

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи



Нечаев Артем Тимурович

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕЧЕНИЙ,
ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ПРОНИКАНИИ ЧЕРЕЗ СВОБОДНУЮ
ГРАНИЦУ ТОНКИХ СВОБОДНЫХ ИЛИ ЗАТОПЛЕННЫХ
СТРУЙ ЖИДКОСТИ**

Специальность 1.1.9 – механика жидкости, газа и плазмы

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико–математических наук

Москва – 2023

Диссертация подготовлена на кафедре гидромеханики механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Научные руководители – **Карликов Владимир Павлович**
доктор физико-математических наук,
профессор
Толоконников Сергей Львович
доктор физико-математических наук,
доцент

Официальные оппоненты – **Калиниченко Владимир Анатольевич**
доктор физико-математических наук, доцент,
Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН, ведущий научный сотрудник лаборатории механики сложных жидкостей

Осипцов Андрей Александрович
доктор физико-математических наук, Сколковский институт науки и технологий, профессор, руководитель проектного центра по энергопереходу

Прокофьев Владислав Викторович
кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией нестационарной гидродинамики НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова

Защита диссертации состоится 20 октября 2023 года в 16:00 часов на заседании диссертационного совета МГУ.011.5 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119192, Москва, Мичуринский проспект, дом 1, НИИ механики МГУ, кинозал.

Email: pelevina.daria@gmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/011.5/2574>.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.011.5,
кандидат физико-математических наук

Д.А. Пелевина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Проблема взаимодействия свободных или затопленных жидких струй со свободной поверхностью покоящейся жидкости представляет научный и практический интерес. Такие явления имеют место в природе, а также во многих технических устройствах и технологических процессах.

При проникании свободной струи жидкости через свободную границу в области контакта наблюдаются захват и увлечение воздуха под свободную поверхность, что приводит к образованию подводной двухфазной области.

Эжектирующая способность струй широко используется на практике при аэрации водоемов, флотационной очистке сточных вод, для интенсификации тепломассопереноса и пр. Захват воздуха падающими струями может сопровождать также процессы разлива металлов, где внедрение воздуха может иметь негативные последствия.

Актуальность выполненных в настоящей работе исследований взаимодействия плоских, круглых и клиновидных свободных струй со свободной поверхностью обусловлена многообразием возможных приложений. Обнаруженные впервые нестационарные автоколебательные режимы течений со значительным перемещением затопленных участков струй и двухфазных областей течения от места проникания струи, а также интенсивным волнообразованием на свободной поверхности могут быть полезны для повышения эффективности работы струйных аэраторов и смесителей.

Исследование процесса взаимодействия с жидкостью проникающих затопленных струй представляет интерес в связи с тем, что такие течения наблюдаются в природе, а также имеют практические приложения в гидродинамике и геофизике. Подобные течения формируются при всплывании струй сбросовых вод в океане, при истечении струй из разломов земной коры на дне океана, при проникании родниковых вод из плоских трещин в дне озер и пр.

При фонтанировании струй в определенных условиях могут возникать нестационарные автоколебательные режимы течения. Одним из примеров таких режимов фонтанирования затопленных струй служат течения однородной тяжелой жидкости в относительно узком канале, создаваемые плоской вертикальной струей, проникающей в слой жидкости конечной толщины, ограниченный с одной стороны горизонтальным дном, а с другой - свободной поверхностью. Эксперименты показали, что в широком диапазоне определяющих параметров задачи течение не является стационарным и симметричным, возникают регулярные автоколебательные перемещения жидкости над кана-

лом с существенным изменением формы свободной поверхности.

В настоящей работе выполнено детальное исследование аналогичных режимов фонтанирования, существенно дополняющее полученные ранее результаты для одиночной плоской струи. Изучены особенности фонтанирования осесимметричных струй в относительно узких каналах, проникание через свободную поверхность двух затопленных параллельных плоских струй, взаимодействие со свободной границей наклонной плоской струи, вытекающей из примыкающего к вертикальной стенке плоского канала. Исследование указанных течений ранее не проводилось и является актуальным. Обнаруженная возможность существования автоколебательных режимов для различных способов подачи струй жидкости может представлять интерес для расширения области практического применения изучаемого эффекта.

Целью работы являются:

- Экспериментальное исследование автоколебательных режимов проникания одиночных вертикальных плоских и осесимметричных свободных струй через свободную поверхность жидкости в относительно узких каналах.
- Экспериментальное изучение взаимодействия пары вертикальных свободных плоских струй при их проникании через свободную поверхность, а также совокупности двух струй, вытекающих из клиновидного сопла.
- Экспериментальное и численное исследование процесса фонтанирования в относительно узких каналах вертикальных затопленных струй, подаваемых из насадков круглого сечения.
- Численное моделирование фонтанирования затопленной вертикальной струи, вытекающей из насадка прямоугольного сечения в неограниченный объем жидкости.
- Изучение физических особенностей и проведение классификации режимов фонтанирования пары затопленных вертикальных плоских струй.
- Изучение особенностей течений, возникающих при проникании через свободную границу наклонных затопленных струй жидкости, и возможности использования эжектирующей способности таких струй для опорожнения сосудов.

Научная новизна состоит в следующем:

- Впервые обнаружены и изучены автоколебательные режимы взаимодействия свободных вертикальных и наклонных струй с поверхностью жидкости в узких каналах.
- Впервые изучен процесс фонтанирования в узком канале вертикальной струи, вытекающей из насадка круглого сечения.

- Впервые изучены и классифицированы режимы фонтанирования пары параллельных плоских вертикальных затопленных струй жидкости.
- Впервые проведено исследование процесса взаимодействия со свободной поверхностью неограниченного объема жидкости проникающей вертикальной струи первоначально прямоугольного сечения. Определены диапазоны значений определяющих параметров, при которых возникают регулярные автоколебательные режимы фонтанирования.
- Предложен новый способ удаления жидкости из резервуаров, основанный на эжектирующей способности затопленных струй.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость результатов проведенных экспериментальных и численных исследований обусловлена обнаружением новых гидродинамических эффектов и изучением основных свойств возникающих течений.

Полученные результаты могут иметь практическое применение. Так, например, обнаруженные существенно нестационарные режимы течений, возникающих при проникании через свободную поверхность свободных струй жидкости, могут быть использованы для повышения эффективности работы струйных аэраторов, смесителей и пр.

Методы исследования. В диссертационной работе используются экспериментальные и численные методы исследования.

Экспериментальные исследования проводились в НИИ механики МГУ на специально подготовленных стендах. Использовалась видео и фотосъемка исследуемых процессов. Численные расчеты проводились с использованием вычислительного комплекса STAR-CCM+. Обработка результатов экспериментов осуществлялась с помощью методов анализа размерностей.

Достоверность полученных результатов в разделах, посвященных экспериментальному изучению течений подтверждается многократным проведением опытов и хорошей повторяемостью результатов. Адекватность численной модели проверялась сравнением результатов расчета с экспериментальными данными. Проводился дополнительный анализ чувствительности расчета к изменению основных параметров численной модели.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Плоские и осесимметричные свободные струи, проникая через поверхность жидкости, находящейся в относительно узких каналах, внедряют воздух и образуют течения, для которых характерен автоколебательный характер перемещения подводных участков струй и пузырьковых масс.
- Осесимметричные затопленные струи, проникая через поверхность жидкости, находящейся в относительно узких каналах, образуют фонтаны, совер-

шающие регулярные автоколебания. Экспериментальные зависимости периода автоколебаний от скорости струи для осесимметричных струй качественно отличаются от зависимостей, полученных для плоских струй.

- Затопленные струи, подаваемые из насадка прямоугольного сечения, при взаимодействии со свободной поверхностью жидкости неограниченного объема, образуют фонтаны, совершающие регулярные автоколебания.
- Свободная клиновидная струя, при взаимодействии со свободной поверхностью жидкости, находящейся в относительно узких каналах, образует подводные газонасыщенные области, совершающие периодические перемещения совместно с перемещением границ свободных участков клиновидной струи.

Апробация работы. Основные положения и результаты, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на следующих научных семинарах и конференциях: семинар по механике сплошных сред под руководством акад. РАН А.Г. Куликовского, проф. В.П. Карликова, член-корр. РАН О.Э. Мельника, проф. А.Н. Осипцова (2021); Международная конференция «Современные проблемы механики сплошной среды», посвященная памяти академика Леонида Ивановича Седова в связи со столетием со дня его рождения (2017); конференции «Ломоносовские чтения МГУ» (2016-2022); XII Международная летняя научная школа-конференция «Гидродинамика больших скоростей и кораблестроение», посвященная 155-летию со дня рождения академика А.Н. Крылова (2018); 20-я Международная конференция молодых специалистов по ядерным энергетическим установкам (2018); 10-я Международная научно-техническая конференция «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» (2017).

Полученные в диссертации результаты содержатся в научно-квалификационной работе на тему: «Исследование нестационарных течений, возникающих при проникании через свободную границу тонких свободных или затопленных турбулентных струй жидкости», которая была успешно защищена автором при окончании аспирантуры механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова в 2018 г.

Публикация результатов. По теме диссертации опубликовано 5 статей в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, RSCI.

Личный вклад.

Разделы главы 1 и 2 написаны на основе совместных работ с Карликовым В.П. и Толоконниковым С.Л. Автор принимал участие в создании экспериментальных стендов, проведении экспериментов, обработке и анализе результатов, а также выполнил численные расчеты. Глава 3 содержит результаты,

полученные лично автором. Вклад автора в работах [1–3, 5] составляет 1/3, в работе [4] – 1.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы; содержит 121 страницу, 73 рисунка и 190 библиографических ссылок.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отмечена актуальность темы диссертационной работы, указаны цель и основные направления исследований, проведен анализ работ по изучаемой тематике, отмечены научная новизна работы и возможное практическое применение полученных результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 содержит результаты экспериментального изучения процесса проникания вертикальных плоских и круглых свободных турбулентных струй через поверхность жидкости, находящейся в относительно узких каналах. Опыты проводились в НИИ механики МГУ на стенде, схема которого показана на рис. 1. Он представлял из себя резервуар с прозрачными прямоуголь-

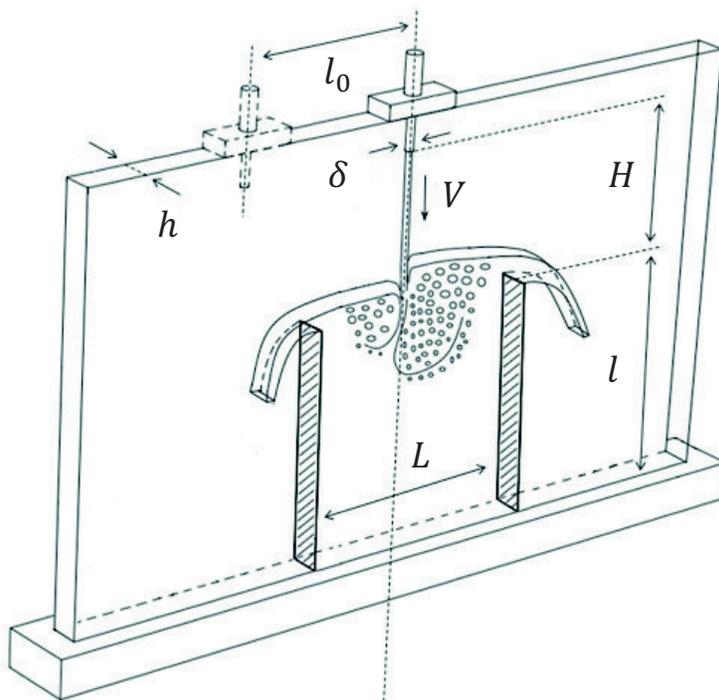


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

ми боковыми стенками из оргстекла, размером 102x55 см, удаленных друг от друга на расстояние $h = 1$ см. В верхней части стенда имелась возможность устанавливать сопла прямоугольной формы с толщиной δ и осесимметричные с диаметром d . Начальный уровень жидкости в резервуаре задавался с

помощью установки по левому и правому краю водосливов различной высоты l , находящихся на расстоянии L друг от друга. Расстояние H от сопла до свободной поверхности жидкости регулировалось высотой водосливов l .

В разделах 1.1, 1.2 представлены результаты серии экспериментальных исследований взаимодействия одиночных вертикальных плоских и осесимметричных струй с поверхностью жидкости в узком канале.

Эксперименты проводились на установке с $L = 102$ см. Другие определяющие параметры менялись в следующих диапазонах: $0.2 \leq \delta \leq 0.7$ см, $0.3 \leq d \leq 0.7$ см, $10 \leq H \leq 20$ см, $50 \leq V \leq 800$ см/с.

При проникании свободных струй через поверхность жидкости наблюдается увлечение струей окружающего воздуха и внедрение его в жидкость. Значительная часть воздуха, как показывают опыты, захватывается в области начального контакта струи с жидкостью. Пузыри воздуха по мере всплытия увеличивают свой объем.

Было установлено, что наиболее характерной особенностью течений, возникающих в жидкости, находящейся в узких каналах, является наличие регулярных автоколебательных режимов перемещения затопленных участков струй и двухфазных областей течения. Такие режимы существуют в весьма широком диапазоне значений определяющих параметров.

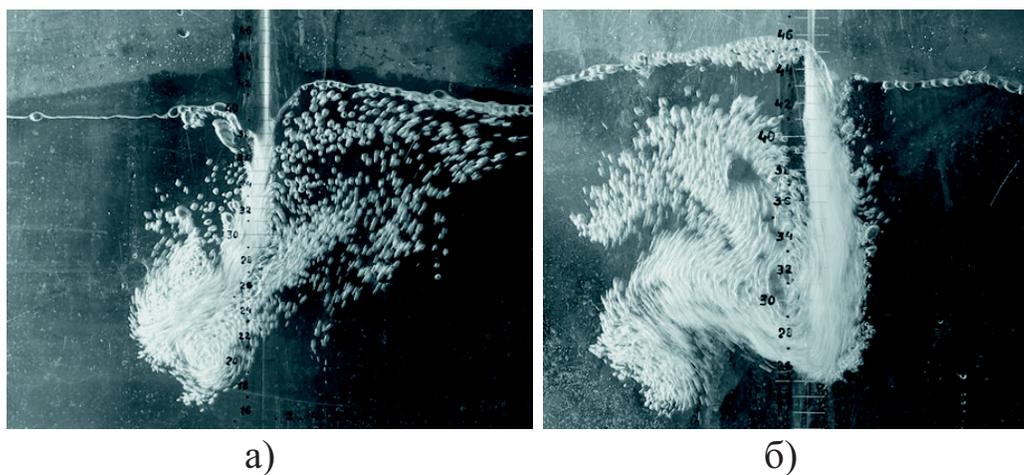


Рис. 2. Снимки течения при проникании свободной а) плоской и б) осесимметричной струи

В основе возникновения автоколебаний лежит появление в некоторый момент времени случайного отличия в суммарных объемах пузырей, внедренных в жидкость по обеим сторонам затопленного участка струи, что приводит к разным уровням свободной поверхности и, следовательно, разным значениям разности гидростатической составляющей давления в жидкости, отклоняющей затопленный участок струи (рис. 2а,б). При значительных скоростях струй, когда разница уровней свободной поверхности достаточно велика, ста-

новится хорошо заметным отклонение лишь частично затопленного участка свободной струи, что еще более увеличивает амплитуду автоколебаний и способствует устойчивости такого режима.

Определяемым параметром в экспериментах являлся период автоколебаний τ затопленных участков струи. Согласно П-теореме

$$T = \frac{\tau}{\sqrt{h/g}} = \varphi(Fr, \frac{\delta}{h}, \frac{H}{h}, \frac{\nu}{g^{1/2}h^{3/2}})$$

где $Fr = V/\sqrt{gh}$ - число Фруда.

На рис. 3 представлены некоторые из полученных зависимостей безразмерного периода от числа Фруда. Обращает на себя внимание качественное отличие этих зависимостей для плоских и осесимметричных струй: если для плоских струй имеет место с ростом скорости уменьшение периода автоколебаний до определенной величины, то в случае круглых струй, наоборот, наблюдается постоянный рост периода, т.е. уменьшение частоты автоколебаний.

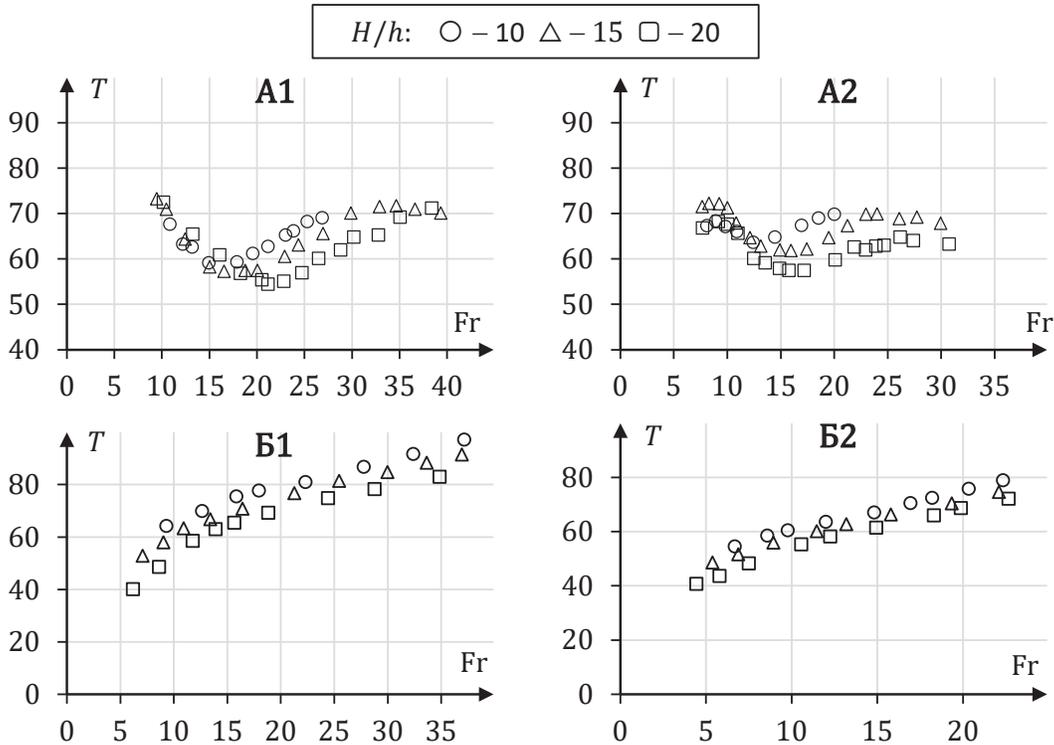


Рис. 3. Зависимости $T(Fr)$ для плоских струй с $\delta/h = 0.2, 0.3$ (A1,A2) и для осесимметричных струй с $d/h = 0.3, 0.5$ (B1,B2), при различных значениях H/h

Этот эффект может быть связан с отличием течений в окрестности струи. Если плоские струи занимают все пространство между стенками, то круглые - лишь какую-то ее часть. В связи с этим, для плоских струй перепад давлений действует на большую поверхность, чем у круглых, и отклоняет затопленную часть существенно быстрее. Этим и объясняется качественное различие

зависимостей периода автоколебаний для плоских и круглых струй с ростом числа Фруда. Следует отметить, что существенной особенностью, отличающей наблюдаемые картины течения от случая плоских струй, является также и интенсивное обтекание свободного и затопленного участков круглой струи потоком жидкости со стороны с более высоким уровнем свободной поверхности (рис. 2,б).

В разделе 1.3 описаны особенности проникания плоских и осесимметричных струй в относительно узких каналах разной протяженности L , размер которых регулировался установкой водосливов на разном их удалении L друг от друга (см. рис. 1).

Эксперименты выявили существенные отличия процесса автоколебаний в относительно коротких каналах $L/h \leq 50$ по сравнению с рассмотренными ранее в 1.1, 1.2 течениями в установке с $L/h = 102$. В таких каналах, например с $L/h = 20$, при разных значениях d/h или δ/h с ростом числа Фруда, начиная с некоторых его значений, наблюдался заметный рост периода автоколебаний T (рис. 4). Было установлено, что это вызвано периодическим формирова-

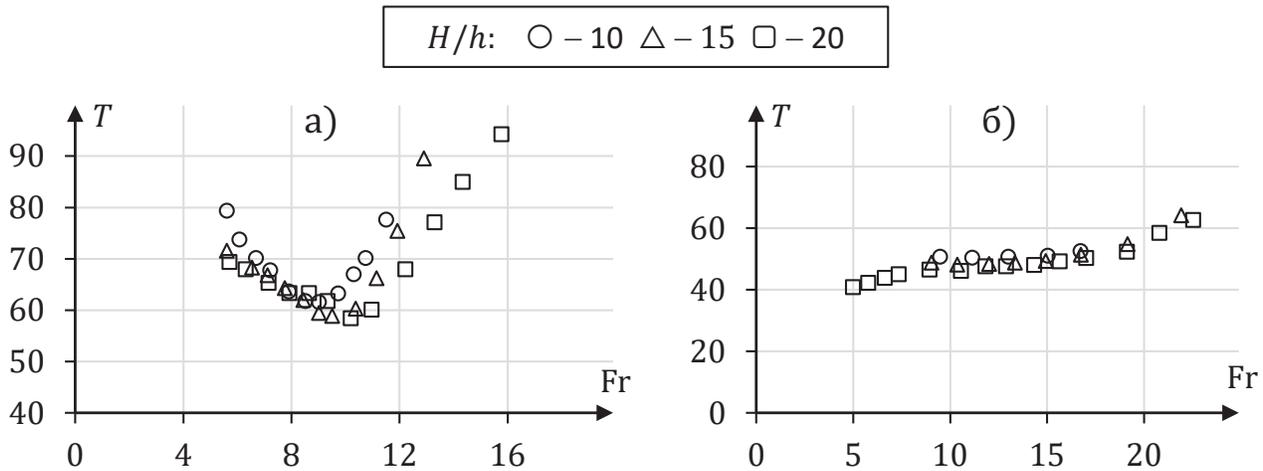


Рис. 4. Зависимости $T(Fr)$ для плоских и круглых струй в канале с $L/h = 20$ и (а) $\delta/h = 0.5$, (б) $d/h = 0.5$

ем областей с интенсивным вращением жидкости вблизи стенок водосливов после ударов о них и расщеплением затопленного участка струи. Низкое давление внутри таких циркуляционных зон должно существенно снижать поперечный перепад давления, который отклоняет затопленный участок струи в противоположную сторону, что и увеличивает период автоколебаний T .

В относительно коротких каналах с ростом скорости начиная с определенного ее значения наблюдается сначала периодическое прилипание струи к стенкам, а затем нерегулярные автоколебания. При некотором значении скорости струя достигает дна и после ряда ее случайных колебаний они

полностью прекращаются. На рис. 5 показаны фотоснимки течений, в которых наблюдается образование одного или нескольких интенсивных вихрей в установке с $L/h = 20$.

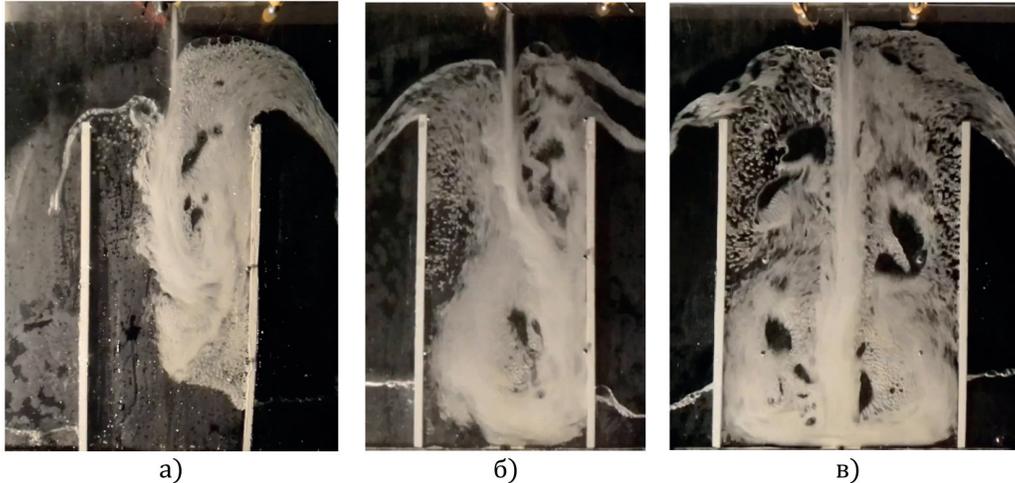


Рис. 5. Фотоснимки течения в каналах малой протяженности при $H/h = 15$ и $Fr = 15, 30, 30$; $L/h = 30, 30, 20$; $\delta/h = 0.5, 0.5, 0.3$ (а-в)

Еще одна из существенных особенностей процесса проникания струй в жидкость была выявлена при нахождении вида зависимостей периода автоколебаний от числа Фруда при разных значениях l_0/h . Опыты проводились в наиболее длинном канале $L/h = 102$ для значений $H/h = 15$ при $\delta/h = 0.3$ в диапазоне значений чисел Фруда $5 \leq Fr \leq 35$. Оказалось, что существует достаточно широкий диапазон значений числа Фруда $6 \leq Fr \leq 26$, в котором значение периода автоколебаний при разных положениях насадка (разных l_0/h) остается практически одинаковым для каждого фиксированного значения Fr (отличия не превосходят 4%, т.е. находятся в пределах точности измерений). Этот результат позволяет сделать важный вывод о достаточно высокой степени локализации изучаемого эффекта возникновения автоколебаний. Аналогичные опыты с другими значениями определяющих параметров подтверждают это и для плоских, и для круглых струй.

В разделе 1.4 изучен процесс взаимодействия пары вертикальных плоских свободных струй при их проникании через свободную поверхность жидкости в относительно узких каналах (рис. 6). В верхней части описанного ранее экспериментального стенда устанавливались два одинаковых сопла прямоугольного сечения с шириной δ , удаленных друг от друга на расстояние L . Скорости V обеих струй были одинаковы.

Эксперименты проводились для следующих наборов значений определяющих параметров: $H = 10$ см, $\delta = 0.3$ см, $1 \leq L \leq 60$ см, $100 \leq V \leq 800$ см/с.

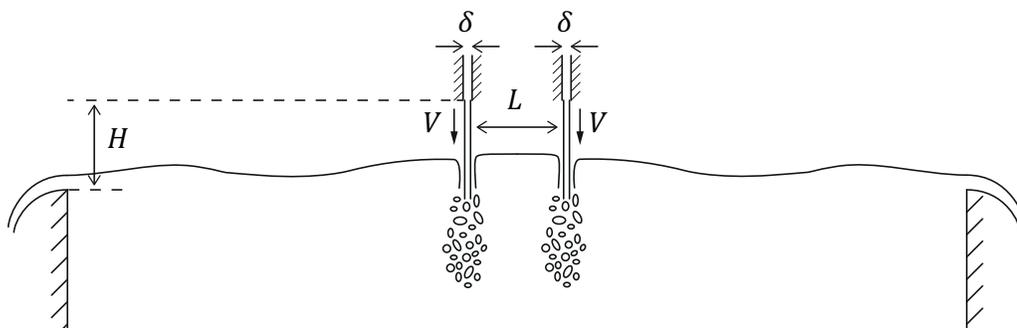


Рис. 6. Схема эксперимента с прониканием пары свободных струй

Были выявлены четыре качественно отличающихся друг от друга режима течений. В первом из них (режим А), соответствующем относительно близкому расположению струй ($0 < l < 8$, где $l = L/h$), возникает объединение затопленных участков струй и автоколебания их как единого целого (рис. 7,а). При $8 < l < 20$ (режим В) преимущественно наблюдалось сложное взаимодействие подводных областей, при котором регулярные колебания прекращались (рис. 7,б).

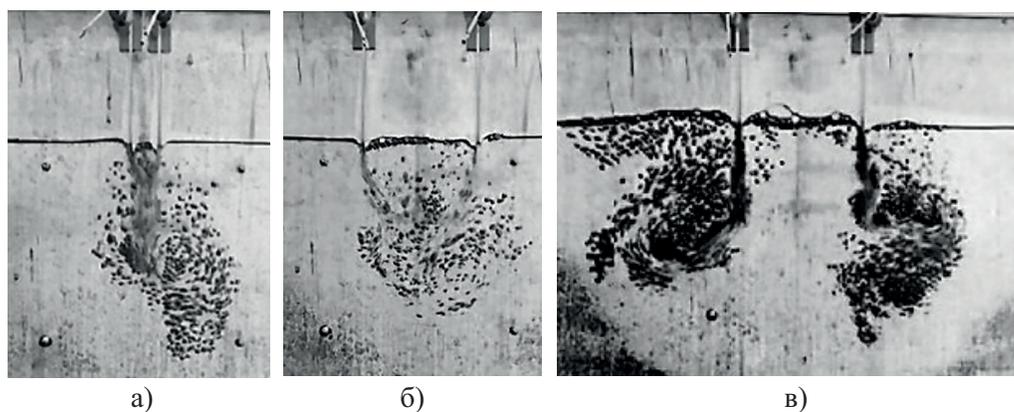


Рис. 7. Фотоснимки течения для системы двух свободных плоских струй

При $l > 20$ обнаружен режим С согласованных колебаний с взаимным соударением и отталкиванием газонасыщенных подводных областей (рис. 7,в). В таком режиме в результате соударения газонасыщенных областей друг с другом в межструйном пространстве наблюдается значительный подъем уровня жидкости, вызванный всплытием суммарного объема пузырьков от обеих струй, что приводит к увеличению амплитуды перемещений пузырьков масс. При дальнейшем увеличении l начиная с некоторого его значения режим С перестает существовать, и образование подводных течений от внедряемых струй происходит независимо друг от друга (режим D). Граница, разделяющая последние два режима, весьма условна и зависит от скорости подаваемых струй. На рис. 8 схематично показан вид зависимостей $T(l)$ при фиксирован-

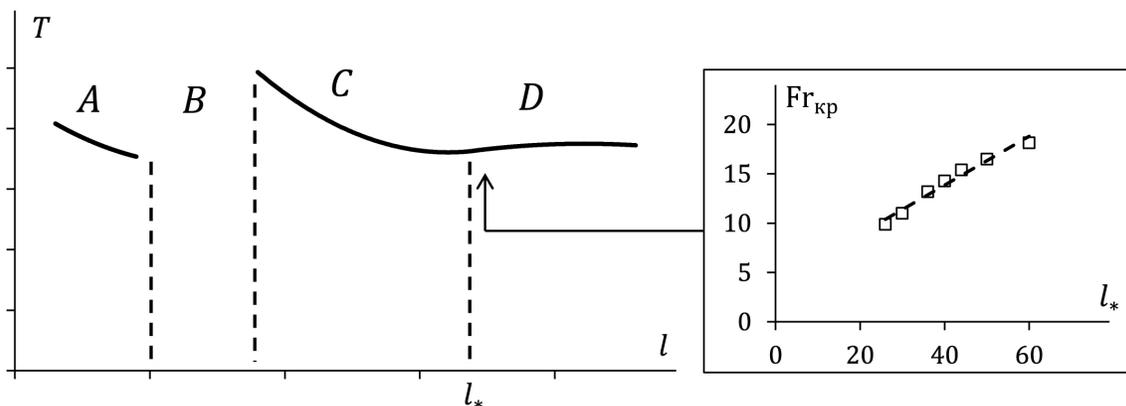


Рис. 8. Общий вид зависимостей $T(l)$

ном значении числа Фруда. На каждом из участков A , C происходит плавное убывание периода колебаний с ростом l . Установлено, что смена режимов C и D не сопровождается резким изменением значения периода. Значение $l = l_*$, определяющее границу режимов C и D , растет с увеличением числа Фруда (рис. 8). Эксперименты показали, что эта зависимость близка к линейной.

Глава 2 посвящена экспериментальному и численному исследованию взаимодействия вертикальных затопленных струй с поверхностью жидкости.

В **разделе 2.1** приведены результаты экспериментального изучения фонтанирования осесимметричных затопленных струй в относительно узких каналах. Экспериментальная установка имела две параллельные прозрачные стенки размером 102×56 с расстоянием $h = 1$ см между ними, укрепленные на плоском основании, в центральной части которого устанавливалась деталь, содержащая круглое сопло диаметра d с подведенным к ней трубопроводом и краном для регулировки расхода воды. На концах основания размещалась пара сменных вертикальных вкладышей в форме водосливов с острой кромкой, через которые осуществлялся слив жидкости из установки. Изменением высоты вкладышей H создавалась различная глубина начального погружения выходного сечения канала. Эксперименты проводились с насадками, имеющими диаметр $d = 0.1, 0.3$ и 0.5 см. Высота водосливов менялась в диапазоне $1 \leq H \leq 15$ см, а начальная скорость истечения струй - в диапазоне $0 < V < 10000$ см/с.

Как было установлено ранее в работах В.П. Карликова, при истечении жидкости из затопленных каналов прямоугольного сечения в широком диапазоне определяющих параметров такие течения не являются стационарными и симметричными, появляются регулярные автоколебательные режимы поперечного перемещения жидкости над каналом. В настоящей работе было обнаружено, что для затопленных струй, подаваемых через сопло круглого

сечения, также существуют автоколебательные режимы. Для таких режимов построены зависимости периода автоколебаний фонтана от глубины затопления сопла и скорости поступающей через него жидкости. На рис. 9 приведены графики зависимостей безразмерного периода $T = \tau\sqrt{(g/H)}$ автоколебаний фонтана от числа Фруда струи $Fr = v/\sqrt{gH}$ для двух значений d/h при разных относительных заглублениях сопла $p = H/h$.

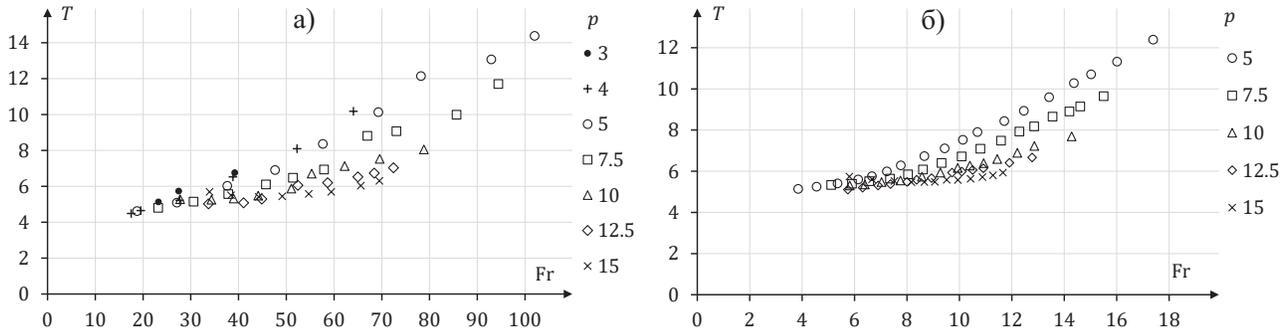


Рис. 9. Экспериментальные зависимости $T = T(Fr)$ для $d/h = 0.1$ (а) и $d/h = 0.3$ (б) при различных $p = H/h$

Существенным отличием от плоских струй является монотонный и почти всегда непрерывный характер полученных зависимостей. В опытах установлено также, что на процесс автоколебаний осесимметричных струй более существенное влияние, чем в плоском случае, оказывает волнообразование в экспериментальной установке. Максимальный подъем свободной поверхности оказывается существенно более высоким, что вызывает сильное волнообразование во всем объеме жидкости в сосуде. Наблюдения за свободной поверхностью для случая максимального относительного затопления $p = 15$ показали, что форма свободной границы близка к форме стоячей волны. Значения периода колебаний фонтана при этом достаточно близки к периоду соответствующей стоячей волны, вычисляемому по линейной теории.

В **разделе 2.2** представлено описание математической модели программного комплекса STAR-CCM+, в котором проводилось численное моделирование процесса фонтанирования затопленных струй жидкости. Данный вычислительный пакет основан на методе конечных объемов и включает в себя средства от построения геометрии расчетной области до обработки и визуализации результатов расчета.

В **разделе 2.3** проведена верификация пакета программ на задаче о плоском затопленном фонтане, подобраны оптимальные параметры численной модели, такие как размер сетки, шаг по времени, величина невязок и т.д.

В **разделе 2.4** представлены результаты численного моделирования автоколебаний затопленного фонтана, создаваемого осесимметричной струей

в узком канале. Проведено качественное и количественное сравнение с полученными экспериментальными данными. Оказалось, что в широком диапазоне определяющих параметров отклонение расчетного значения периода автоколебаний затопленных фонтанов от экспериментального не превышает 5%. Изменение формы свободной поверхности течения со временем, получен-

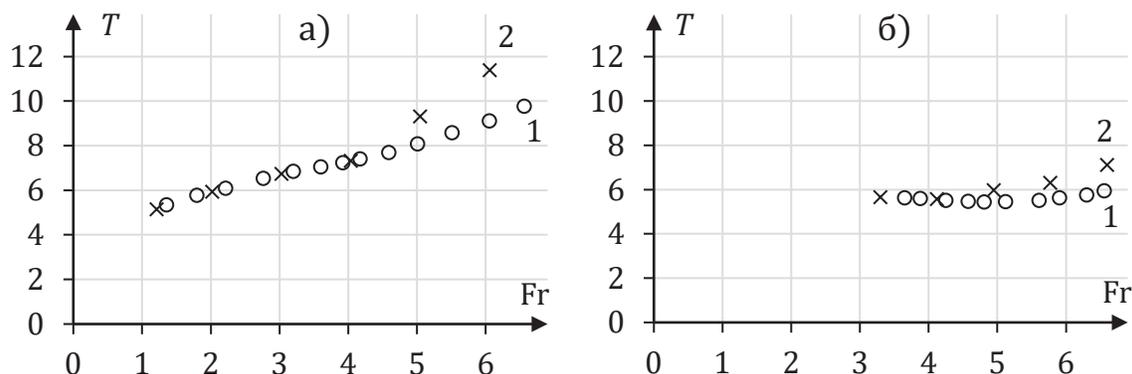


Рис. 10. Экспериментальные (1) и расчетные (2) зависимости $T(Fr)$ для $d = 0.5$ см и а) $H = 2.5$ см, б) $H = 15$ см

ное в расчетах, также хорошо соответствует картине, наблюдаемой в экспериментах. На рис. 10 показано сравнение экспериментальных и численных зависимостей для безразмерного периода автоколебаний при $d = 0.5$ см и $H = 2.5$ см (а), $H = 15$ см (б), свидетельствующее о приемлемой точности использованного метода.

Раздел 2.5 содержит результаты моделирования процесса фонтанирования затопленных струй, подаваемых из сопла прямоугольной формы в неограниченном объеме жидкости (рис. 11,а). В отличие от случая фонтанирования затопленных струй в узких каналах здесь отсутствуют боковые стенки, ограничивающие возможность перемещения жидкости в поперечном направлении. Тем не менее, для фонтанов с достаточно протяженным гребнем также были обнаружены диапазоны изменения определяющих параметров, для которых существуют устойчивые автоколебательные режимы перемещения возвышения свободной поверхности. Так же, как и для случая фонтанов в узких каналах, причиной существования автоколебаний служат возникающие вследствие обрушения гребня фонтана в одну или другую сторону поперечные перепады давления по обеим сторонам затопленного участка струи.

Расчеты выполнены для следующих наборов значений определяющих параметров: $\delta = 1, 2, 3, 5$ мм, $h = 2$ см, $0 < v < 700$ см/с, $1 \leq H \leq 5$ см, где h и δ – длина и ширина прямоугольного сопла соответственно, V – скорость, H – расстояние от среза сопла до невозмущенного уровня свободной поверхности.

Было установлено, что для изученного набора значений скорости струи

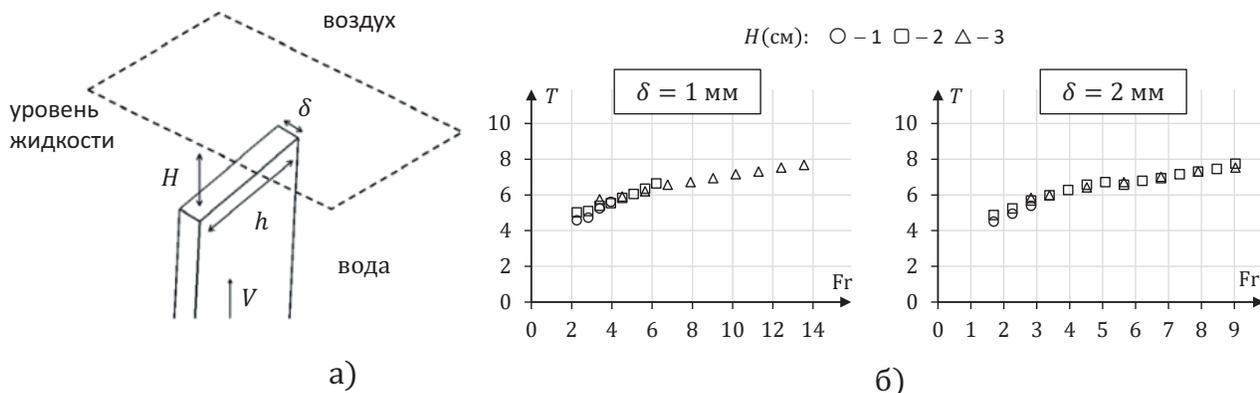


Рис. 11. Схема численного эксперимента (а) и расчетные зависимости $T(Fr)$ (б) для различной ширины сопла и различных значениях заглубления $H = 1, 2, 3$ см

автоколебания существует лишь в относительно узком диапазоне заглублений сопла $1 < H < 3$ см. При малых значениях $H < 1$ см наблюдался прорыв струи через свободную поверхность, а при относительно больших заглублениях $H > 3$ см в процессе движения в толще воды прямоугольная структура струи разрушалась, и гребень фонтана приобретал форму, близкую к осесимметричной.

Были построены зависимости периода автоколебаний фонтана $T(Fr)$ для разной геометрии сопла и его заглубления H (рис. 11,б). Монотонный рост T по мере увеличения Fr связан с увеличением высоты гребня фонтана и амплитуды его перемещений.

В разделе 2.6 представлены результаты численного и экспериментального исследования процесса проникания пары вертикальных плоских струй через поверхность жидкости, находящейся в каналах с водосливным режимом стока (рис. 12).

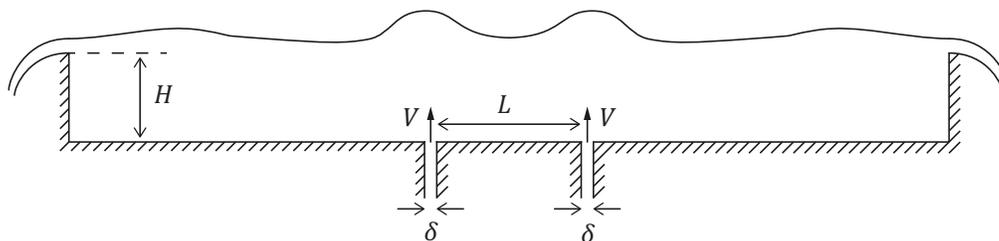


Рис. 12. Схема установки

Сопла, подающие плоские струи, имеют ширину $\delta = 0.3$ см и расположены на расстоянии L друг от друга, скорости струй V были одинаковыми. Расчеты проведены для ряда значений определяющих параметров из диапазонов $1 \leq L \leq 50$ см, $0.5 \leq V \leq 5$ м/с. Высота боковых водосливов, обеспечивающих начальное затопление, принималась равной $H = 7.5$ см. Наибольшее

внимание уделено анализу возникающих регулярных автоколебательных режимов течений. Возможные варианты вида свободной поверхности для таких режимов показаны на рис. 13.

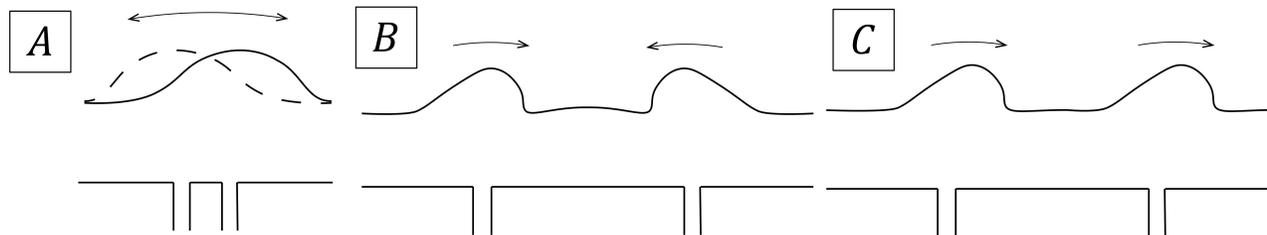


Рис. 13. Схематичное изображение видов взаимодействия пары затопленных струй

Режим *A* соответствует относительно малым расстояниям между струями $L \leq 2$ см. В достаточно широком диапазоне значений скорости струй наблюдаются автоколебания возвышения свободной поверхности, аналогичные случаю одиночной струи шириной 2δ . Близкими также оказываются значения периода колебаний. На рис. 14 приведены зависимости периода колебаний от скорости струй для $L = 1$ и 2 см. В большей части исследованного диапазона скорости период практически не меняется и равен среднему значению 0.56 с.

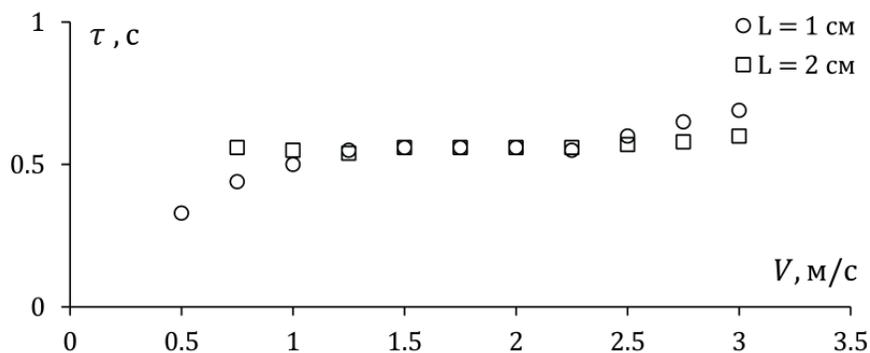


Рис. 14. Зависимости $T(V)$ для $L = 1$ и 2 см

Для режима *B* характерно образование двух фонтанов, совершающих согласованные автоколебания в противоположные стороны. Такого рода колебания появляются начиная с $L = 7$ см и существуют в весьма узком диапазоне $1.5 \leq V \leq 1.75$ м/с, который расширяется с увеличением расстояния между соплами. Например, при $L = 10$ см этот режим существует в диапазоне $1.5 \leq V \leq 2$ м/с, а для $L = 15$ см при $1.5 \leq V \leq 2.5$ м/с. Для относительно малых расстояний L автоколебания сопровождаются интенсивным соударением фонтанов с образованием брызговой струйки (рис. 15). Следует отметить, что аналогичные режимы согласованных автоколебаний наблюдаются также для достаточно больших расстояний между подающими каналами, например, при $L = 50$ см.

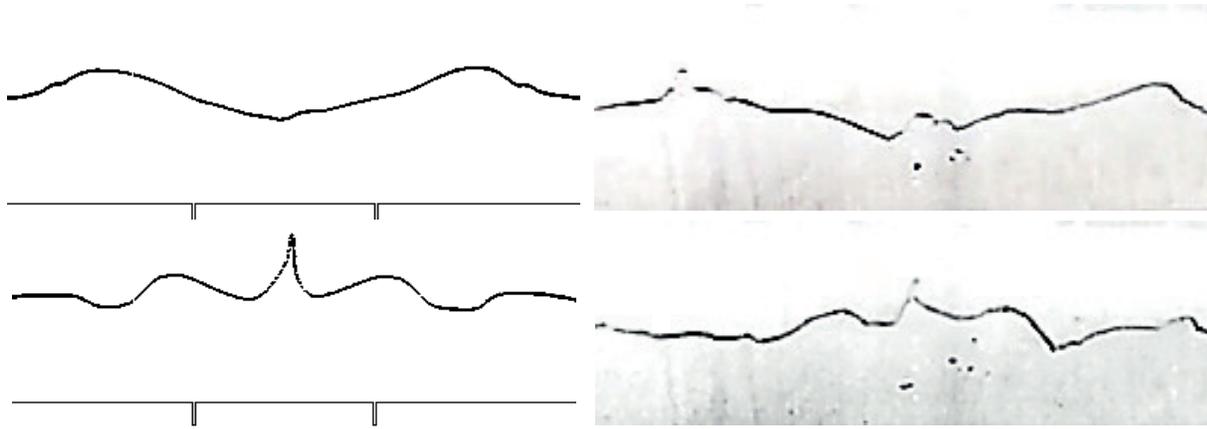


Рис. 15. Расчетные (слева) и экспериментальные (справа) формы свободных поверхностей для $L = 15$ см и $V = 1.75$ м/с

Для режима C характерно образование двух фонтанов, совершающих согласованные автоколебания в одну и ту же сторону. Такой режим впервые появляется при $L = 30$ см и существует в диапазоне скоростей $1 \leq V \leq 2$ м/с. С дальнейшим ростом скорости регулярность автоколебаний нарушается по причине интенсивного волнообразования в межструйном пространстве. На рис. 16 приведено сравнение картин течения, получающихся в расчете и эксперименте для данного режима фонтанирования. Период автоколебаний в опыте был равен $\tau = 0.52$ с и в точности совпал с расчетным значением. В

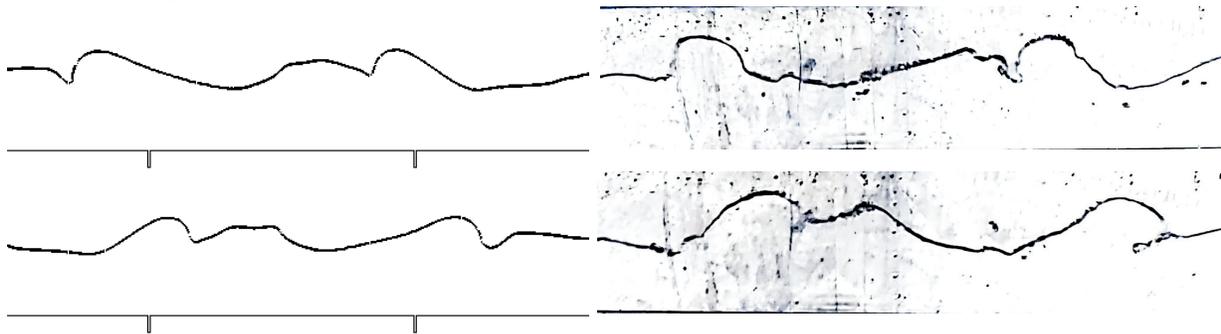


Рис. 16. Расчетные (слева) и экспериментальные (справа) формы свободных поверхностей для $L = 30$ см и $V = 1.5$ м/с

исследованном диапазоне изменения определяющих параметров обнаружены такие значения L , при которых регулярных автоколебаний не существует ни при каком значении V .

Заслуживает быть отмеченным еще один нестационарный режим течения, обнаруженный в диапазоне $3 \leq L \leq 7$ см. Начиная с некоторой скорости, индивидуальной для каждого расстояния L , в области между струями возникает интенсивный вихрь, который воздействует на затопленные участки струй и существенно отклоняет их от первоначального вертикального направления.

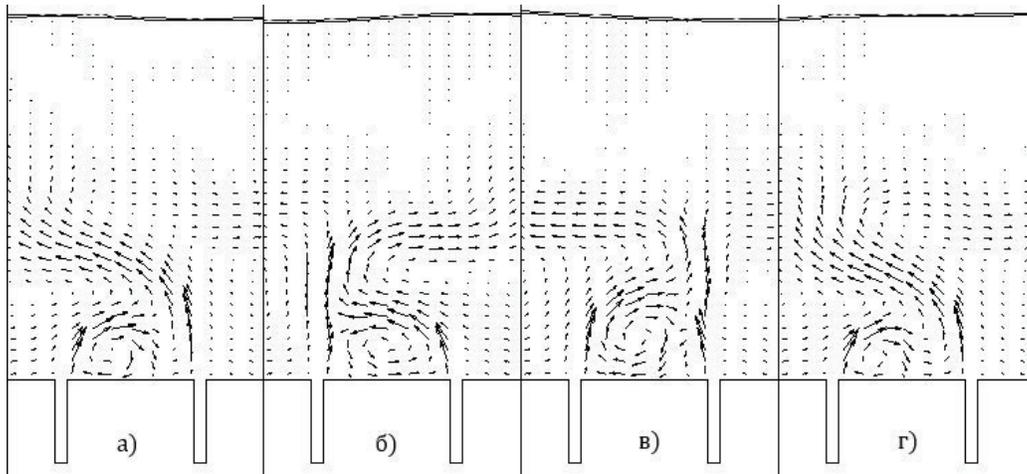


Рис. 17. Векторное поле течения с шагом $\Delta t = 0.04$ с для $L = 3$ см и $V = 1$ м/с

Расчеты показывают (рис. 17), что в этом случае вблизи свободной поверхности скорость жидкости оказывается мала, а свободная поверхность является практически невозмущенной. Эксперименты, проведенные для диапазонов параметров L и V , в которых наблюдался описанный выше эффект, подтвердили результаты расчетов. В работе описаны также стационарные и квазистационарные режимы с образованием одного или двух возвышений свободной поверхности, соответствующие относительно малым значениям скорости.

Глава 3 посвящена изучению проникания через поверхность жидкости наклонных свободных и затопленных струй в относительно узких каналах.

Раздел 3.1 содержит результаты экспериментального изучения эффектов, возникающих при проникании через поверхность жидкости свободных струй, вытекающих из клиновидного сопла. Опыты проводились на стенде, описанном в главе 1. Клиновидное сопло, размещаемое в верхней части уста-

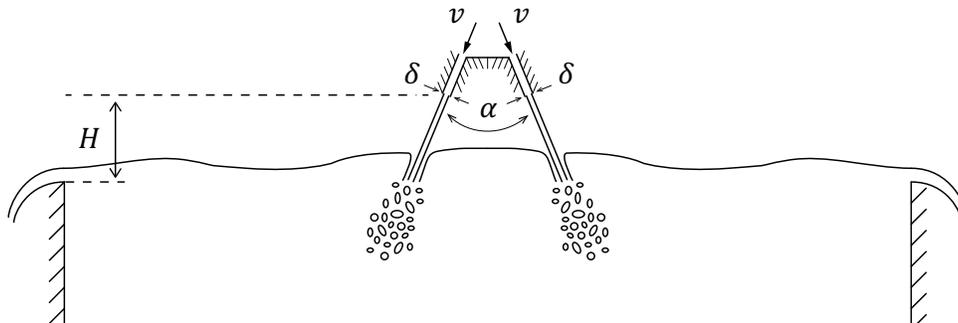


Рис. 18. Схема эксперимента с клиновидной струей.

новки, представляло из себя два канала прямоугольного сечения с шириной $\delta = 0.3$ см, отклоненных друг от друга на угол α (рис. 18). Расстояние между боковыми стенками установки было равным $h = 1$ см. Эксперименты проводились в следующих диапазонах определяющих параметров: $30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$,

$5 \leq H \leq 30$ см, $0 < v < 800$ см/с, где H — расстояние от сопла до начального уровня воды, v — скорости вытекающих струй.

При взаимодействии таких струй со свободной поверхностью жидкости в установке были обнаружены регулярные автоколебательные режимы поперечного перемещения границ струй и их подводных участков. Фотоснимки течения в некоторые последовательные моменты времени в течение одного периода автоколебаний показаны на рис. 19.

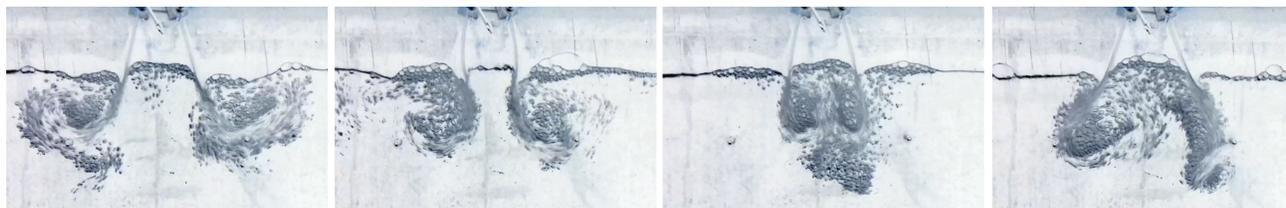


Рис. 19. Фотоснимки течения в некоторые последовательные моменты времени в течение одного периода автоколебаний для случая $H = 10$ см, $\alpha = 30^\circ$, $Fr = 9$

Механизм возникновения автоколебаний оказывается отличным от описанного выше случая вертикальных одиночных струй. Причиной существования автоколебаний является регулярное изменение давления в пространстве между струями. Оно связано, с одной стороны, с уносом эжектируемого струей воздуха из него с последующим возвращением со всплывающими пузырями и, с другой стороны, с периодическим изменением уровня жидкости в пространстве между струями из-за поперечного перемещения проникших в жидкость участков струй. Для автоколебательных режимов были построены экспериментальные зависимости безразмерного периода автоколебаний

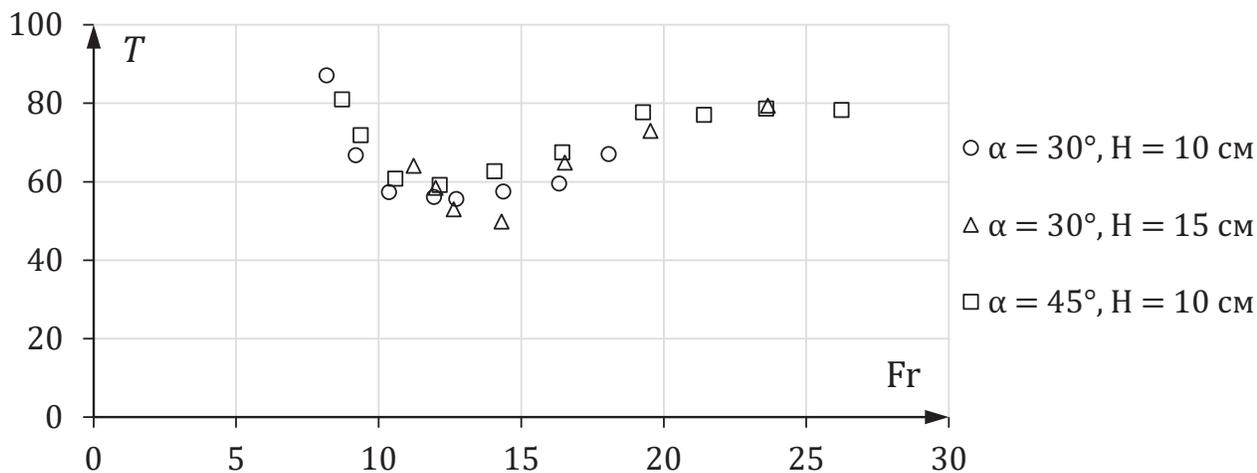


Рис. 20. Зависимости $T(Fr)$ периода автоколебаний границ клиновидной струй при различных значениях α и H

$T = \tau \sqrt{\frac{g}{h}}$ от числа Фруда $Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}$. Пример такой зависимости приведен на рис. 20. Обращает на себя внимание малое отличие зависимостей $T(Fr)$ для разных значений α и H .

В разделе 3.2 представлены результаты изучения процесса взаимодействия со свободной поверхностью наклонной затопленной струи. Эксперименты проводились на установке, представляющей собой относительно узкий канал с расстоянием между боковыми стенками 1 см. Схема эксперимента показана на рис. 21. Оказалось, что струя, вытекающая из наклонного кана-

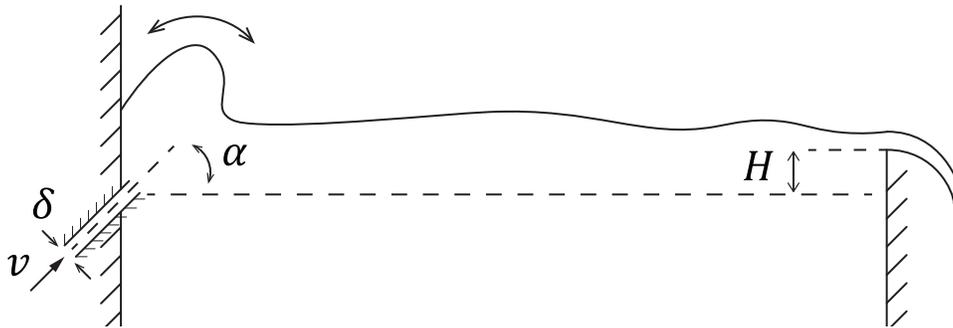


Рис. 21. Схема эксперимента с затопленной пристенной струей

ла в боковой вертикальной стенке при взаимодействии с ней и поверхностью жидкости образует фонтан, совершающий регулярные периодические перемещения к стенке и от нее. Описан механизм появления этого эффекта и установлен диапазон определяющих параметров, в которых он существует. Построены зависимости для периода автоколебаний такого фонтана от скорости вытекающей струи v и заглубления сопла H .

В разделе 3.3 установлена принципиальная возможность применения эжектирующих свойств струи для удаления жидкости из сосудов. Рассматривается резервуар, заполненный водой, вдоль наклонной стенки которого подается струя из плоского канала (рис. 22). При движении вдоль нее струя интенсивно взаимодействует с окружающей жидкостью, увлекая ее за собой.

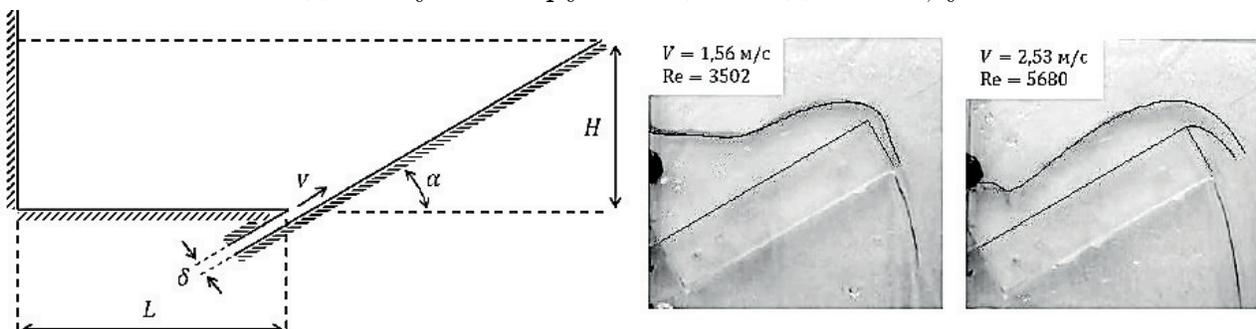


Рис. 22. Схема сосуда, из которого удалялась жидкость; фотоснимки свободной поверхности при частичном опорожнении сосуда

Исследование проводилось численным методом. Предварительно была сделана серия опытов для настройки параметров модели и получения достоверных результатов расчетов. Основной целью являлось сравнительная оценка эффективности данного способа удаления жидкости из сосудов при разных значениях скорости подаваемой струи, ее толщины и угла наклона боковой стенки. В ходе расчетов было выявлено, что сосуд при данной скорости струи может быть опорожнен либо частично, либо полностью. Была найдена минимальная возможная скорость струи, при которой реализуется полное опорожнение сосуда. Выяснилось, что величина этой скорости линейно зависит от начальной глубины жидкости, находящейся в сосуде. Также было установлено, время опорожнения будет минимальным, когда угол наклона стенки составляет 45° .

Получены зависимости времени опорожнения сосудов различной протяженности L от скорости струи при разных размерах щели δ . При одинаковых скоростях струи V время полного опорожнения t_0 имеет меньшее значение у струй большей толщины, однако с увеличением скорости это отличие практически исчезает. Для каждой толщины струи существует диапазон скоростей струй, в котором невозможно полное опорожнение сосуда рассматриваемым способом, и относительно узкий диапазон скоростей с весьма сильной зависимостью времени опорожнения сосуда от скорости струи. Дальнейшее увеличение скорости приводит лишь к постепенному уменьшению времени опорожнения сосуда.

В заключении перечислены основные результаты диссертации:

1. Впервые обнаружен и исследован новый класс регулярных автоколебательных режимов течений, возникающих при проникании вертикальных плоских или круглых свободных струй через свободную поверхность жидкости, находящейся в относительно узких каналах. Возникновение таких режимов связано с внедрением в жидкость воздуха свободными струями. Найдены зависимости безразмерного периода автоколебаний от основных определяющих параметров. Установлено качественное отличие этих зависимостей для плоских и круглых струй. Учет изученных особенностей процесса эжектирования воздуха в жидкость свободными струями может быть полезным при проектировании ряда технических устройств (аэраторов, смесителей и др.).
2. Экспериментально и численно изучен процесс фонтанирования осесимметричных затопленных струй в узких каналах. Получены зависимости безразмерного периода автоколебаний от числа Фруда и относительного заглубления струи. Обнаружено существенное отличие этих зависимостей от случая плоских струй.

3. В численных расчетах обнаружены автоколебательные режимы фонтанирования затопленной струи, вытекающей из прямоугольного канала, для случая отсутствия стенок, органичивающих перемещение жидкости в поперечном направлении. Построены зависимости периода автоколебаний и высоты подъема фонтана от скорости струи.

4. Численно исследован процесс взаимодействия двух затопленных плоских струй в относительно узких каналах. Проведена классификация режимов взаимодействия. Установлены диапазоны изменения определяющих параметров, при которых возникают автоколебательные режимы фонтанирования. Для таких режимов построены зависимости периода автоколебаний системы фонтанов от числа Фруда.

5. Экспериментально обнаружено и изучено явление автоколебаний пристенного затопленного фонтана. Построены графики зависимостей периода колебаний от относительного заглубления щели, угла ее наклона и скорости затопленной струи.

6. Экспериментально исследованы режимы взаимодействия струй жидкости, вытекающих из клиновидного сопла, со свободной границей. Обнаружены регулярные автоколебательные режимы поперечного перемещения границ струи и их подводных участков. Установлено, что механизм автоколебаний оказывается отличным от случая одиночной струи. Построен график зависимости периода автоколебаний от скорости струи и расстояния от сопла до свободной поверхности жидкости.

7. Численно изучен процесс эжектирования жидкости из сосуда конечного размера с наклонной стенкой пристенной затопленной струей. Проведена сравнительная оценка эффективности использованного способа удаления жидкости из сосудов при разных значениях скорости эжектирующей струи и ее толщины.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus, RSCI:

1. Карликов В.П., Нечаев А.Т., Толоконников С.Л. Об автоколебательных режимах проникания вертикальных свободных турбулентных струй через поверхность жидкости // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2017. – № 6. – С. 24–30.
Перевод: *Karlikov V.P., Nechaev A.T., Tolokonnikov S.L.* Self-Oscillatory Regimes of the Penetration of Vertical Free Turbulent Jets through a Liquid Surface // Fluid Dynamics. – 2017. – V. 52. – № 6. – P. 733–739. – DOI: 10.7868/S0568528117060032. (WoS IF – 0.688).
2. Карликов В.П., Нечаев А.Т., Толоконников С.Л. Об автоколебательных режимах проникания свободных или затопленных струй через поверхность жидкости // Водные ресурсы. – 2019. – Т. 46. – № 2. – С. 142–148.
Перевод: *Karlikov V.P., Nechaev A.T., Tolokonnikov S.L.* Self-Oscillation Regimes of Penetration of Free or Plunging Jets through Liquid Surface // Water Resources. – 2019. – V. 46. – № 2. – С. 182–187. – DOI: 10.1134/S0097807819020052. (WoS IF – 0.919).
3. Карликов В.П., Нечаев А.Т., Толоконников С.Л. О фонтанировании вертикальных затопленных осесимметричных струй в относительно узких каналах // Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика. – 2019. – № 3. – С. 54–58.
Перевод: *Karlikov V.P., Nechaev A.T., Tolokonnikov S.L.* Spouting of Vertical Submerged Axisymmetric Jets in Relatively Narrow Channels // Moscow University Mechanics Bulletin. – 2019. – V. 74. – № 3. – P. 65–68. – DOI: 10.3103/S0027133019030038. (Scopus IF – 0.383).
4. Нечаев А.Т. Об эжектировании жидкости из сосуда плоской пристенной струей // Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика. – 2019. – № 2. – С. 67–69.
Перевод: *Nechaev A.T.* Ejection of a Liquid from a Vessel by a Plane Wall Jet // Moscow University Mechanics Bulletin. – 2019. – V. 74. – № 2. – P. 51–53. – DOI: 10.3103/S0027133019020067. (Scopus IF – 0.383).
5. Карликов В.П., Нечаев А.Т., Толоконников С.Л. Об особенностях проникания вертикальных свободных турбулентных струй через поверхность жидкости в узких каналах разной протяженности // Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика. – 2020. – № 4. – С. 61–65.
Перевод: *Karlikov V.P., Nechaev A.T., Tolokonnikov S.L.* On Features of Penetration of Vertical Free Turbulent Jets into Surface of Liquid in Narrow Channels of Different Lengths // Moscow University Mechanics Bulletin. – 2020. – V. 75. – № 4. – P. 110–114. – DOI: 10.3103/S0027133020040020. (Scopus IF – 0.383).