

На правах рукописи

Храбрый Александр Иосифович

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ  
ЖИДКОСТИ СО СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Специальность 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2015

Работа выполнена на кафедре гидроаэродинамики ФГАОУ ВО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

**Научный руководитель:**

Кандидат физико-математических наук, доцент Зайцев Дмитрий Кириллович

**Официальные оппоненты:**

Доктор технических наук, профессор Ткаченко Игорь Вячеславович, заведующий кафедрой гидроаэромеханики и морской акустики Санкт-Петербургского государственного морского технического университета,

Доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Рябинин Анатолий Николаевич, главный научный сотрудник кафедры гидроаэромеханики Санкт-Петербургского государственного университета

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное унитарное предприятие «Крыловский государственный научный центр», г. Санкт-Петербург

Защита состоится «    » \_\_\_\_\_ 2015 года в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.232.30 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: Санкт-Петербург, Петродворец, Университетский пр., 28, математико-механический факультет, ауд. 405.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. М. Горького Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9 и на сайте [http://spbu.ru/disser2/disser/Khrabry\\_AI\\_disser.pdf](http://spbu.ru/disser2/disser/Khrabry_AI_disser.pdf).

Автореферат разослан «    » \_\_\_\_\_ 2015 года.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 211.232.30, д.ф.-м.н., проф.

Кустова Елена Владимировна

## Общая характеристика работы

### *Актуальность проблемы*

Течения со свободной поверхностью играют важнейшую роль во многих сферах взаимодействия человека с природой и в технике. Интересные с практической точки зрения течения являются, как правило, нестационарными, зачастую существенно трехмерными и в условиях натекания потока на те или иные препятствия характеризуются сильной деформацией свободной поверхности. При этом может возникать отрыв вязкого слоя от поверхности, по которой течет поток, вызванный областью повышенного давления перед препятствием.

Большинство встречающихся на практике течений со свободной поверхностью являются турбулентными. При их численном моделировании, как правило, используют ту или иную модель турбулентности. При этом в большинстве опубликованных работ оставлен без рассмотрения вопрос о степени влияния учета турбулентности (как в ядре потока, так и в пристенных областях) на получаемое решение, равно как и вопрос о применимости используемой модели турбулентности для данного класса течений. Также зачастую не уделялось внимания вопросу качества полученного численного решения, его зависимости от схемных факторов.

Для аккуратного учета эффектов турбулентности и вязких пристеночных эффектов, в том числе для правильного предсказания отрыва придонного пограничного слоя, необходимо обеспечить численное решение, практически сошедшее по сетке. Это означает необходимость использования весьма густых расчетных сеток в целом по расчетной области, в сочетании с сильным сгущением к нижней стенке (так называемых «низкорейнольдсовых» сеток). Данные требования в условиях необходимости проведения нестационарных трехмерных расчетов приводят к большим затратам вычислительных ресурсов, что до недавнего времени делало проведение подобных расчетов практически невозможным. Открывшиеся сегодня, в связи с ростом компьютерных мощностей, возможности изменяют ситуацию, и проведение аккуратных расчетов турбулентных нестационарных течений жидкости со свободной поверхностью, с накоплением опыта по преодолению возможных трудностей методического характера, является актуальной задачей.

В настоящее время наибольшее распространение при расчетах течений со свободной поверхностью приобрел т.н. метод VOF (Volume-Of-Fluid), хорошо зарекомендовавший себя в условиях сильной деформации свободной поверхности. В данном методе для определения положения свободной поверхности используется распределение маркер-функции, представляющей собой объемную долю жидкости, динамика которой описывается уравнением конвективного переноса.

Ощутимые затраты вычислительных ресурсов при расчетах сложных течений со свободной поверхностью делают актуальной также задачу поиска эффективных численных схем для решения уравнений метода VOF, позволяющих достичь требуемой

точности решения при сравнительно низких требованиях к густоте расчетной сетки и шагов по времени. Важной составной частью этой задачи является выбор схемы для аппроксимации уравнения конвективного переноса маркер-функции.

### ***Цели работы***

Представляемая диссертационная работа направлена на:

- 1) Разработку основанного на методе VOF численного алгоритма для расчета течений жидкости со свободной поверхностью в условиях сильной деформации последней и с возможным отрывом вязкого придонного слоя перед препятствием.
- 2) Отработку эффективных численных схем для решения системы уравнений метода VOF, позволяющих достичь требуемой точности решения при сравнительно низких требованиях к густоте расчетной сетки и шагов по времени.
- 3) Программную реализацию разработанного численного алгоритма. Верификацию разработанного программного кода на ряде тестовых задач путем сравнения с экспериментальными данными, аналитическими решениями и расчетами, проведенными с использованием других кодов.
- 4) Проведение систематического исследования роли турбулентности и вязких эффектов в придонной области в нестационарных течениях жидкости со свободной поверхностью, включая случаи натекания потока на препятствия различной формы. Оценку применимости популярных моделей турбулентности SST и  $k$ - $\epsilon$  при расчетах рассматриваемого класса течений.
- 5) Применение разработанного программного кода для решения модельных задач практической направленности, включая определение нагрузок, действующих на одиночные и множественные препятствия в форме параллелепипедов.

### ***Научная новизна работы***

1. На серии тестовых задач показано превосходство «сжимающей» схемы M-CICSAM над другими известными схемами, применяемыми для решения уравнения конвективного переноса маркер-функции в методе VOF.

2. Разработана оригинальная методика дополнительного обострения межфазной границы, позволяющая улучшить качество численного решения уравнения конвективного переноса маркер-функции с применением «сжимающих» схем.

3. Предложен способ введения искусственной диффузии маркер-функции для устранения артефактов, возникающих при численном решении задачи о растекании жидкости по сухой стенке с аккуратным разрешением вязкого подслоя.

4. Разработан новый подход к аппроксимации конвективной части уравнений гидродинамики при реализации метода VOF, позволяющий существенно уменьшить сеточную зависимость решения по сравнению с традиционными численными схемами.

5. Проведено систематическое исследование значимости учета эффектов турбулентности при численном моделировании течения, развивающегося после обрушения дамбы и взаимодействующего с препятствием.

6. Получены новые данные о влиянии вязких пристенных эффектов при натекании потока жидкости со свободной поверхностью на препятствия различной формы.

7. Получено численное решение существенно трехмерной задачи о натекании потока на множественные однорядные и двухрядные препятствия и выполнен сопоставительный анализ действующих на них нагрузок.

### ***Достоверность полученных результатов***

Достоверность полученных в работе результатов обеспечена следующим:

- положительной практикой использования метода VOF, представленной в многочисленных литературных источниках;
- систематической проверкой получаемых решений на независимость от используемой расчетной сетки, шагов по времени,
- хорошим согласованием результатов расчетов с известными аналитическими решениями, экспериментальными данными и результатами расчетов, полученными по другим программным кодам.

### ***Практическая значимость работы***

Практическая значимость диссертационной работы состоит в следующем:

- разработанный программный код Flag-FS позволяет моделировать течения жидкости со свободной поверхностью, включая случаи ее сильной деформации, с аккуратным разрешением эффектов придонного трения, в том числе при натекании потока на различные препятствия;
- разработанные рекомендации по выбору схем для аппроксимации уравнений, решаемых при использовании метода VOF, и предложенные модификации схем способствуют уменьшению затрат вычислительных ресурсов при расчетах течений со свободной поверхностью;
- накопленный опыт численного анализа натекания потока на различные препятствия с использованием «высоко-» и «низкорейнольдсовых» расчетных сеток может быть полезен для проведения расчетов данного класса течений практической направленности;
- предложенная методика искусственной диффузии маркер-функции вблизи стенок обеспечивает возможность корректного учета пристеночного трения при расчете растекания жидкости по сухой поверхности с использованием «низкорейнольдсовых» сеток.

### ***Апробация работы***

Результаты работы докладывались на российских и международных конференциях и семинарах: международной конференции по вычислительной гидродинамике (ICCFD-6) (С.-Петербург, 12-16 июля 2010г.); европейской конференции по вычислительным технологиям в прикладной науке и инженерии (ECCOMAS) (Вена, Австрия, 10-14 сентября 2012г.); международной научной конференции “Супервычисления и

математическое моделирование” (Саров, 1-5 октября 2012г.); европейской конференции по вычислительной гидродинамике (ECFD-VI) (Барселона, Испания, 20-25 июля 2014г.); суперкомпьютерной научной конференции “Научный сервис в сети Интернет” (г. Новороссийск, 22-27 сентября 2014г.); межвузовском видеосеминаре по аэромеханике (ЦАГИ – ИТПМ СО РАН – СПбПУ – НИИМ МГУ, 11 ноября 2014г.).

### ***Публикации по теме диссертации и личный вклад автора***

Основные результаты работы изложены в восьми научных публикациях, приведенных в конце автореферата, в том числе три публикации в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК.

В получение результатов, вошедших в диссертационную работу, автор внес определяющий вклад: он принимал активное творческое участие в разработке численного алгоритма для расчета течений жидкости со свободной поверхностью, а его программная реализация, а также все расчеты, результаты которых представлены в диссертации, их обработка и анализ выполнены им лично. Соавторы публикаций – д.ф.-м.н. Смирнов Е.М. и к.ф.-м.н. Зайцев Д.К. – осуществляли консультирование по вопросам, связанным, соответственно, с моделированием турбулентности и со свойствами численных схем, а также по постановкам задач и интерпретации полученных результатов; д.т.н. Горячев В.Д. оказал содействие в графическом представлении результатов решения задачи о натекании потока на множественные препятствия.

### ***Положения, выносимые на защиту***

Результаты сравнительного анализа работоспособности различных численных схем, применяемых для аппроксимации уравнения конвективного переноса маркер-функции в методе VOF.

Численные методики, разработанные для улучшения качества решения уравнения переноса маркер-функции.

Результаты тестовых расчетов течений жидкости со свободной поверхностью в сопоставлении с экспериментальными данными.

Результаты численного исследования роли турбулентности и пристеночного трения в течениях жидкости со свободной поверхностью применительно к задачам о натекании потока на препятствия различной формы.

Результаты сопоставительного численного анализа величин нагрузок, действующих на множественные однорядные и двухрядные препятствия в форме параллелепипедов при натекании на них потока жидкости.

### ***Структура и объем работы***

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Работа изложена на 154 страницах машинописного текста, включая 113 рисунков. Список литературы содержит 144 наименования.

## *Содержание работы*

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы исследования, ее научное и практическое значение, сформулированы основные задачи работы. Отмечается, что программная реализация разработанного численного алгоритма проводилась путем расширения возможностей разрабатываемого на кафедре гидроаэродинамики СПбПУ и исходно не предназначавшегося для расчета течений со свободной поверхностью гидрогазодинамического программного кода SINF/Flag-S.

В первой главе приводится обзор литературы по тематике работы.

В параграфе 1.1 приводится обзор методов расчета течений со свободной поверхностью и их классификация, указаны их достоинства и недостатки. Обосновывается выбор метода VOF.

В параграфе 1.2 приведены примеры представленных в литературе расчетов интересных с практической точки зрения течений со свободной поверхностью. Отмечены достоинства и недостатки рассмотренных работ. Обосновывается актуальность задач диссертационного исследования.

Во второй главе приведены уравнения, описывающие турбулентные течения со свободной поверхностью, и основные положения методики их дискретизации.

В параграфе 2.1 приводятся уравнения, описывающие, согласно методу VOF, движение системы несмешивающихся несжимаемых жидкости и газа (как единой среды с переменными материальными свойствами). Дан краткий обзор методов моделирования турбулентных течений и приведены формулировки моделей SST (низкорейнольдсовая) и  $k$ - $\varepsilon$  (стандартная высокорейнольдсовая), используемых в настоящей работе. Приведены формулировки пристенных функций для этих моделей (для модели SST – универсальные пристенные функции, предназначенные для работы в широком диапазоне значений  $y^+$ ).

В параграфе 2.2 описан метод конечных объемов, используемый в настоящей работе для дискретизации определяющих уравнений. Приведены схемы второго порядка, традиционно применяемые для аппроксимации конвективных потоков и производных по времени.

В третьей главе представлены методика и результаты систематического тестирования современных специализированных схем для аппроксимации уравнения конвективного переноса маркер-функции.

В параграфе 3.1 приведен критерий локальной ограниченности решения конвективного уравнения (CBC-критерий) для расчета одномерных течений с использованием явных и неявных схем аппроксимации по времени, а также даны формулировки трех специализированных т.н. «сжимающих» схем для аппроксимации конвективных потоков в уравнении переноса маркер-функции – двух наиболее популярных в настоящее время схем (CICSAM и HRIC), а также относительно недавно появившейся схемы M-CICSAM (Waclawczyk & Koronowicz, 2008).

В параграфе 3.2 проводится систематическое тестирование схем, как традиционных противопоточных схем первого и второго порядка, так и специализированных «сжимающих», а также метода геометрической реконструкции, реализованного в коммерческом программном пакете ANSYS Fluent; в сочетании с различными схемами аппроксимации по времени. Рассматривались задачи о сносе (в заданном поле скорости) различной формы «пятен» жидкости, а также модельная задача об обрушении дамбы.

Предварительные тесты с использованием «стандартных» схем показали, что они не подходят для аппроксимации уравнения переноса объемной доли жидкости, так как приводят к «размытию» межфазной границы на множество ячеек расчетной сетки. Таким образом, для решения этого уравнения требуются специализированные схемы.

На рис. 1 показаны результаты решения задачи о сносе «пятна» в форме полого квадрата однородным потоком на декартовой расчетной сетке с использованием специализированных схем при числах Куранта 0,5 и 0,75. Для аппроксимации по времени использовалась схема Кранка-Николсон (за исключением метода геометрической реконструкции, с которым использовалась явная схема), показавшая по результатам тестов превосходство над схемами первого порядка и трехслойной схемой второго порядка, а именно: способность обеспечить то же качество результатов при больших числах Куранта. Как видно из рисунка, схема M-CICSAM превосходит другие схемы, обеспечивая высокое качества решения (отсутствие размытия «пятна» и искажения его формы) при числах Куранта вплоть до 0,75.

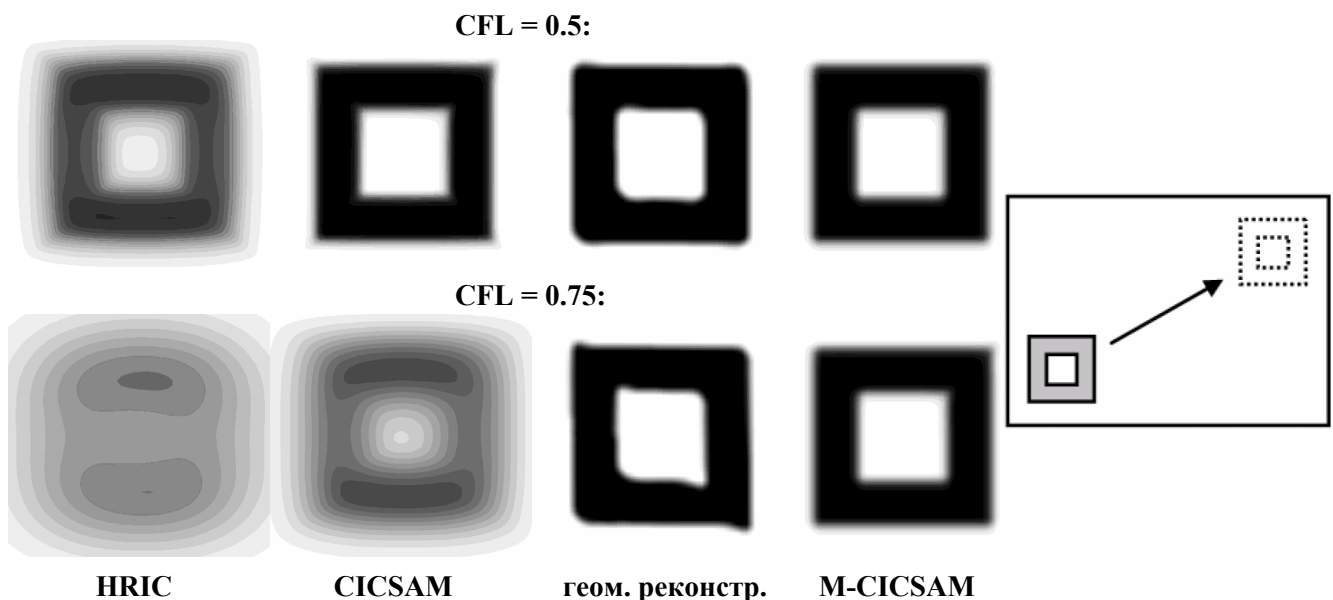


Рис. 1. Конечная форма «пятна», имевшего форму полого квадрата, после сноса однородным потоком на расстояние около 3,5 внешних габаритов пятна

Тесты с другими формами пятен, расчетными сетками различного качества и разными видами движения подтвердили способность схемы M-CICSAM обеспечивать высокое качество результатов при более высоких числах Куранта, а также показали меньшую ее чувствительность к качеству расчетной сетки и способность работать в



условиях сложного поля скорости. В дальнейших расчетах использовалась схема M-CICSAM в сочетании со схемой Кранка-Николсон.

В четвертой главе описаны особенности реализации метода VOF в настоящей работе, в том числе оригинальные численные методики.

В параграфе 4.1 представлены разработанные автором вычислительные приемы для улучшения качества решения уравнения переноса маркер-функции.

В пункте 4.1.1 описана методика дополнительного обострения межфазной границы, предназначенная для устранения остаточного ее «размытия», имеющего место при использовании схем HRIC и M-CICSAM (см. рис. 2). Данный эффект иллюстрируется на рис. 2б, где поле маркер-функции  $C$  показано в масштабе (0–0,01): видно, что вокруг «пятна» имеет место «ореол» толщиной в несколько ячеек с небольшими, но отличными от нуля значениями маркер-функции (в обычном масштабе 0–1, использованном для построения рис. 2а, «ореол» не заметен).

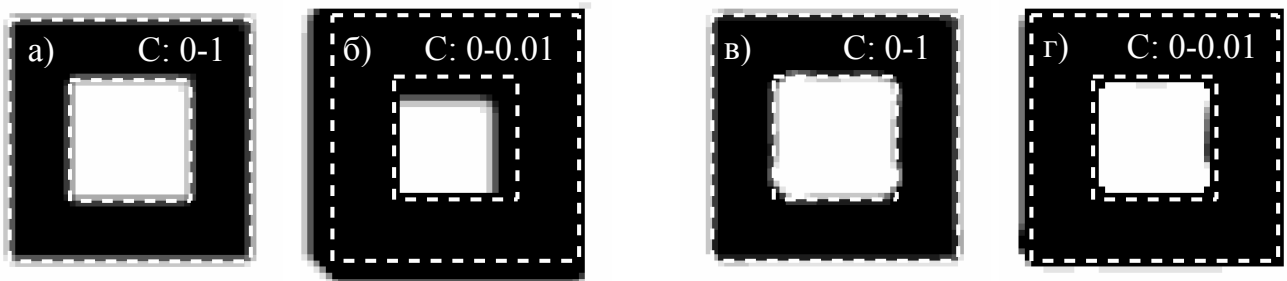


Рис. 2. Конечное поле маркер-функции, рассчитанное по схеме M-CICSAM без введения дополнительного обострения межфазной границы (а и б) и с обострением (в и г).

Пунктиром показано положение «пятна» при точном решении

Несмотря на кажущуюся незначительность данного явления, оно может приводить к существенным искажениям в численном решении, поскольку плотность эффективной среды внутри «ореола» может быть в разы (или даже десятки раз) больше плотности газа, и ее инерция весьма существенна. Так, к примеру, при расчете удара о стенку перетекающего через препятствие потока воды (рис. 3а), частички окружающего поток «ореола» выбрасываются с высокими скоростями вдоль стенки (рис. 3б) и не могут быть остановлены за счет взаимодействия с «легким» окружающим воздухом. Как следствие, формируется нефизичный вихрь (рис. 3в).

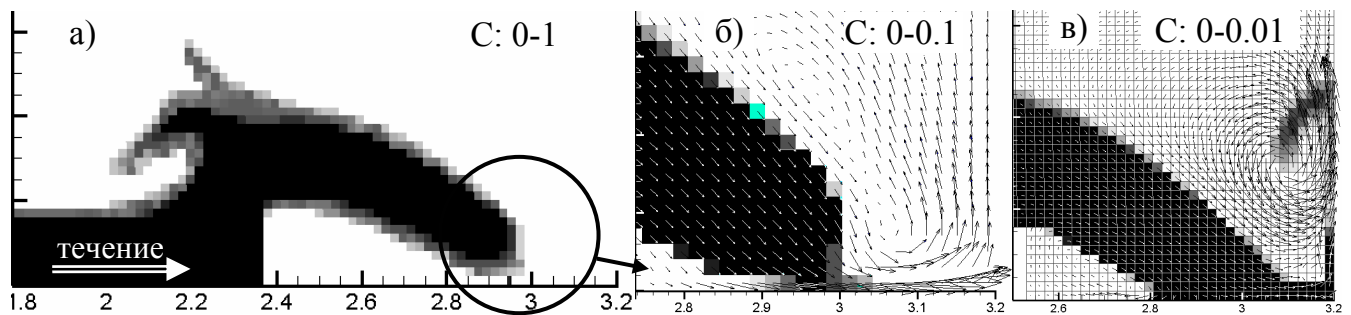


Рис. 3. Поле маркер-функции в момент времени, соответствующий удару жидкости о нижнюю стенку (а, б), и в более поздний момент (в)

Для преодоления описанной проблемы необходимо введение специальной методики для «обострения» межфазной границы. В литературе представлены «обостряющие» методики, которые определяют новые значения маркер-функции в ячейках расчетной сетки как функцию от старых значений. В ходе диссертационного исследования была опробована действующая таким образом методика IS-GMC (Aliabadi et al., 2002), достоинством которой является сохранение общего количества маркер-функции (и как следствие, объема жидкости) в расчетной области в целом. Выяснилось, однако, что при расчете рассматриваемого течения она приводит к сильному искажению формы занимаемого жидкостью объема, бесконтрольно перебрасывая жидкость с одной части свободной поверхности в другую. В настоящей работе предложена оригинальная методика для обострения межфазной границы. Методика протестирована на ряде модельных задач. Показано, что она позволяет практически полностью подавить окружающий жидкость «ореол» (см., к примеру, рис. 2в,г), сохраняет общий объем жидкости и не искажает форму свободной поверхности, в том числе и в случаях ее сильной деформации.

Пункт 4.1.2 посвящен проблеме, связанной с возникновением нефизичной пристенной прослойки воздуха при расчете по методу VOF растекания жидкости по сухой стенке с использованием «низкорейнольдсовых» расчетных сеток. На рис. 4. приведено придонное поле маркер-функции, полученное в расчетах по коду Flag-FS и пакету ANSYS Fluent-14.0 растекания столба жидкости по горизонтальной поверхности (использовалась сетка, обеспечивающая примерно значение  $Y^+=1$ , здесь и далее по тексту под  $Y^+$  понимается максимальное из локальных значений  $y^+$  для прилегающих к стенке ячеек). Видно, что в обоих расчетах имеют место схожие картины течения – с расширяющейся в сторону движения жидкости пристенной воздушной прослойкой. Таким образом, можно заключить, что наблюдаемый нефизичный эффект обусловлен не возможными ошибками в программной реализации метода VOF, а свойствами этого метода как такового.

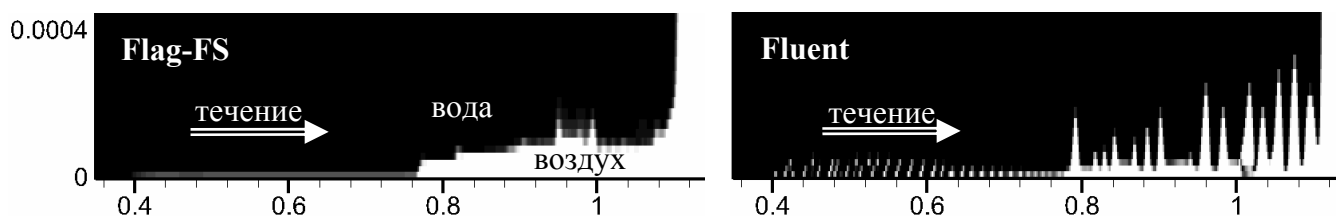


Рис. 4. Поле маркер-функции вблизи нижней стенки (изображения сильно растянуто в вертикальном направлении) по результатам расчетов растекания столба жидкости вдоль горизонтальной плоскости с использованием «низкорейнольдсовой» сетки

Возникающая прослойка воздуха приводит к существенному занижению трения на стенке, и для получения сошедшегося по сетке решения должна быть устранена. Для этой цели в работе применялась оригинальная численная методика, вводящая искусственную диффузию объемной доли жидкости вблизи стенки. Методика позволила полностью

подавить образование воздушной прослойки и, как следствие, обеспечила возможность проверки работоспособности универсальных пристенных функций (в сочетании с SST моделью) при расчетах данного класса течений. По результатам проведенных тестов было установлено, что, несмотря на нестационарность течения, пристенные функции работают весьма удовлетворительно, обеспечивая близкие значения трения в широком диапазоне  $y^+$ .

В пункте 4.1.3 описана вычислительная методика, позволяющая повысить экономичность вычислений посредством выполнения нескольких дробных шагов по времени при решении уравнения переноса маркер-функции в пределах одного шага решения уравнений гидродинамики.

В параграфе 4.2 изложены численные схемы и методы для решения уравнений, описывающих движение системы жидкость-газ. В первых четырех пунктах описываются элементы (в том числе оригинальные) численной методики, применяемой для аппроксимации различных частей уравнений переноса импульса и параметров турбулентности. В пункте 4.2.1 приведен оригинальный подход к аппроксимации конвективной части уравнений, позволяющий избежать искажений в численном решении, связанных со значительным и резким изменением плотности среды в окрестности межфазной границы. В пункте 4.2.2 описана методика аппроксимации диффузионных слагаемых. В пункте 4.2.3 сопоставляются две схемы второго порядка аппроксимации по времени: трехслойная неявная схема и схема Кранка-Николсон с введенной поправкой для предотвращения развития осцилляций на шагах по времени. Приводятся результаты тестовых расчетов, показывающие способность схемы Кранка-Николсон обеспечить, при той же точности, возможность использования бóльших шагов по времени. В пункте 4.2.4 рассматриваются разные способы аппроксимации градиента давления в уравнении движения. Поскольку традиционно используемая линейная интерполяция значений давления на грани ячеек в условиях статического равновесия жидкости и газа приводит к возникновению осцилляций скорости и давления вблизи межфазной границы, была исследована возможность использования интерполяции давления на грани ячеек с весами, равными значению плотности среды в смежных по грани ячейках (хорошо работающая в условиях статики). Выяснилось, однако, что такая интерполяция плохо работает в условиях свободного падения жидкости в воздушной среде. В окончательном варианте использовалось переключение между линейной и «взвешенной» интерполяцией, в зависимости от угла между нормалью к границе и направлением силы тяжести.

Последние три пункта параграфа 4.2 посвящены изложению вычислительного алгоритма в целом. Описан метод SIMPLEC для «перевязки» полей давления и скорости, поправка Rhie-Chow для подавления осцилляций в поле давления, общий алгоритм продвижения по физическому времени и выполнения итераций по нахождению решений уравнений на временном шаге. Дана общая информация об используемых солверах

СЛАУ (основанных на методах сопряженных и бисопряженных градиентов). Описана методика распараллеливания вычислений на основе стратегии «domain-decomposition».

Пятая глава посвящена тестированию разработанной численной методики и оценке значимости вязких эффектов при натекании потока жидкости со свободной поверхностью на препятствия различной формы. Рассматривается ряд модельных задач, соответствующих экспериментам, в которых течения близки к двумерным (расчеты проводятся в двумерной постановке, результаты сопоставляются с опытными данными). Для всех задач проводится исследование сеточной сходимости решения (как в основной части расчетной области, так и вблизи нижней стенки, по которой течет поток). Проверяется также степень чувствительности результатов к начальным значениям параметров турбулентности, варьируемым в разумных пределах.

В параграфах 5.1 и 5.2 рассматривается модельная задача о растекании воды по сухой или покрытой тонким слоем воды горизонтальной поверхности после обрушения дамбы (см. рис. 5). По результатам тестовых расчетов установлено, что модель  $k-\varepsilon$  следует использовать с поправкой Като-Лаундера. На рис. 6 для случая, когда на горизонтальной поверхности изначально имеется слой воды толщиной 38 мм, приведены результаты расчетов по модели  $k-\varepsilon$ , как с поправкой Като-Лаундера, так и без нее. Видно, что результаты расчета при использовании поправки хорошо согласуются с данными экспериментов (Janosi et al., 2004), в то время как для стандартной версии модели наблюдаются значительные различия между результатами расчета и эксперимента. Данные различия обусловлены тем, что стандартная  $k-\varepsilon$  модель генерирует многократно завышенный уровень турбулентной вязкости уже на начальном этапе течения.

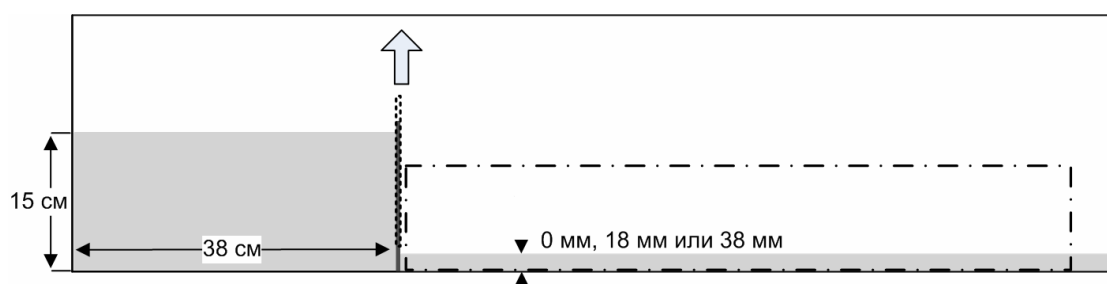


Рис. 5. Постановка задачи, рассмотренной в параграфах 5.1 и 5.2

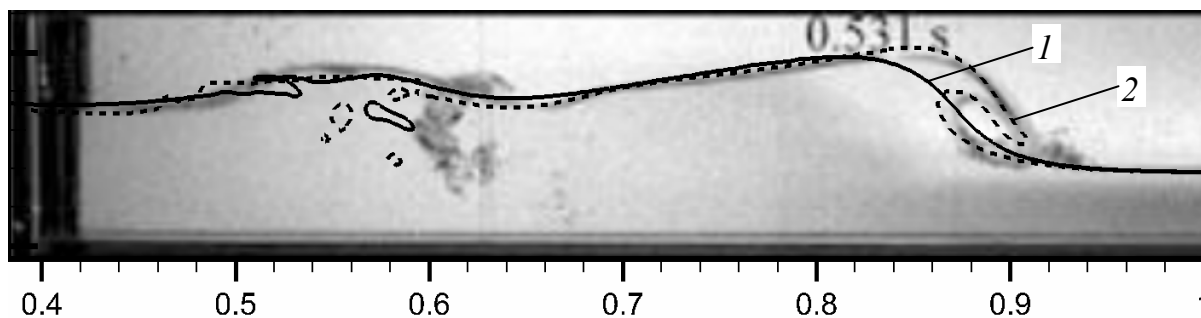


Рис. 6. Положение свободной поверхности в момент времени 0,531 с: фотография эксперимента и результаты расчетов с использованием модели  $k-\varepsilon$  с поправкой Като-Лаундера (1) и без нее (2). Отображаемая область обведена штрих-пунктиром на рис. 5

В целом же, по итогам представленных в параграфах 5.1 и 5.2 исследований установлено, что учет турбулентности (при обеспечении адекватного уровня турбулентной вязкости), равно как и трения о стенку на результаты расчета растекающегося потока влияния практически не оказывает: результаты расчетов с моделями турбулентности SST и  $k-\varepsilon$  (с поправкой) оказались очень близкими к данным вычислений без учета турбулентности и трения о стенку.

В параграфе 5.3 рассматривается натекание потока на пологое трапецевидное препятствие (см. рис. 7) в соответствии с условиями экспериментов (Ozmen-Cagatay & Kosaman, 2011). Использовалась модель SST и сетки с различной степенью сгущения к нижней стенке ( $Y^+ = 1$  и  $Y^+ = 100$ ). В расчетах обнаружен отрыв придонного пограничного слоя перед препятствием и формирование рециркуляционной зоны, оказывающей заметное влияние как на течение в целом, так и на форму свободной поверхности (для оценки влияния отрывной зоны проводится сравнение с результатами расчета, выполненного с условием проскальзывания на стенках; см. рис. 8). Установлено, что для данного течения применение пристенных функций не искажает решение: результаты расчетов на вышеназванных двух сетках довольно близки друг к другу и хорошо согласуются с данными эксперимента.

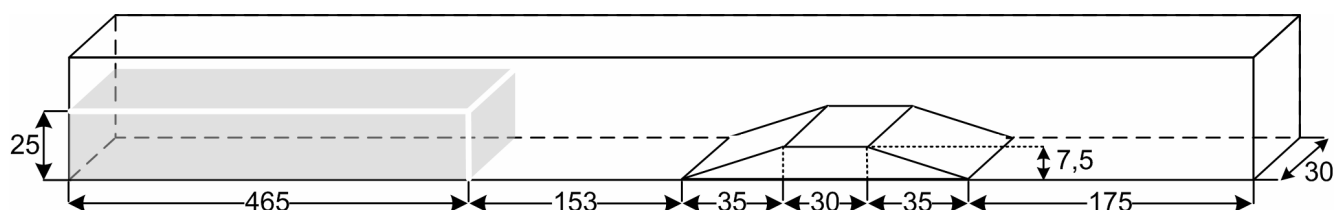


Рис. 7. Постановка задачи, рассмотренной в параграфе 5.3

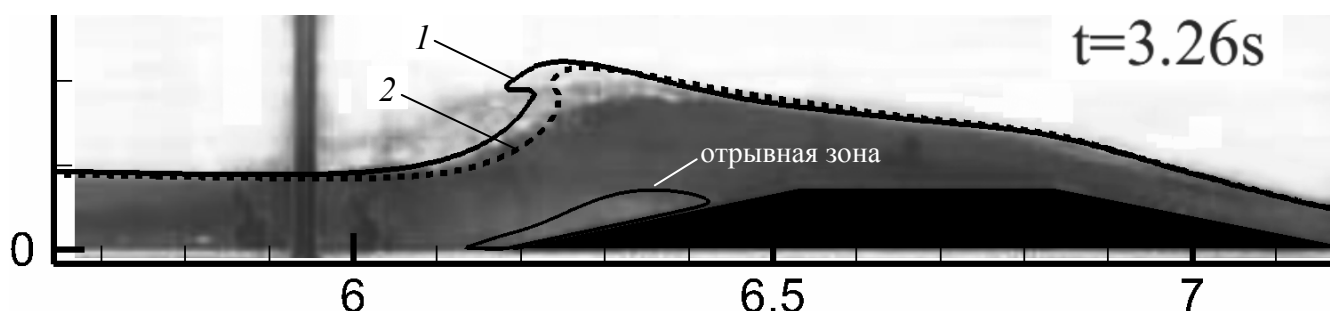


Рис. 8. Фотография эксперимента и результаты расчетов с учетом трения о стенку (1) и без него (2)

Еще более значимыми эффекты пристенного трения оказываются в случае течения, рассмотренного в параграфе 5.4 для условий экспериментов (Soares-Fraza, 2007). Постановка задачи сходна с рассмотренной в предыдущем параграфе: близки габариты и расстояния, схожи и пропорции пологого препятствия, имеющего здесь треугольную форму. Основное отличие заключается в высоте начального уровня воды, удерживаемой «дамбой»: в данном случае она уменьшена в два с лишним раза. В результате этого поток, натекающий на препятствие, оказывается менее глубоким и менее скоростным,

что приводит к более интенсивному формированию отрывных зон. На рис. 9а иллюстрируются две полученные в расчетах отрывные зоны, существенно влияющие на течение, и приводящие, в частности, к формированию «горбов» на свободной поверхности, также видимых и в эксперименте. Как и в предыдущей задаче, результаты расчетов на «высокорейнольдсовой» ( $Y^+ = 80$ ) и «низкорейнольдсовой» ( $Y^+ = 1$ ) сетках оказались довольно близкими. Как и следовало ожидать, расчет без учета трения о стенку не предсказывает возникновения отрывных зон, и форма свободной поверхности далека от наблюдаемой в опытах (рис.9б).

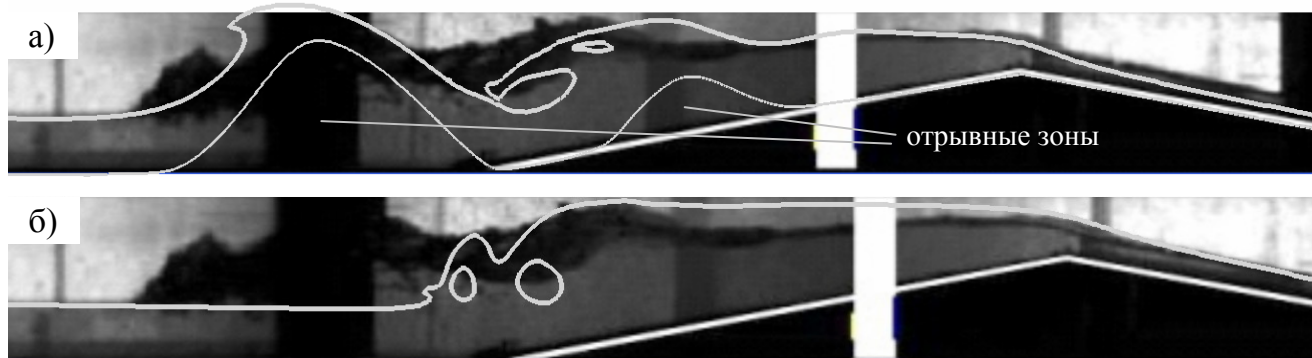


Рис. 9. Фотография эксперимента и результаты расчетов с учетом трения о стенку (а) и без него (б)

Результаты исследования влияния масштабного фактора на относительный размер отрывных зон представлены в том же параграфе. Были проведены расчеты с уменьшенной (в 10 и 100 раз) молекулярной вязкостью среды (отметим, что уменьшение вязкости в 100 раз эквивалентно увеличению высоты препятствия в 22 раза – до 140 см, если вязкость неизменна). Результаты вычислений показали, что отрывные зоны постепенно уменьшались с ростом масштаба задачи (по отношению к размерам расчетной области), однако все равно оставались довольно крупными, по-прежнему формируя «горбы» на свободной поверхности.

Кроме того, в [параграфе 5.4](#) приведены данные по оценке влияния поправки, вводимой в модель турбулентности для учета эффектов кривизны линий тока. Течение внутри рециркуляционных (отрывных) зон характеризуется значительной кривизной линий тока, и для этих зон стандартные полуэмпирические модели турбулентности могут приводить к существенному завышению турбулентной вязкости. Для SST модели известна ее модифицированная версия (SST-CC) с поправкой на кривизну линий тока (Smirnov & Menter, 2009). В результате сопоставительных расчетов было установлено, что введение поправки на кривизну линий тока приводит к уменьшению турбулентной вязкости в ядре отрывных зон почти в два раза, однако это практически не сказывается на картине течения.

[Параграф 5.5](#) посвящен моделированию отражения потока воды от вертикальной стенки (см. рис. 10а). Проведена серия расчетов с использованием расчетных сеток с различной степенью сгущения к нижней стенке ( $Y^+$  от 1 до 200). Как и в случае

препятствий, рассмотренных ранее, перед стенкой формируется массивная отрывная зона (см. рис. 10б). Однако, в отличие от предыдущих задач, различия в форме отрывной зоны при использовании расчетных сеток с разной степенью сгущения к стенке приводят к существенному изменению решения в целом (см. рис. 10в,г). Сеточно-сошедшее решение, достигаемое при использовании «низко-рейнольдсовых» расчетных сеток (значение  $Y^+$  около 1), находится в наилучшем согласовании с экспериментальными данными (Hu & Sueyoshi, 2010).

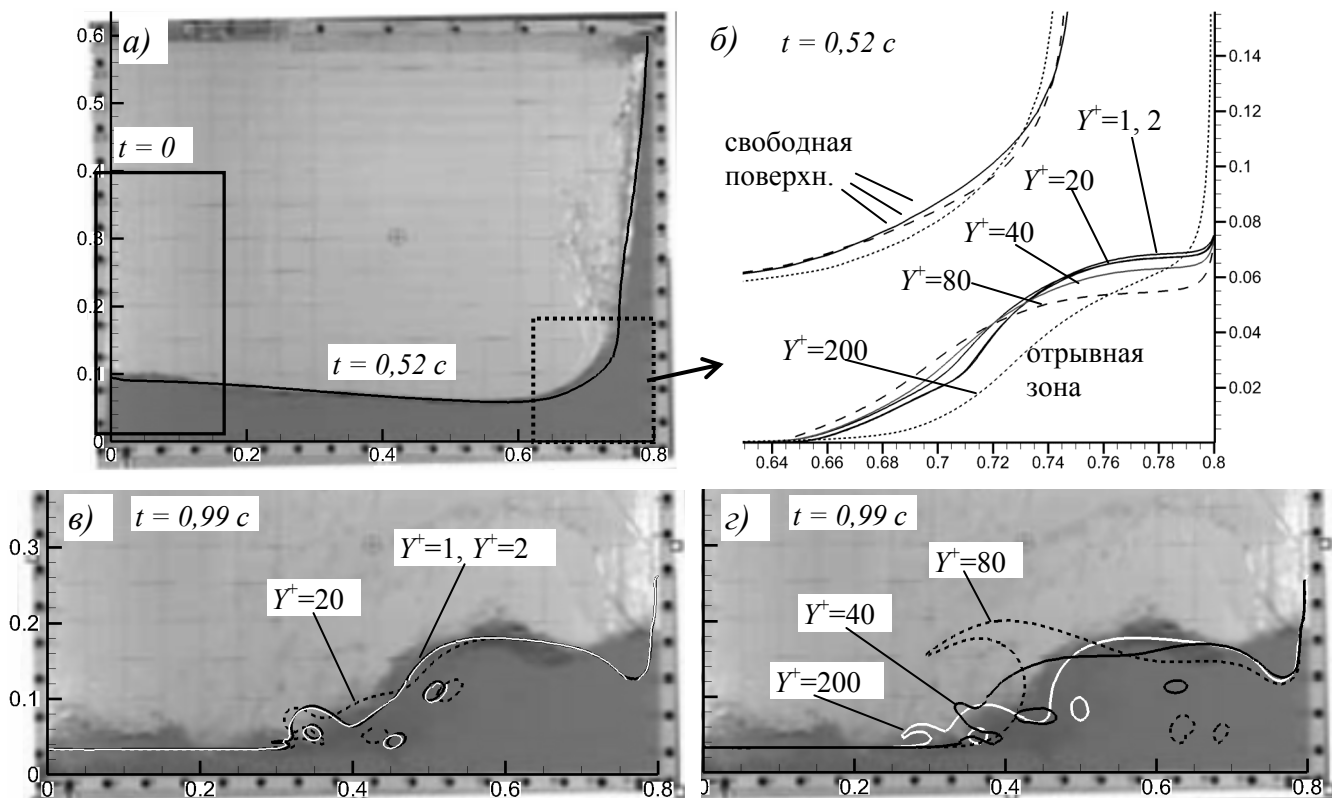


Рис. 10. Положения свободной поверхности и отрывной зоны (б) в моменты времени 0,52 с и 0,99 с, полученные на сетках с различными значениями  $Y^+$

Для данного течения также были проведены расчеты с условием проскальзывания на стенках, с учетом и без учета турбулентности. Установлено, что наличие турбулентной вязкости в ядре потока практически не влияет на картину течения. Был выполнен и расчет с моделью SST-CC. Вывод оказался тем же, что и для задачи из параграфа 5.4: имеет место уменьшение турбулентной вязкости в центре отрывной зоны без заметного влияния на ее конфигурацию и течение в целом.

Параграф 5.6 посвящен численному моделированию перетекания потока воды через квадратное препятствие (высотой 16 см). В первой части параграфа представлены результаты расчетов без учета турбулентности и трения о стенки (использовались расчетные сетки без сгущения к стенкам). Исследовалась чувствительность решения к густоте расчетной сетки и к величине шагов по времени, проводилось сопоставление результатов, полученных по кодам Flag-FS и ANSYS Fluent-14.0. Как видно по рис. 11, код Flag-FS способен обеспечить решение, близкое к сеточно-сошедшему, уже на сетке

с шагом  $h = 1$  см, в то время как Fluent дает аналогичное решение лишь на сетке с шагом  $h = 0.5$  см. Показано также, что шаг по времени, обеспечивающий типичное значение числа Куранта 0,8, является уже достаточно малым для получения неискаженного решения.

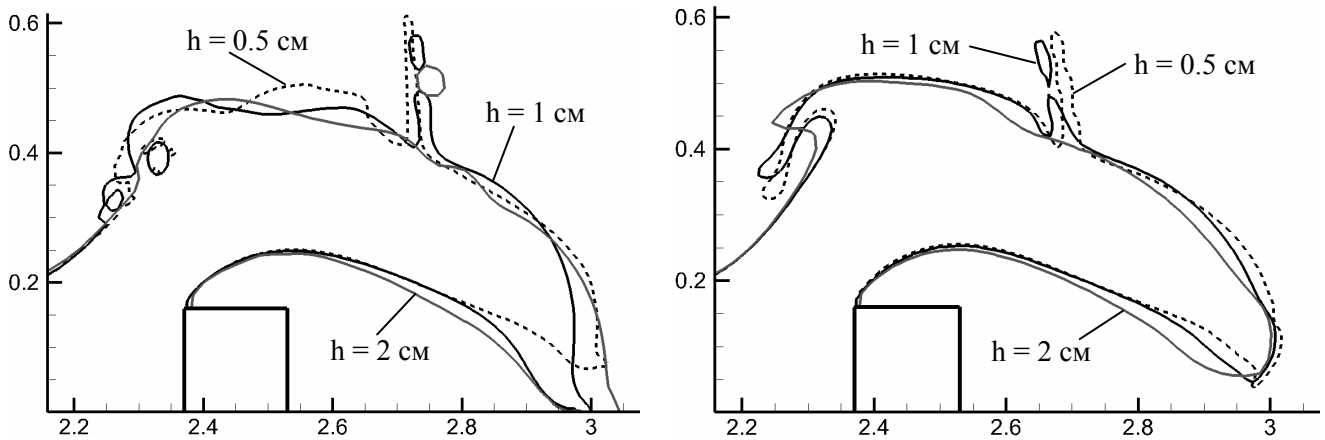


Рис. 11. Перетекание жидкости через препятствие: расчеты по кодам Fluent-14.0 (слева) и Flag-FS (справа) с использованием сеток различного шага  $h$

Далее в [параграфе 5.6](#) представляются результаты расчетов, выполненных с учетом эффектов турбулентности и пристеночного трения. Как и в случае течения, рассмотренного в предыдущем параграфе, обнаружена заметно влияющая на общую конфигурацию течения отрывная зона перед препятствием, для правильного предсказания которой и течения в целом необходима «низкорейнольдсовая» расчетная сетка с сильным сгущением к нижней стенке (см. рис. 12).

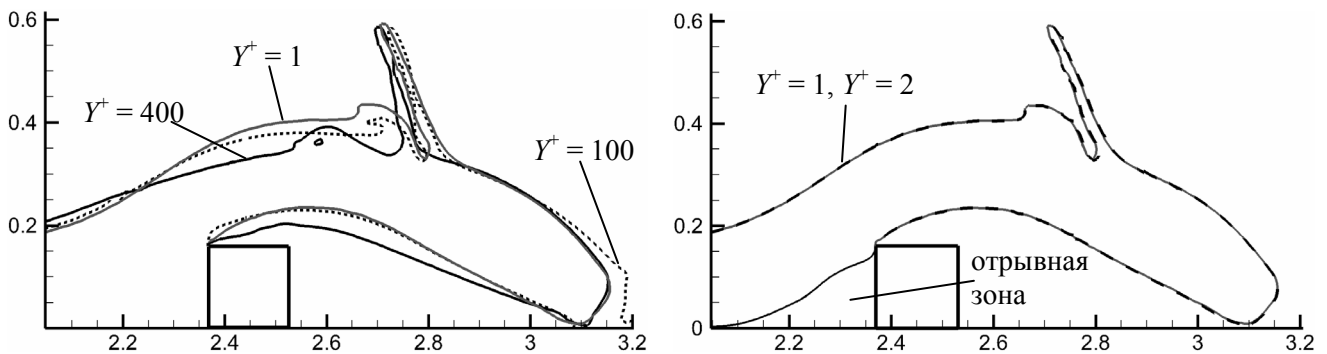


Рис. 12. Перетекание жидкости через препятствие: результаты расчетов по коду Flag-FS на сетках с различными значениями  $Y^+$

Отличительной же особенностью данного течения от всех рассмотренных ранее является его сложность, переходящая в хаотичность. Сильное бурление, возникающее вследствие трех соударений, претерпеваемых потоком воды (о препятствие, о нижнюю и вертикальную стенку), сопровождается образованием большого количества мелких структур (капелек, пузырьков и пр.). Разрешение всех этих структур потребовало бы очень густой расчетной сетки в основной части расчетной области и огромных затрат вычислительных ресурсов, что представляется невозможным в рамках настоящей



работы. Тем не менее, влияние на решение в целом со стороны недоразрешенных структур оказалось весьма ограниченным: решения, полученные на трех последовательно измельченных сетках, оказались близки друг к другу в плане крупномасштабной структуры течения, а значения давления в точках на наветренной стороне препятствия почти совпали.

Другим следствием усложняющейся картины данного течения оказалось заметное влияние на решение учета турбулентности в ядре потока (для исследования которого проведены расчеты с условием проскальзывания на стенках, с учетом турбулентности и без него). Начиная с некоторого момента времени, решения, полученные с моделями турбулентности SST и  $k-\varepsilon$  (близкие друг к другу) заметно отличаются от результатов расчета без учета турбулентности. Отличие заключается в большей «гладкости» решений (меньшем количестве мелкомасштабных возмущений) при учете эффектов турбулентной вязкости.

В шестой главе представлены результаты расчетов отдельных, интересных с практической точки зрения течений со свободной поверхностью.

В параграфе 6.1 рассматривается трехмерная задача о натекании потока на одиночное препятствие в форме параллелепипеда (см. рис. 13) для условий экспериментов, проведенных в центре MARIN (Нидерланды) и описанных, в частности, в (Kleefsman et al., 2005). Шаг используемой в расчете сетки, степень ее сгущения к нижней стенке и шаг по времени задавались, исходя из представленного в параграфе 5.6 опыта решения двумерной задачи, постановка которой соответствует плоскости симметрии в трехмерной конфигурации. Проводится сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными для уровня жидкости над точками мониторинга, и для давления в точках на препятствии. Получено хорошее согласование для давления в точках на наветренной стороне препятствия (см. рис. 14) и удовлетворительное согласование для других параметров.

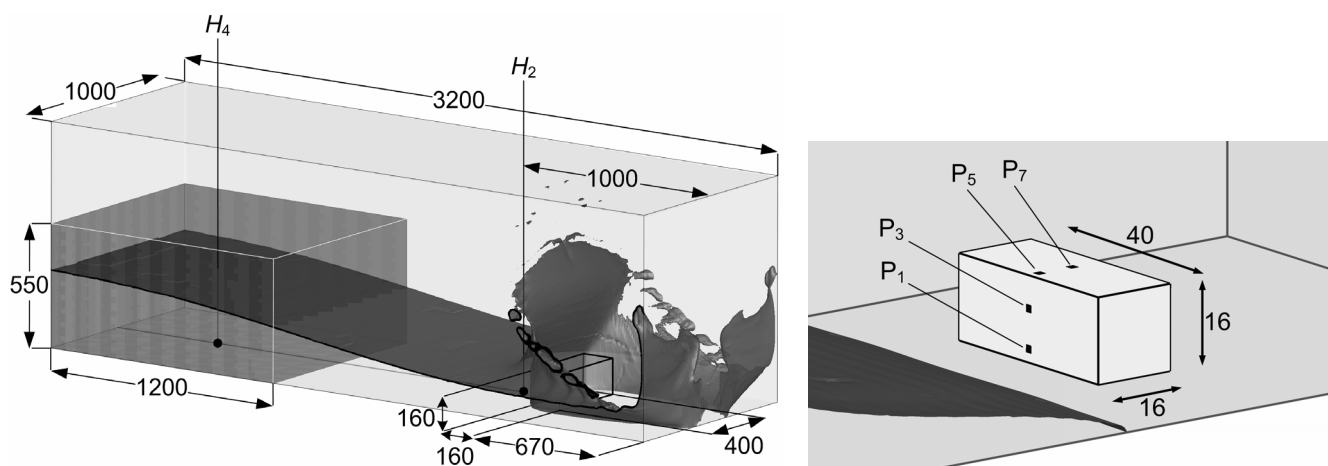


Рис. 13. Схема рабочей области в опытах MARIN и расчетное положение (слева) свободной поверхности на момент времени 0,64 с

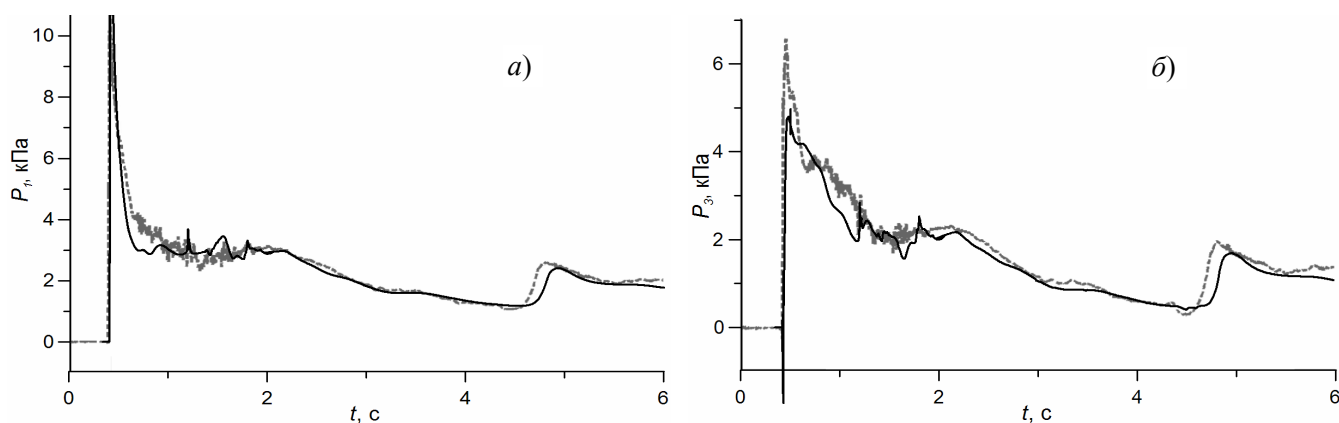


Рис. 14. Зависимость давления от времени в точках  $P_1$  (а) и  $P_3$  (б) на одиночном препятствии: результаты расчета (черная линия) и эксперимента MARIN (серая линия)

Параграф 6.2 посвящен натеканию потока на множественные препятствия, выстроенные поперек потока в один и два ряда (см. рис. 15). Измерялись давления в точках  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_3$  (см. рис. 15в). Постановка задачи в целом схожа с предыдущей (те же начальные высота и длина столба жидкости, расстояние от него до препятствий), поэтому и параметры расчетной сетки были такими же. Из рис. 15а,б видно, что в двух рассматриваемых случаях характер течения заметно отличается. В отсутствие первого ряда поток ударяется в нижнюю часть высоких препятствий. При этом возникает всплеск воды, сначала поднимающийся вверх вдоль стенок препятствий, а затем опрокидывающийся назад, навстречу потоку. При наличии же первого ряда препятствий поток сначала ударяется о них. При этом возникают мощные всплески воды, которая затем ударяется во второй ряд препятствий, налетая на них вплоть до середины их высоты, в результате чего давление в точках  $P_2$  и  $P_3$  на протяжении всего расчета оказывается заметно выше (см. рис. 16). В точке  $P_1$  величины давления в двух случаях оказались довольно близки. Таким образом, препятствия первого ряда усиливают опрокидывающий момент, действующий со стороны потока на препятствия основного ряда.

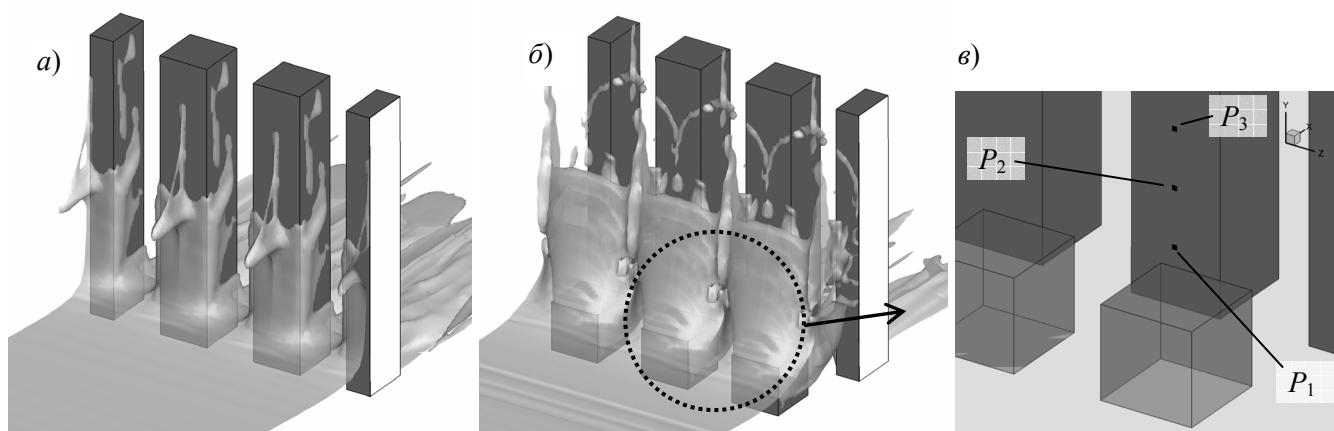


Рис. 15. Расчетное положение свободной поверхности на момент времени 0,8 с при обтекании одного (а) и двух (б) рядов препятствий. Положение точек измерения давления (в)

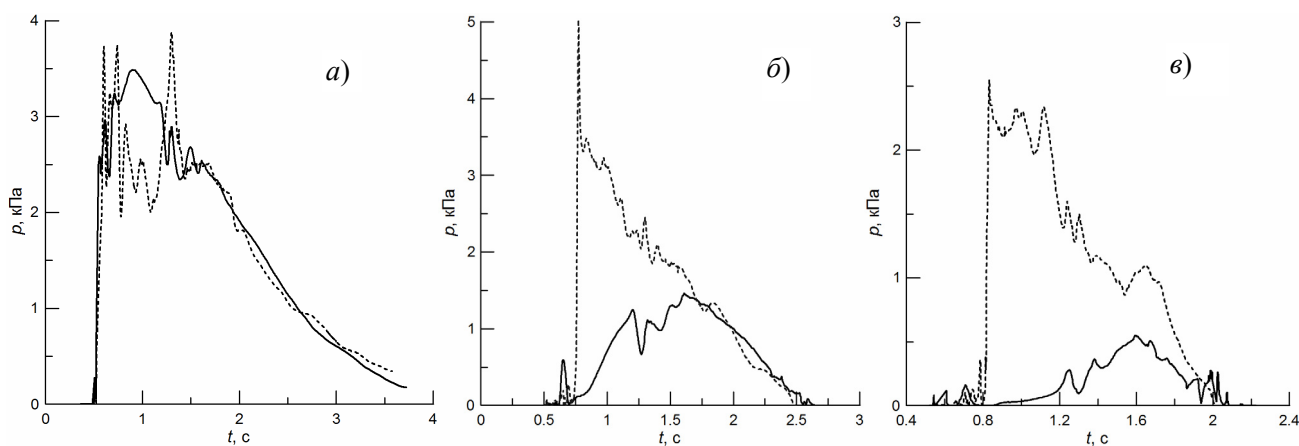


Рис. 16. Зависимости давления в точках  $P_1$  (а),  $P_2$  (б),  $P_3$  (в) от времени при наличии первого ряда препятствий (пунктирная линия) и при его отсутствии (сплошная линия)

В параграфе 6.3 представлены результаты расчета плескания жидкости в баке, колеблющемся по гармоническому закону в горизонтальном направлении. Получено хорошее согласование с результатами эксперимента по форме свободной поверхности и величине давления в заданной точке на стенке бака. Показано, что для данной задачи влияние учета турбулентности на получаемое решение несущественно.

В заключении сформулированы основные результаты настоящей работы, которые сводятся к следующему:

1. На базе программного кода SINF/Flag-S, предназначенного для расчета турбулентных течений жидкости и газа с использованием неструктурированных расчетных сеток, разработана авторская версия (названная Flag-FS), позволяющая на основе метода VOF моделировать течения жидкости со свободной поверхностью в условиях сильной деформации последней и с возможным отрывом вязкого придонного слоя перед препятствием. Реализованная в коде Flag-FS численная методика всесторонне верифицирована путем сравнения результатов расчетов с экспериментальными данными, аналитическими решениями и результатами, полученными с использованием других кодов; в целом получено хорошее согласование.
2. Проведено систематическое исследование ряда специализированных схем для аппроксимации уравнения конвективного переноса маркер-функции. Показано превосходство «сжимающей» схемы M-CICSAM – она наименее чувствительна к качеству расчетной сетки и обеспечивает высокое качество решения при больших шагах по времени. Среди рассмотренных схем аппроксимации по времени (первого и второго порядка) наилучшие результаты продемонстрировала схема Кранка-Николсон.
3. Разработан и апробирован ряд оригинальных составляющих метода VOF, а именно:
  - а. Предложен подход к аппроксимации конвективной части уравнений гидродинамики, позволяющий избежать искажений в численном решении, связанных со значительным и резким изменением плотности среды в окрестности межфазной границы.

- б. Предложен вычислительно эффективный способ аппроксимации градиента давления, предотвращающий возникновение осцилляций в решении, как в условиях статического равновесия жидкости и газа, так и при их движении, в том числе, при свободном падении жидкости.
  - в. Показано, что при расчете по методу VOF процесса растекания жидкости по сухой стенке с использованием «низкорейнольдсовых» расчетных сеток вблизи стенки образуется тонкая нефизичная прослойка воздуха, приводящая к сильному занижению трения на стенке. Предложена методика, основанная на введении искусственной диффузии маркер-функции вблизи стенок, позволяющая устранить данный артефакт.
  - г. Обнаружено, что даже слабое остаточное «размытие» межфазной границы, имеющее место при использовании «сжимающих» схем HRIC и M-CICSAM, может приводить к существенным искажениям в численном решении при столкновении жидкости со стенкой. Предложена оригинальная методика «обострения» межфазной границы, устраняющая остаточное «размытие» границы и не искажающая ее форму, в том числе и в случаях ее сильной деформации.
4. Проведено систематическое исследование роли пристеночного трения и турбулентной вязкости в потоке со свободной поверхностью, натекающем на препятствия различной формы. Показано следующее:
- а. Пристеночное трение может оказывать сильное влияние на картину течения и форму свободной поверхности через образование крупных отрывных зон перед препятствием или непосредственно на нем. Для адекватного моделирования взаимодействия потока с препятствием в общем случае необходимо разрешение пограничных слоев вплоть до стенки (включая вязкий подслой).
  - б. Введение поправки на кривизну линий тока в SST модель турбулентности приводит к заметному уменьшению турбулентной вязкости в ядре отрывных зон, что, однако, практически не сказывается на картине течения.
  - в. При расчете течений, вызванных обрушением дамбы, стандартная модель  $k-\varepsilon$  чрезмерно (на порядок и более) завышает величину турбулентной вязкости в потоке, что приводит к существенному искажению решения. Применение поправки Като-Лаундера решает эту проблему.
  - г. В случае использования условий проскальзывания на стенках учет турбулентности в потоке, развивающемся после обрушения дамбы, не оказывает существенного влияния на результаты расчета его взаимодействия с препятствиями (при условии обеспечения моделью адекватного уровня турбулентной вязкости).
5. Результаты двумерных расчетов для рассмотренных в работе тестовых конфигураций, выполненных с использованием SST модели турбулентности и «низкорейнольдсовых» расчетных сеток, хорошо согласуются с представленными в литературе

экспериментальными данными. Для трехмерной конфигурации (эксперимент MARIN) также получено приемлемое согласование расчетных и опытных данных.

6. Проведено численное моделирование натекания потока на множественные однорядные и двухрядные препятствия. Установлено, что наличие первого ряда (менее высоких) препятствий может приводить к увеличению опрокидывающего момента, действующего со стороны потока на второй ряд.

**Основные результаты диссертации опубликованы в работах:**

**1. Khrabry A.I., Smirnov E.M., Zaytsev D.K. Solving the Convective Transport Equation with Several High-Resolution Finite Volume Schemes: Test Computations // Computational Fluid Dynamics 2010. – New-York: Springer, 2011. – 954 p. – P. 535-540.**

2. Khrabry A.I., Smirnov E.M., Zaytsev D.K. Free surface flow computations using the M-CICSAM scheme added with a sharpening procedure // Proceedings of the 6th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS 2012), Vienna, Austria, 10-14 September 2012. – CD-ROM. – Vienna University of Technology, Austria, ISBN: 978-3-9502481-9-7. 2 p.

3. Зайцев Д.К., Смирнов Е.М., Храбрый А.И. Расчет течений со свободными поверхностями: влияние схемных факторов и модели турбулентности // Труды 14-й международной конференции «Супервычисления и математическое моделирование», Саров, 1-5 октября 2012. – Саров, ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ», 2013. – 624 с. – С. 282-292.

**4. Храбрый А.И., Смирнов Е.М., Зайцев Д.К. Влияние модели турбулентности на результаты расчета обтекания препятствия потоком воды после обрушения дамбы // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2013. – №1 (165). – С. 182-187.**

**5. Храбрый А.И., Зайцев Д.К., Смирнов Е.М. Численное моделирование течений со свободной поверхностью на основе метода VOF // Труды ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова (Труды Крыловского государственного научного центра). – 2013. – Вып. 78 (362). – С. 53-64.**

6. Khrabry A.I., Smirnov E.M., Zaytsev D.K. Numerical Study of wall friction effects on dam-break flows in the presence of an obstacle // 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI), 20-25 July 2014, Barcelona, Spain. – p. 1-2.

7. Храбрый А.И., Зайцев Д.К., Смирнов Е.М., Горячев В.Д. Численное моделирование нестационарного натекания потока воды на один и два ряда трехмерных препятствий // Труды международной суперкомпьютерной конференции “Научный сервис в сети Интернет”, г. Новороссийск, 22-27 сентября 2014. – CD-ROM. – М.: Изд-во МГУ, 2014. – 497 с. – С. 388-394.

8. Храбрый А.И., Смирнов Е.М., Зайцев Д.К. Расчет нестационарных волновых течений с отрывом вязкого придонного слоя // Сборник трудов научного форума с международным участием XLIII «Неделя науки СПбПУ», С.-Петербург, 1-6 декабря 2014г. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – 320 с. – С. 47-53.