертационная работа Синькова Константина Федоровича «Развитие гидродинамических моделей многофазных течений в трубопроводах» соответствует специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы и требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям пунктом 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ от 24.09.2013 №842, а ее автор достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертационная работа Синькова К. Ф. заслушана, а отзыв на нее обсужден на семинаре по прикладной механике сплошных сред лаборатории механики сложных жидкостей Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук под руководством д.ф.-м.н. А. Н. Рожкова, протокол от 04.07.2016.

Работа получила положительную оценку и рекомендована к защите по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы. Отзыв составлен

ведущим научным сотрудником лаборатории механики сложных жидкостей,  
доктором физико-математических наук, профессором Теодоровичем Э. В.

Ведущий научный сотрудник  
лаборатории механики сложных жидкостей  
Института проблем механики  
им. А. Ю. Ишлинского РАН,  
д. ф.-м. н., профессор



Теодорович  
Эдуард Владимирович

ФГБУН Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского  
Российской академии наук,  
119526, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1  
Тел.: +7 (916) 559-82-66  
E-mail: [teodor@ipmnet.ru](mailto:teodor@ipmnet.ru)