

ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук Нечаева Артема Тимуровича
на тему: «Исследование нестационарных течений, возникающих при
проникании через свободную границу тонких свободных или
затопленных струй жидкости»
по специальности 1.1.9. «Механика жидкости, газа и плазмы»

Во **введении** отмечается актуальность темы диссертации и степень ее разработанности на основании проведенного литературного обзора по изучаемой тематике. Поставлены цель и задачи работы, отмечены научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В **первой** главе диссертации содержатся результаты экспериментального изучения проникания свободных вертикальных струй через поверхность жидкости в узких каналах. Обнаружено, что отличительной особенностью течений, возникающих при внедрении струй через поверхность жидкости, находящейся в узких каналах, является периодическое перемещение затопленной части струи и внедренного воздуха в виде облака пузырей. В **разделе 1.1** представлены результаты изучения такого рода автоколебательных режимов течений, образующихся при проникании плоских струй, а в **разделе 1.2** – осесимметричных струй. Построены зависимости периода автоколебаний от скорости подаваемых струй и расстояния от сопла до свободной поверхности. Дано объяснение обнаруженному качественному и количественному отличию полученных зависимостей.

В **разделе 1.3** описаны некоторые особенности течений при проникании свободных плоских и осесимметричных струй через поверхность жидкости, находящейся в узких каналах различной протяженности. Установлено, что размер области, в которую подается струя, существенным образом сказывается на характере получаемых экспериментальных зависимостей. Обнаружено, что близость расположения водосливов, за счет которых регулируется протяженность канала, может приводить как увеличению частоты автоколебаний, так и к ее уменьшению. Проведена оценка влияния различного расположения сопла относительно оси симметрии установки и сделан вывод о достаточно высокой степени локализации процесса автоколебаний затопленного участка струи.

В **разделе 1.4** содержатся результаты серии экспериментов с прониканием пары вертикальных плоских свободных струй через свободную поверхность жидкости в узких каналах. Описаны возможные режимы взаимодействия пары струй. В широком диапазоне определяющих параметров

обнаружены автоколебательные режимы течений и построены зависимости периода автоколебаний от расстояния между соплами, подающих струи.

Во **второй** главе диссертационной работы изложены результаты экспериментального и численного анализа взаимодействия затопленных вертикальных струй со свободной поверхностью жидкости. В **разделе 2.1** изучен процесс фонтанирования вертикальных осесимметричных струй в узких каналах. Построены экспериментальные зависимости периода автоколебаний фонтана для разных диаметров и заглублений сопла. Отмечено существенное отличие от полученных ранее аналогичных зависимостей для фонтанов, создаваемых плоскими струями.

В **разделе 2.2** приведено краткое описание математической модели пакета программ для решения задач гидродинамики. В **разделе 2.3** проведена верификация программного комплекса и подобраны оптимальные параметры численной модели для решения задач с затопленными струями. В **разделе 2.4** проведено численное моделирование процесса фонтанирования затопленной осесимметричной струи, находящейся в узком канале. Отмечено хорошее совпадение с экспериментом, описанным в первом разделе этой главы.

Раздел 2.5 посвящен численному моделированию фонтанирования затопленных струй, подаваемых из сопла прямоугольного сечения, вытекающих в неограниченный объем жидкости, что отличает этот случай от рассмотренных в предыдущих разделах. Установлено, что если сопло достаточно протяженное, то могут наблюдаться автоколебательные режимы фонтанирования, аналогичные тем, что были получены в узких каналах. Отмечено, что обнаруженные автоколебания имеют приповерхностный характер, то есть существуют в достаточно узком диапазоне заглублений сопла. Для ряда определяющих параметров построены зависимости периода автоколебаний фонтана и высоты его подъема над свободной поверхностью от скорости подаваемой струи.

В **разделе 2.6** представлены результаты численного моделирования взаимодействия двух затопленных плоских струй. Проведена верификация полученных результатов на серии экспериментов, отмечено хорошее соответствие расчета с экспериментом. Описаны возможные режимы взаимодействия затопленных струй в зависимости от их скорости и расстояния между соплами. Для режимов фонтанирования с относительно близким расположением сопел построены зависимости периода автоколебаний фонтана от скорости струй. Отмечена качественная схожесть таких режимов со случаем фонтанирования одиночной струи.

В **третьей** главе диссертации содержатся результаты экспериментального и численного анализа процесса проникания наклонных

свободных и затопленных струй через свободную поверхность жидкости. В **Разделе 3.1** исследовано взаимодействие свободной клиновидной струи со свободной поверхностью жидкости. Обнаружено, что в отличие от процесса внедрения пары вертикальных струй, совершают периодические перемещения также и свободные участки клиновидной струи, что усиливает амплитуду перемещений облака пузырей. Построены зависимости периода автоколебаний от скорости струи. Отмечено, что для ранее проведенных опытов с конической струей с аналогичным механизмом возникновения автоколебаний экспериментальные зависимости были качественно иные.

В **разделе 3.2** содержатся результаты экспериментов с прониканием затопленной струи, сопло которой расположено вблизи вертикальной стенки и имеет определенный наклон относительно горизонта. Обнаружен диапазон значений определяющих параметров, при которых наблюдаются регулярные автоколебания фонтана. Описана роль вертикальной стенки в механизме возникновения таких колебаний. Построены зависимости периода автоколебаний фонтана от скорости струи и величины ее затопления.

В **разделе 3.3** описан способ опорожнения сосуда с наклонной боковой стенкой, вдоль которой подается струя, основанный на эжектировании затопленной струей окружающей ее жидкости. Проведено численное исследование рассмотренного процесса и определены значения определяющих параметров, при которых реализуется полное опорожнение сосуда. Проведена необходимая верификация на ряде экспериментов с частичным опорожением сосуда.

В **заключении** сделаны основные выводы и результаты, полученные в диссертации.

ЗАМЕЧАНИЯ

По диссертационной работе имеются следующие замечания:

1. За исключением краткого упоминания ранних работ по затопленным фонтанам во введении (с. 6-16), диссертация не содержит детализированного обзора литературы по теме, который, как правило, размещается в первой главе диссертационной работы.
2. На с. 28 приведено толкование механизма автоколебаний в конфигурации, когда струя проникает под свободную поверхность с образованием пузырьков. Однако остается неясным, каков относительный вклад двух конкурирующих эффектов в увеличение (или уменьшение) давления с той стороны, в которую отклоняется струя: эффект повышения уровня свободной поверхности (и

связанное с этим увеличение гидростатического давления) и насыщение жидкости пузырьками (и связанное с этим уменьшение эффективной осредненной плотности, а значит, понижение гидростатической составляющей давления).

3. При анализе размерной зависимости периода автоколебаний от определяющих размерных параметров и затем, после применения П-теоремы, при переходе к безразмерным переменным возникает вопрос: почему можно пренебречь зависимостью безразмерного периода от параметра Fr/Re . В классических работах В.П. Карликова о затопленных фонтанах проведено рассуждение о том, что достигается автомодельность по этому параметру при больших числах Re , и, таким образом, безразмерный период зависит только от Fr . Так ли это в настоящей работе, остается неясным.
4. В классических работах о затопленных фонтанах течение является плоским. В данной диссертационной работе этот вопрос отдельно не обсуждается. Однако интересно все же разобраться, относятся ли рассматриваемые течения к классу плоских течений или все же являются трехмерными? Или, может быть, некоторый подкласс рассматриваемых течений, когда сечение сопла прямоугольное и ширина сопла много меньше расстояния между плоскими прозрачными стенками, относится к плоским течениям.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Нечаев Артем Тимурович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук,
Профессор, директор проектного центра по энергопереходу,
АНО ВО “Сколковский институт науки и технологий”

Осипцов Андрей Александрович

подпись

6 октября 2023 г.

Контактные данные:

тел.: 7(495)280-14-81, e-mail: a.osiptsov@skoltech.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация на соискание ученой степени доктора физ-мат наук:
01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы
(ныне 1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы)

Адрес места работы:

121205, г. Москва, территория Инновационного центра “Сколково”, АНО ВО
“Сколковский институт науки и технологий”, Большой бульвар, д. 30 с. 1.
Проектный центр по энергопереходу.

Подпись сотрудника Осипцова А.А.

АНО ВО “Сколковский институт науки и технологий” удостоверяю:
руководитель/кадровый работник

И.О. Фамилия
дата

06.10.23