

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу

Исаенкова Сергея Владимировича

«Экспериментальное исследование трехмерной структуры волн на поверхности пленки жидкости, обдуваемой высокоскоростным потоком газа»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 - " Механика жидкости, газа и плазмы "

Диссертационная работа С.В.Исаенкова посвящена экспериментальному исследованию волновых возмущений, развивающихся на поверхности кольцевого газожидкостного течения при высоких скоростях обдувающего газового потока. Эта фундаментальная задача механики жидкости и газа имеет давнюю историю, как в России, так и за рубежом. Интерес к этим задачам обусловлен их важными практическими приложениями в различных отраслях промышленности и энергетики. Данная задача относится к самому сложному для теоретического описания и численного моделирования классу задач механики жидкости и газа - течениям на границе раздела несмешивающихся жидкостей. Именно поэтому применение экспериментальных методов особенно важно. В то же время, это также очень сложная экспериментальная задача, связанная с измерением характеристик трехмерных структур, развивающихся в высокоскоростных потоках. Лишь применение современных оптических методов, прежде всего, метода лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ), и скоростной видеосъемки, ставших доступными лишь в последнее время, обеспечивает достаточное пространственное и временное разрешение для восстановления характеристик этих структур.

Диссертационная работа состоит из Введения, 5-и глав и Заключения.

Во **Введении** кратко представлены актуальность, цель и научная новизна работы, а также научная и практическая значимость и положения, выносимые на защиту. Дана информация о достоверности научных результатов, апробации работы, публикациях и личном вкладе автора.

В **1-й главе** диссертации автор дал обстоятельный обзор экспериментальных и теоретических исследований по тематике диссертации и определил место своей работы среди значительного количества проведенных к настоящему времени исследований волн возмущений в жидкой пленке, обдуваемой газовым потоком, начиная от первых работ, датированных серединой прошлого века, до самых последних публикаций 2018-2019 гг. *К сожалению в обзоре литературы не нашли отражения исследования динамики тонких пленок, обдуваемых турбулентными потоками газа, с помощью прямого численного моделирования.* Обнаруженные в таких расчетах особенности структур турбулентного пограничного слоя могли бы быть полезны при интерпретации результатов экспериментов. Например, особенности флуктуаций сдвигового напряжения на поверхности в виде узких полос, вытянутых вдоль потока, обнаруженные в /A. Bender, A. Stroh, B. Frohnepfel, P. Stephan, and T. Gambaryan-Roisman, "Combined direct numerical simulation and long-wave simulation of a liquid film sheared by a turbulent gas flow in a channel," Phys. Fluids 31, 022103 (2019)/, могли бы пролить свет на особенности структуры возмущений толщины пленки.

Вторая глава диссертации посвящена детальному описанию экспериментальной установки и использованных экспериментальных методик. Здесь хотелось бы отметить тщательную проработку экспериментальных, которая обеспечивает высокую достоверность полученных результатов. Автор использует современную методику, основанную на лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ), при измерении двумерного поля толщин пленки и теневой метод при

калибровочных измерениях для метода ЛИФ. При этом автор не ограничивается описанием методик, а приводит решение необходимых оптических задач. В качестве замечания здесь следует указать использование жаргонных выражений, например, "компенсационная строка". Это затрудняет понимание деталей работы. Было бы также полезно объяснить, каким образом производится оценка погрешности измерений.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию волновой структуры пленки жидкости 3D методом лазерно-индуцированной флуоресценции (ЛИФ). Эксперименты подтвердили присутствие двух типов волн: быстрых долгоживущих первичных и медленных короткоживущих вторичных. На основе обработки данных изучены свойства этих возмущений, в том числе исследована статистика вторичных волн. Следует заметить, что полученные в работе результаты представляют собой очень ценный материал для верификации теоретических и численных моделей. Например, полученное автором уменьшение поперечного размера первичных волн с ростом скорости газа (рис. 28 диссертации) соответствует результатам прямого численного моделирования (A. Bender et al, 2019), которое показывает, что при увеличении скорости ветра происходит уменьшение продольного и поперечного масштаба флуктуаций касательного напряжения, которое, в свою очередь, является источником волновых возмущений. Полученное автором распределение вторичных возмущений по поперечным масштабам, представленное на рис. 30 диссертации, по-видимому, близко к логнормальному. Такое предположение довольно естественно, поскольку, согласно классической работе Колмогорова (1941), при близком по смыслу явлении дробления и слияния частиц получается логнормальное распределение по размерам. При этом процесс взаимодействия первичных и вторичных волн, описанный в параграфе "Вариация амплитуды первичных волн", подобен дроблению и слиянию частиц. На мой взгляд, имело бы

смысл построить распределение по размерам всех возмущений, как первичных, так и вторичных, и проверить, работает ли для этого распределения логнормальный закон. *Необходимо, однако, сделать замечание автору за некоторую небрежность. На рис.30 нет подписи на вертикальной оси. Кроме того, не объясняется, что имеется в виду под словом "распределение", читатель может только догадываться, что это плотность вероятности.*

Четвертая и пятая главы посвящены исследованию свойств волновых возмущение на начальном участке дисперсно-кольцевого течения. В этой области происходит установление картины волн, в связи с этим она характеризуется существенной пространственной неоднородностью и разнообразием режимов волновых возмущений. 4-я глава посвящена экспериментальному исследованию пространственной структуры волн возмущений на начальном участке пленочного течения, обдуваемого потоком газа. Примечательно, что смена режимов поля возмущений в пленке очень напоминает смену режимов в поле ветровых волн в океане при удалении от берега. Вначале возбуждаются почти двумерные гравитационные волны, которые затем становятся существенно трехмерными, при дальнейшем развитии волн их спектр становится все более трехмерным. Центральное место в главе 5 занимает сопоставление экспериментальных данных и результатов расчетов в рамках теоретической модели линейной устойчивости течения. Сочетание высокотехнологичного эксперимента и передовой теории, используемой для его интерпретации, безусловно, представляет собой явное достоинство данной диссертации. Надо отметить большие сложности подобного составления, требующие обоснования применимости модели, основанной на рассмотрении дисперсионных свойств линейных гармонических волн, к описанию возмущений конечной амплитуды на существенно неоднородном течении. Автору удалось корректно и убедительно определить частоту, длину волны и

фазовую скорость возмущений. Однако, большие вопросы вызывает определение пространственного инкремента. Так выбор участка линейного роста возмущений на рис. 51 выглядит в значительной степени произвольным. В то же время, очевидно, что на рассматриваемом участке течения имеет место нелинейное насыщение амплитуды возмущений. С учетом этого, на мой взгляд, для аппроксимации данных больше подошло бы решение уравнения Ван-дер-Поля

$$\ddot{h} - (\lambda - h^2)\dot{h} + k^2 h = 0,$$

$$h = \operatorname{Re}(ae^{-ikx}),$$

$$a = a_0 \sqrt{\frac{\lambda}{a_0^2 + (\lambda - a_0^2) \exp(-\lambda x)}},$$

используя которое можно было бы более точно определить инкремент возмущений.

Оценивая диссертацию в целом, следует отметить, что она представляет собой законченное экспериментальное исследование сложного газо-жидкостного потока. Работа содержит новое решение актуальной задачи механики жидкости и газа, связанной с изучением волновых возмущений на поверхности пленки жидкости, обдуваемой потоком газа. Диссертация содержит ряд новых результатов, которые могут быть использованы при создании новых, физически обоснованных моделей процессов, происходящих в промышленных и энергетических установках, необходимых для повышения их производительности и уровня безопасности. Хотелось бы также отметить новые приложения полученных результатов в области физики окружающей среды. С высокой вероятностью фрагментация возмущений, подобных описанным в настоящей работе, является источником морского аэрозоля - фактора, играющего важнейшую роль в климатической системе Земли, а также в прогнозе морских штормов. Следует отметить высокую культуру эксперимента, обеспечивающую достоверность и

высокую точность полученных данных. Отмеченные недостатки носят в основном характер рекомендаций и не влияют на общую положительную оценку диссертации. Основные результаты диссертации докладывались на научных семинарах и конференциях и опубликованы в ведущих научных журналах. Автореферат правильно отражает ее содержание.

Представленная диссертация удовлетворяет требованиям ВАК, а ее автор С.В. Исаенков, безусловно, заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 - "Механика жидкости, газа и плазмы".

Я, Троицкая Юлия Игоревна, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Исаенкова Сергея Владимировича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент

Троицкая Юлия Игоревна,

доктор физ.-мат.наук,

старший научный сотрудник

Зав.отделом Нелинейных геофизических процессов

Федерального государственного бюджетного научного учреждения
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики
Российской академии наук» (ИПФ РАН)

603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

Телефон: 8314 36 82 97 (раб.), E-mail: yuliya@hydro.appl.sci-nnov.ru

Подпись Ю.И.Троицкой заверяю.

Ученый секретарь ИПФ РАН

к.ф.-м.н.



Корюкин Игорь Валерьевич

22 ноября 2019 г.