

ОТЗЫВ

на диссертацию Е.С. Асмолова «Поперечная миграция малых сферических частиц в сдвиговых и нестационарных потоках», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Интерес к обтеканию частиц пространственно неоднородными и нестационарными потоками связан в первую очередь с исследованием двухфазных течений (суспензий, газовзвесей и т.п.) в каналах, трубах и пограничных слоях. Однако этими классами течений интерес к проблеме не исчерпывается. Во многих двухфазных потоках локально дальнейшее поле течения несущей фазы около отдельной частицы нельзя даже приближенно считать пространственно однородным и квазистационарным. Например, в течениях с мелкомасштабной вихревой структурой, когда линейный масштаб вихрей имеет порядок размера частиц; в осциллирующих или турбулентных течениях, в которых временной масштаб имеет порядок времени динамической релаксации частиц. В названных и многих других ситуациях для адекватного описания поведения примеси нельзя ограничиться в модели силового взаимодействия фаз только силой аэродинамического сопротивления частиц. Проблема адекватного моделирования взаимодействия несущей среды с дисперсными включениями является одной из ключевых в гидромеханике двухфазных течений. При обтекании частиц локально пространственно неоднородными и нестационарными потоками появляются поперечные силы, проявляются эффекты нестационарности, эффекты памяти, эффекты присутствия стенок и т.п. Диссертационная работа Е.С. Асмолова посвящена как раз развитию данного направления в теории двухфазных течений, поэтому тема диссертационного исследования, бесспорно, **актуальна**.

Чтобы лучше понять и оценить, что сделал автор диссертации и в чем собственно новизна и значение его работы, я очень кратко затрону предысторию. Первой теоретической работой, в которой было получено выражение для поперечной силы, действующей на частицу в безграничном

сдвиговом потоке, была работа Сэфмана (Saffman). Опубликована она была в 1965 году, и ее целью было объяснить наблюдаемую в эксперименте поперечную миграцию частиц в течении Пуазейля. Впоследствии его результат был назван силой Сэфмана (кстати, в первоначальной статье была допущена неточность в вычислении интеграла, которая позже, в 1968 году, была исправлена самим автором). Это совершенно классический результат, как, например, сила Стокса. Сэфман при решении своей задачи использовал метод сращиваемых асимптотических разложений и трехмерные преобразования Фурье для уравнений Озее-на. Однако он использовал довольно сильные ограничения на соотношение числа Рейнольдса обтекания частицы и числа Рейнольдса, связанного с профилем сдвига скорости невозмущенного потока. В 1977 году появилась статья Вассэ и Кокса (Vasseur, Cox), в которой рассматривалась задача о влиянии стенки на поперечную силу в сдвиговом потоке при малых числах Рейнольдса в ситуации, когда стенка находится в стоксовой области течения, и было построено решение во втором приближении по числу Рейнольдса для уравнений Стокса с правой частью. Рассмотрение задачи при менее ограничительных допущениях оказалось настолько сложным, что наступил длительный, примерно двадцатипятилетний, период затишья. Правда за это время важность проблемы не то, что не уменьшилась, а даже возросла, в частности, в связи с исследованием двухфазных течений в пограничных слоях и турбулентных потоках. В самом конце 1980-х – начале 1990-х годов в этой области начался ренессанс, и именно в этот период появились первые публикации диссертанта. Они были посвящены определению поперечных сил на частицу в более общих по сравнению с Сэфманом и Коксом случаях. Здесь надо сказать, что ни в Советском Союзе, ни в России никто, кроме автора диссертации, этим направлением не занимался. Позже полученные результаты были применены к исследованию поперечной миграции частиц в пограничных слоях и течениях в каналах. По теме диссертации автором опубликовано 17 статей в ведущих российских и международных журналах (6 статей в "Известиях РАН, Механика жидкости и газа", 5 статей в "Journal of Fluid Mechanics.", 3 статьи в "Physics of Fluids"; 2 статьи в "International Journal of Multiphase Flow", 1 Статья в Ученых записках ЦАГИ"). Результаты докладывались на 12 национальных и международ-

ных форумах, в том числе на двух международных конгрессах по теоретической и прикладной механике и трех европейских конференциях по гидромеханике.

Результаты решения всех рассмотренных в диссертации задач являлись на момент их опубликования совершенно новыми и приоритетными, в настоящее время они признаны мировым научным сообществом. Так, только статья [9] из списка публикаций автора в автореферате цитируется в более чем 200 работах различных авторов (данные по базе Web of Science), в основном, зарубежных. Я уверен, что результаты Е.С. Асмолова в конце концов станут такими же классическими, как и работа Сэфмана.

Теперь о квалификационной оценке работы.

Актуальность была отмечены выше.

Научная новизна.

Все результаты диссертации на момент их опубликования являлись пионерскими. Частных результатов очень много, они перечислены и в диссертации, и в тексте автореферата, и здесь нет необходимости их повторять. Если же говорить более глобально, то новизна состоит, *во-первых*, в развитии метода сращиваемых асимптотических разложений применительно к проблеме обтекания сферических частиц сдвиговыми и нестационарными потоками вязкой жидкости (газа) при малых числах Рейнольдса; *во-вторых*, в решении этим методом конкретных задач в значительно более широких диапазонах определяющих параметров, чем в работах предшественников; *в-третьих*, в решении новых задач и, *наконец*, в применении полученных решений для анализа свойств двухфазных течений в каналах и в пограничных слоях на пластине, клине и в окрестности точки торможения на сфере.

О методе.

Использованный метод сращиваемых асимптотических разложений (для решения уравнений Навье–Стокса при малых числах Рейнольдса) является одним из наиболее эффективных аналитических ме-

тодов в гидромеханике и других областях физики и остается востребованным и работающим, несмотря на бурное развитие численного моделирования. Однако применение этого метода не является «делом техники», необходимо так или иначе обосновывать вид асимптотических разложений и условия срачивания, проверять физическую корректность получаемых решений в смежных областях независимых переменных. Надо сказать, что здесь автор проявил высокую математическую эрудицию.

Обращает на себя внимание тот результат, что для определения поперечной силы на одиночную частицу в плоском сдвиговом потоке не потребовалось специально сращивать решения в областях Стокса и Сэфмана для продольной и трансверсальной компонент скорости. Это является интересной особенностью данной задачи. В диссертации (в главе 3) показано, что указанные две компоненты вектора скорости сращиваются автоматически. Это означает фактически единственность решения не только для силы, но и для поля скорости. При исследовании гидродинамического взаимодействия, например, двух частиц сращивание для указанных компонент уже требуется.

Используемый подход к решению задачи с применением двух- и трехмерного преобразования Фурье для искомых функций оказался очень эффективным инструментом, так как позволил свести исходные задачи для уравнений в частных производных к задачам для обыкновенных дифференциальных уравнений. Более того, в рассмотренных задачах автор уделил специальное внимание вопросу эквивалентности сращивания решений в Фурье-пространствах сращиванию в физическом пространстве.

Научная и практическая значимость.

Прежде всего, следует отметить фундаментальный характер диссертационного исследования – результаты автора представляют существенный вклад в теоретическую гидромеханику течений с малыми числами Рейнольдса. Результаты имеют также важное значение для уточнения моделей взаимодействия фаз в сдвиговых двухфазных течениях с дисперсными включениями и, следовательно, для более правильного моделирования свойств течений примеси в каналах и пограничных сло-

ях и предсказания качественных особенностей динамики примеси в таких течениях.

Несомненное практическое значение имеет предложенная классификация режимов миграции частиц в каналах при больших числах Рейнольдса канального течения.

Автором предложены простые аппроксимационные соотношения для коэффициента поперечной силы, которые очень удобно использовать в практических расчетах двухфазных течений.

Среди других возможных применений результатов диссертации, я бы выделил область, не упомянутую авторов в работе, а именно возможность более корректного анализа достоверности определения поля течения газа с использованием широко распространенного PIV-метода, когда экспериментаторы запускают в поток очень мелкие частицы (или капли) и, следя за их поведением, судят о свойствах течения газа. Как следует из полученных в диссертации результатах, даже очень мелкие частицы в сдвиговых, вихревых и турбулентных течениях не следуют за газовой фазой, причем возникновение поперечной силы вызывает миграцию частиц поперек потока и при некоторых условиях появляются области свободные от частиц. Понятно, что в этом случае PIV-метод оказывается неработоспособным, хотя об этом экспериментаторы часто даже не подозревают.

Степень обоснованности и достоверность.

Исходная фундаментальная система уравнений Навье–Стокса, используемый математический аппарат и тщательность оценок и выкладок автора, а также совпадение с известными частными экспериментальными и теоретическими результатами других исследователей не дают никаких оснований усомниться в обоснованности и достоверности полученных результатов и сделанных выводов. Независимым подтверждением строгости и обоснованности результатов являются многочисленные опубликованные статьи автора в ведущих российских и международных рецензируемых журналах, таких, как уже упоминавшиеся «Известия РАН, Механика жидкости и газа», "Journal of Fluid Mechanics" и другие.

Замечания.

Сразу отмечу, что по существу выполненного исследования замечаний нет.

Тем не менее, можно высказать некоторые критические соображения методического и редакционного характера:

1. В диссертации фактически не затронут вопрос о выборе асимптотических последовательностей при построении асимптотических разложений в различных областях течения. Понятно, что автор опирается на работы предшественников, в частности Сэфмана, однако следовало бы все же пояснить, из каких соображений выбираются степени малого параметра в различных асимптотических рядах.

2. Число Рейнольдса во всех главах, кроме пятой, обозначатся одной буквой R с тем или иным индексом, хотя общепринятое обозначение числа Рейнольдса – Re . При этом той же буквой R в ряде случаев обозначается полярный радиус сферической системы координат (см., например, стр. 144)

3. Литература насчитывает 184 наименования и при этом приведена в порядке цитирования, что заметно затрудняет поиск ссылок по авторам при чтении.

4. На мой взгляд, следовало бы привести список основных обозначений в начале работы.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Заключение.

Ввиду изложенного, рецензируемая диссертация является научно-квалификационной работой, в которой получили существенное развитие методы теоретической гидромеханики для течений с малыми числами Рейнольдса, получены новые результаты, представляющие как самостоятельную научную ценность, так и имеющие важное значение для теории двухфазных течений. Совокупность выполненных автором исследований можно квалифицировать, как крупное научное достижение в указанных областях. Выводы в диссертации в полной мере аргументированы. Диссертация, на мой взгляд, полностью соответствует требованиям раздела II Положения о присуждении ученых степеней (Постанов-

ление Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 года), а ее автор Евгений Савельевич Асмолов, несомненно, достоин присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

В качестве дополнения хотел бы высказать пожелание автору диссертации опубликовать все материалы, включая подробное описание использованных математических методов и анализ результатов, в виде монографии, которая явилась бы хорошим дополнением к широко известной книге Хаппеля и Бреннера (Happel, Brenner) «Гидродинамика при малых числах Рейольдса» (М.: Мир, 1976).

Официальный оппонент
д.ф.-м.н., профессор

 Ю.М. Циркунов

28 марта 2016 г.

Подпись Ю.М. Циркунова удостоверяю:

 М.Н. Ощинский



Циркунов Юрий Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, лауреат премии Н.Е. Жуковского первой степени
Кафедра плазмогазодинамики и теплотехники, тел. (812)4957763
Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова
1-я Красноармейская ул., дом 1, 190005 г. Санкт-Петербург, Россия
E-mail: tsrknv@bstu.spb.su ; Yury-Tsirkunov@rambler.ru