

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный
технический университет»
Факультет энергетики, транспорта и морских технологий

С.Д. Чижиумов, И.В. Каменских, А.Д. Бурменский

**ПРОБЛЕМЫ ГИДРОДИНАМИКИ КОРАБЛЯ
(ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ)**

Учебное пособие

Комсомольск на Амуре
2016

УДК 629.5.015:532.5:004.9
ББК 39.42-011я7
Ч 594

Рецензенты:

В. М. Козин, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института машиноведения и металлургии ДВО РАН; кафедра «Кораблестроение и океанотехника» ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», зав. кафедрой канд. технич. наук, доцент К.В. Грибов

Чижиумов, С. Д.

Ч 594 Проблемы гидродинамики корабля (численное моделирование): учеб. пособие / С. Д. Чижиумов, И.В. Каменских, А.Д. Бурменский. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВО «КНАГТУ», 2016. – 122 с. ISBN 978-5-7765-1238-4

В учебном пособии даны указания по решению задач гидродинамики кораблей и морских сооружений на основе численного моделирования с применением компьютерных технологий. Рассмотрены основные понятия численного моделирования гидродинамики. Приведены примеры решения задач гидродинамики подводного крыла, определения сопротивления движению и параметров качки судов, преобразования энергии волн. Кратко рассмотрены вопросы моделирования различных гидродинамических эффектов (присасывание судов в потоке, влияние свободной поверхности и твёрдых экранов, взаимодействие волн с препятствиями и др.).

Учебное пособие предназначено для магистров направления 26.04.02 «Кораблестроение, океанотехника и системотехника объектов морской инфраструктуры» при изучении дисциплины «Проблемы гидромеханики и теории корабля». Пособие может быть полезно студентам других направлений и специальностей, изучающих гидромеханику.

Учебное пособие разработано в рамках выполнения программ:

- НИР «Государственное задание № 9.356.2014/К от 18.06.2014 г.;

- Программа Минобрнауки РФ от 31.08.2014 г. «Подготовка высококвалифицированных кадров в области проектирования и строительства корветов с элементами стелс-технологий при использовании конструкций из композитных материалов»

УДК 629.5.015.532.5:004.9
ББК 39.42-011я7

ISBN 978-5-7765-1238-4

© ГБОУ ВО «КНАГТУ», 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ ГИДРОДИНАМИКИ ..	7
1.1. Общие понятия о вычислительной гидродинамике	7
1.2. Основные уравнения гидродинамики	9
1.3. Численные модели идеальной несжимаемой жидкости	12
1.3.1. Постановка задачи	12
1.3.2. Метод конечных разностей	14
1.3.3. Методы источников и граничных элементов	16
1.4. Численные модели вязкой жидкости	17
1.4.1. Постановка задачи	17
1.4.2. Модели турбулентности	19
1.4.3. Метод конечных объёмов	21
1.4.4. Общие сведения о системе Flow-3D	22
1.5. Первый пример компьютерного моделирования в системе Flow-3D. Заполнение ёмкости жидкостью	24
1.5.1. Установка общих параметров модели	25
1.5.2. Выбор параметров физической модели	26
1.5.3. Задание свойств жидкости	28
1.5.4. Построение расчётной сетки	28
1.5.5. Задание граничных и начальных условий	30
1.5.6. Определение геометрии модели	32
1.5.7. Выполнение и контроль расчёта	35
1.5.8. Просмотр результатов расчёта	37
2. СТАЦИОНАРНЫЕ ПОТОКИ И ПОСТУПАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ ТЕЛ В ЖИДКОСТИ	41
2.1. Обтекание подводного крыла	42
2.1.1. Создание расчётной модели	42
2.1.2. Анализ результатов и уточнение модели	45
2.1.3. Анализ сходимости	49
2.1.4. Задания	50
2.2. Экранные эффекты	51
2.2.1. Обтекание крыла вблизи дна	51
2.2.2. Применение дополнительной сетки	54
2.2.3. Обтекание крыла вблизи свободной поверхности	55
2.2.4. Задания	57
2.3. Эффекты взаимодействия тел в потоке	57
2.3.1. Сила сопротивления двух цилиндров	58
2.3.2. Эффект присасывания	58
2.3.3. Моделирование движения тела	62
2.3.4. Задания	66

2.4. Пространственные задачи о движении корабля	66
2.4.1. Особенности пространственного моделирования	66
2.4.2. Движение подводной лодки подо льдом	67
2.4.3. Сопротивление воды при движении надводного корабля.....	72
2.4.4. Гидродинамика корпуса буксира.....	77
3. КАЧКА КОРАБЛЯ	80
3.1. Модели волнения	80
3.2. Кратко об остойчивости судна	84
3.3. Определение собственных периодов качки	84
3.3.1. Приближённые формулы	84
3.3.2. Пример расчёта в системе Flow-3D	86
3.3.3. Задания	89
3.4. Поперечная качка на волнении	90
3.4.1. Качка на различных волнах.....	90
3.4.2. Задания	94
3.5. Моделирование продольной качки	95
3.5.1. Особенности продольной качки в условиях шторма	95
3.5.2. Слеминг	99
4. ГИДРОДИНАМИКА МОРСКИХ СООРУЖЕНИЙ	102
4.1. Взаимодействие волн с берегом	102
4.2. Преобразователи энергии волн	106
4.2.1. Преобразователи типа OWSC	107
4.2.2. Преобразователи типа OWEC	114
4.3. Задания	119
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	119
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	120

ВВЕДЕНИЕ

Гидродинамика является основой многих прикладных наук, в том числе связанных с проектированием и эксплуатацией водного транспорта и гидротехнических сооружений. Законы гидродинамики и теории корабля человечество постигало в течение всей своей истории, совершенствуя обводы и движители кораблей, создавая морские сооружения. Крупнейшие учёные со времён Архимеда создавали науку о движении жидкостей. Леонардо да Винчи, Г. Галилей и И. Ньютон исследовали сопротивление воздуха и воды движению тел.

Л. Эйлер вывел дифференциальные уравнения движения жидкости, создал основы теории корабля. Лагранж писал в 1788 г.: «Мы обязаны Эйлеру первыми общими формулами для движения жидкостей... Благодаря этому открытию вся механика жидкостей свелась к вопросу анализа этих уравнений...» [1]. Однако анализ уравнений гидродинамики оказался настолько сложным, что оказался возможным только на основе упрощений – гипотез (например, несжимаемости, невязкости, сплошности, потенциальности и др.). В ряде случаев уравнения Эйлера были проинтегрированы, но, результаты расчётов нередко расходились с наблюдениями. Эти несоответствия теории и практики, названные «парадоксами», до сих пор являются предметом многих шуток, например: среди гидродинамиков «есть инженеры, которые видят, но не могут объяснить, и математики, которые объясняют то, что нельзя увидеть»; «можно изучать гидродинамику, не зная, что вода мокрая» [1].

В результате в гидродинамике выделились два направления: теоретическое и экспериментальное. До сих пор теоретические и численные результаты не всегда соответствуют натурным измерениям. Это не значит, что математические модели не верны и их не следует изучать. Без теории нельзя понять и систематизировать многообразие движений. Но теорию и результаты расчётов обязательно необходимо сопоставлять с опытными данными. Такие сопоставления выявляют расхождения теории и практики, позволяют ввести поправки к расчётным формулам, построить инженерные методики.

Развитие науки в этом направлении привело к появлению технической гидромеханики и её частных разделов: гидродинамики и теории корабля, аэродинамики, гидравлики и др. Теория корабля за последние десятилетия интенсивно развивалась как «вглубь» (на основе изучения турбулентности, кавитации, ударных и нелинейных волновых процессов, гидроупругости и пр.), так и «вширь» (с развитием судов с новыми формами корпуса и новыми режимами движения, подводных лодок, судов на подводных крыльях, на воздушной подушке, экранопланов и др.).

По мере развития гидродинамики её математические модели уточнялись, но при этом усложнялись, и их анализ стал невозможен без примене-

ния численных методов и компьютерных технологий. Так появилась вычислительная гидродинамика (CFD – Computer Fluid Dynamics). На основе её вычислительных алгоритмов созданы мощные компьютерные программы, позволяющие обычным инженерам и студентам виртуально экспериментировать с самыми сложными течениями жидкостей.

К настоящему времени накопилось огромное количество учебной и справочной литературы по гидромеханике и теории корабля. Создано большое множество различных инструментов (расчётных методик, экспериментальных установок, компьютерных программ). Но на их изучение у студентов просто не хватает времени, особенно в условиях, когда курсы специальных дисциплин сокращаются. В результате многие актуальные разделы гидромеханики и теории корабля, в том числе связанные с инновационными проектами, просто выпадают из поля зрения.

Более того, как показывает практика последних лет, многие студенты после изучения сокращённых курсов гидромеханики и теории корабля, даже успешно выполнив все расчётные задания по стандартным методикам, просто не понимают физического смысла многих теоретических положений, «в воде» математических моделей и формул «не видят реальную воду». Поэтому основная цель, которую пытаются добиться авторы пособия, состоит в том, чтобы дать учащимся «ощутить» теоретические модели и понятия гидродинамики и теории корабля на наглядных примерах, чтобы показать, что можно с интересом решать сложные практические, в том числе нестандартные задачи путём компьютерного экспериментирования.

Изучение этого пособия позволит:

- получить навыки компьютерного моделирования задач гидродинамики и теории корабля;
- применить эти навыки при решении учебных задач;
- выполнить выпускную работу по проектированию или анализу инновационных объектов (в том числе военных кораблей), с применением численных экспериментов в условиях отсутствия стандартных методик расчётов;
- выполнять практические расчёты ходкости, качки, динамической остойчивости, волновых нагрузок кораблей и морских объектов, в том числе нестандартных;
- выявлять новые гидродинамические эффекты (особенно это реально для судов и морских объектов новых типов), выполнять научные исследования в перспективных областях знаний;
- изобретать, проектировать и внедрять новые суда и другие водные объекты, например: многокорпусные корабли, суда с динамическими принципами поддержания, плавучие дома и платформы, подводную технику, волновые и плавниковые движители, волновые электростанции и пр.

1. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ ГИДРОДИНАМИКИ

1.1. Общие понятия о вычислительной гидродинамике

Традиционно наиболее надёжным средством изучения гидродинамических явлений является наблюдение и анализ реальных явлений, т.е. физический эксперимент. Однако проведение натурного эксперимента требует значительных ресурсов и времени, а для экстремальных случаев эксплуатации вообще невозможно. Например, как изучить поведение буровой платформы при воздействии цунами? Испытания качки корабля в критических штормовых условиях также практически невозможны. Кроме того, эксперименты с морской техникой, строящейся в единичных экземплярах, невозможно провести на этапе проектирования.

Поэтому эксперименты часто выполняют на уменьшенных моделях в опытовом бассейне или аэродинамической трубе. Но и здесь существуют сложности моделирования, связанные в основном с масштабным эффектом.

Допустим, необходимо экспериментально оценить ходкость корабля с помощью модельных экспериментов. Очевидно, при этом необходимо обеспечить условия подобия, т.е. обеспечить равенство критериев для модели и натурального судна, как минимум, числа Фруда и числа Рейнольдса, так как силы тяжести и вязкости имеют определяющее значение для сопротивления воды движению судна. Но проблема состоит в том, что одновременно эти два условия выполнить практически невозможно. Чтобы в этом убедиться, достаточно посмотреть на структуру выражений для этих критериев:

$$\text{Fr} = \frac{v}{\sqrt{gL}}; \quad \text{Re} = \frac{vL}{\nu}.$$

Если при уменьшенной длине модели для соблюдения подобия по числу Фруда скорость движения модели нужно увеличивать, то для соблюдения подобия по числу Рейнольдса скорость нужно наоборот уменьшать. Таким образом, модельный эксперимент не позволяет обеспечить условия полного подобия, а его применение неизбежно связано с погрешностями.

С другой стороны, в настоящее время теоретическая гидродинамика достигла значительного развития, разработаны разнообразные численные методы и алгоритмы решения уравнений гидродинамики, а с прогрессом компьютерных технологий появилась возможность эффективно их решать. Появилась относительно новая область науки - вычислительная гидродинамика (CFD – computer fluid dynamic).

Наиболее распространённой задачей вычислительной гидродинамики является численное решение уравнений Навье-Стокса. Для решения за-

дач CFD в настоящее время существует множество компьютерных программ, из которых широко известны Flow-3D, Flow Vision, ANSYS, SHIPFLOW, OpenFOAM и др. [9 – 11].

Следует отметить, что численные методы называют приближёнными. Они отличаются тем, что при чётко поставленной математической модели, в отличие от аналитических методов, не приводят к абсолютно точному решению.

Это, конечно, не означает, что аналитические методы лучше. Дело в том, что очень часто точные аналитические решения удаётся получить только для довольно грубых, упрощённых математических моделей сложных явлений и конструкций. Очевидно, что в таких случаях преимущество аналитических методов в точности не имеет особого смысла.

С другой стороны, погрешности приближённых методов можно регулировать в зависимости от требуемой точности расчётов. Однако для этого, естественно, требуется дополнительный анализ погрешностей. Такой анализ производится обычно путём выполнения серии тестовых расчётов с разными сетками. Объём таких дополнительных исследований зависит от многих факторов: возможности проверки результата сопоставлением с данными эксперимента либо другого расчёта; сложности изучаемого процесса; степени ответственности за результаты расчётов; опыта и знаний расчётчика; доверия к программному обеспечению и др. Главное, нужно твердо запомнить: достоверность любого результата нужно доказать, - иначе доверия к нему не будет.

Если грубая сетка используется для представления области со значительным изменением скоростей и давлений, то результаты, очевидно, будут неточными. При слишком большом шаге по времени результаты вычислений также будут либо неточными, либо неустойчивыми, в зависимости от принятой схемы интегрирования по времени. Если же шаг по времени слишком мал, то вычисления оказываются излишне долгими. При грубой сетке малый шаг по времени не приведёт к уточнению результатов, и наоборот. В системах автоматизированных расчётов CFD шаг по времени в процессе вычислений обычно автоматически регулируется из условия достижения достаточной точности.

Для оценки точности и достоверности результатов следует выполнять расчёты для моделей с разной сеткой, сопоставлять результаты с другими доступными данными (экспериментов, аналитических расчётов и пр.).

Компьютерный анализ течения жидкости включает в себя следующие основные шаги:

1. Создание геометрической модели (сложных границ области жидкости), например, смоченной поверхности судна, ёмкости сложной формы и т.п. Обычно для этого используются специализированные программы САПР.

2. Задание свойств жидкости, физических условий моделирования течения (учитывается ли вязкость, сжимаемость жидкости, присутствует ли свободная поверхность и др.). Исходя из этих условий, определяется математическая модель течения.

3. Задание исходной расчетной области и соответствующей сетки. Размещение в этой области геометрической модели.

4. Задание граничных и начальных условий.

5. Задание параметров расчета.

6. Проведение расчета.

7. Просмотр результатов расчета в графической форме («визуализация» результатов расчетов). Анализ результатов.

8. Оценка достоверности и точности результатов расчетов методом сходимости по сетке. Сопоставление с экспериментами или другими данными.

9. Оформление результатов.

1.2. Основные уравнения гидродинамики

Существуют различные математические модели динамики жидкости, описанные в специальной литературе [1, 3, 6, 7]. Кратко приведём здесь только некоторые простые, распространённые в морской гидродинамике модели, - с целью иллюстрации их связи с физическими особенностями реальных процессов, моделируемых в компьютерных экспериментах.

Одно из основных соотношений гидромеханики – уравнение неразрывности (сплошности) – выражает закон сохранения массы жидкости:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0, \quad (1.1)$$

где v_x, v_y, v_z - проекции скорости \vec{v} .

В векторной форме это уравнение записывается в виде:

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0.$$

Уравнение движения жидкости в напряжениях:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{g} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \vec{p}_x}{\partial x} + \frac{\partial \vec{p}_y}{\partial y} + \frac{\partial \vec{p}_z}{\partial z} \right). \quad (1.2)$$

где \vec{g} - напряжённость массовых (гравитационных) сил; ρ - плотность жидкости, \vec{p}_n - напряжение поверхностных сил.

Проекция этого уравнения на координатные оси даёт систему трех скалярных уравнений:

$$\begin{aligned}\frac{dv_x}{dt} &= g_x + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial p_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right); \\ \frac{dv_y}{dt} &= g_y + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial p_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right); \\ \frac{dv_z}{dt} &= g_z + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial p_{zz}}{\partial z} \right).\end{aligned}\tag{1.3}$$

Полученные уравнения пригодны для описания движения любой однородной несжимаемой жидкости.

При интегрировании дифференциальных уравнений неразрывности и движения жидкости появляются постоянные интегрирования, зависящие от координат и времени. Для их определения следует использовать начальные и граничные условия задачи.

Начальные условия определяют кинематические и динамические характеристики движения жидкости в начальный момент времени. Они имеют смысл только для неустановившихся движений и сводятся к заданию в начальный момент времени положения границ, скоростей, давлений или других параметров движения.

Граничные (краевые) условия определяют характеристики движения на поверхностях, ограничивающих жидкость. Они делятся на кинематические и динамические. Кинематические условия обычно сводятся к заданию скоростей на границах. Обычно такие границы – твердая стенка (например, дно водоема, стенка канала), смоченная поверхность движущегося в жидкости тела (например, судна). Сквозь твердую стенку или поверхность твердого тела жидкость протекать не может, а если обтекание безотрывное, то она не может и оторваться от твердых поверхностей, иначе нарушается условие сплошности. Отсюда условие непротекания для неподвижной твердой границы состоит в равенстве нулю нормальной к граничной поверхности скорости жидкости:

$$v_n = 0,$$

а для границы твердого тела, движущегося в жидкости:

$$v_n = v_{n \text{ тела}}.$$

где $v_{n \text{ тела}}$ - нормальные составляющие скоростей точек поверхности тела.

Динамические граничные условия обычно сводятся к заданию поля давлений на поверхности, ограничивающей жидкость. Например, на свободной поверхности жидкости давление должно быть равно атмосферному

p_a . Если задано уравнение свободной поверхности $z = \zeta(x, y, t)$, то динамическое граничное условие примет вид

$$p = p_a \quad \text{при} \quad z = \zeta.$$

В ряде течений вязкость, т.е. сопротивление жидкости сдвиговым напряжениям, оказывается несущественной. Такие жидкости называются идеальными. Пренебречь вязкостью можно, если силы давления на один – два порядка больше сил трения, например, при быстротекущих процессах с ускорением, ударах о воду, движении морских волн и др.

Можно выделить безвихревые и вихревые движения жидкости. Безвихревым называется движение, при котором вращение жидких частиц отсутствует, следовательно, линии тока незамкнуты, а угловая скорость вращения и вихрь скорости равны нулю.

Как правило, образование вихрей в реальной жидкости тесно связано с её вязкостью. Тем не менее, для течения идеальной жидкости вихревые движения возможны при выполнении теоремы Стокса: «циркуляция скорости по любому контуру, проведенному в односвязной плоскости, равна потоку вихрей через поверхность, опирающуюся на этот контур». Из теоремы Стокса вытекает следствие: «поток вихрей через любую замкнутую поверхность равен нулю». Отсюда следует также кинематическая теорема Гельмгольца: «интенсивность вихревой трубки по всей ее длине остается постоянной». Из теоремы Гельмгольца вытекает следствие: «Вихрь не может начаться или закончиться внутри жидкости».

Вихревые модели течения идеальной жидкости получили наибольшее распространение при решении задач о подъёмной силе при движении крыльев с постоянной скоростью.

Нестационарные вихревые движения определяются теоремой лорда Кельвина (Томпсона) о неизменности циркуляции: «если объемные силы консервативны, а жидкость баротропна, то циркуляция скорости по любому замкнутому контуру, движущемуся вместе с жидкостью, остается для этого контура постоянной все время движения».

Следствием данной общей теоремы является теорема Лагранжа: «если в некоторый момент времени в фиксированной массе жидкости нет вихрей, то их не было в предыдущие и не будет в последующие моменты времени». Во многих задачах гидромеханики течение возникает из состояния покоя (например, задачи об ударе тел в воду). Следовательно, оно в начальный момент времени является безвихревым. По теореме Лагранжа течение останется безвихревым и в дальнейшем.

Теоремы Кельвина и Лагранжа обосновывают возможность применения теории потенциальных течений при решении многих практических задач гидромеханики. Следует отметить, что условия вывода теоремы Кельвина соблюдаются не всегда. Во-первых, течения могут происходить в

условиях переменной плотности жидкости, вызванной изменениями температуры или солёности, наличием неоднородных примесей и др., когда не соблюдается условие баротропности. Кроме этого, массовые силы могут быть неконсервативными. В условиях Земли, например, силы Кориолиса могут нарушить консервативность тяготения. И, наконец, основной причиной возникновения вихрей обычно является наличие вязкости жидкости.

1.3. Численные модели идеальной несжимаемой жидкости

Начнём с более традиционной и простой модели идеальной жидкости. Отметим, что эта простота для некоторых случаев оборачивается некоторым несоответствием реальным течениям – так называемым парадоксам гидродинамики.

1.3.1. Постановка задачи

Безвихревое течение идеальной жидкости называется потенциальным. Это означает, что вектор скорости \vec{v} можно описать скалярной функцией – потенциалом скорости φ :

$$\vec{v} = \text{grad } \varphi = \nabla \varphi, \quad (1.4)$$

или
$$v_x = \frac{\partial \varphi}{\partial x}; \quad v_y = \frac{\partial \varphi}{\partial y}; \quad v_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z}.$$

И вообще, для любого направления n :
$$v_n = \frac{\partial \varphi}{\partial n}.$$

Рассмотрим модель потенциального течения. Оно описывается уравнением Лапласа (его можно вывести из уравнения неразрывности (1.1)):

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad \text{или} \quad \nabla^2 \varphi = 0. \quad (1.5)$$

Для решения этого уравнения необходимо дополнительно знать условия на границах жидкости.

Плоское потенциальное течение можно выразить также через функцию тока ψ , связанную с проекциями скоростей зависимостями

$$v_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}; \quad v_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x}. \quad (1.6)$$

Графически поле потенциала скорости плоского течения можно изобразить линиями равного потенциала (эквипотенциалами). Из формул (1.4) и (1.6) видно, что вектор скорости в любой точке жидкости направлен по

касательной к линии тока и по нормали к эквипотенциали. Линии равного потенциала перпендикулярны к линиям тока.

В качестве примера рассмотрим обтекание цилиндра идеальной жидкостью между двумя стенками (рис. 1.1). Эту задачу можно решать двумя способами: через определение функции тока или путём нахождения функции потенциала скорости.

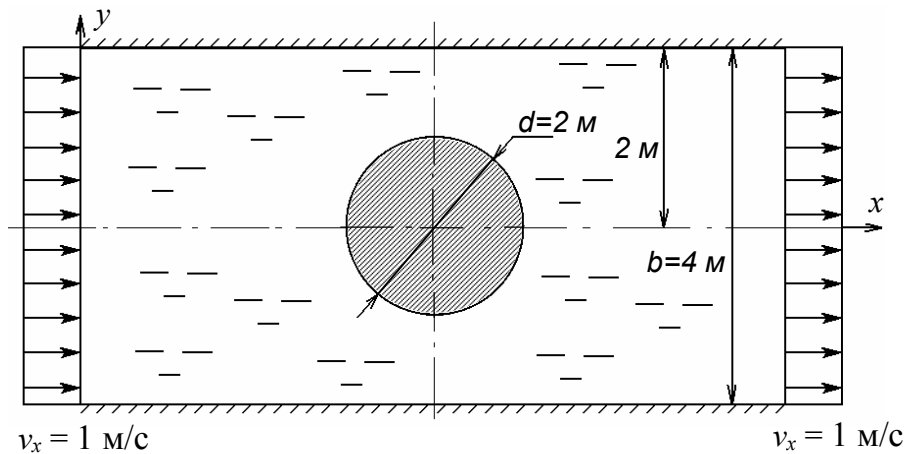


Рис. 1.1. Задача о течении вокруг цилиндра

В первом случае решается уравнение Лапласа для функции тока ψ с граничными условиями, изображенными на рис. 1.2, а (при этом используем очевидную симметрию потока). Так как скорости течения определяются производными от функции тока, на одной из линий тока значение ψ можно принять произвольное. Очевидно, что одна из линий тока идёт вдоль горизонтальной оси симметрии, переходя на границу цилиндра, а ещё одна – вдоль верхней стенки. Примем на нижней линии тока $\psi = 0$, тогда на левой границе

$$\psi = \int v_x dy = y,$$

а на верхней границе $\psi = 2$.

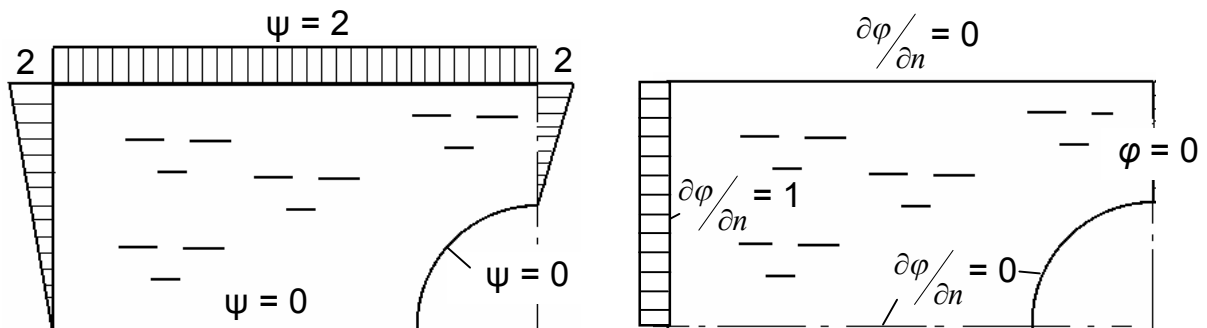


Рис. 1.2. Граничные условия:
а – на функцию тока; б – на потенциал скорости

Во втором случае решается уравнение Лапласа для потенциала скорости φ с граничными условиями, изображенными на рис. 1.2, б. На твёрдых стенках и горизонтальной оси симметрии принимается условие непротекания $\partial\varphi/\partial n = 0$. Так как скорости течения определяются производными от потенциала, на одной из линий равного потенциала значение φ можно принять произвольное ($\varphi = 0$ на правой границе, перпендикулярной линиям тока). Условие на левой границе: $\partial\varphi/\partial n = v_x = 1$ м/с.

Картина течения в виде распределения функций тока и потенциала представлена на рис. 1.3. Скорость течения в любой точке можно найти из формул (1.4) и (1.6).

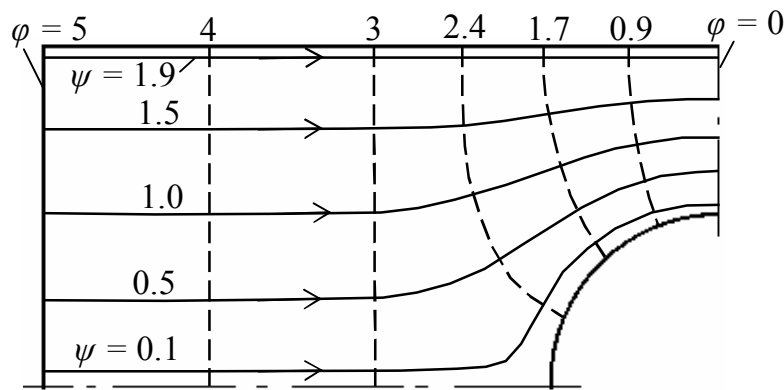


Рис. 1.3. Линии тока и равного потенциала

Проблема состоит в том, что даже для такой простой задачи получить решение, показанное на рис. 1.3, аналитически очень трудно. При сложной форме границы это возможно только численными методами.

1.3.2. Метод конечных разностей

Метод конечных разностей (МКР) или метод сеток является наиболее универсальным методом решения задач анализа сплошной среды, имеющих дифференциальную постановку. В основе метода лежит замена дифференциалов конечными разностями. Конечные разности по пространственным координатам образуют сетку, покрывающую исследуемую область.

В качестве относительно простого примера рассмотрим основные принципы метода на уравнении Лапласа (1.5):

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0$$

Для наглядности рассмотрим двумерную задачу. Разделим область жидкости на малые ячейки с помощью сетки (рис. 1.4).

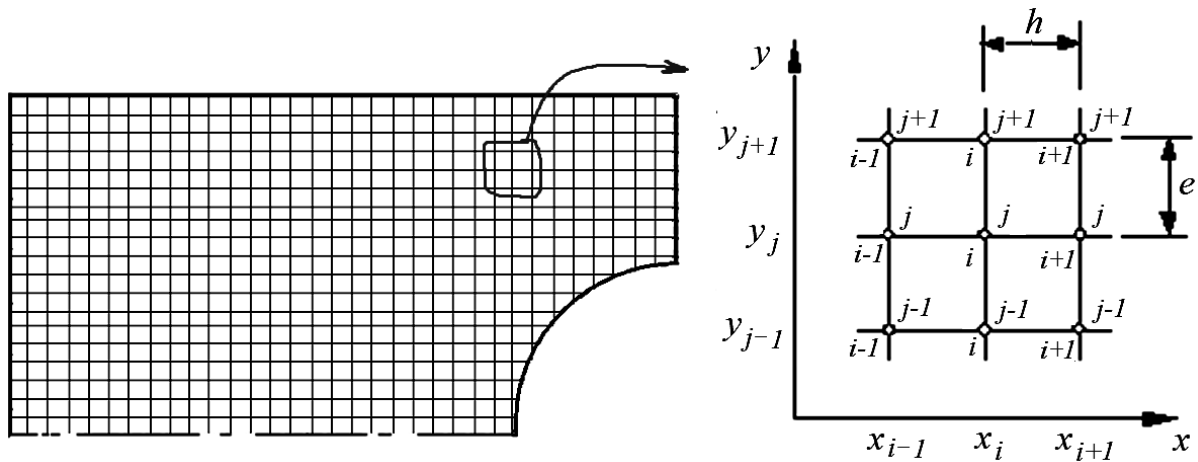


Рис. 1.4. Конечно-разностная сетка

Производные дифференциального уравнения в узле i приближённо заменим следующим образом:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} \approx \frac{\varphi_{i+1,j} - \varphi_{i-1,j}}{2h}, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial y} \approx \frac{\varphi_{i,j+1} - \varphi_{i,j-1}}{2e},$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \approx \frac{\varphi_{i+1,j} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i-1,j}}{h^2}, \quad \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \approx \frac{\varphi_{i,j+1} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i,j-1}}{e^2},$$

где $\varphi_{i,j}$ – значение искомой функции в узле i, j .

Подставив эти формулы для каждого узла сетки в дифференциальное уравнение (1.5), получим систему алгебраических уравнений для множества узлов сетки.

Аналогично применяется МКР и для динамических уравнений (с производными по времени). При этом исследуемый период времени делится на ряд мелких шагов Δt .

Точность решений по МКР увеличивается с уменьшением размеров ячеек сетки. Однако, чем гуще сетка, тем больше неизвестных значений в узлах, - что приводит к увеличению вычислительных затрат.

Достоинствами МКР являются высокая эффективность и простота реализации, наглядность дискретизации, возможность достижения высокой точности. Однако эти достоинства реализуются лишь при использовании достаточно «хорошей» регулярной сетки – почти ортогональной и с плавно меняющимися размерами ячеек. Как следствие, большинство применений МКР ограничено случаями сравнительно простых по геометрии расчетных областей.

1.3.3. Методы источников и граничных элементов

Простым и эффективным методом определения потенциала или функции тока является метод суперпозиции – наложения так называемых элементарных или фундаментальных решений уравнения Лапласа. Примером такого решения является параллельный поток вдоль оси x ($v_x = v_0$):

$$\varphi = v_0 x. \quad (1.7)$$

Другой пример – пространственный точечный источник (при отрицательном значении – сток жидкости в точку):

$$\varphi = \pm \frac{Q}{4\pi} \frac{1}{r}, \quad (1.8)$$

где Q – мощностью источника (стока), $Q/(4\pi)$ – расход жидкости через поверхность вокруг источника, $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ – расстояние от точки в жидкости до источника. Потенциал скорости от источника при плоском течении:

$$\varphi = \pm \frac{Q}{2\pi} \ln |r|.$$

Если имеется источник и сток одинаковой мощности, то

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi r_1} - \frac{Q}{4\pi r} = \frac{Q}{4\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r} \right).$$

Если расстояние между источником и стоком уменьшать до бесконечно малого, а их мощность увеличивать обратно пропорционально этому расстоянию, то получим диполь.

Любое потенциальное поле можно определить путём расположения на границах области множества источников различной мощности. Если распределить конечное число точек i с источниками, то приближённое решение задачи можно свести к определению мощностей Q_i .

Для расчета обтекания твердых тел сложной формы гидродинамические особенности обычно распределяют по смоченной поверхности тела непрерывным образом: в виде так называемого простого слоя (распределение источников) или двойного слоя (распределение диполей). Интенсивность этих особенностей (слоёв) подбирают так, чтобы удовлетворялись граничные условия.

Например, моделируя обтекание тела поступательным потоком с помощью простого слоя, потенциал скорости движения жидкости с учетом (1.7) и (1.8) записывается в виде

$$\varphi = v_0 x + \frac{1}{4\pi} \int_S \frac{q}{r} dS, \quad (1.9)$$

где q - искомая интенсивность (мощность на единицу площади) источников, которая определяется из граничных условий. Подставляя эту формулу в граничные условия, получаем граничное интегральное уравнение. Решение этого уравнения ищется методом граничных элементов – путем замены интеграла конечной суммой слагаемых. Для этого поверхность тела разбивают на конечное, но достаточно большое число N площадок (граничных элементов) и в пределах каждой площадки интенсивность источников считают постоянной. В итоге задача сводится к решению системы N линейных алгебраических уравнений, которое находится численно с помощью компьютера.

1.4. Численные модели вязкой жидкости

1.4.1. Постановка задачи

Три уравнения гидродинамики (1.3) в проекциях на оси координат вместе с уравнением неразрывности (1.1) содержат 6 неизвестных компонентов напряжений и 3 неизвестные проекции скорости. Задача является неразрешимой.

Чтобы уменьшить число неизвестных, вводятся различные гипотезы. Наиболее распространены две гипотезы:

1. Считается, что нормальные напряжения могут быть представлены в виде

$$\begin{aligned} p_{xx} &= -p + \sigma_{xx}, \\ p_{yy} &= -p + \sigma_{yy}, \\ p_{zz} &= -p + \sigma_{zz}, \end{aligned}$$

где p - гидродинамическое давление в точке, направленное по внутренней нормали к площадке; $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$ - некоторые добавки к нему, обусловленные вязкостью жидкости.

2. Считается, что каждый из членов матрицы напряжений пропорционален соответствующему члену матрицы скоростей деформаций.

С учётом этих гипотез из уравнений (1.3) можно вывести уравнения Навье-Стокса динамики вязкой жидкости:

$$\begin{aligned} \frac{dv_x}{dt} &= g_x - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right); \\ \frac{dv_y}{dt} &= g_y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right); \\ \frac{dv_z}{dt} &= g_z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right). \end{aligned} \quad (1.10)$$

В векторной форме уравнение движения принимает вид:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{g} - \frac{1}{\rho} \text{grad } p + \nu \Delta v.$$

Добавляя к системе (1.10) уравнение неразрывности (1.1), получаем замкнутую систему четырех уравнений для определения четырех неизвестных – давления p и проекций скорости v_x, v_y, v_z .

Для расчёта конкретного течения вязкой жидкости, т. е. нахождения частного решения системы дифференциальных уравнений Навье-Стокса (1.10) и неразрывности (1.1), необходимо дополнительно учесть граничные и начальные условия движения.

Кинематические граничные условия исходят из физического факта «прилипания» частиц вязкой жидкости к поверхности твердого тела. Следовательно, при обтекании неподвижной твердой границы на ней должно соблюдаться условие $\vec{v} = 0$, где \vec{v} - вектор скорости жидкости. Если тело движется со скоростью \vec{v}_τ , то граничное условие на его поверхности будет иметь вид $\vec{v} = \vec{v}_\tau$.

Характерными режимами течения вязкой жидкости являются ламинарное и турбулентное. Ламинарным называется плавное, упорядоченное, регулярное движение, когда отдельные струйки жидкости, не перемешиваясь, как бы скользят друг по другу. При таком потоке существует лишь молекулярное трение между соседними струйками. Ламинарные течения достаточно точно описываются уравнениями Навье-Стокса. Как показывает опыт, ламинарное движение возможно при сравнительно невысоких числах Рейнольдса.

С ростом Re в некоторый момент происходит потеря устойчивости движения, струйки перемешиваются, в потоке образуются хаотически пульсирующие вихри. Такое неупорядоченное движение вязкой жидкости называется турбулентным. При турбулентном режиме обычно резко растёт сопротивление потока жидкости.

Число Рейнольдса, при котором происходит переход ламинарного течения в турбулентное, называют критическим и обозначают $Re_{кр}$. Критическое число Рейнольдса для трубы ($Re_{тр} = Dv/\nu$, где D – диаметр трубы) находится в диапазоне от 2000 до 3000. Поток воды вокруг водоизмещающего судна из ламинарного переходит в турбулентный при числе Рейнольдса $Re = Lv/\nu$ порядка 10^6 (L - длина судна).

Ламинарное движение жидкости может быть как установившимся, так и неустойчивым. Турбулентное движение по своей природе всегда неустойчивое. Большинство течений в задачах гидродинамики судов и водных сооружений являются турбулентными.

Изменение скорости во времени при турбулентном движении носит характер беспорядочных пульсаций вокруг некоторого среднего значения. Поэтому скорость турбулентного потока, например, вдоль оси x , можно представить в виде

$$v_x(t) = \bar{v}_x + v_x^*(t),$$

где \bar{v}_x - осредненная за большой интервал времени скорость; v_x^* - пульсации скорости.

Дифференциальные уравнения движения жидкости в напряжениях (1.2) справедливы как для ламинарного, так и для турбулентного режимов течения, однако, в случае турбулентного режима в них нужно не только скорости, но и напряжения представить в виде суммы средних значений и пульсаций.

Уравнения движения жидкости (1.2) с учетом выражений для пульсаций давлений называются уравнениями Рейнольдса осредненного турбулентного движения однородной несжимаемой жидкости. Их принципиальным отличием от общих уравнений (1.2) и от уравнений Навье-Стокса (1.10) является наличие в правых частях слагаемых, зависящих от пульсаций скорости. Эти слагаемые называются турбулентными напряжениями.

Уравнения Рейнольдса можно записать таким образом, что входящая в них динамическая вязкость жидкости будет иметь вид:

$$\mu = \mu_l + \mu_T,$$

где μ_l – молекулярная вязкость, μ_T – турбулентная вязкость.

Турбулентная вязкость определяется с помощью различных полуэмпирических теорий турбулентности.

1.4.2. Модели турбулентности

В системе Flow-3D доступны пять моделей турбулентности: 1) модель пути перемешивания Прандтля; 2) модель с одним дополнительным уравнением переноса турбулентной вязкости; 3) модель (k-ε) – с двумя дополнительными уравнениями переноса кинетической энергии турбулентности и диссипации турбулентности; 4) RNG (Renormalization group k-ε) модель; 5) модель крупных вихрей (LES – Large Eddy Simulation).

Все модели имеют преимущества и недостатки в зависимости от области их применения и наличия значений модельных постоянных, полученных на основе экспериментов.

Модель Прандтля основана на допущении, что пульсации скорости на некоторой части пограничного слоя толщиной l (она называется длиной пути перемешивания) определяются по формуле (рис. 1.5)

$$v_x^* = v_y^* \approx l \frac{d\bar{v}_x}{dy}.$$

Длина пути перемешивания l определяется на основе экспериментальных данных. Её иногда называют масштабом турбулентности. Модель Прандтля позволяет достаточно точно рассчитать характеристики турбулентных течений при удачном выборе l .

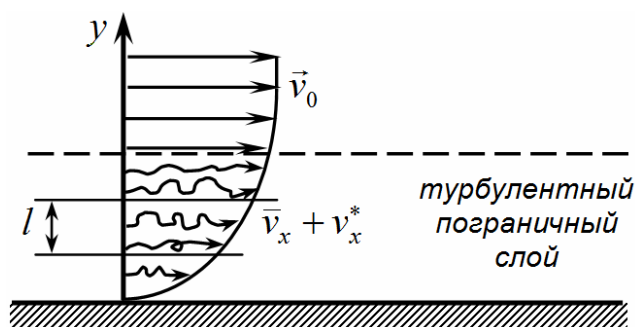


Рис. 1.5. К модели Прандтля

Модель Прандтля хорошо работает для простых (классических) течений (пограничный слой, струя), при этом используется обобщённая характеристика этих течений, связанная с толщиной пограничного слоя. В результате она не универсальна.

Не вдаваясь в описание других теорий турбулентности, отметим некоторые общие рекомендации по их применению.

Модель (к-ε) можно применять в задачах обтекания гладких пластин и стенок с полностью развитым турбулентным пограничным слоем (когда $\mu_T \gg \mu_l$). Применение модели (к-ε) сталкивается с трудностями при описании пограничных слоев с большим градиентом давления, сильно закрученных течений, ламинарно-турбулентного перехода, трехмерных течений с изменяющимся пограничным слоем (переходом в ламинарный режим и обратно), а также при моделировании сжимаемых и отрывных течений (например, турбулентного следа за цилиндром). Во многих случаях модель (к-ε) дает завышенные значения кинетической энергии турбулентности, например, в окрестности критической точки, но хорошо согласуется с данными измерений по скорости. Несмотря на перечисленные ограничения, распространение (к-ε) модели на практике объясняется устойчивым итерационным процессом вычислений, устойчивостью к погрешностям задания входных данных и разумной точностью для широкого класса течений.

В стандартной (к-ε) модели турбулентная вязкость определяется из единственного характерного масштаба турбулентности, поэтому расчетная турбулентная диффузия отражает только то, что происходит в указанном

масштабе, тогда как в реальности, все масштабы движения будут способствовать турбулентной диффузии.

В модели RNG вводится дополнительное условие в уравнение для скорости диссипации, которое улучшает точность решения для потоков с большими касательными напряжениями. При этом также учитывается эффект циркуляции турбулентности, что улучшает точность расчета высокоскоростных вращающихся потоков. Эта модель приспособлена для расчёта течений как при высоких, так и при низких числах Рейнольдса. Термин Renormalization означает, что модель удовлетворяет математическим ограничениям на нормальные напряжения, согласующимся с физикой турбулентных течений (избегаются отрицательные значения вихревой вязкости при расчете течений с большими градиентами).

Недостаток RNG модели – могут быть большие погрешности вычисления турбулентной вязкости при сочетании подвижных вихрей и неподвижных областей.

1.4.3. Метод конечных объёмов

Метод конечных объемов (МКО) применяется во многих вычислительных гидродинамических (CFD) пакетах, таких как FlowVision, Flow-3D и др.

Основа МКО заключается в том, что расчётная область с помощью сетки разбивается на совокупность конечных объёмов. Узлы, в которых ищется решение, находятся в центрах этих объёмов. Для каждого объёма должны выполняться законы сохранения массы, количества движения и энергии. То есть, например, изменение во времени массы жидкости в конечном объёме может происходить только за счёт внешнего входящего или выходящего потока.

В качестве относительно простого примера рассмотрим основные принципы метода на уравнении неразрывности (1.1):

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0.$$

Выделим малый конечный объём жидкости, ограниченный параллелепипедом. Для наглядности рассмотрим двумерную задачу. Тогда конечным объёмом будет прямоугольник (рис. 1.6).

Проинтегрируем уравнение (1.1) по данному объёму, а затем преобразуем интеграл в поверхностный по теореме Остроградского-Гаусса:

$$\int_V (\operatorname{div} \vec{v}) dV = 0 \quad \rightarrow \quad \int_S \vec{v} \cdot d\vec{S} = 0.$$

Такие интегральные уравнения по граням конечных объёмов являются основными в МКО. Фактически они представляют собой законы со-

хранения для конечного объёма. Если считать, что профиль скорости на гранях равномерный, а граница S состоит из участков Δx и Δy , то мы получим следующее алгебраическое уравнение неразрывности для конечного объёма:

$$(v_x^{out} - v_x^{in})\Delta y + (v_y^{out} - v_y^{in})\Delta x = 0$$

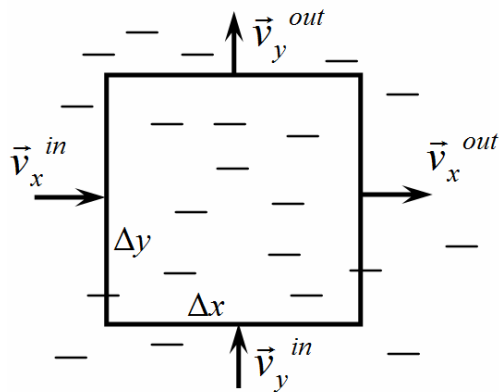


Рис. 1.6. Конечный объём

Таким образом, дифференциальное уравнение (1.1) для всей области жидкости можно свести к системе алгебраических уравнений для множества конечных объёмов. Аналогично преобразуются и другие уравнения.

1.4.4. Общие сведения о системе Flow-3D

В этом разделе рассмотрен программный пакет Flow-3D компании Flow Science. Он широко применяется для математического моделирования течений жидкости, течений со свободной поверхностью при турбулентном и ламинарном режимах с учётом тепловых воздействий, потоков газов в дозвуковом и сверхзвуковом режимах. Расчётные алгоритмы Flow-3D основаны на применении метода конечных разностей (МКР) и его разновидности – метода конечных объёмов (VOF – volume of fluid), разработанным учёными Hirt C.W. и Nichols B.D. [9,10].

Для описания моделируемой области жидкости Flow-3D использует сетку в декартовых или цилиндрических координатах. Сложная геометрия моделируется с использованием метода FAVOR, где обтекаемые тела и поверхности заключаются в ортогональную сетку (расчётный объём – вычислительный бассейн). Данный метод допускает независимое определение сетки и геометрии, то есть геометрия может быть изменена без повторного определения сетки.

Генератор сетки Flow-3D прост в применении и способен создавать сложные сетки. Так как сетка определяется независимо для каждой из трех

ортогональных координат, пользователь как минимум должен задать граничные координаты сетки и число ячеек в каждом направлении. Для более сложной сетки могут быть определены промежуточные плоскости сетки, а также размер ячеек в определенных местах или количество ячеек между двумя точками. Промежуточные точки используются в основном для определения мест более высокой разрешающей способности. Примером использования промежуточных точек может служить модель внешнего течения, когда высокая разрешающая способность требуется вблизи интересующего объекта, с сеткой, расширяющейся от объекта.

Программа Flow-3D включает различные математические модели потоков: нестационарные одно-, двух- или трехмерные уравнения Навье-Стокса в декартовых или цилиндрических системах координат; модели сжимаемых и несжимаемых жидкостей; модель распространения звуковых волн; модель обтекания твердых тел; модель свободных и ограниченных течений; различные модели турбулентности, кавитацию и многое другое.

Программа Flow-3D состоит из четырех связанных подпрограмм: препроцессора, главного процессора, постпроцессора и графического пакета.

Препроцессор переводит вводные параметры в полную численную модель для главного процессора, упрощая тем самым работу пользователя по постановке задачи. Препроцессор определяет свойства сплошной среды, начальные и граничные условия, устанавливает численные значения переменных, определяет тела и препятствия. Все исходные данные, определенные пользователем, читаются препроцессором. Некоторые исходные параметры имеют значения, определенные по умолчанию, тем самым, позволяя пользователю определять только те данные, которые являются особенными для решения конкретной задачи. Препроцессор производит логический контроль входных данных и, если это необходимо, предупреждает пользователя о некорректной постановке задачи.

Главный процессор включает в себя алгоритмы численных решений при широком спектре физических условий. Кроме того, главный процессор контролирует величины критерия сходимости и временного шага; тем самым достигается наилучшая скорость и точность решения поставленной задачи.

Постпроцессор позволяет легко просматривать промежуточные и окончательные результаты вычислений и манипулировать ими. Математическая модель в главном процессоре строится по принципу модели с переменной структурой, так что части уравнений, описывающие различные физические эффекты, вызываются только тогда, когда эти эффекты включены в решаемую задачу. Во время работы главный процессор выдает различную информацию о ходе расчета. Эта информация может применяться для построения различных графических диаграмм, а также

использоваться как начальные условия для новых последующих вычислений. В этом случае большинство физических параметров может быть переопределено, что дает пользователю существенную гибкость в решении задачи.

Постпроцессор, используя ранее полученные данные, генерирует различные графические диаграммы. Векторные и контурные диаграммы строятся в заданных видах и разрезах физического пространства. Постпроцессор имеет широкие цветовые возможности для отображения различных эффектов. Графики строятся для просмотра локальных и интегральных величин: компонентов скоростей, давлений, температур, сил и моментов, плотностей, концентраций энергии и т.д.

Постпроцессор может записывать данные вычислений в специальные файлы для ввода в иные программные пакеты, например, для моделирования динамики твердых тел или анализа прочности конструкций.

Графический пакет предназначен для визуализации результатов моделирования. Пакет способен отображать графики различных временных функций, двумерные и трехмерные диаграммы в сером или цветном изображении, а также создавать данные, необходимые для анимации.

1.5. Первый пример компьютерного моделирования в системе Flow-3D. Заполнение ёмкости жидкостью

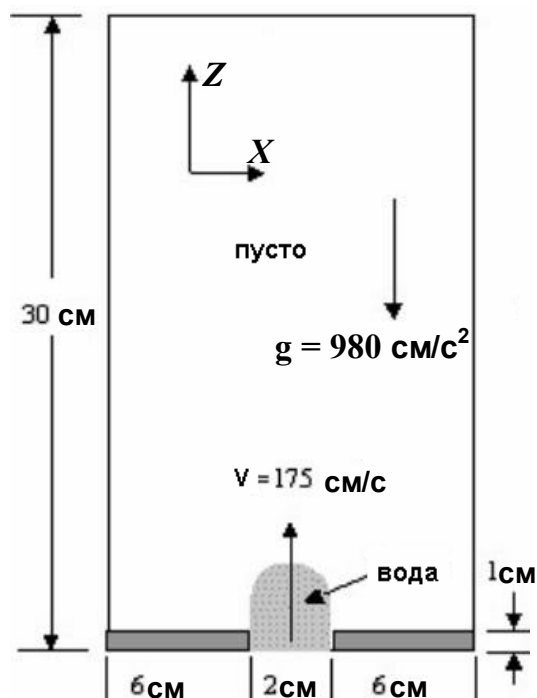


Рис. 1.7. Расчётная схема

Первое знакомство с системой Flow-3D начнём с рассмотрения задачи о заполнении снизу прямоугольной полости несжимаемой жидкостью (рис. 1.7). Сверху вниз действует сила тяжести. Вытянутая по длине (по оси Y) полость имеет ширину 14 см и высоту 30 см. Она заполняется через отверстие (щель) шириной 2 см. Так как полость по оси Y вытянута, то будем считать, что течение происходит только в поперечных сечениях, а по направлению Y поток не изменяется. Тогда можно рассмотреть упрощённую, плоскую задачу (в плоскости XOZ).

Обратите внимание: мы начнем процесс без жидкости в полости, так что схема на рис. 1.7 представляет начальный период времени.

1.5.1. Установка общих параметров модели

Начните новый проект (рабочее пространство), выбрав в главном меню **File / New Workspace**. В появившемся окне введите название проекта и выберите или создайте папку для него.

Запомните: Система Flow-3D воспринимает только английскую раскладку клавиатуры. Не используйте русский шрифт, так как это может привести к сбою работы программы с потерей данных модели!

На вкладке **Navigator** появится новая строка – Ваш проект. В одном проекте (**Workspace**) можно создать много различных моделей – расчётов (**simulations**). Выберите новый расчёт: **File / Add new simulation**. Задайте название модели. На вкладке **Navigator** выберите строку с именем вашей модели и перейдите на вкладку **Model Setup**. На этой вкладке предстоит выполнить все шаги по созданию модели и подготовке её к расчёту. Она содержит новые вкладки. На первой из них (**General**) настроим общие параметры модели, как показано на рис. 1.8.

Поясним основные настройки:

✓ **Finish Time**. Есть три различных способа задания критерия окончания расчёта. Метод по умолчанию состоит в том, чтобы остановиться по достижении заданного времени (1.2 с). Второй способ определяет окончание расчёта по заполнению ёмкости (**Fill Fraction**). Третий метод (**Steady-state**) состоит в том, чтобы закончить расчёт, когда течение жидкости стало установившимся и далее не изменяется. Параметр **Finish Time** во втором и третьем случае играет второстепенную роль, но он необходим для того, чтобы расчёт не был бесконечным в случаях, когда выясняется, что полное заполнение или стационарный режим течения невозможно достичь.

Нажмите кнопку **Additional Finish Condition**, выберите условие **Fill Fraction** и задайте параметр **Finish Fraction**, который определяет степень окончательного заполнения (1.0 соответствует полному заполнению).

✓ Параметр **Interface tracking** определяет характер обтекания на внутренних границах жидкости. В этой задаче существует свободная поверхность (граница раздела), так что должен быть установлен переключатель **Free Surface or Sharp Interface**. Он активизирует специальный алгоритм расчёта, отслеживающий свободную поверхность. Если внутри расчётной области нет незаполненных полостей и острых кромок, образующих разрывы потока и каверны, то выбирается вариант **No sharp interface**.

✓ Параметр **Flow mode** определяет сжимаемость (**compressible**) или (в нашей задаче) несжимаемость (**incompressible**) жидкости.

✓ **Number of fluids**. В данной задаче присутствуют две жидкости: вода и воздух. Однако плотности жидкостей различаются на несколько порядков, поэтому используем модель с одной жидкостью (**One fluid**). В этом случае лёгкая жидкость (воздух) трактуется как пустота, в которой давление постоянно и отсутствует течение (поле скоростей). Если бы была использована модель двух жидкостей (**Two fluids**), то расчёт течения выполнялся бы и в

воздухе. Тогда скоростные потоки в жидкостях вблизи границы раздела резко бы отличались, вызывая вычислительную неустойчивость расчёта, многочисленные разрушения границы раздела и несоответствие результатов действительности. Модель с двумя жидкостями применима в случаях, когда граница раздела движется без разрушения и резких изменений конфигурации.

✓ **Units** – единицы измерения. Выберите CGS (сантиметр, грамм, секунда). В дальнейших задачах рекомендуем использовать систему СИ (SI).

✓ Остальные параметры оставьте по умолчанию (изменять их приходится относительно редко).

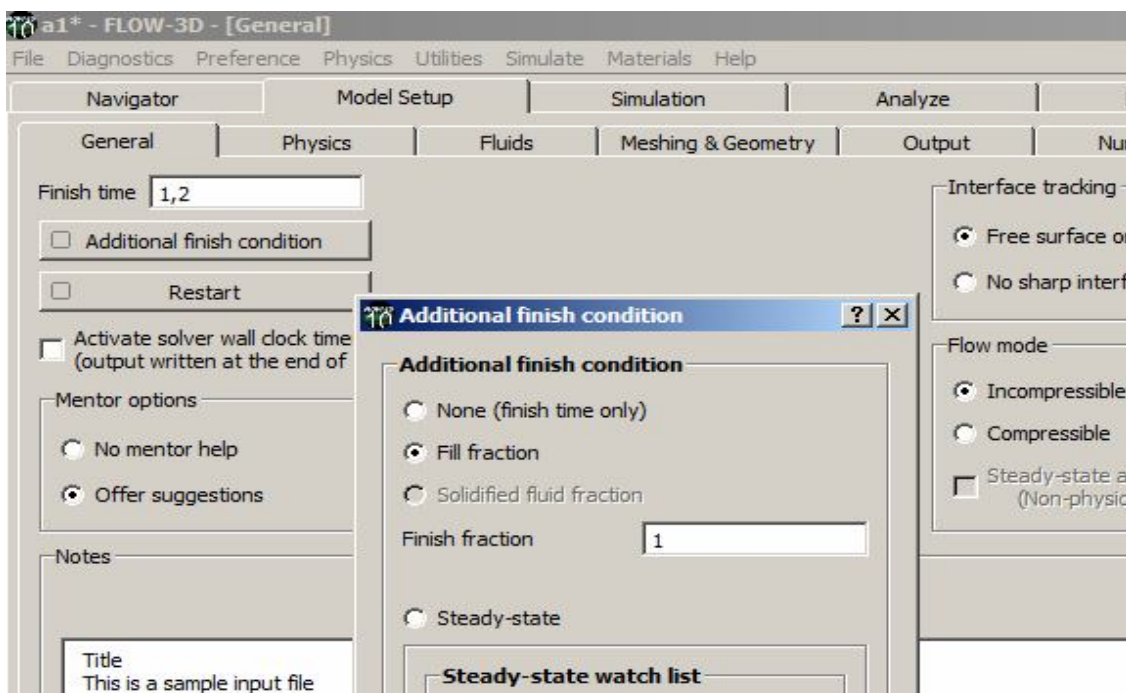


Рис. 1.8. Вкладка **General** для задания общих параметров задачи

1.5.2. Выбор параметров физической модели

Переключитесь на вкладку **Physics** или соответствующий раздел главного меню (рис. 1.9). Здесь определяются физические особенности задачи. Для создания физической модели не стремитесь «на всякий случай» учесть множество физических особенностей модели. Это может привести к проблемам при решении задачи. Во-первых, может резко увеличиться время расчёта. Например, учёт поверхностного натяжения требует гораздо меньшего шага по времени, чем большинство других физических процессов. Во-вторых, точность результатов не только не вырастет, но сможет существенно уменьшиться, вплоть до потери устойчивости вычислений. Другими словами, учёт физических эффектов, мало влияющих на реальный процесс, может привести к вредным особенностям (так называемой плохой обусловленности) численной модели.



Рис. 1.9. Меню и вкладка Physics

В нашей задаче число Рейнольдса $Re = 24500$, так что вязкость жидкости, по-видимому, следует учесть. Щёлкните на кнопке **Viscosity and turbulence** и выберите режим **Viscous flow**. В этом примере выберите модель турбулентности **RNG** (для выбора модели турбулентности см. раздел 1.4.2).

Силы тяжести в этой задаче, очевидно, следует учесть. Щёлкните по кнопке **Gravity** и введите ускорение свободного падения по оси **Z**: -980 см/с^2 (рис. 1.10).

После задания вязкости и гравитации можно увидеть отметки на соответствующих кнопках на панели **Physics**.

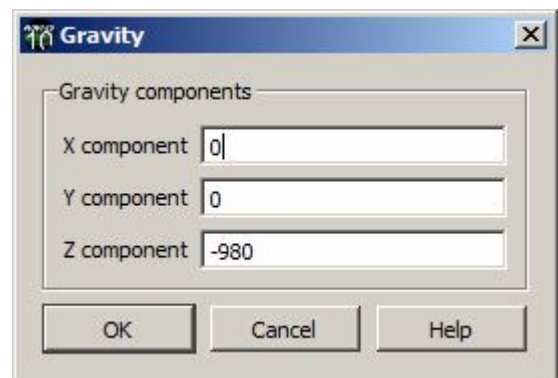


Рис. 1.10. Панель для задания гравитационных ускорений

1.5.3. Задание свойств жидкости

Далее перейдите на вкладку **Fluids** для задания свойств жидкости. Раскрывая список свойств жидкости (для **Fluid 1**), необходимо задать плотность (**Density**) и динамическую вязкость (**Viscosity**) жидкости. Для быстрой установки свойств воды их можно загрузить из базы данных, выбрав в главном меню **Materials** → **Fluids Database**. Вы увидите диалоговое окно, показанное на рис. 1.11. Выберите строку **Water at 293K** (вода) и нажмите кнопку **Load Fluid 1**, затем **OK**. Появится окно задания системы единиц, в котором можно изменить систему размерностей свойств жидкости, выбранной из базы данных. В результате из базы данных загрузятся свойства воды при 20°C в системе СГС. Закрыв окно **Fluids Database** кнопкой **Close**, Вы увидите значения свойств (рис. 1.12).

Сохраним задачу, выбрав в главном меню **File** → **Save simulation**, после чего перейдём к созданию расчётной сетки и геометрической модели.

1.5.4. Построение расчётной сетки

Для этой задачи размеры расчётной области выбрать сравнительно просто - это размеры ёмкости, которая будет заполнена. Выбор начала системы координат произволен, - примем его в центре отверстия.

Перейдите на вкладку **Meshing & Geometry** (рис. 1.13).

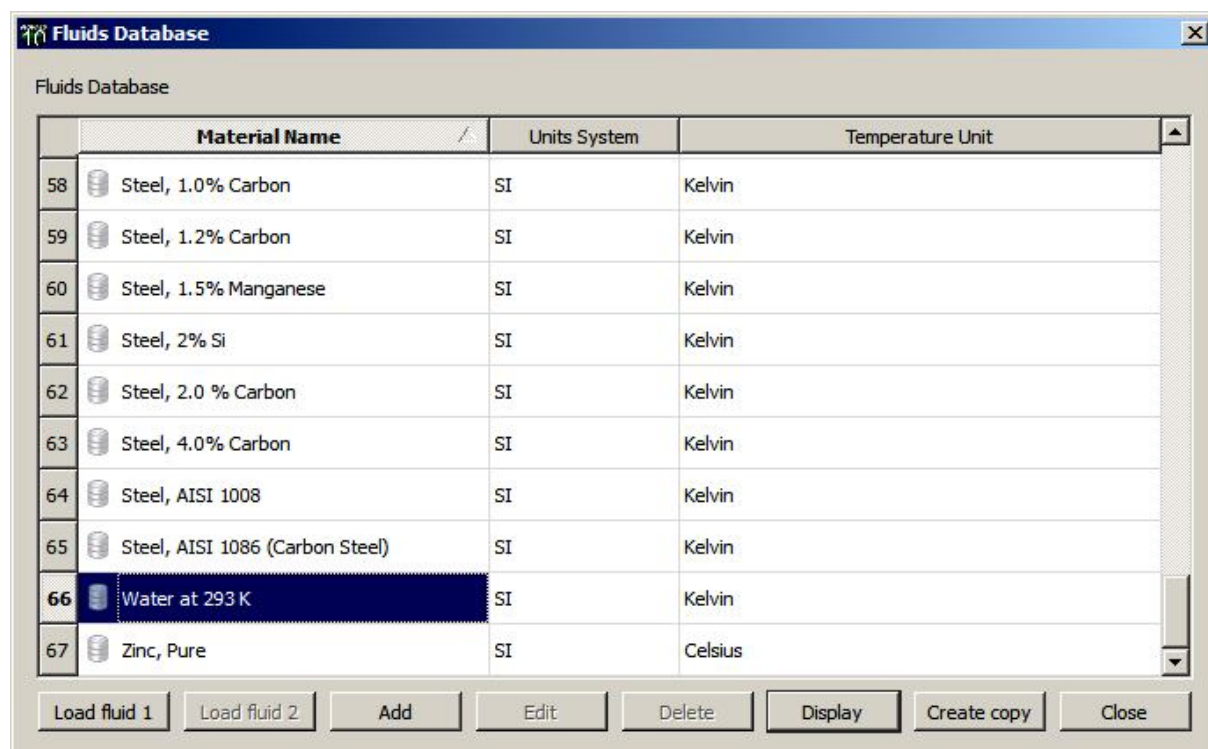


Рис. 1.11. Окно **Fluids Database** для задания свойств жидкости

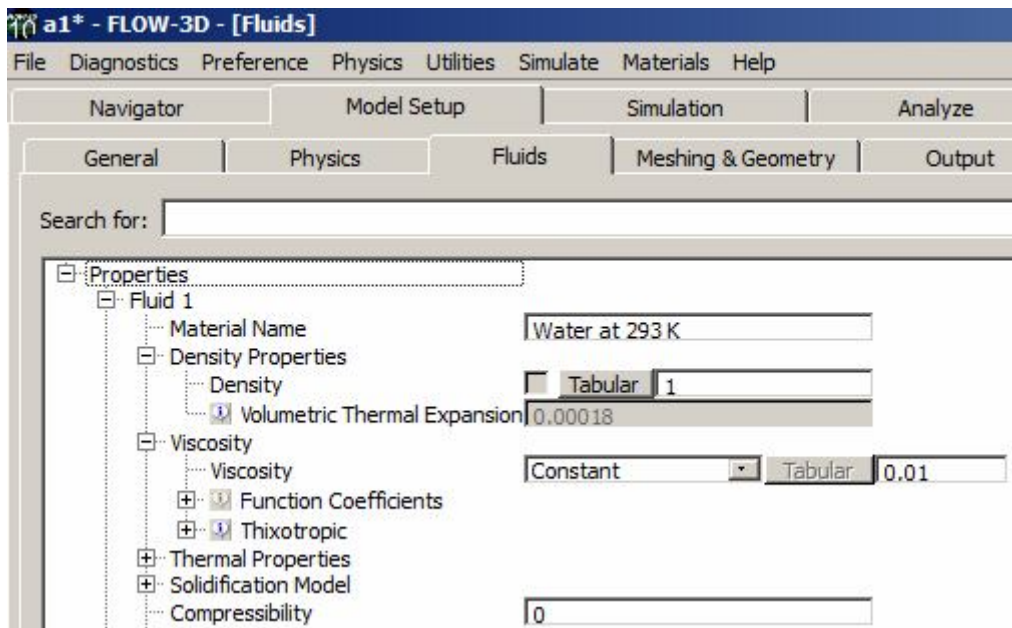


Рис. 1.12. Свойства жидкости

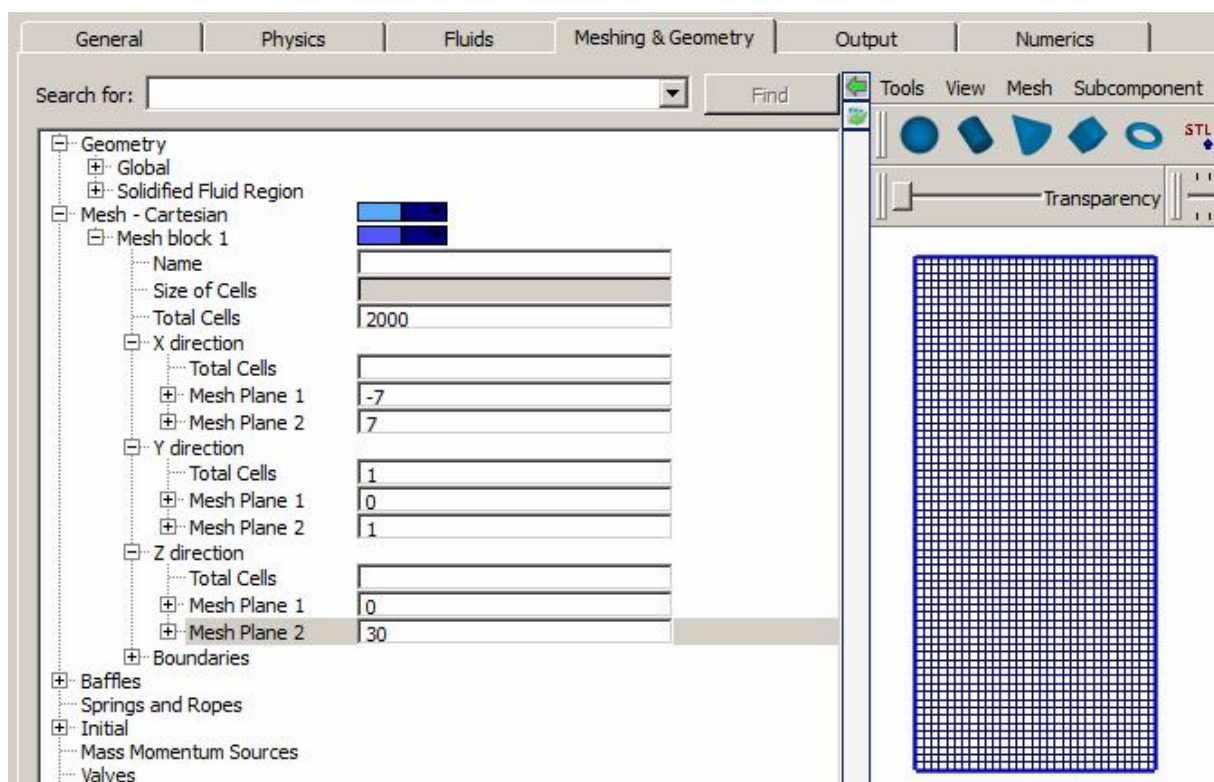


Рис. 1.13. Вкладка Meshing & Geometry для задания параметров сетки и геометрии модели

Создадим блок расчётной сетки в декартовой системе координат. Для этого в строке дерева свойств Mesh – Cartesian щёлкните правой кнопкой мыши и выберите Add a mesh block. В графическом окне появляется сет-

ка (с размерами пока по умолчанию). Любые свойства блока сетки (**Mesh block 1**) можно задать в окне свойств. Задайте свойства сетки, как приведено на рис. 1.13. Поясним эти свойства:

- **Total cells** – общее число ячеек расчётной сетки. Оно может быть задано для всей сетки или по координатам (если по координате число ячеек не задано, то оно определяется автоматически);
- **Mesh Plane N** – координата плоскости N (задаются крайние плоскости (границы) сетки, но можно задать плоскости и внутри расчётного объёма);
- **Cell size** – размер ячейки сетки;
- **Cell count** – число ячеек.

По координате Y установите только одну ячейку (**Total Cells = 1**), так как задача плоская и течение по Y отсутствует.

Управление графическим окном выполняется с помощью отдельного меню, кнопок (рис. 1.14) и мыши. При движении мыши с нажатой правой кнопкой можно перемещать взгляд относительно модели. С левой кнопкой можно изменить угол просмотра. Для приближения (удаления) модели вначале щёлкните, а затем крутите колёсико мыши.

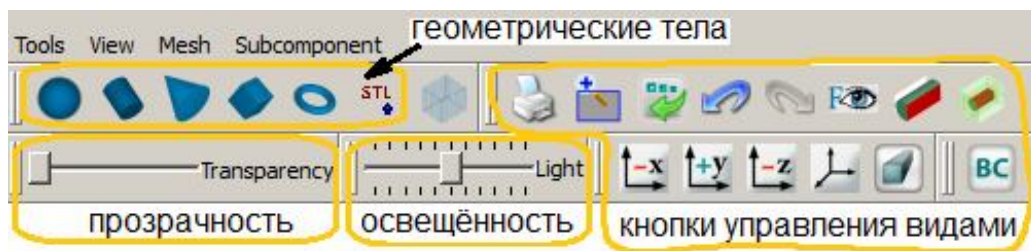


Рис. 1.14. Управление графическим окном

1.5.5. Задание граничных и начальных условий

В системе Flow-3D можно использовать несколько типов граничных условий: плоскость симметрии (**Symmetry**); твёрдая стенка (**Wall**); продолжение (**Continuative** – означает равенство нулю нормальных производных к границе для скоростей, давлений, сил и плотности, соответствуя, таким образом, плавному продолжению течения за границу); периодичность (**Periodic** – означает, что если течение продолжить за границу, то оно полностью повторит всю картину от противоположной до текущей границы – рис. 1.15). Кроме этого, на границе можно задать значения давления (**Specified Pressure**), компонентов скорости (**Specified Velocity**) и др.

В левом окне списка свойств модели раскройте строку **Boundaries**. Нажмите первую из шести кнопок (в строке **X min**), соответствующую граничной плоскости расчётного объёма. В появившемся окне выберите

граничное условие **Wall** (твёрдая стенка) (рис. 1.16). Аналогично условие **Wall** задаётся для правой (**X max**) и верхней (**Z max**) стенки резервуара.

Для нижней плоскости (**Z min**) задайте скорость течения (**Specified velocity**). В поле **Z velocity** введите значение скорости, см/с: 175.

Так как течение плоское, то для передней (**Y min**) и задней (**Y max**) стенок определим условия симметрии (**Symmetry**).

Давление или скорости можно задавать переменными во времени. Для этого достаточно нажать соответствующие кнопки (**Velocities** или **Pressure**) и ввести эти параметры в табличном виде для множества моментов времени.

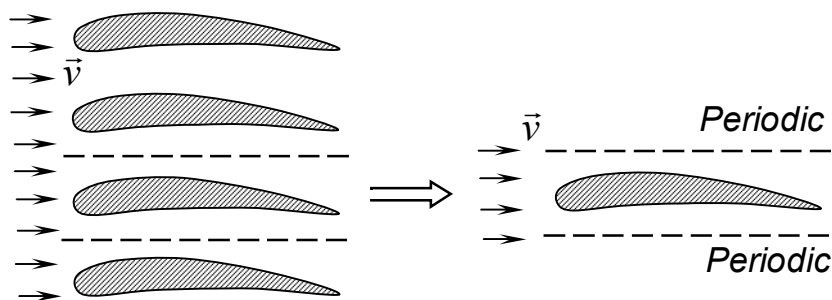


Рис. 1.15. Пример граничного условия **Periodic** – обтекание решётки крыльев заменяем рассмотрением одного крыла

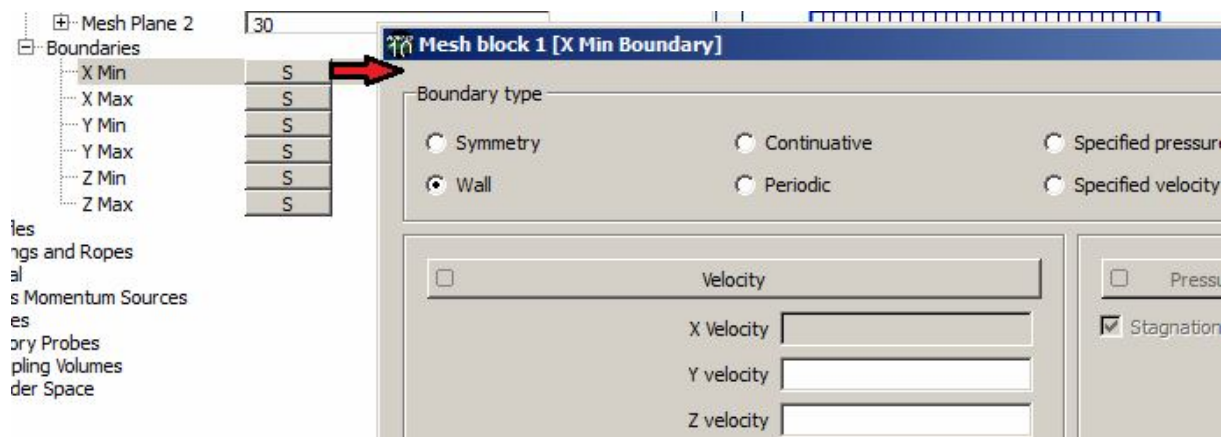


Рис. 1.16. Задание граничного условия **Wall** (твёрдая стенка)

Для задания **начальных условий** раскройте в списке свойств строки **Initial** → **Global** (рис. 1.17). В строке **Fluid Initialization** можно определить начальное положение жидкости, в частности, задав уровень (**Use fluid elevation**) или начальный объём (**Use fluid volume**). В нашей задаче в начальный момент времени жидкость ещё не вошла в расчётную область, поэтому оставьте значение по умолчанию (**None**).

Раскрыв строку **Void Initial State** (пустое начальное состояние), в поле **Pressure**, введите начальное давление, $\text{г}/(\text{см}\cdot\text{с}^2)$: 0. Это значит, что будут вычисляться избыточные давления. Если задать начальное давление равным атмосферному ($1.013\text{e}6$), то рассчитывались бы абсолютные давления.

Так как свободная поверхность жидкости в начальный момент присутствует у нижней границы, зададим на ней направление начального давления: **Pressure: hydrostatic pressure in z direction** (рис. 1.17).

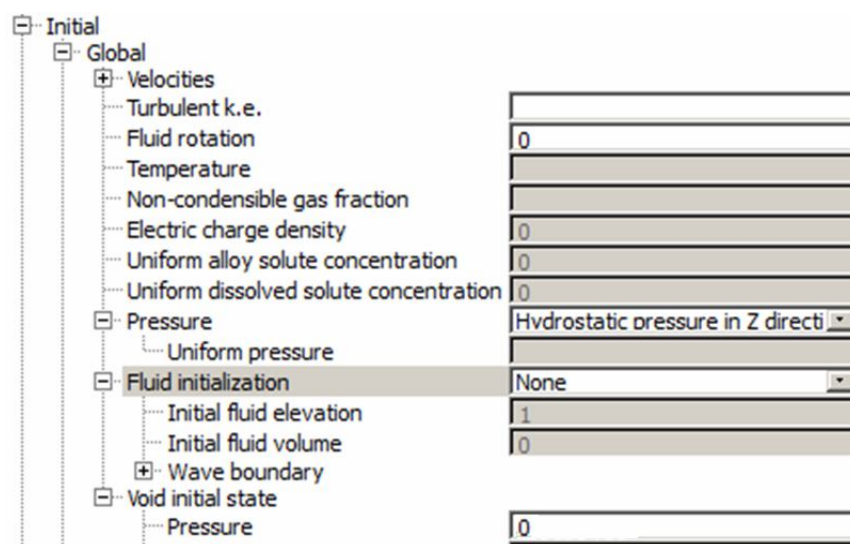



Рис. 1.17. Задание начальных условий

1.5.6. Определение геометрии модели

Заметьте, что пока скорость потока задана на всей нижней границе. Истечение из отверстия получится, если в пределах расчётной сетки по этой границе зададим препятствие с отверстием.

Геометрические объекты (тела, отверстия и др.) в расчётную область можно установить двумя способами. Во-первых, можно использовать простейшие примитивы (см. рис. 1.14). Более сложные по форме объекты иногда можно создать путём комбинации простых элементов, однако удобнее для этого использовать системы компьютерного моделирования CAD, например AutoCAD. Flow-3D использует для этого импортируемые модели в формате STL.


Геометрические объекты Flow-3D называются компонентами (**Components**). Компоненты состоят из одного или нескольких сгруппированных субкомпонентов (**Subcomponents**).

Установим препятствие в виде параллелепипеда - бокса (**Box**). Для этого нажмите кнопку  на панели управления графическим окном. В появившемся окне **Add box subcomponent** введите имя и размеры бокса (рис. 1.18). Затем нажмите ОК, в новом окне введите имя компонента (рис. 1.18).

Выполним щель в установленной стенке. Для этого к компоненту **box1** добавим новый субкомпонент (рис. 1.19). Обратите внимание, что следует установить его тип **Hole** (отверстие).

После введения компонента и субкомпонентов в окне свойств модели появляются соответствующие строки (рис. 1.20), разворачивая которые можно задать или переопределить многие свойства, в частности:

- **Enabled** – включить (отключить);
- **Limiters** – размеры;
- **Transformations** – изменения положения и размеров;
- **Magnifications** – изменение масштаба;
- **Rotations** – повороты;
- **Translations** – перемещения.

Итак, модель практически готова и её можно увидеть в графическом окне. Однако некоторые особенности здесь посмотреть пока нельзя, например, положение и объём жидкости. Для этого используется просмотр модели в другом режиме, - он называется **FAVOR**. Нажмите кнопку . В появившемся окне переключите свойство **View fluid volume** в режим **Fluid1** и нажмите кнопку **Render**. На рис. 1.21 показаны варианты изображения модели в обычном режиме и в режиме **FAVOR**.

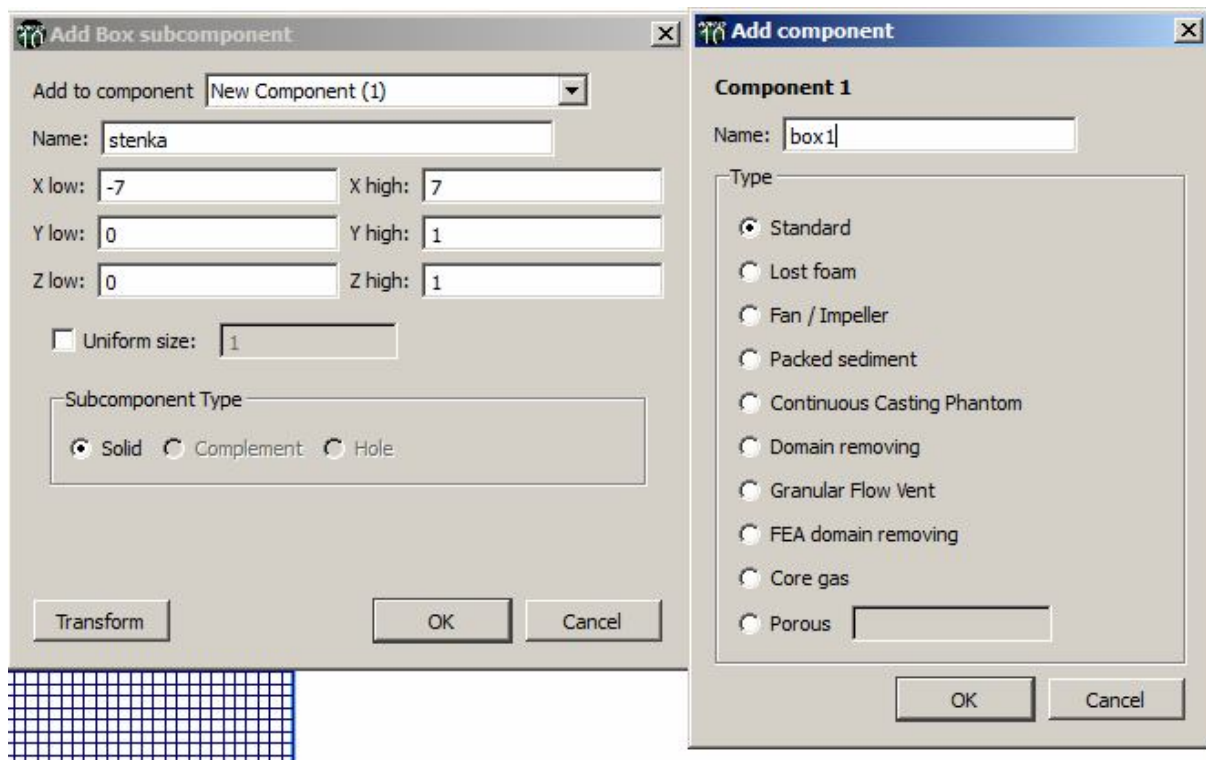


Рис. 1.18. Задание субкомпонента и компонента

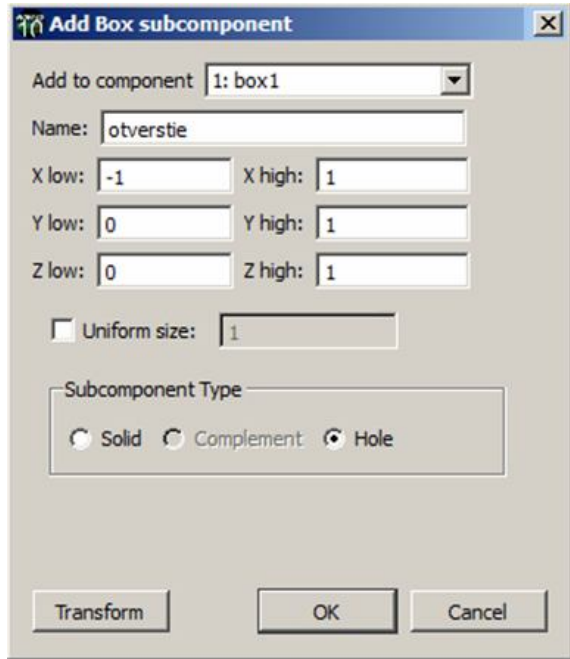


Рис. 1.19. Задание субкомпонента - отверстия

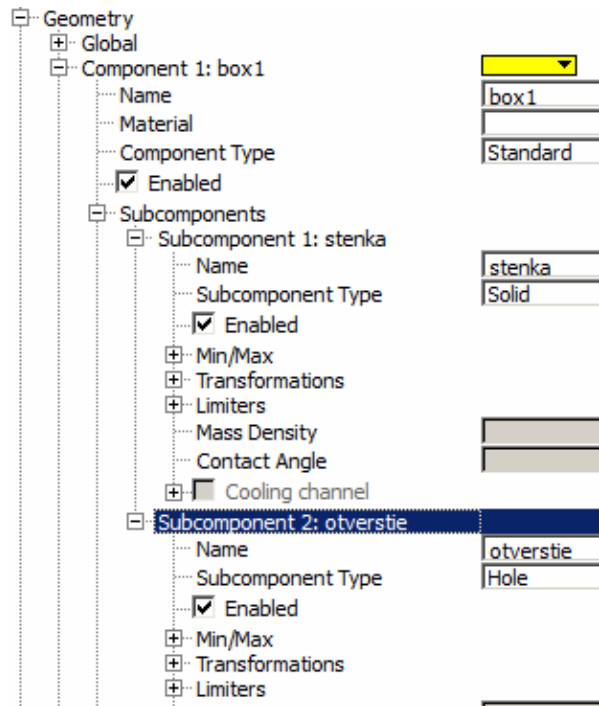


Рис. 1.20. Свойства субкомпонентов

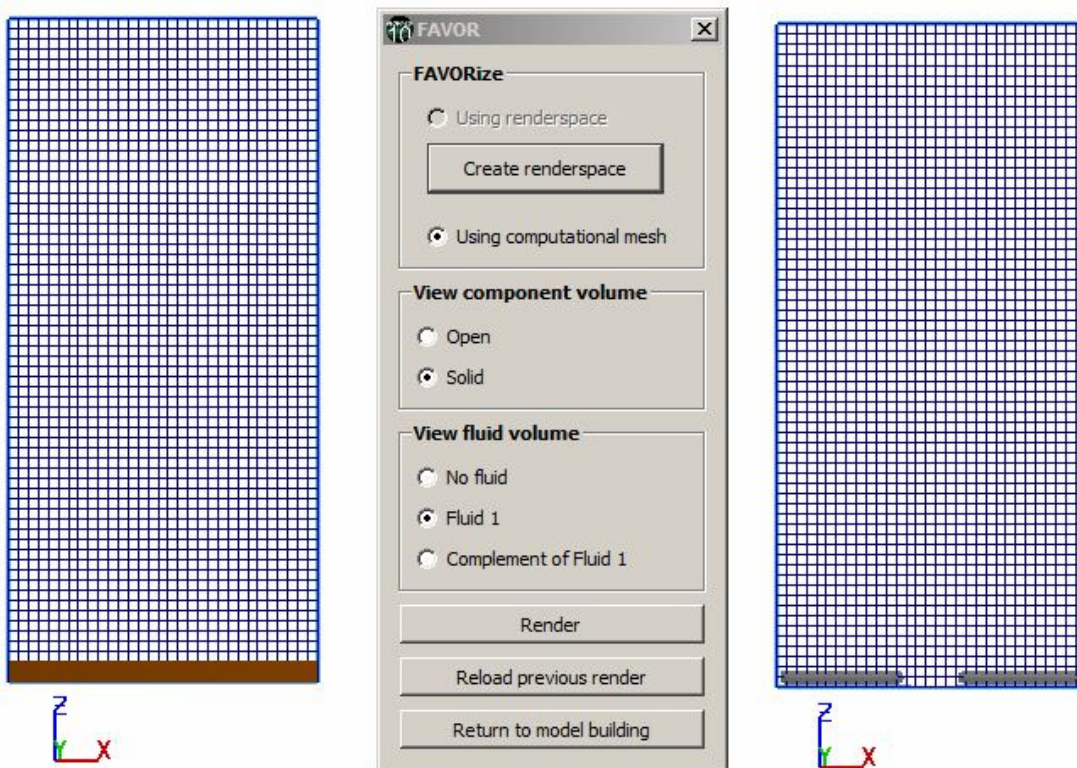


Рис. 1.21. Варианты изображения модели в обычном режиме и в режиме FAVOR.

1.5.7. Выполнение и контроль расчёта

Чтобы определить наборы результатов расчёта, перейдите на вкладку **Output**. Изображение модели после расчёта сохраняется по кадрам. По умолчанию количество кадров небольшое (порядка 10). Для более точного отражения динамики процесса желательно большее количество кадров. Зададим интервал времени между кадрами 0.05 с. Значение 0.05 необходимо ввести во все поля интервала времени (**Restart data interval**, **History data interval**, **Short print interval**, **Long print interval**, **Selected data interval**).

На вкладке **Numerics** определяются параметры процесса вычислений. В большинстве задач лучше оставить их значения по умолчанию.

Итак, модель полностью подготовлена к расчёту. Сохраните её (**File** → **Save simulation**) и перейдите на вкладку **Simulation** для проведения расчёта. Здесь предстоит выполнить два стандартных действия.

Вначале в главном меню выберите **Simulate** → **Preprocess simulation** → **Yes**. По окончании работы препроцессора слева появляется сообщение **Preprocessor Done**. Препроцессор может выявить ошибки модели или выдать предупреждения. В этом случае в левом верхнем углу становится активной кнопка с красной надписью **Warnings & Errors**, нажав на которую можно посмотреть предупреждения или суть ошибок.

Если ошибок нет, то начнём расчёт: **Simulate** → **Run simulation**. Расчёт занимает некоторое время. В процессе расчёта можно контролировать некоторые параметры в виде графиков, а также в текстовом окне (рис. 1.22):

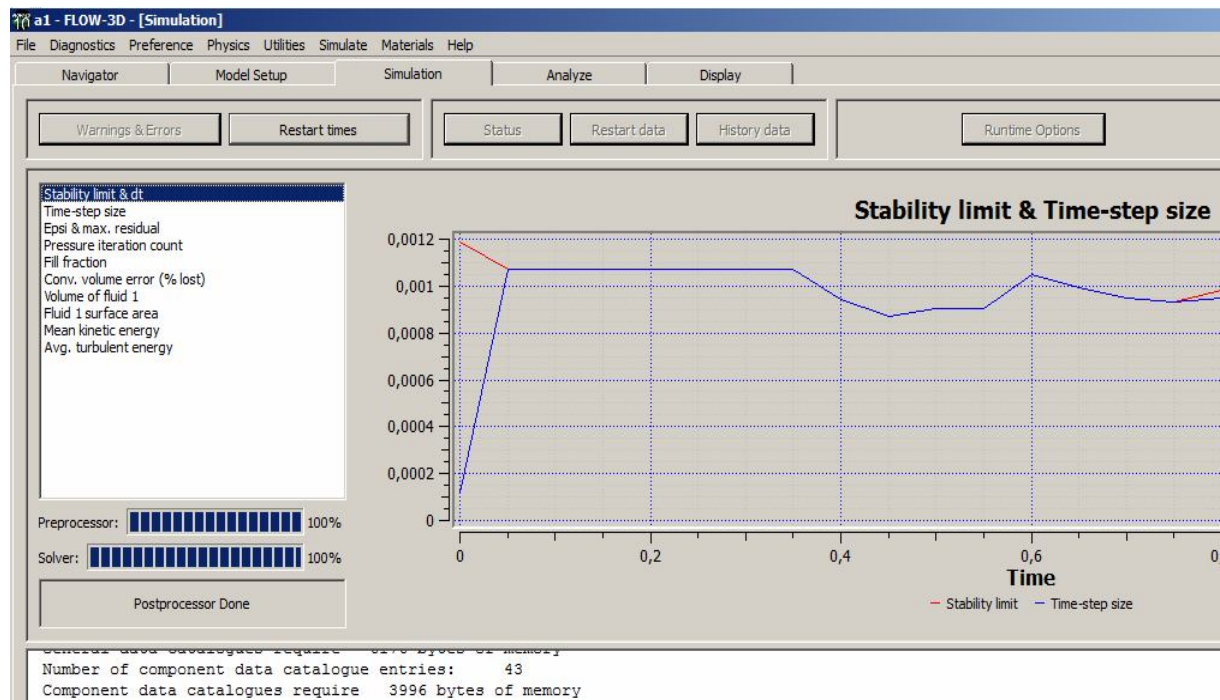


Рис. 1.22. Контроль расчёта

- **Stability Limit & dt** – сопоставление шага по времени: предельного (обеспечивающего устойчивость процесса) и фактического **dt**. В идеальном случае они совпадают, но **dt** может быть меньше (обычно в начальный момент или в случаях существенных уточнений, связанных, например, с резкими изменениями давлений, брызгами и пр.);
- **Time step size** – шаг по времени (он автоматически подстраивается таким образом, чтобы обеспечить устойчивость и точность вычислений. Его резкое уменьшение в процессе расчёта обычно говорит о сложности физического процесса, наличии резких изменений (ударов, неустойчивости и т.п.);
- **Epsi & max. residual** – погрешность вычислений. **Epsi** представляет собой критерий сходимости при уточнении давлений, а **max. residual** – это фактическая наибольшая погрешность, которая должна быть не больше **epsi**. Нарушение этого условия говорит о наличии сбоя в процессе уточнения давлений. На каждом шаге по времени производятся вычисления методом последовательных уточнений (итераций) с таким условием, чтобы погрешность (**max. residual**) не превышала **epsi**, либо до тех пор, пока число приближений не достигнет заданного максимума **ITMAX**. Если число приближений превысит **ITMAX**, то в текстовом окне появится сообщение об ошибке;
- **Pressure iteration count** – число итераций давления. Малые значения указывают на хорошую сходимость давления;
- **Fill fraction** – степень заполнения расчётного объёма жидкостью;
- **Conv. volume error (% lost)** – ошибка сходимости по объёму жидкости. Количество жидкости, потерянное или добавленное (отрицательное значение) из-за погрешности вычислений. Обычно гораздо меньше, чем 1%. Значения больше 1% -3% указывают на проблемы: недостатки моделирования (чаще всего из-за грубой или слишком неоднородной расчётной сетки); чрезмерное нарушение сплошности жидкости (брызги, разрывы и др.); быстрое движение объектов, удары;
- **Volume of fluid 1** – объём жидкости внутри расчётной области;
- **Fluid 1 surface area** – площадь свободной поверхности жидкости. Изменение указывает на образование волн, всплесков, струй, капель и т.п.;
- **Mean kinetic energy** – средняя кинетическая энергия – надёжный показатель устойчивости потока;
- **Avg. turbulent energy** – средняя энергия турбулентности, по которой можно судить о характере течения (особенно сопоставляя этот показатель со средней (общей) кинетической энергией).

Если в процессе расчёта Вы обнаружили ошибку, несоответствующее реальности изменение контролируемых параметров или вычисления проходят слишком медленно, можно прервать расчёт кнопкой **Terminate** (в правом верхнем углу), а затем внести необходимые изменения в исходную модель.

Если процесс вычислений протекает слишком медленно, то возможностям компьютера (его быстродействию) не соответствует сложность численной модели. Упростить численную модель можно разными способами:

– возможно, в численной модели не учтены условия симметрии течения, тогда необходимо переделать модель с учётом симметрии. Обычно такой способ позволяет в несколько раз повысить эффективность вычислений без потери точности;

– можно уменьшить количество ячеек (cells) расчётной сетки, однако это может привести к потере точности результатов. Можно сделать сетку нерегулярной, то есть в районе резких изменений потока сетку сгустить, а в стороне, где течение плавное – размер ячеек сетки увеличить. При ответственных расчётах всегда необходимо анализировать несколько моделей с разной плотностью сетки. По мере сгущения расчётной сетки модели параметры течения должны сходиться к некоторым значениям, которые можно считать точными; – если возможно (хотя бы приближённо) заменить пространственное течение плоским, это необходимо сделать. Как правило, плоская модель гораздо проще и её расчёт не вызывает затруднений для современных компьютеров. Даже если при этом точность результатов будет сомнительна, эта модель может многое прояснить в характере течения и позволит в дальнейшем сделать более рациональную пространственную модель.

При успешном окончании расчёта слева появляется сообщение **Postprocessor Done**. Процессор может выдать предупреждения или аварийно завершить процесс расчёта вследствие ошибки, чрезмерного уменьшения шага по времени при уточнениях и пр. В этом случае появляется сообщение **Solver Terminated**, а в левом верхнем углу становится активной кнопка с красной надписью **Warnings & Errors**, нажав на которую можно посмотреть предупреждения или суть ошибок.

1.5.8. Просмотр результатов расчёта

Для анализа результатов после расчёта перейдите на вкладку **Analyze**. Если для данной модели Вы сделали первый расчёт, то появляется окно **Flow-3D Results**, в котором следует выбрать файл с результатами расчёта. Этот файл имеет стандартное имя **flsgrf** и расширение - имя вашей задачи (например **flsgrf.a1**). Файл находится в папке, в которой Вы сохранили задачу (она является текущей в данном окне). Выберите этот файл и нажмите ОК.

На вкладке **Analyze** представлено несколько вкладок, на которых можно настроить вывод результатов различными способами. Рассмотрим пока одну из них: **2D** (рис. 1.23). На ней настраивается вывод результатов в виде двумерных полей параметров течения по плоским сечениям расчётной области.

Поля скалярных величин (обычно давлений – **pressure**) выбираются в списке **Contour Variable**. Поля векторных величин (обычно скоростей – **velocity**) изображаемые в виде стрелок – векторов выбираются в списке **Vector Type**.

Положение сечения и границы области просмотра выбираются в разделах **Plane** и **Limits**, а диапазон времени задаётся в поле **Time Frame**. В разделе **Contour Type** можно выбрать стиль отображения скалярных величин: **color shaded** – областями разного цвета; **B/W contour lines** – чёрными или белыми линиями равного уровня; **color contour lines** – цветными линиями.

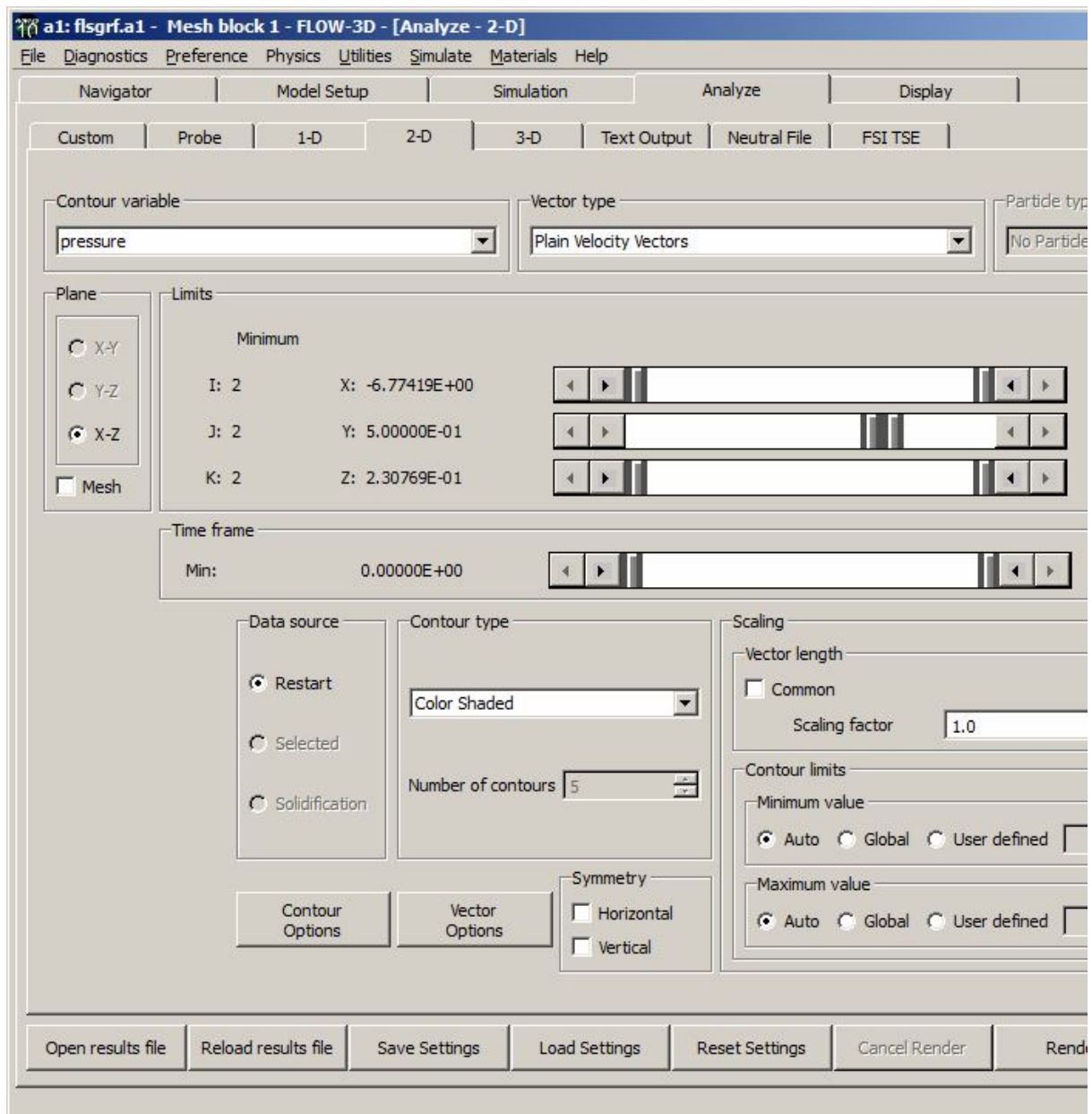




Рис. 1.23. Вкладка 2D настройки просмотра двумерных течений

Нажмите кнопку **Render**. Происходит переход на вкладку **Display**, где в графическом окне показываются кадры гидродинамического процесса (рис. 1.24). В поле справа отображается контрольная панель со списком кадров. Переход по кадрам можно выполнять кнопками **Next / Previous** или запустив анимацию кнопкой .

Размеры стрелок векторного поля скоростей желательно настроить, чтобы они не загромождали изображение. Это можно сделать, открыв окно настроек **Format options** кнопкой **Format** или . В разделе **Vector size** этого окна подберите относительную длину (**Length**) и размер стрелок (**Arrowhead**) векторов. Здесь же можно настроить многие другие элементы оформления изображений.

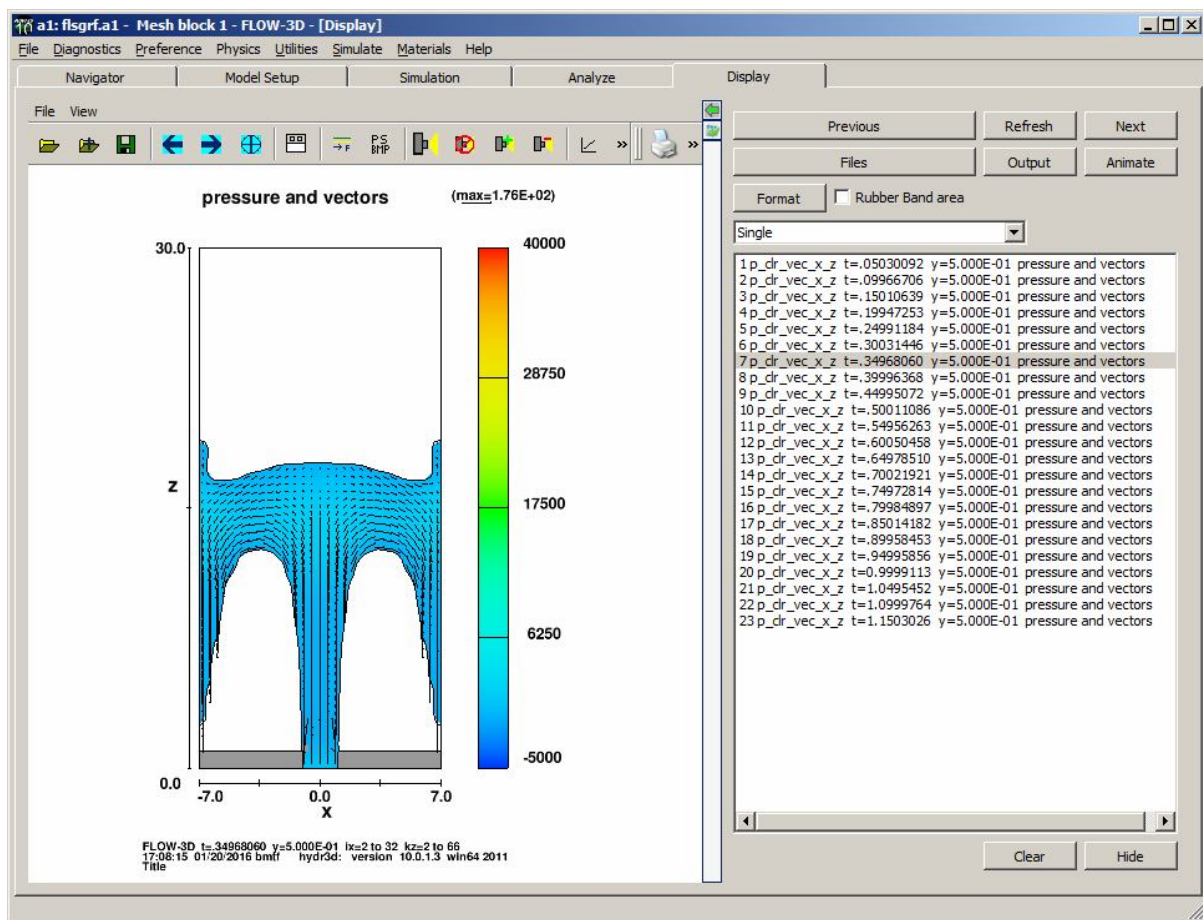


Рис. 1.24. Вкладка **Display**

При анализе кадров процесса обратите внимание, что цветовая палитра поля и величины давлений на легенде автоматически изменяются на каждом кадре. Это не всегда удобно и может ввести в заблуждение, так как в разные моменты времени одному давлению соответствуют разные цвета. Более адекватным реальности будет задание единой легенды и палитры цветов для всех кадров. Для этого просмотрите кадры, найдите наимень-

шее и наибольшее значения давлений (при этом отбросьте лишние кадры, - в данном примере это последний момент, где давления резко возросли в результате полного заполнения полости, - скорее всего на этом кадре давления не соответствуют реальности). Вернитесь на вкладку **Analyze** и в разделе **Contour limits** выберите: **Minimum value – User Defined = -5000**; **Maximum value – User Defined = 40000**. В разделе **Time frame** подвиньте правый ползунок чуть влево, отсекая последний кадр. Затем снова нажмите кнопку **Render**.

Изображения потоков воды для последовательных моментов времени представлены на рис. 1.25.

Модель можно редактировать и анализировать многократно различные её варианты. Например, вернитесь на вкладку **Model setup – Meshing & geometry**, в свойствах расчётной области измените входную скорость на значение 250 см/с (**Mesh Cartesian – Mesh block 1 – Boundaries – Z min – кнопка – Z velocity = 250**). Затем снова выполните расчёт (**Simulation**) и перейдите на вкладку **Analyze**. Нажмите кнопку перезагрузки файла с результатом расчёта – **Reload result file** (она после нового расчёта имеет красную надпись) – **Render**.

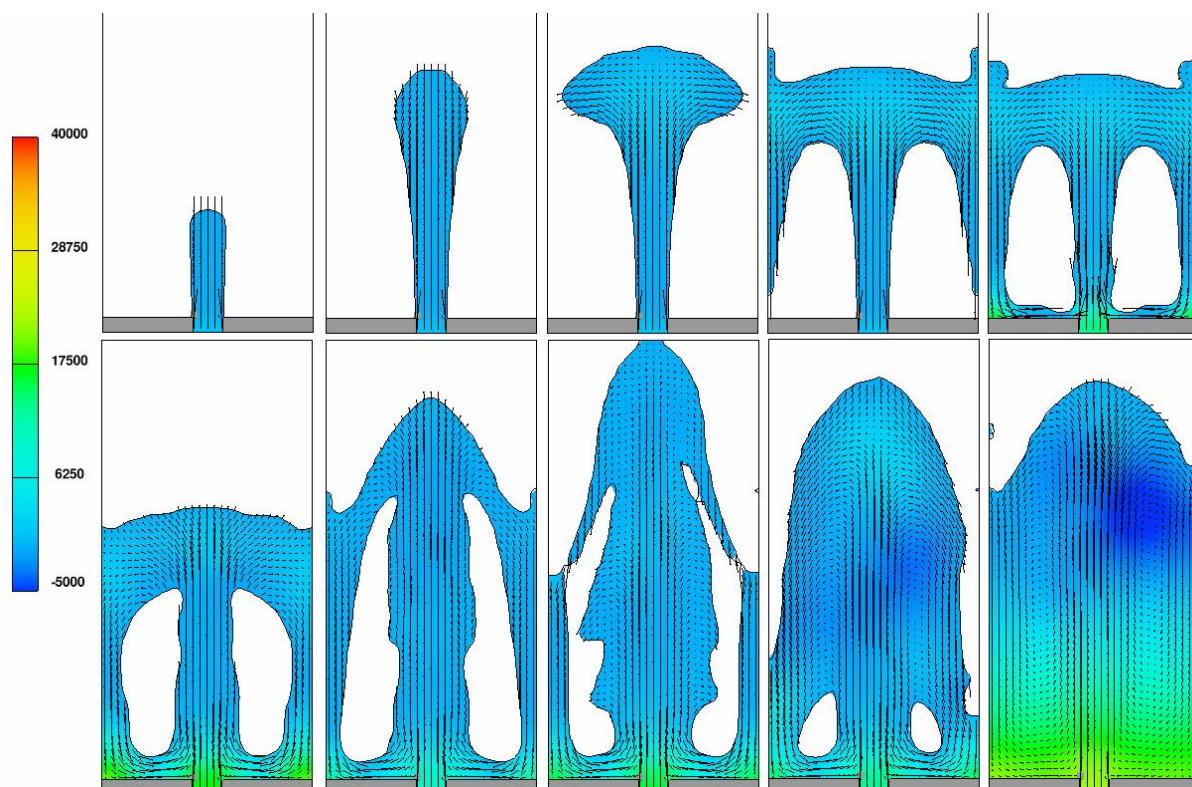


Рис. 1.25. Результат расчёта

2. СТАЦИОНАРНЫЕ ПОТОКИ И ПОСТУПАТЕЛЬНОЕ ДВИЖЕНИЕ ТЕЛ В ЖИДКОСТИ

По временному признаку потоки делятся на установившиеся (стационарные – при течении с постоянной скоростью) и неуставившиеся (нестационарные – при движениях с ускорением).

Поле скоростей жидкости является функцией четырёх координат Эйлера x, y, z, t :

$$\vec{v} = f(x, y, z, t).$$

Ускорение в общем случае определяется в виде

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} \frac{dz}{dt}. \quad (2.1)$$

Первое слагаемое в правой части называется локальным (местным) ускорением. Остальные слагаемые составляют конвективное (переносное) ускорение. Учитывая, что производные от координат по времени представляют собой проекции скорости, конвективное ускорение равно

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial x} v_x + \frac{\partial \vec{v}}{\partial y} v_y + \frac{\partial \vec{v}}{\partial z} v_z = (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v}.$$

Если местное ускорение равно нулю, то зависимость скорости от времени становится неявной, а движение жидкости называется установившимся (стационарным). При этом конвективное, а значит и полное ускорение в ноль не обращается. Этим отличается движение легко деформируемой жидкой среды от движения твёрдого тела.

При анализе стационарных течений справедлив принцип обращения потока, согласно которому равномерно движущееся в жидкости тело можно считать неподвижным, а жидкую среду - набегающей на тело с равномерной скоростью, равной скорости движения тела. Это существенно облегчает решение многих задач за счёт исключения из математической модели переменной t .

Следует, однако, отметить, что в большинстве систем компьютерного анализа (в частности, в программе Flow-3D) не используются специальные математические модели стационарного течения, так как за основу принимается единая и более общая нестационарная модель. Однако стационарные течения они анализировать позволяют (правда, с большими вычислительными затратами). В этом случае просто ставится задача с начальными условиями. При этом в первый период гидродинамического процесса движение неуставившееся, но затем оно стабилизируется и постепенно становится полностью стационарным (если граничные условия это позволяют и отсутствуют внешние возмущения).

2.1. Обтекание подводного крыла

Рассмотрим плоскую задачу о стационарном обтекании профиля подводного крыла. Пусть крыло большого удлинения движется в воде с постоянной скоростью на большом удалении от дна и от поверхности воды. При таких условиях можно перейти к стационарной задаче об обтекании неподвижного крыла потоком воды с постоянной скоростью.

2.1.1. Создание расчётной модели

Создайте в системе AutoCAD сплошную трёхмерную модель кормового крыла теплохода «Метеор» (рис. 2.1). Оно имеет профиль сегмента круга. Хорда крыла 1030 мм, толщина 56.6 мм. Длину крыла можно взять произвольно, так как рассмотрим плоскую задачу.

Система Flow-3D использует геометрические объекты в формате STL. Для экспорта модели крыла в формат STL выполните следующее:

- Введите в командной строке AutoCAD команду FACETRES (это настройка точности отображения формы модели). Установите параметр FACETRES равный 10;
- Введите команду STLOUT (если по умолчанию используются команды на русском языке, то: `_stlout`). Укажите объект для экспорта. Нажмите клавишу Y или Enter на запрос Create a binary STL file? [Yes/No];
- Задайте имя файла и сохраните его (напоминаем, что **Flow-3D не воспринимает русский шрифт**, поэтому имя файла и все папки, в которых он находится, должны иметь названия только на английском языке).

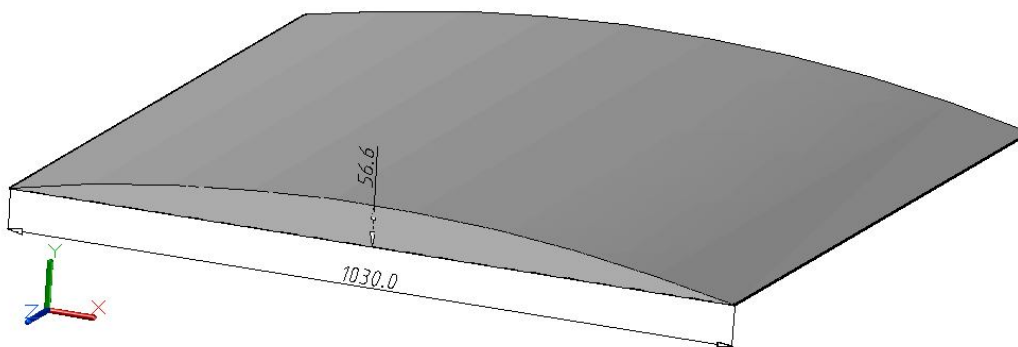


Рис. 2.1. 3D модель крыла

Начнём новый расчёт (**New simulation**) в системе Flow-3D. Подготовка модели принципиально не отличается от рассмотренного примера в разделе 1.4, поэтому рассмотрим процесс моделирования сокращённо, поясняя только новые особенности этой модели.

На вкладке **General** настроим: **Finish Time** = 0.5 с; **Additional Finish Condition** → **Steady State**; **Interface tracking** → **No sharp interface**; **Flow mode** → **incompressible**; **Number of fluids** → **One fluid**; **Simulation units** → **SI**. Размерности всех параметров будем определять в системе СИ.


На вкладке **Physics** выбираем турбулентный режим движения: **Viscosity and turbulence** → **Viscous flow**, **Turbulence models** → **RNG model**. На вкладке **Fluids** определяем свойства жидкости: главное меню **Materials** → **Fluids Database** → **Water at 293K** → **Load Fluid 1** → **OK** → **OK** → **Close**.

Перейдем на вкладку **Meshing & Geometry**. Создайте блок расчётной сетки в декартовой системе координат: в строке дерева свойств **Mesh** – **Cartesian** щёлкните правой кнопкой мыши и выберите **Add a mesh block**. Отредактируйте размеры расчётной сетки: **Total cells** = 10000; длина по оси **X** = 5 м (от 0 до 5); высота по оси **Z** = 2 м (от 0 до 2); ширина по оси **Y** = 0.05 м (от 0 до 0.05); **Total cells** по оси **Y** = 1.

Задайте граничные условия (раздел **Boundaries**):

- **X min: Specified velocity** → **X velocity** (скорость по оси **X**) = 15 м/с;
- **X max: Specified velocity** → **X velocity** (скорость по оси **X**) = 15 м/с;
- **Y min: Symmetry**; **Y max: Symmetry**;
- **Z min: Wall**; **Z max: Wall**.

Зададим начальные условия (раздел **Initial** → **Global**). Так как силы гравитации в этой задаче не учитываются, а крыло находится далеко от поверхности воды, то начальное поле давлений будем считать однородным: **Pressure: Uniform pressure**, **Uniform pressure** = 0. В начальный момент расчётная область заполнена водой, имеющей скорость течения 15 м/с: **Velocities** → **X direction** = 15.

Далее поместим крыло в расчётную область. В меню графического окна нажмите кнопку  или выберите команду **Subcomponent** → **Geometry File(s)**. В появившемся окне введите **Subcomponent Name** (имя субкомпонента – в английской раскладке клавиатуры!). Нажмите кнопку **Transform** (рис. 2.2).

Размеры модели крыла заданы в миллиметрах (рис. 2.1). В расчёте используется система СИ, поэтому необходимо уменьшить величины размеров в тысячу раз. В появившемся окне **Transformations** в поле **Global Magnification** (по всем координатам) введите масштабный коэффициент 0.001. Кроме того, плоскость сечения созданной ранее модели крыла: **XOY**. Однако в расчётной сетке профиль крыла мы разместим в плоскости **XOZ**. Поэтому следует повернуть крыло вокруг оси **X** на 90°: **Rotate** – **X**: 90. Кроме того, необходимо также переместить модель в середину расчётной области (**Translate**). Однако это можно сделать и потом, редактируя свойства субкомпонента (это будет нагляднее). Поэтому завершим пока трансформации: **OK**.

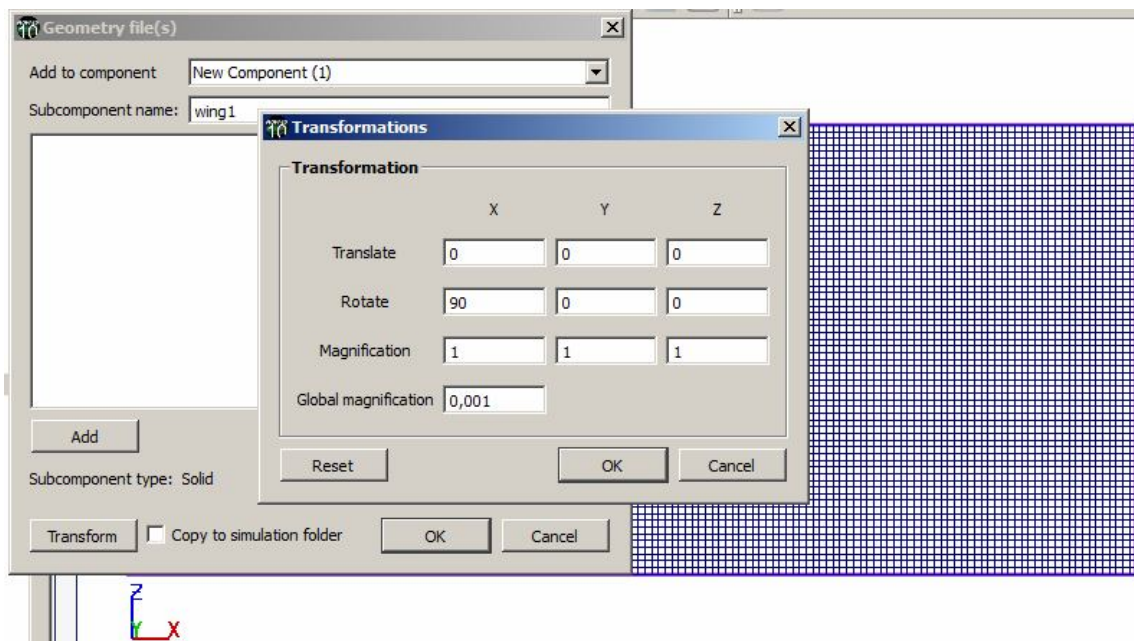


Рис. 2.2. Установка субкомпонента и его преобразование

Вернувшись в окно Geometry File(s) нажмите кнопку Add. Найдите нужный файл *.stl и нажмите Open. OK. В окне Add component введите имя компонента Name, Type: Standard, OK.

Сейчас крыло необходимо переместить в середину расчётной области. Для этого раскройте в списке свойств строки Component 1 → Subcomponents → Subcomponent 1 → Transformations → Translations. Кроме того, поверните крыло (Rotations) вокруг оси Y на угол атаки 3°. На рис. 2.3 показано окончательное положение крыла. Выступающие за область сетки части крыла просто будут игнорированы при расчёте.

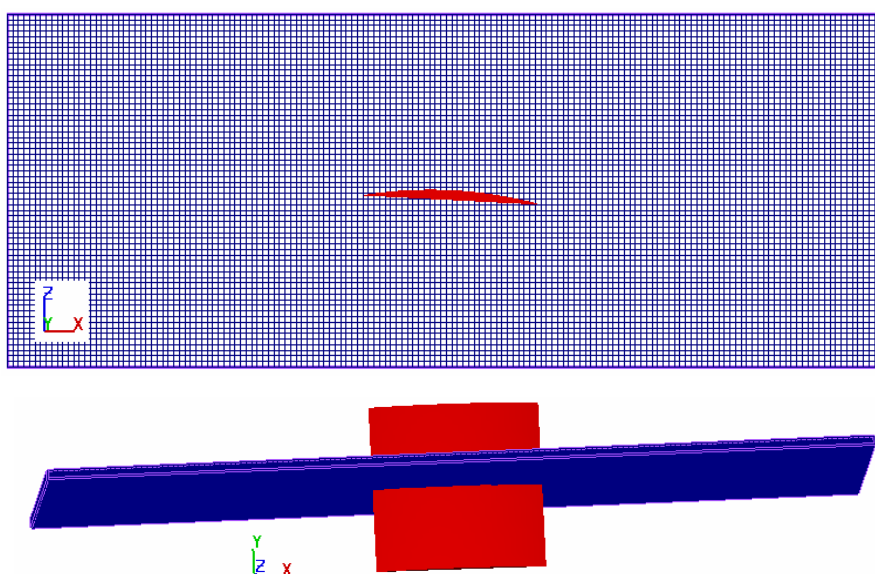


Рис. 2.3. Модель крыла в расчётной сетке

Для вычисления гидродинамических сил на крыло необходимо в списке свойств Component 1 → Component properties → Output отметить свойство Pressure and Shear Force Output.

Далее перейдите на вкладку Output и введите интервал времени между кадрами 0.02 с в поля Restart data interval, History data interval, Short print interval, Long print interval, Selected data interval.

2.1.2. Анализ результатов и уточнение модели

В главном меню выберите Simulate → Preprocess simulation. Если ошибок нет, то начнём расчёт: Simulate → Run simulation.

Анализ результатов расчёта в целом описан в разделе 1.4.8. В результатах расчёта анализ первых кадров можно отбросить, так как нас интересует установившееся течение (на последнем кадре).

Для более наглядного изображения поля давлений на вкладке Analyze в разделе Contour Type выберите Color Shaded with Contour Lines, Number of contours: 5. В разделе Contour limits выберите: Minimum value – User Defined = -90000; Maximum value – User Defined = 70000.

На рис. 2.4 показано поле давлений вблизи крыла. Обратите внимание на то, что острые кромки крыла обрезаны. Это является следствием грубой сетки. Так как в этом районе имеются резкие изменения давлений и скоростей, то необходимо скорректировать сетку и повторить расчёт.

Улучшать расчётную сетку можно разными способами:

1) увеличить общее число ячеек (Total Cells). Этот способ самый простой, но требует значительного увеличения времени расчёта. При решении трёхмерных задач он обычно не годится;

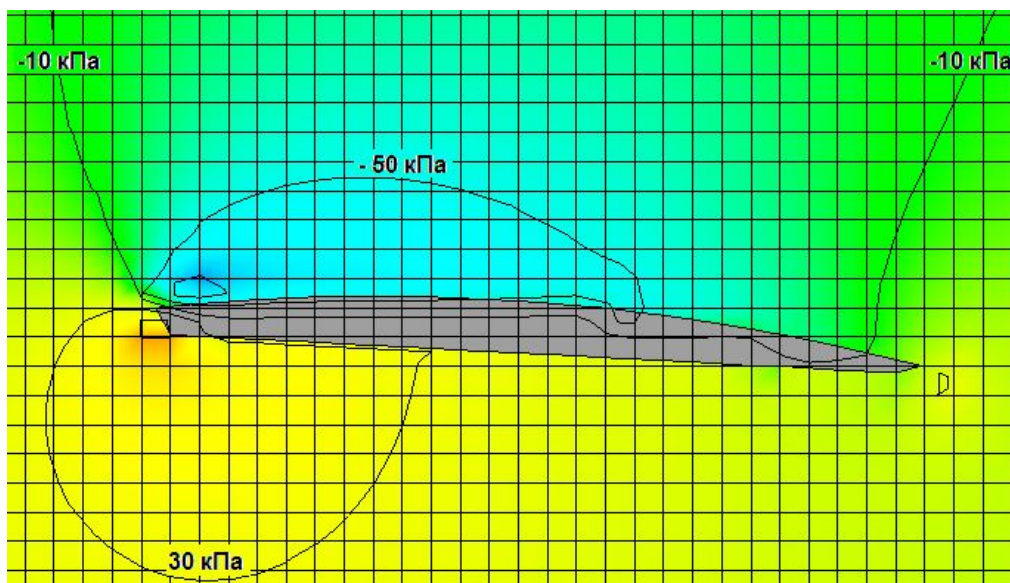


Рис. 2.4. Поле давлений вокруг крыла

- 2) сгустить сетку в области резких изменений потока и геометрии;
- 3) наложить дополнительную сетку в области резких изменений.

Используем здесь второй вариант. Создайте на уровне крыла дополнительную горизонтальную плоскость. Для этого на вкладке **Meshing & Geometry** в разделе **Mesh – Cartesian → Mesh block** в строке **Z Direction** щёлкните правой кнопкой мыши и выберите **Add** (добавить). В появившемся окне **Add mesh plane** введите координату **Z** на уровне чуть выше крыла. Теперь на этой горизонтали можно задать малый размер ячеек. Разверните новую строку **Mesh plane 2** и установите **Cell size = 0.01**. Аналогично добавьте плоскость чуть ниже крыла и установите **Cell size = 0.01**, **Cell count = 12** (число ячеек между этими плоскостями). В результате сетка на уровне крыла будет более густой (рис. 2.5).

Аналогично сделайте сгущение сетки по оси **X**, установив **Cell size = 0.01** и число ячеек между вертикалями **Cell count = 60** (рис. 2.6).

На рис. 2.7 показано уточнённое поле давлений вблизи крыла (сравните с рис. 2.4).

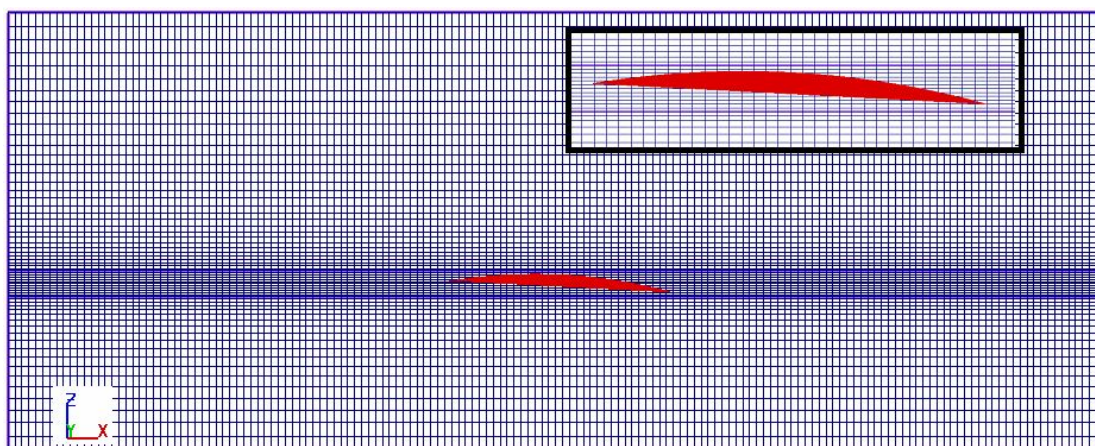


Рис. 2.5. Сгущение сетки в районе крыла по высоте

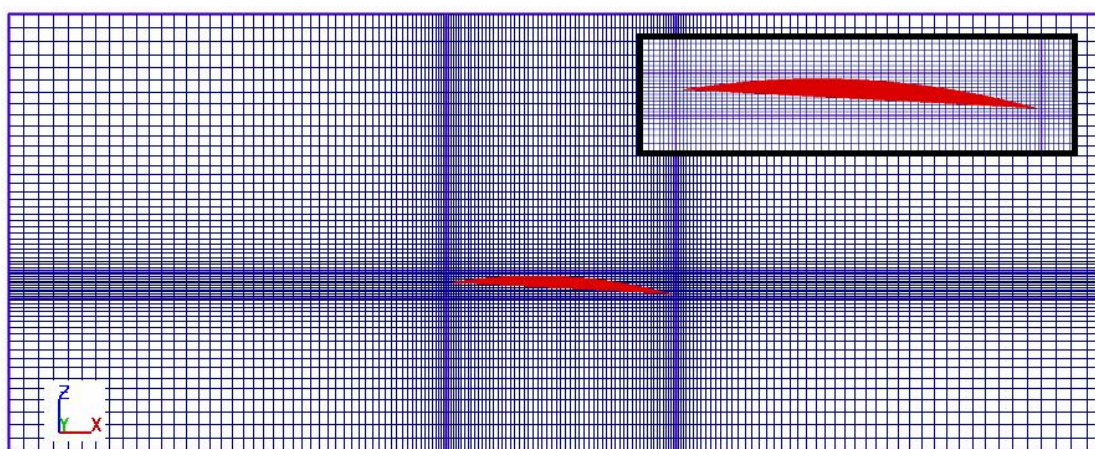


Рис. 2.6. Сгущение сетки в районе крыла по высоте и ширине

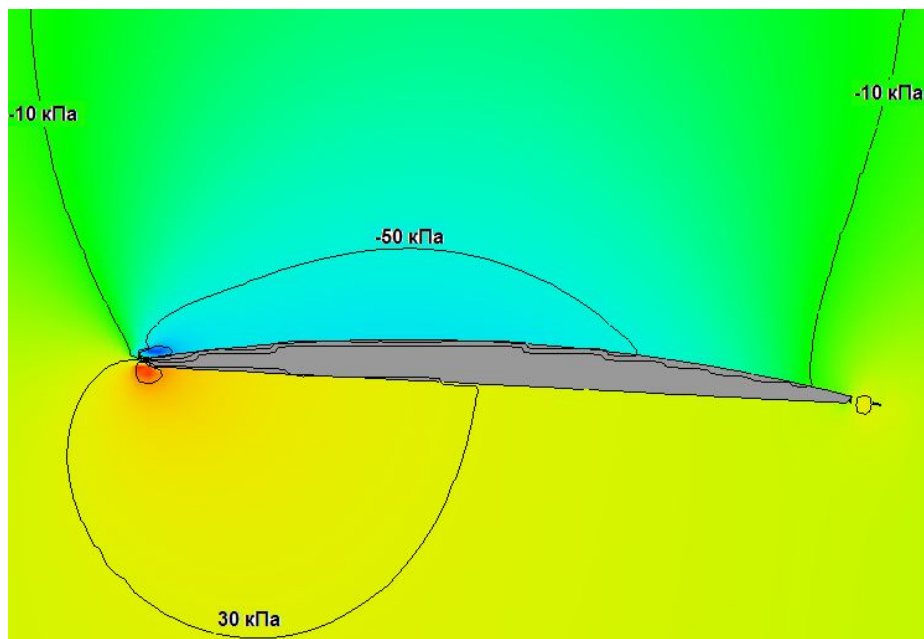


Рис. 2.7. Уточнённое поле давлений вокруг крыла

Результаты расчёта можно оформить в виде графиков зависимостей параметров по отдельным координатам пространства. Для этого следует перейти на вкладку **1D** анализа результатов.

На вкладке **Probe** можно сформировать графики зависимостей результатов от времени. Рассмотрим эту вкладку. В разделе **Data variables** представлен список параметров, которые можно посмотреть. Раздел **Data source** представляет на выбор источники данных: **Restart** – параметры, изменение во времени которых можно посмотреть в отдельных ячейках сетки; **General history** – обобщённые параметры для всей модели.

В разделе **Data point** устанавливается положение ячейки в расчётной области, а в разделе **Time frame** устанавливается диапазон времени. Результаты можно вывести в виде графиков или сохранить в текстовый файл в виде таблицы (раздел **Output form**).

Посмотрим значения подъёмной силы крыла F_z и силы сопротивления F_x ¹. Для этого на вкладке **Probe** в разделе **Data source** выберите **General history**. Затем в списке **Data variables** найдите соответствующие строки для компонента **Component 1** (рис. 2.8). После нажмите кнопку **Render**.

На рис. 2.9 представлены результаты расчётов сил для двух рассмотренных выше моделей. Оформление графиков отличается от стандартного в системе Flow-3D, так как результаты были сохранены в текстовый файл, экспортированы в систему Excel и там обработаны.

¹ Напомним, что эти силы вычисляются только в случае, если при создании модели (на вкладке **Meshing & Geometry** в списке свойств **Component properties** → **Output**) помечено свойство **Pressure and Shear Force Output**.

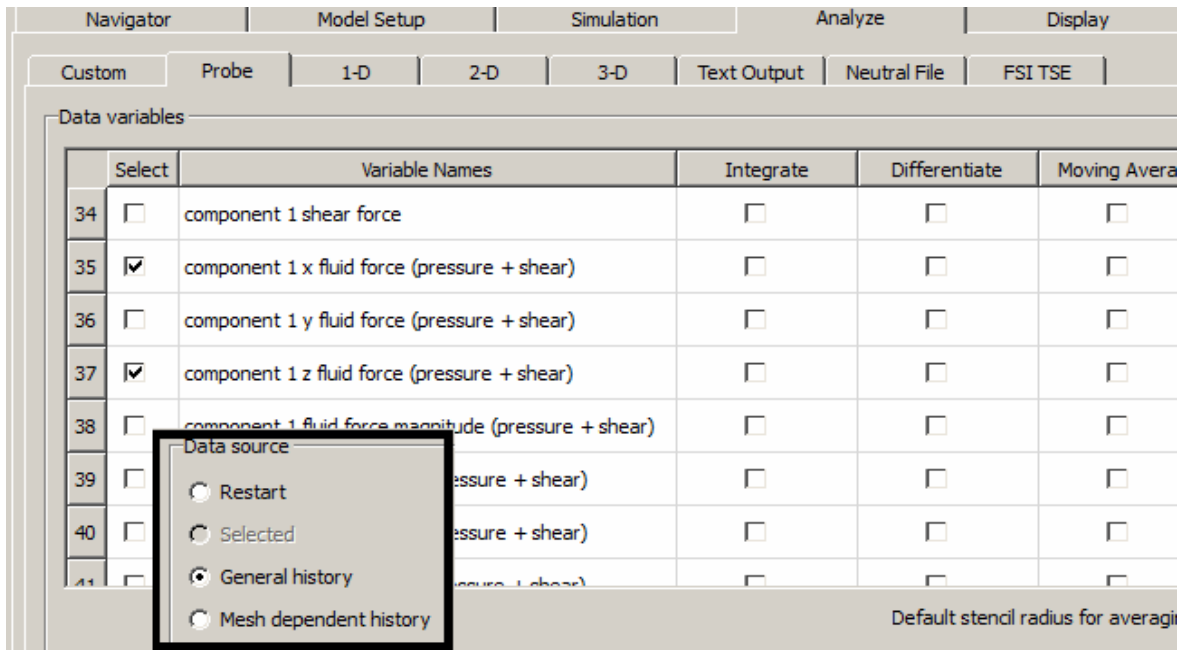


Рис. 2.8. Выбор для построения графиков на вкладке Probe

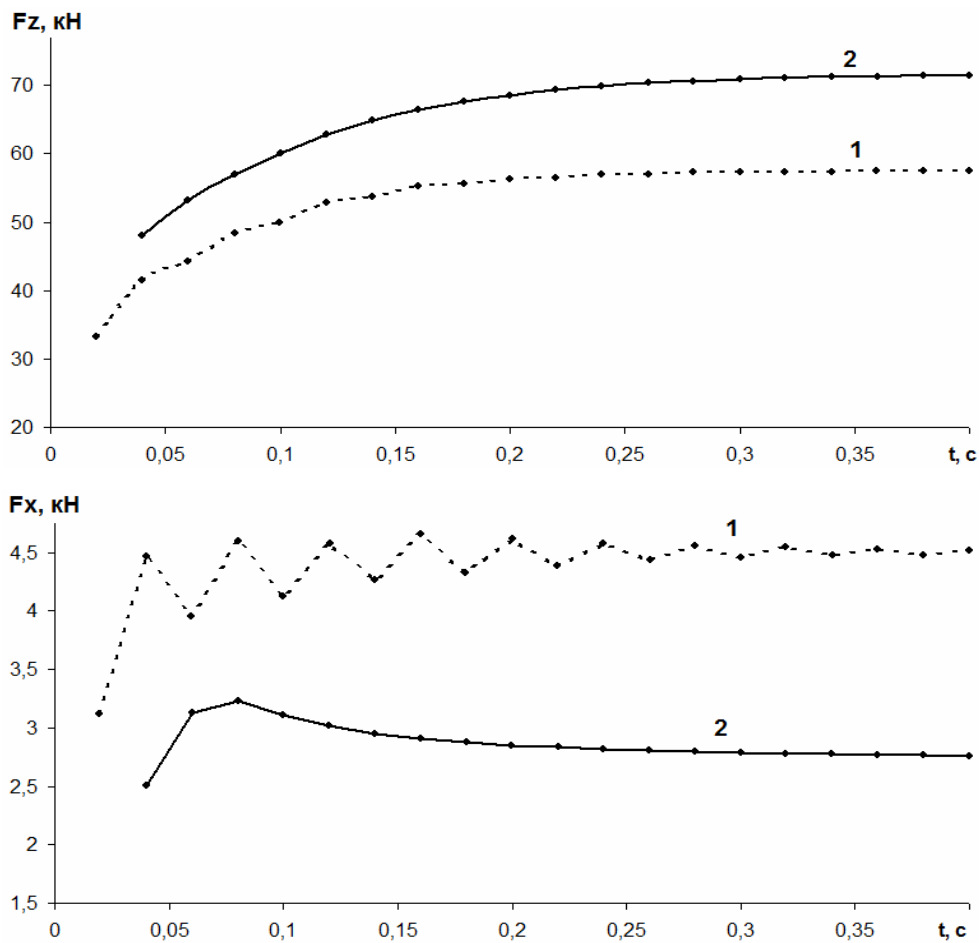


Рис. 2.9. Подъёмная сила F_z и сила сопротивления F_x крыла (на 1 метр длины): 1 – при регулярной расчётной сетке; 2 – при уточнённой сетке

Как видите, первый расчёт с однородной сеткой оказался грубым. Ошибка в определении подъёмной силы составляет 20%, а силы сопротивления – 40%!

Рисунок 2.9 показывает ещё одно важное обстоятельство. Стационарное значение сил достигнуто к моменту 0.4 с. Между тем, при включенной опции **Additional Finish Condition** → **Steady State** (на вкладке **General**) расчёт автоматически заканчивался при достижении 0.2 с. К этому моменту стабилизировались только кинематические параметры течения. Таким образом, опцию **Steady State** следует использовать осторожно: при анализе динамических характеристик течения её применение может привести к существенным погрешностям.

2.1.3. Анализ сходимости

Для обеспечения достоверности и точности результатов расчётов численным методом практически всегда следует выполнять так называемую верификацию модели, то есть подтверждение её правильности. В этом мы убедились на рассмотренном примере.

Способы такого подтверждения:

- 1) сопоставление с данными физического эксперимента;
- 2) сопоставление с расчётами по аналитическим моделям или инженерным методикам;
- 3) серия численных расчётов с анализом сходимости результатов.

В ответственных практических случаях применяются все эти способы в комплексе, так как любые расчёты или эксперименты связаны с упрощениями, допущениями, погрешностями измерений и вычислений, снижающими их достоверность.

Точность численного метода существенно зависит от дискретизации модели, то есть замены непрерывных параметров дискретными значениями. Примеры дискретизации:

- геометрическая – замена плавных форм ломаными или ступенчатыми;
- конечно-разностная по координатам пространства – замена дифференциалов пространственных переменных конечными разностями;
- конечно-разностная по времени – замена dt на Δt .

Сходимостью называется асимптотическое приближение искомого параметра (например, подъёмной силы крыла) к конкретному значению при увеличении степени дискретизации (то есть сгущении сетки - увеличении числа дискретных значений по расчётной области).

Следует отметить, что не во всех задачах удаётся простым сгущением сетки обеспечить достижение достаточно точного решения. Во-первых, с ростом числа ячеек резко увеличивается время расчёта, особенно для сложных пространственных задач. Поэтому важно не просто увеличивать общее

число ячеек, а сгущать сетку только в районах концентрации (резкого изменения) параметров. Во-вторых, при сгущении расчётной сетки начинают расти погрешности вычислений, связанные с большим количеством арифметических операций, поэтому точность вычислений начинает не увеличиваться, а уменьшаться. Особенно это характерно при анализе неустойчивых процессов (удары, кавитация, турбулентность и др.), когда небольшие изменения внешних условий приводят к резким изменениям течения.

Таким образом, необходимо понимать, что численный анализ не сводится к формальному созданию модели и её расчёту. Необходимо экспериментировать, то есть исследовать, как изменения исходных параметров влияют на результаты расчётов. Для получения достоверных результатов часто требуется не столько формальное введение исходных данных и выполнение указаний руководств, но и искусство расчётчика. Это искусство основано на «трёх китах»: 1) знания (физики, теории и программного обеспечения); 2) отсутствие «слепой» веры в результат расчёта (стремление и умение проверять, экспериментировать и доказывать достоверность результата разными способами); 3) опыт. ***Чем меньше опыта, тем тщательнее надо проверять результаты расчётов!***

В системе Flow-3D дискретизация и сходимость по времени по умолчанию выполняется и контролируется автоматически. Поэтому основной анализ сходимости заключается в выполнении серии расчётов с различной сеткой и построении зависимости искомых величин от степени дискретизации.

Проведём анализ сходимости для нашей задачи. Для этого выполним несколько расчётов с различным числом ячеек сетки (Total cells). В каждом расчёте определим подъемную силу и сопротивление крыла (при достижении стационарного потока). Результаты представлены на рис. 2.10.

Следует отметить, что для получения приемлемой точности ($F_x = 2.8$ кН, $F_z = 74$ кН) при однородной сетке понадобилось на порядок больше ячеек, чем при сгущении сетки только в области вблизи крыла (рис. 2.6). Поэтому при анализе сходимости рекомендуется одновременно увеличивать число ячеек сетки и «сгущать» сетку к области наибольших возмущений.

2.1.4. Задания

1. Выполнить расчёты крыла (рис. 2.1) при тех же исходных данных, но без учёта вязкости. Чем отличаются результаты? Объяснить причины отличий.

2. Выполнить расчёты и на их основе построить график изменения коэффициентов подъемной силы и сопротивления в зависимости от изменения угла атаки крыла.

3. Выполнить расчёты и на их основе построить график изменения коэффициентов подъемной силы и сопротивления в зависимости от относительной толщины сегментного профиля при заданном угле атаки.

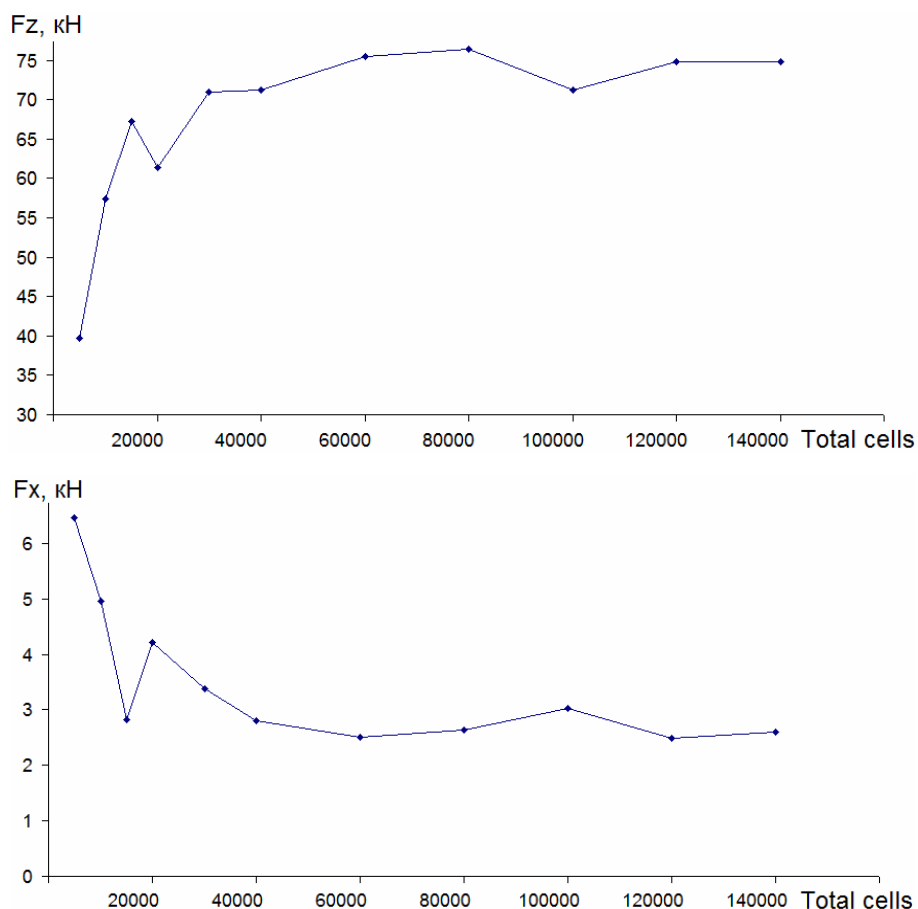


Рис. 2.10. Сходимость величин подъёмной силы и силы сопротивления

2.2. Экранные эффекты

2.2.1. Обтекание крыла вблизи дна

Продолжим рассмотрение задачи об обтекании крыла. Опустим крыло на расстояние 0.2 м от дна (0.12 м от задней кромки до дна). Для этого на вкладке **Meshing & Geometry** установите в свойствах компонента: **Component 1** → **Subcomponents** → **Subcomponent 1** → **Transformations** → **Translations** → **Z = 0.2**.

Напомним, что на нижней границе стоит условие в виде стенки (**Mesh block 1** → **Boundaries** → **Zmin: Wall**).

Увеличьте число ячеек сетки до 40 тыс. и сгустите сетку к нижней границе, добавив дополнительные плоскости и задав параметры сетки (**Mesh block 1**), как показано на рис. 2.11.

Выполнив расчёт с такой сеткой, Вы увидите неестественное изменение потока: скачки давлений и сил, причём переход к стационарному течению не происходит. Наблюдается потеря устойчивости численного решения. В чём причина? Обратите внимание, что сетка имеет *очень вытянутые ячейки* на удалении от крыла. Они являются причиной неустойчивости вычислений, поэтому *их следует избегать*. Сгущение сетки с введением новых плоскостей приводит к появлению вытянутых ячеек. Далее мы рассмотрим более эффективный способ сгущения путём наложения дополнительной сетки.

Сейчас же несколько улучшим сетку путём уменьшения расчётной области. Из предыдущих расчётов Вы, наверное, обратили внимание, что течение на удалении от крыла более 1 м практически однородное. Поэтому можно просто приблизить к крылу удаленные границы на 1 м: X direction → Mesh plane 1 = 1; Mesh plane 4 = 4; Z direction → Mesh plane 3 = 1 (рис. 2.12).

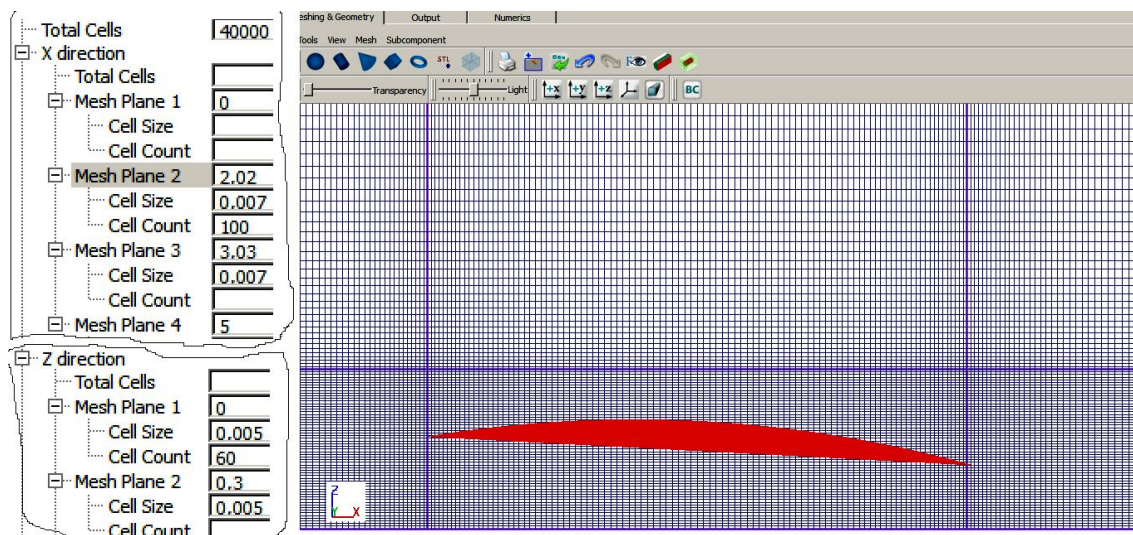


Рис. 2.11. Расчётная сетка с вытянутыми ячейками

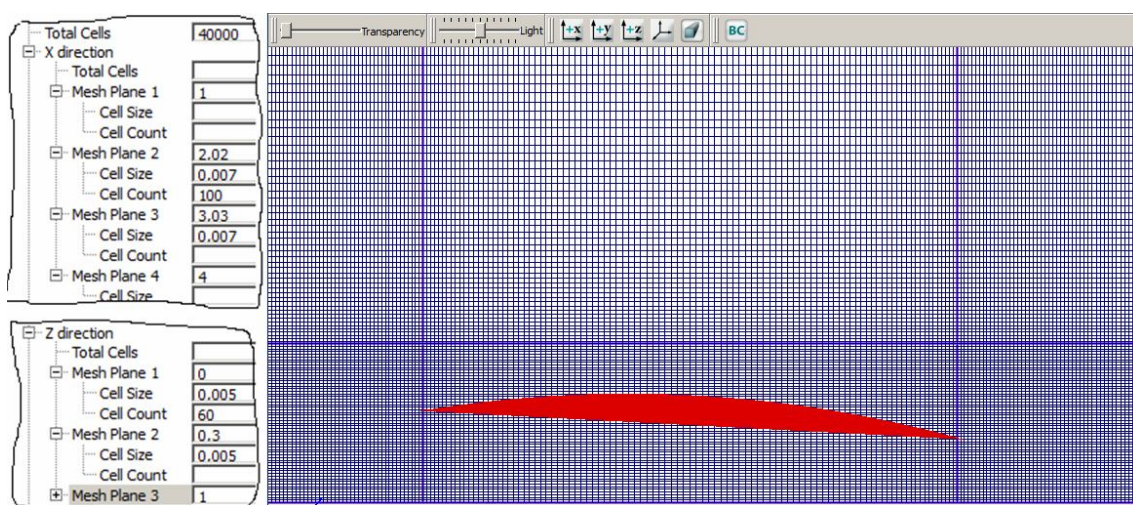


Рис. 2.12. Улучшенная расчётная сетка

Выполните расчёт. На рис. 2.13 представлено поле давлений вокруг крыла, а на рис. 2.14, 2.15 – результаты для подъёмной силы и силы сопротивления. Как видно, при приближении крыла к твёрдому дну существенно увеличивается подъёмная сила. Этот так называемый «экраный эффект» был впервые обнаружен в авиации. На его основе конструктор Р.Е. Алексеев создал уникальные корабли – экранопланы, обладающие скоростями, характерными для самолётов, но более экономичные и несущие гораздо бóльшую полезную нагрузку.

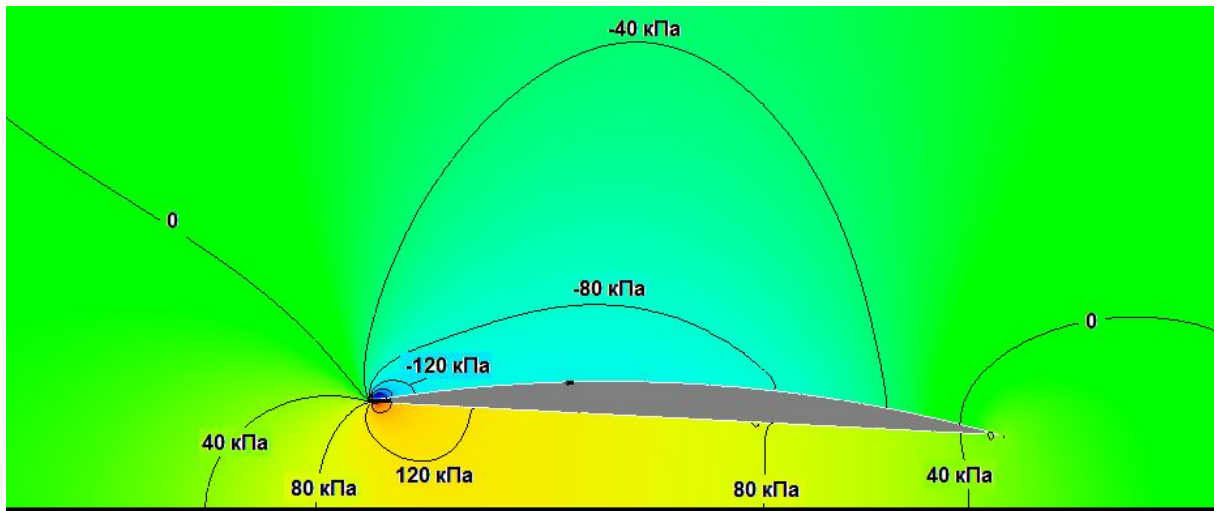


Рис. 2.13. Поле давлений вокруг крыла вблизи дна (0,12 м от задней кромки до дна)

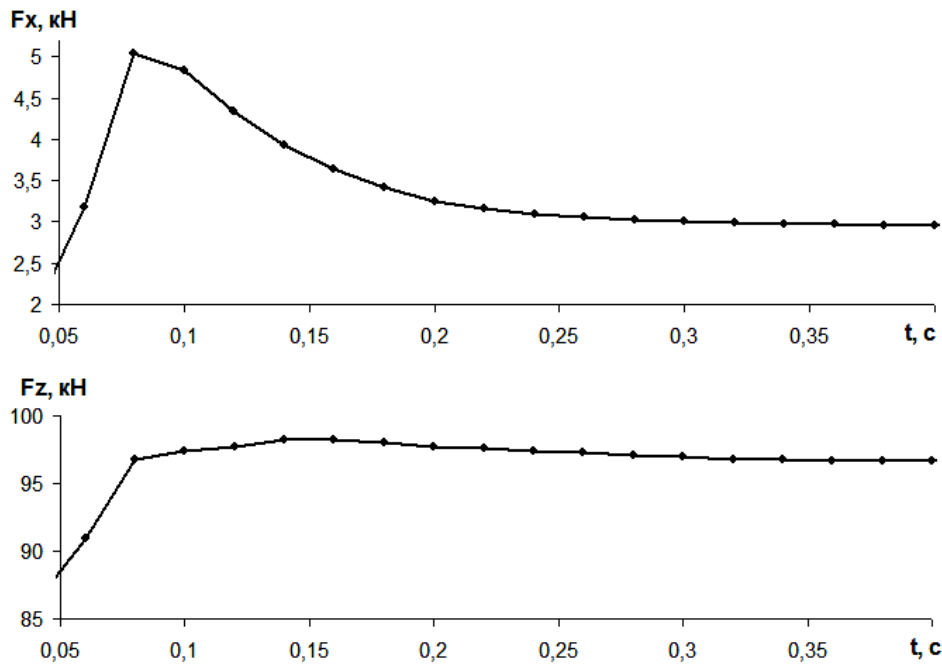


Рис. 2.14. Подъёмная сила F_z и сила сопротивления F_x (на 1 метр длины)

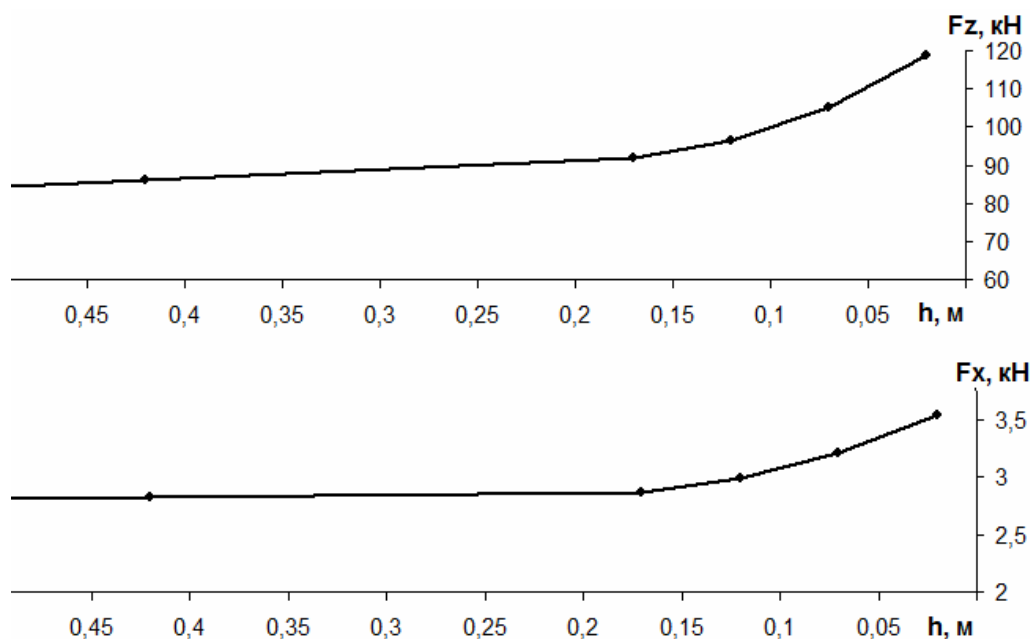


Рис. 2.15. Увеличение подъёмной силы F_z и силы сопротивления F_x с уменьшением расстояния до дна

2.2.2. Применение дополнительной сетки

Эффективным способом повышения точности расчётов является применение дополнительной сетки, наложенной на основную сетку в районе особенности потока.

Рассмотрим предыдущий пример, изменив параметры основной сетки. Уберите дополнительные плоскости, сделайте сетку однородной с числом ячеек $Total\ cells = 10000$.

Введите дополнительную сетку, нажав правой кнопкой мыши в строке **Mesh - Cartesian** и выбрав **Add a mesh block**. В новом разделе «**Mesh block 2**» введите параметры новой сетки: $Total\ cells = 10000$; **X direction** → **Mesh plane 1 = 1.95, Mesh plane 2 = 3.102**; **Y direction** → **Total cells = 1, Mesh plane 1 = 0, Mesh plane 2 = 0.05**; **Z direction** → **Mesh plane 1 = 0.048, Mesh plane 2 = 0.262**. Граничные условия (**Boundaries**) оставьте по умолчанию (**S**).

При установке наложенной сетки рекомендуется, чтобы ячейки основной сетки, которые частично перекрываются краями новой сетки, перекрывались менее чем наполовину (рис. 2.16).

Применение наложенной сетки во многих случаях позволяет добиться достаточно точных результатов с меньшим общим числом ячеек, чем при сгущении сетки. Особенно наложенные сетки рекомендуются в случаях, где применение сгущения сетки приводит к сильно вытянутым элементам вдали от области сгущения.

При графическом просмотре результатов расчётов иногда случается, что наложенная сетка не отображается – вместо неё остаётся пустое место. В этом случае на вкладке **Analyze** → **2D** включите отображение сеток с помощью кнопки **Mesh block** (в правом нижнем углу).

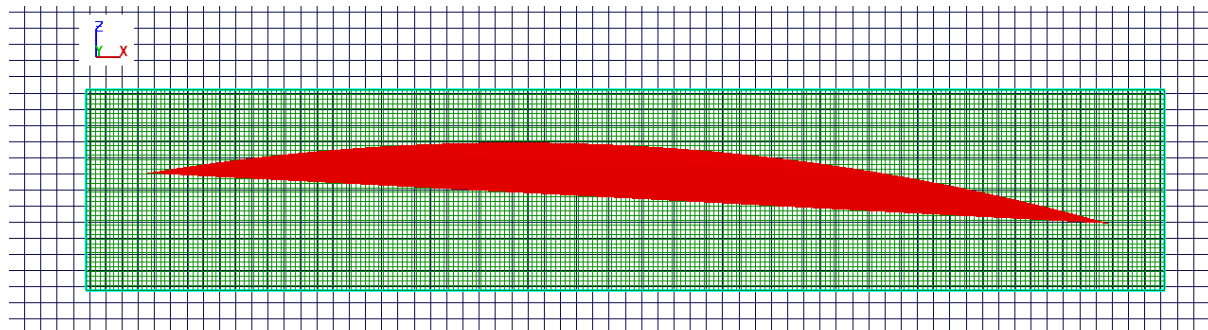


Рис. 2.16. Дополнительная наложенная расчётная сетка

2.2.3. Обтекание крыла вблизи свободной поверхности

Продолжим анализ гидродинамики крыла, расположив его близко под свободной поверхностью воды. Для этого поднимем крыло. На вкладке **Meshing & Geometry** установите в свойствах компонента: **Component 1** → **Subcomponents** → **Subcomponent 1** → **Transformations** → **Translations** → **Z = 0.6**.

Несколько увеличим длину расчётной области: **Mesh block 1** → **X direction** → **Mesh plane 1 = 0.0**; **Mesh plane 2 = 5.0**. Переместим в район крыла наложенную сетку: **Mesh block 2** → **X direction** → **Mesh plane 1 = 1.96**, **Mesh plane 2 = 3.13**; **Z direction** → **Mesh plane 1 = 0.44**, **Mesh plane 2 = 0.65**.

На вкладке **General** переключите параметр **Interface tracking** на режим **Free Surface or Sharp Interface** (течение со свободной поверхностью).

На вкладке **Physics** учтем силы тяжести: в разделе **Gravity** введите ускорение свободного падения по оси **Z**: -9.8 м/с^2 .

Вернёмся на вкладку **Meshing & Geometry**. Внесем изменения в граничные условия. В разделе **Mesh block 1** → **Boundaries** нажмите кнопку **X min**. В раскрывшемся окне справа от кнопки **Fluid elevation** установите уровень воды: **0.7 м**. Аналогично установите уровень на границе **X max**. Для границы **Z max** установите условие **Continuative**.

Изменим начальные условия. В списке свойств найдите раздел **Initial** → **Global**. В строке **Pressure** выберите: **hydrostatic pressure in z direction**. В строке **Fluid Initialization** выберите: **Use fluid elevation** и укажите уровень воды: **Initial fluid elevation = 0.7 м**.

Выполните расчёт. На рис. 2.17 представлено поле давлений вокруг крыла, а на рис. 2.18 – результаты для подъёмной силы и силы сопротивления. Как видно, при приближении крыла к поверхности воды подъёмная сила существенно уменьшается.

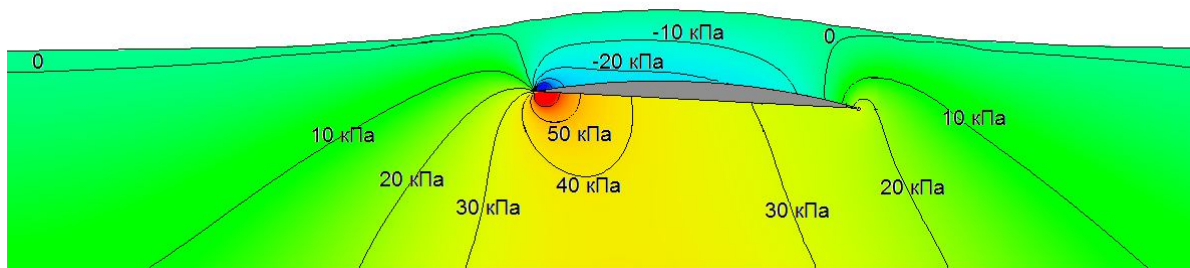


Рис. 2.17. Движение крыла вблизи свободной поверхности

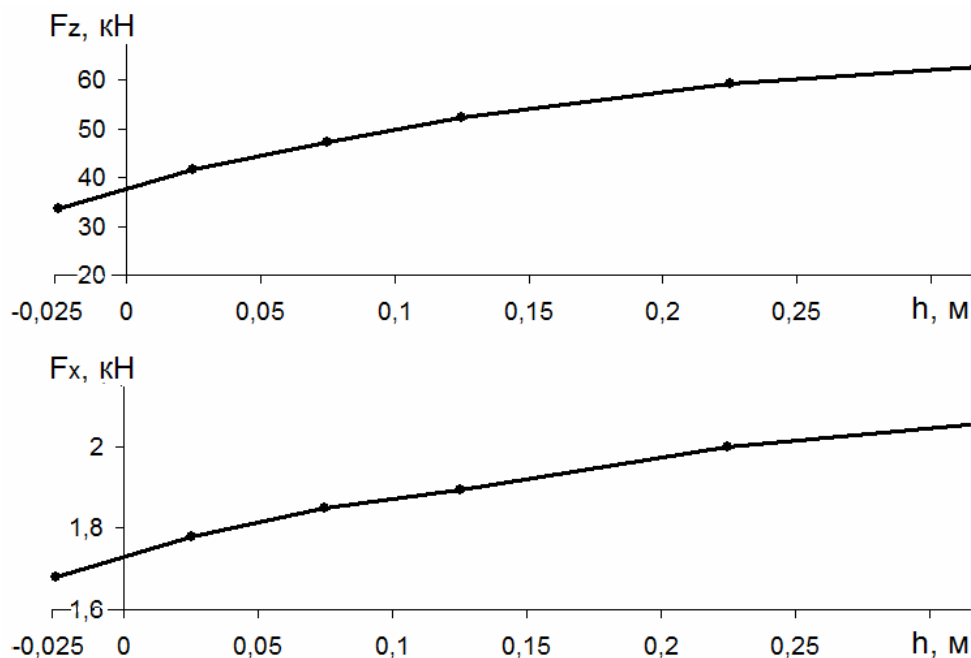


Рис. 2.18. Изменение подъёмной силы F_z и силы сопротивления F_x в зависимости от расстояния до свободной поверхности

На этом эффекте основан принцип стабилизации движения по скорости судов на подводных крыльях. Дело в том, что подъёмная сила глубоко погруженного крыла зависит от квадрата скорости движения. Поэтому при малых изменениях скорости судна подъёмная сила существенно изменяется. В результате движение судна неустойчиво и трудно управляемо: оно может резко опуститься или выскочить на поверхность полностью. В первом случае судно входит в воду корпусом и сваливается в водоизмещающий режим движения. Во втором случае, при полном выходе крыльев на

поверхность подъёмная сила резко пропадает, после чего также теряется режим движения на крыльях – судно «проваливается».

Однако вблизи поверхности воды крылья работают более стабильно, так как скорость и подъём крыла к поверхности влияют на подъёмную силу противоположным образом, компенсируя друг друга. Конструктор Р.Е. Алексеев максимально использовал этот эффект, создав суда с малопогруженными подводными крыльями «Ракета», «Метеор» и др.

2.2.4. Задания

1. Подобрать положение крыла по высоте так, чтобы добиться его глиссирования по поверхности воды. Как изменится подъёмная сила по сравнению с движением крыла под поверхностью?

2. Известно, что силы, действующие на крыло, пропорциональны квадрату скорости. Докажите это с помощью вычислительных экспериментов.

3. В каком направлении (вверх или вниз) будет вертикальная сила на круговой цилиндр в потоке, если он движется: а) вблизи дна; б) вблизи свободной поверхности? Подтвердите Ваш ответ результатами вычислительных экспериментов.

4. После решения задач о движении крыла и изучив основные особенности численного моделирования, Вы теперь можете самостоятельно поэкспериментировать *с несколькими телами* в стационарном потоке и посмотреть, как они взаимодействуют. Для этого не потребуются новых знаний – достаточно лишь желания экспериментировать.

При моделировании движения нескольких тел следует учесть следующее:

- если необходимо выполнить анализ гидродинамических сил, общих для системы тел (например, крыла с закрылок), то необходимо создавать компонент, в состав которого входят субкомпоненты (крыло и закрылок);

- если необходимо проанализировать гидродинамические силы на отдельные тела (например, посмотреть, как взаимодействуют два судна при прохождении вблизи друг друга), то необходимо создавать отдельные компоненты.

2.3. Эффекты взаимодействия тел в потоке

Кратко рассмотрим некоторые физические эффекты, которые Вы сможете проверить самостоятельно с помощью вычислительных экспериментов.

2.3.1. Сила сопротивления двух цилиндров

На рис. 2.19 приведены коэффициенты сопротивления двух цилиндров одинакового радиуса, движущихся совместно «в кильватере»:

$$C_{D_0} = 2 \frac{F_x}{\pi d \rho V^2}; \quad C_{D\Sigma} = \frac{F_{x\Sigma}}{\pi d \rho V^2}.$$

Как видно, при близком расположении цилиндров, их сила сопротивления может существенно изменяться в результате сложного взаимодействия вихрей. При этом заднее тело может испытывать отрицательное сопротивление, то есть притягиваться вихревыми потоками к переднему телу.

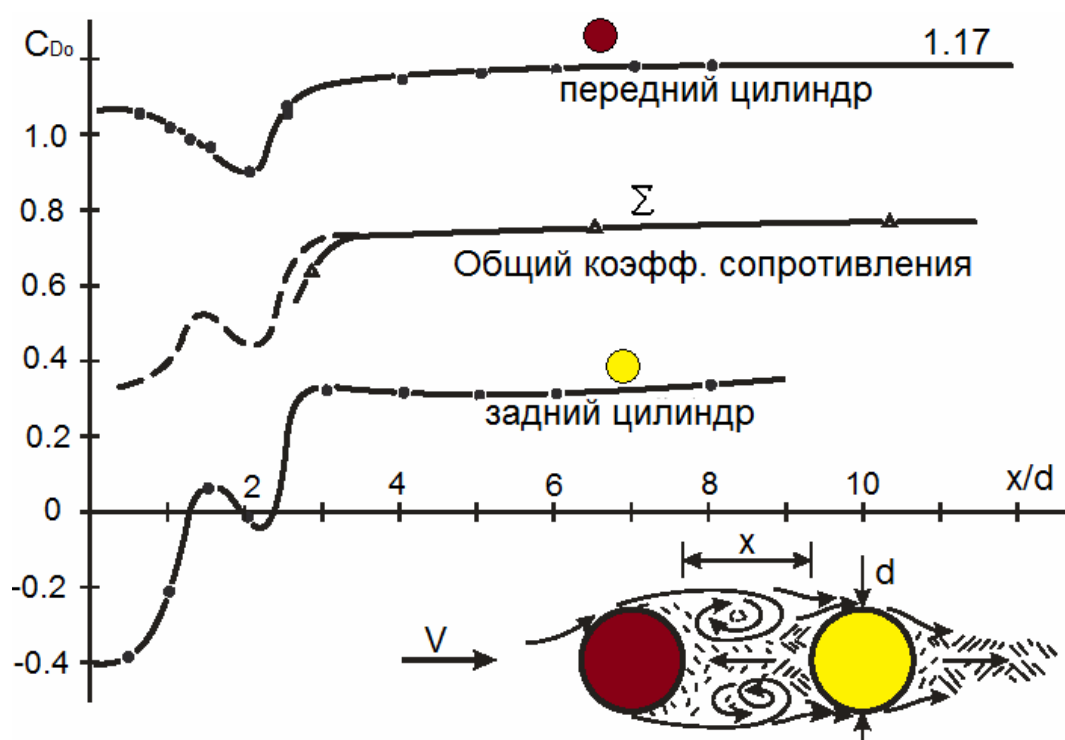


Рис. 2.19. Коэффициент сопротивления двух цилиндров

2.3.2. Эффект присасывания

При обтекании тела потоком жидкости характерно распределение давлений, показанное на рис. 2.20. Как видно, вблизи бортов гидродинамическое давление пониженное. Этим объясняется опасный эффект присасывания проходящих близко судов, который может привести к столкновению (рис. 2.21). Особенно опасно присасывание для маломерного катера при прохождении мимо крупнотоннажного судна.

Риск присасывания увеличивается в следующих случаях:

- суда идут параллельными курсами при обгоне;
- расстояние между судами мало;
- размеры судов сильно различаются;
- суда следуют по мелководью или в узкости;
- скорости судов значительны.

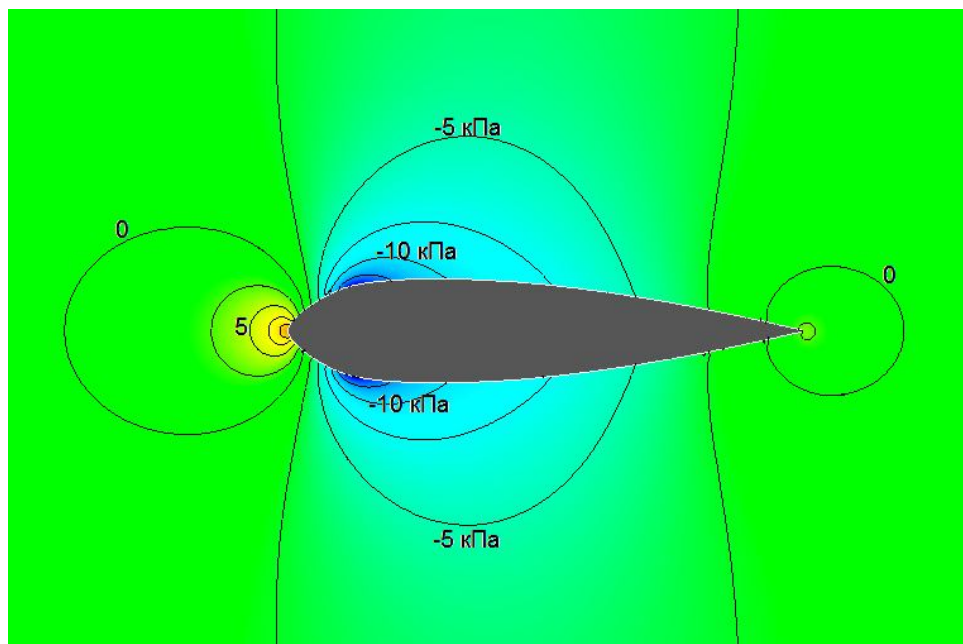


Рис. 2.20. Поле давлений вокруг тела в потоке

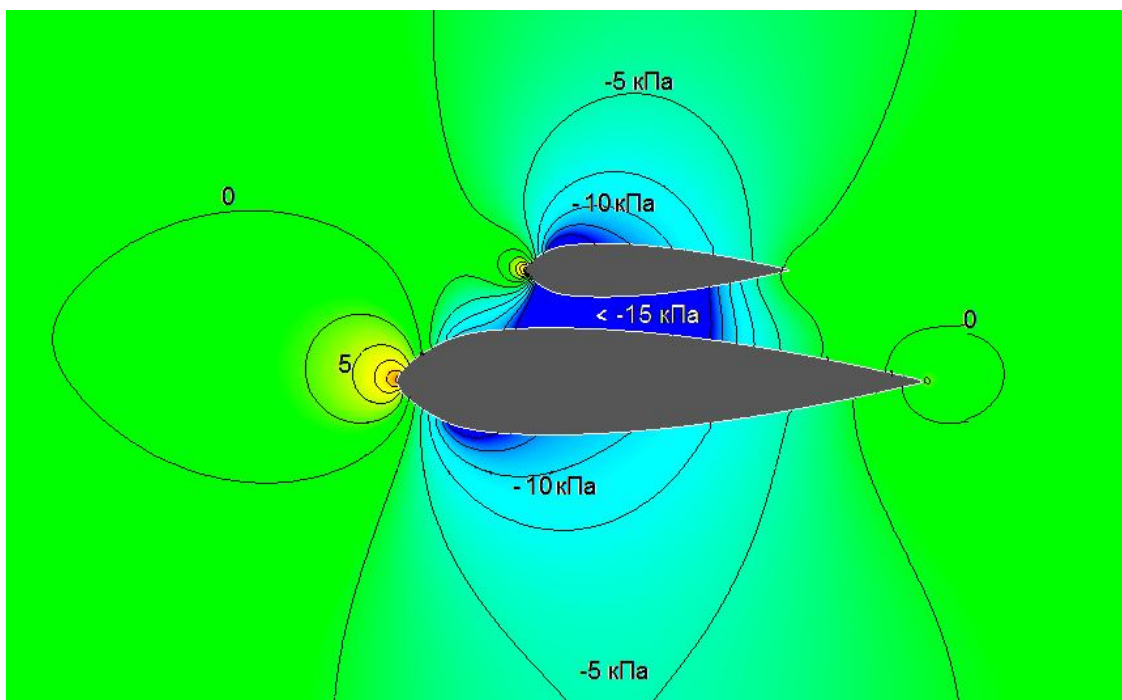


Рис. 2.21. Эффект присасывания

При расхождении на встречных курсах носовые оконечности приближающихся судов отталкиваются (из-за повышенного давления в области носовой оконечности), создавая разворачивающий момент. Это может привести к повороту меньшего судна и удару в его борт носом более крупного судна. Если этого не произошло, то при дальнейшем движении суда попадают в область пониженного давления и могут столкнуться бортами вследствие присасывания.

Эффект присасывания может привести к разрыву швартовов судна, стоящего у причала, при прохождении рядом другого судна.

Рассмотрим более подробно задачу о плоском течении между двумя твёрдыми стенками, одна из которых имеет выступ в виде кругового полуцилиндра радиусом R (рис. 2.22, 2.23). На удалении от препятствия поле скоростей однородное ($V_x = 1$ м/с). Расстояние между стенками равно 5 м.

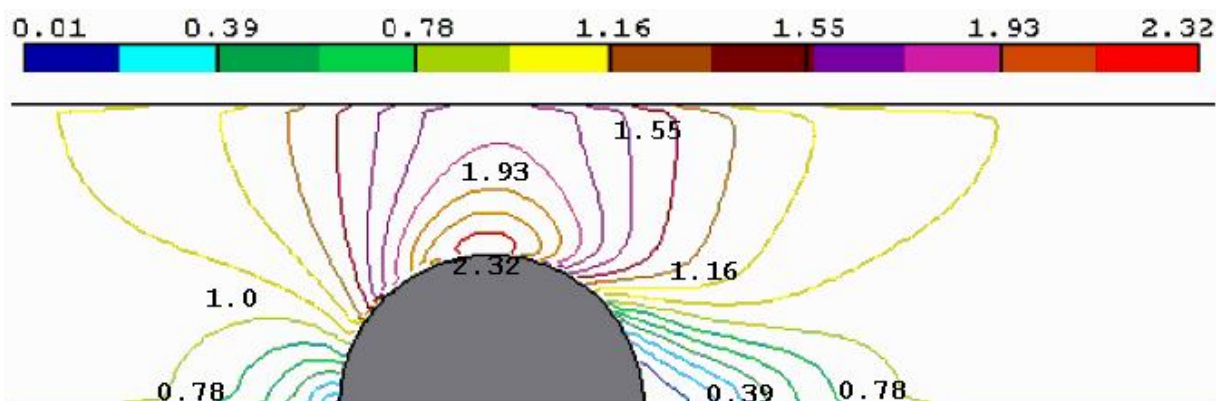


Рис. 2.22. Поле скоростей при обтекании препятствия между стенками

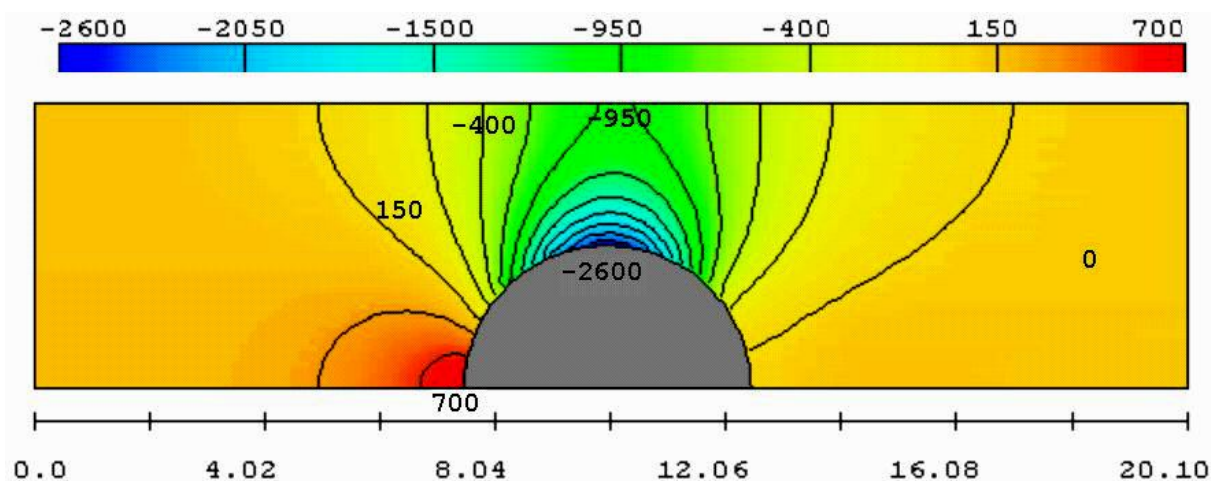


Рис. 2.23. Поле давлений при обтекании препятствия между стенками

На рис. 2.24 – 2.25 даны распределения скоростей и давлений по продольному сечению стенки, расположенной напротив выступа, при различных радиусах выступа.

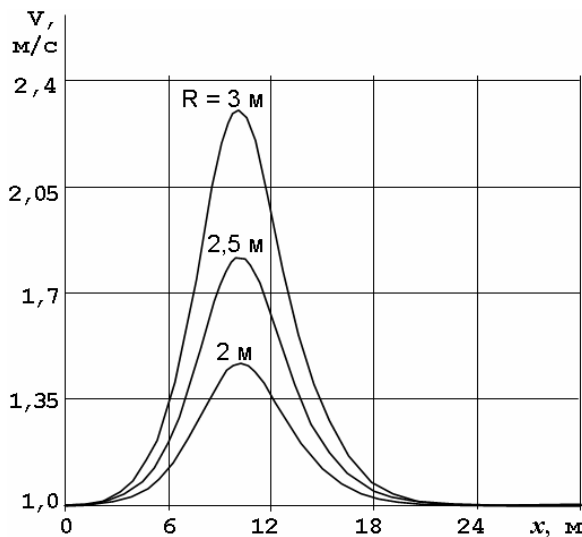


Рис. 2.24. Продольные скорости у стенки

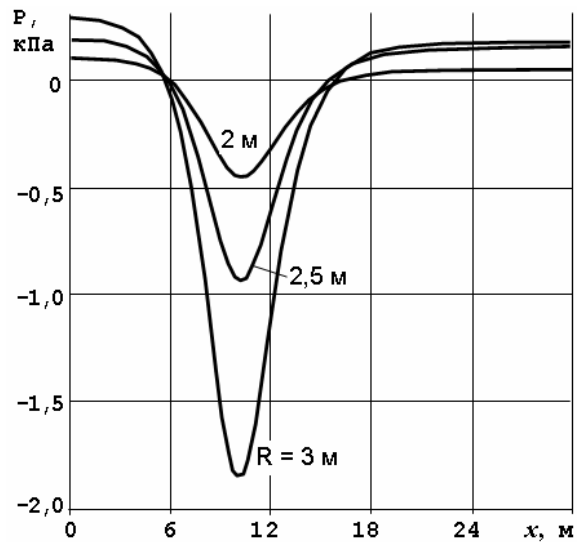


Рис. 2.25. Давления на стенку

Эти графики в системе Flow-3D можно построить, если после выполнения расчёта перейти на вкладку **Analyze** → 1D (рис. 2.26).

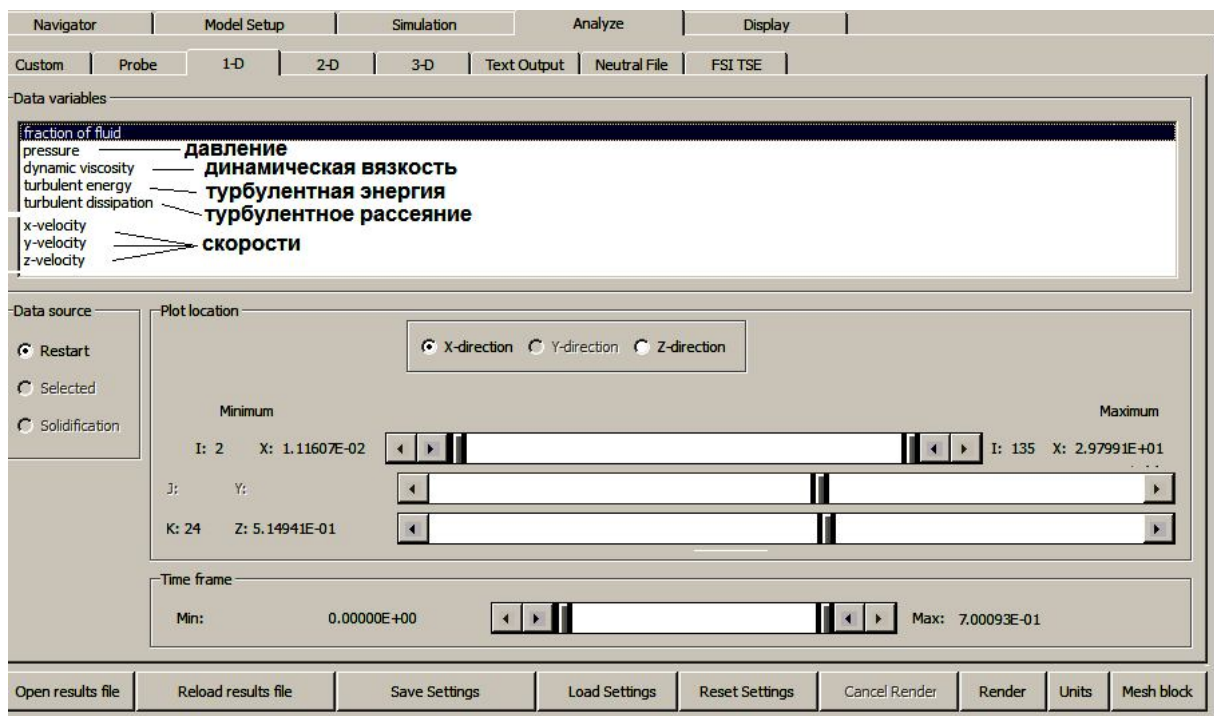


Рис. 2.26. Установка параметров для построения графиков на вкладке 1D

На этой вкладке в разделе **Data variables** следует выбрать переменную (**pressure** – давление, **x-velocity** – скорость по оси X), в разделе **Plot location** – направление (**X-direction**), диапазон координат горизонтальной

оси графика (от 0 до 30), а также положение линии, на которой необходимо получить распределение переменной ($Z = 5$ м). В разделе **Time frame** определяется исследуемый диапазон времени (для каждого момента времени будет построен отдельный график). После установки нажмите кнопку **Render**.

2.3.3. Моделирование движения тела

Рассмотрим, как в системе Flow-3D задать движение тела непосредственно, без перехода к обращённому движению. Допустим, что необходимо изучить гидродинамические силы, действующие на днище судна при его движении на мелководье с местным углублением дна.

Рассмотрим плоскую модель, представленную на рис. 2.27. Модель упрощённая – она не учитывает поперечное обтекание корпуса судна. Поэтому на практике она может быть ограничено применена лишь для речных судов с большим отношением В/Т и санными обводами корпуса. Создание модели в целом не отличается от того, как уже рассмотрено в предыдущих примерах. Поэтому отметим только основные настройки и отличия.

На вкладке **General** значение параметра **Interface tracking** установите в режим **Free Surface or Sharp Interface** (остальные настройки – как в предыдущих примерах). На вкладке **Physics** щелкните на кнопке **Viscosity and turbulence** и выберите режим **Viscous flow**, модель турбулентности **RNG**.

На этой же вкладке нажмите кнопку **Moving and simple deforming objects** и включите режим **Activate general moving objects (GMO) model**. Таким образом включается возможность задания движущихся объектов (GMO). Здесь же учтем силы тяжести: в разделе **Gravity** введите ускорение свободного падения по оси Z : -9.8 м/с^2 .

На вкладке **Fluids** задайте свойства жидкости.

На вкладке **Meshing & Geometry** создайте сетку, длиной 100 м (рис. 2.27). Граничные условия: по оси Y – **Symmetry**; по остальным границам – **Wall**.

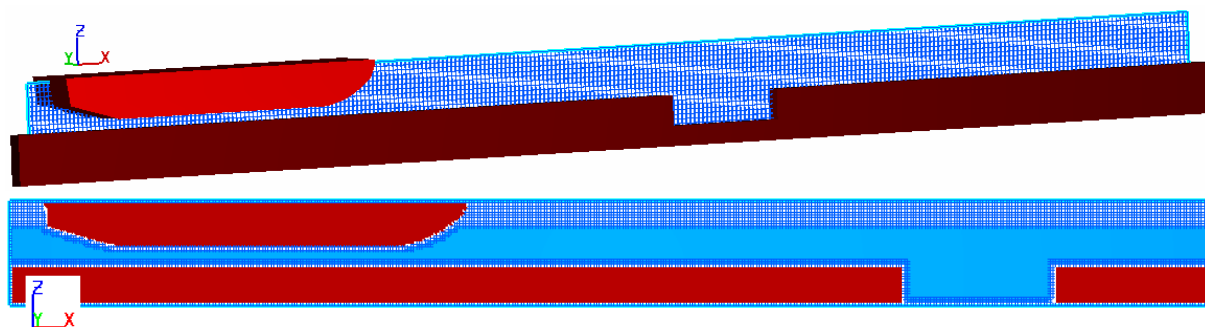



Рис. 2.27. Модель к задаче о движении судна на мелководье с углублением

Введите начальные условия (раздел **Initial** → **Global**). В строке **Pressure** выберите: **hydrostatic pressure in z direction**. В строке **Fluid Initialization** выберите: **Use fluid elevation** и укажите уровень воды: **Initial fluid elevation** (так, чтобы ватерлиния располагалась примерно посередине высоты борта судна, - проверить положение уровня можно в режиме **FAVOR** ).

Создайте два компонента: **GMO_1** – движущееся судно (предварительно создав модель в виде **stl** - файла); **Wall_1** – дно с углублением (может быть создано из простых субкомпонентов).

Для задания движения компонента **GMO_1** в списке свойств раскройте **Component 1: GMO_1** → **Component Properties** → **Type of Moving Object**. Выберите из списка **Coupled Motion**. Этот режим используется в том случае, если движение объекта заранее не задаётся, а формируется под действием заданных или внешних сил, например, от течения, движения других объектов, волнения и др. Режим **Prescribed Motion** применяется, если задаются скорости движения тела. Нажмите кнопку **Edit** – для редактирования свойств движущегося тела.

В открывшемся окне на вкладке **Motion Constraints** задайте опции движения, как на рис. 2.28. Далее перейдите на вкладку **Initial/Prescribed Velocities** и задайте скорости, равные нулю по всем степеням свободы. Обратите внимание, что по направлениям, где режим движения **Coupled**, задаются начальные значения скорости, а по направлениям с режимом **Prescribed** определяются постоянные скорости. В данном случае постоянные нулевые скорости по оси **Y** и вокруг осей **X** и **Z** заданы для того, чтобы судно не уходило в сторону, не рыскало и не кренилось.

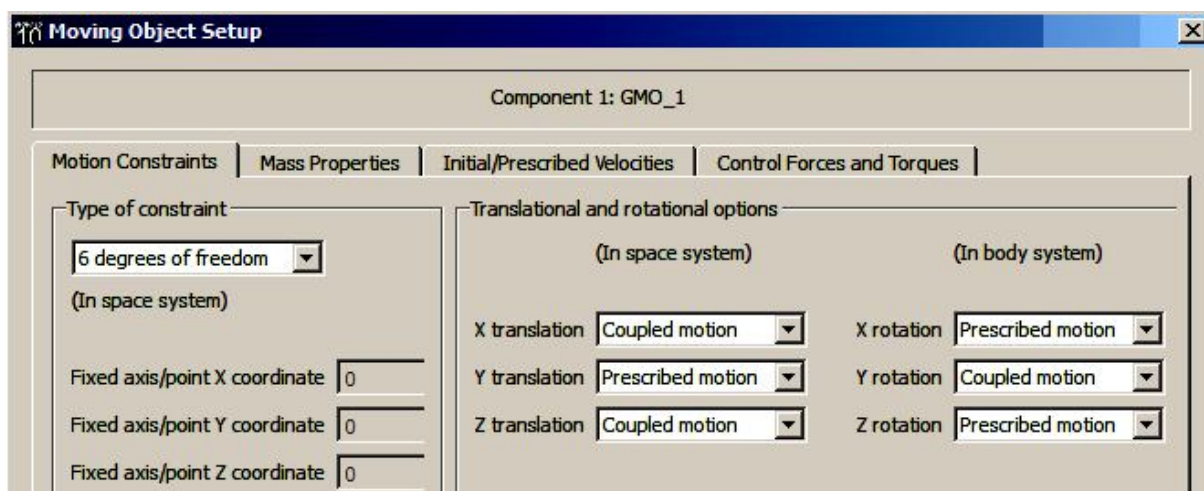


Рис. 2.28. Задание движения объекта

Далее перейдите на вкладку **Mass Properties** и задайте массу тела. В списке выберите **Define density** и введите плотность 500 кг/м^3 (рис. 2.29). В этом случае параметры инерции тела будут определены автоматически, счи-

тая тело однородным. Если задать массу непосредственно, выбрав в списке **Define integrated mass properties**, то кроме указания массы судна потребуется задать также координаты его центра тяжести. и моменты инерции.

Далее перейдите на вкладку **Control Forces and Torques** (силы и моменты) и задайте силу тяги судна, как показано на рис. 2.30. Теперь можно завершить задание движения (ОК).

Для вычисления гидродинамических сил не забудьте в списке свойств компонента **GMO_1** → **Component properties** → **Output** отметить свойство **Pressure and Shear Force Output**.

На вкладке **Output** введите интервал времени между кадрами.

После запуска препроцессора (**Preprocess Simulation**) может появиться предупреждение: «Warning: The minimum density ratio of GMO subcomponents to fluid = 0.500E+00. This is a light moving object problem, the implicit GMO method is recommended». В этом случае нужно на вкладке **Physics** в разделе **Moving and simple deforming objects** переключить **moving object/fluid coupling** в режим **Implicit**.

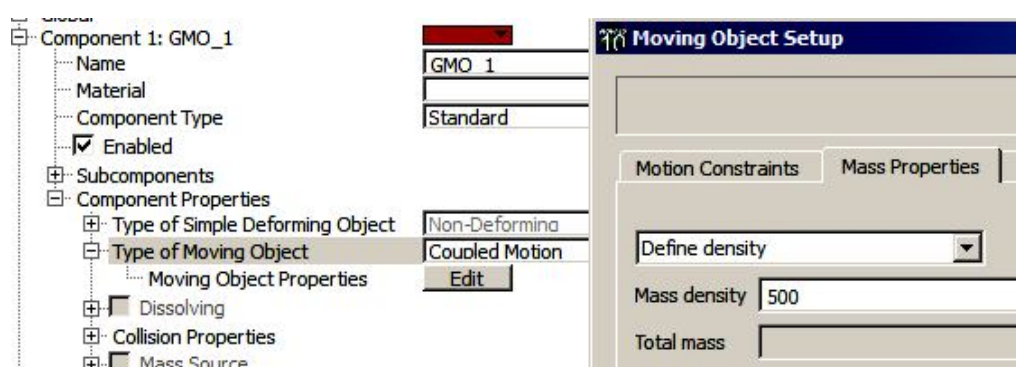


Рис. 2.29. Задание плотности движущегося объекта

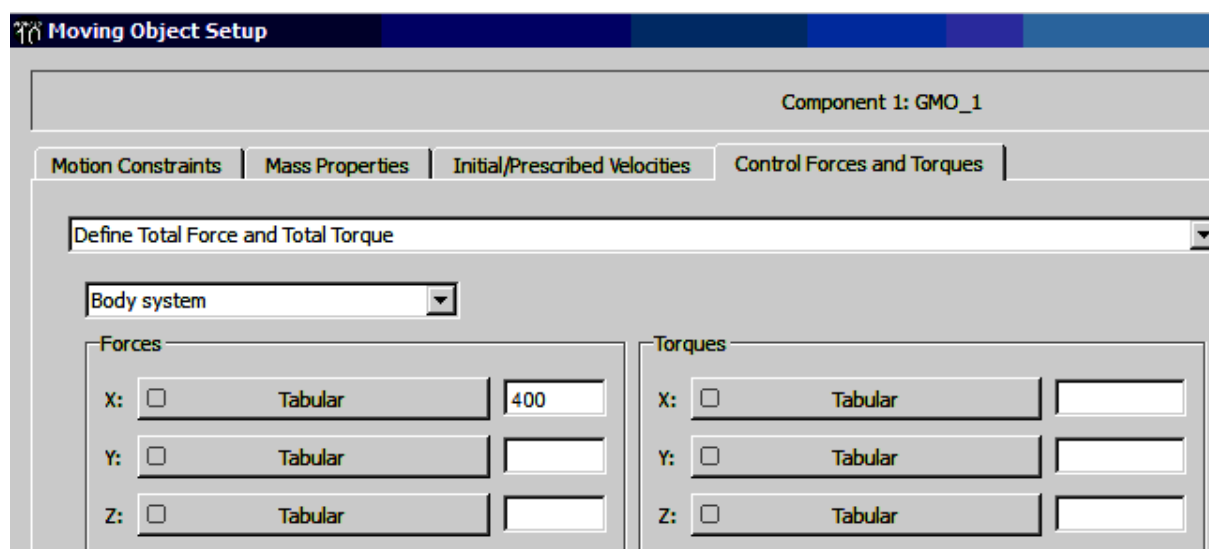


Рис. 2.30. Задание силы тяги судна

Решение задачи показывает, что при движении судно приобретает ходовой дифферент на корму. В результате, с одной стороны, в средней части корпуса образуется малое повышение давления (экранный эффект), с другой стороны, под кормой образуется пониженное давление (эффект присасывания), увеличивающее дифферент (рис. 2.31). Если судно удифферентовано (не имеет дифферента), то эффект присасывания проявляется в проседании судна (рис. 2.32). Малая глубина под килем судна приводит к увеличению скорости потока воды под днищем и уменьшению давлений, вследствие чего несколько уменьшается сопротивление воды движению судна.

При подходе судна к области углубления дна растёт дифферент на корму и сопротивление движению (рис. 2.33). На глубине исчезает эффект присасывания (рис. 2.34), судно приподымается (рис. 2.35).

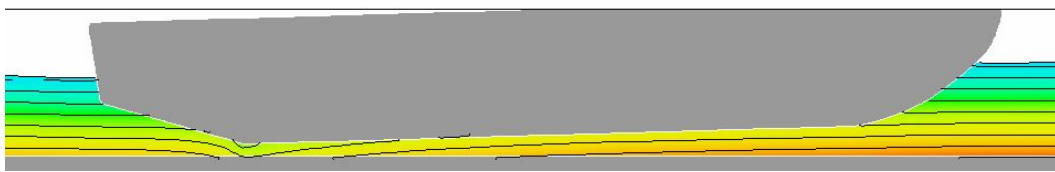


Рис. 2.31. Присасывание кормы при ходовом дифференте

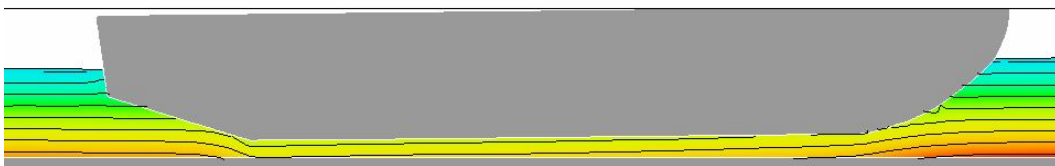


Рис. 2.32. Проседание судна на мелководье

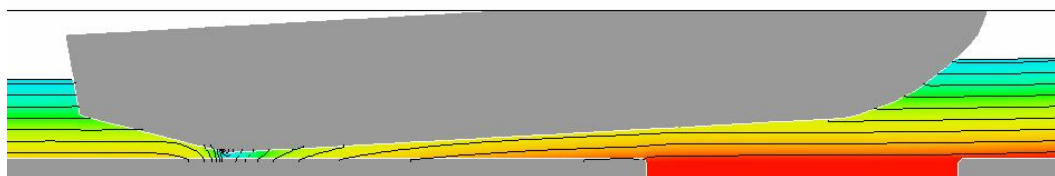


Рис. 2.33. Увеличение дифферента при подходе к углублению

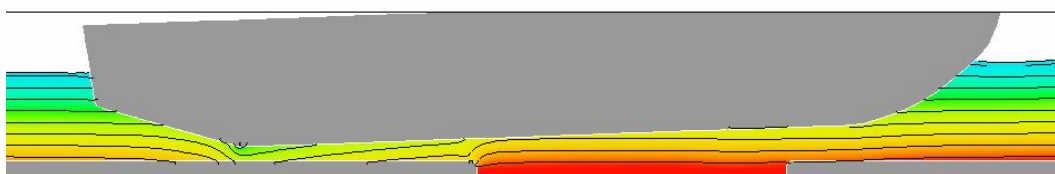


Рис. 2.34. Присасывание над углублением исчезает

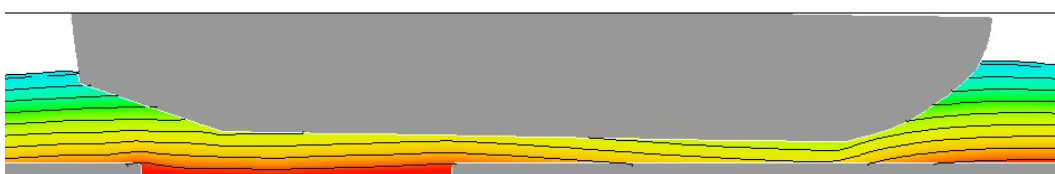


Рис. 2.35. Присасывание носовой оконечности при выходе на мелководье

2.3.4. Задания

1. Проанализировать коэффициент сопротивления двух цилиндров, расположенных параллельно относительно потока.
2. По рис. 2.19 проанализировать силы, действующие на задний цилиндр, в случае, если он несколько отклонён в сторону.
3. Рассмотреть обтекание решетки крыльев (см. рис. 1.15) сегментного профиля с разными углами атаки. Чем отличаются подъемная сила и сила сопротивления одного крыла этой системы по сравнению с силами для отдельного крыла?
4. Рассмотреть обтекание решетки крыльев (см. рис. 1.15) сегментного профиля с разными расстояниями между крыльями при одном угле атаки. Как изменяются подъемная сила и сила сопротивления одного крыла этой системы при приближении крыльев?
5. Рассмотреть течение воды вдоль стенки с прямоугольным углублением. Как изменяется характер течения при изменении скорости потока? Как изменяется характер течения при изменении длины углубления?
6. Рассмотреть течение воды вдоль стенки с прямоугольным выступом. Как изменяется характер течения при изменении скорости потока? Как изменяется характер течения при изменении длины выступа?

2.4. Пространственные задачи о движении корабля

2.4.1. Особенности пространственного моделирования

При подготовке расчётной модели для пространственной задачи по сравнению с плоской, формальное отличие заключается только в том, что расчётная область делится на множество ячеек по всем трём координатам.

При этом резко увеличивается общее число ячеек сетки, а значит и вычислительные затраты. Так, например, в задаче о движении судна на рис. 2.27 сетка имеет около 50 тыс. ячеек, а время расчёта составило порядка 30 мин. Если перейти к пространственной модели и принять по ширине расчётного объёма 50 ячеек, то получим сетку из 2,5 млн. ячеек. Для решения одной такой задачи на том же компьютере потребуется несколько суток!

Решить проблему вычислительных затрат можно следующими основными средствами:

- оптимизировать расчётную сетку (использовать грубую основную сетку и наложенные, более густые сетки в районах возмущений);
- по возможности уменьшать расчётный объём, используя симметрию и грамотно подбирая граничные условия;

- использовать мощные суперкомпьютеры (наиболее эффективный, но не всегда доступный способ).

Следует не забывать, что экономия вычислительных затрат путём применения грубой сетки может привести к существенным погрешностям или неверным результатам.

2.4.2. Движение подводной лодки подо льдом

Рассмотрим пример движения с постоянной скоростью подо льдом подводных лодок (ПЛ) проектов 971 «Барс» (рис. 2.36) и 941 «Акула» (рис. 2.37). Сверху поток ограничен твёрдой поверхностью, моделирующей ледовый покров. Влиянием деформации льда на гидродинамическое поле пренебрегается.

Решение этой задачи связано с проблемами безопасности подлёдного плавания: 1) при ограниченных глубинах возможно движение ПЛ вблизи ледовой поверхности, но при этом возникает опасность присасывания; 2) в экстренных случаях может возникнуть необходимость разрушения ледяного покрова гидродинамическими нагрузками от движения ПЛ [2].

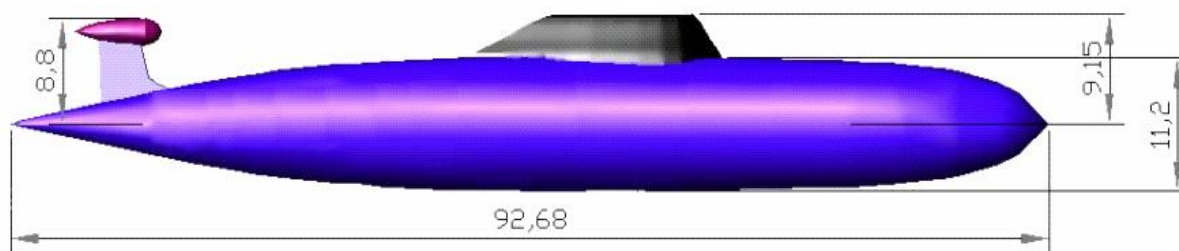


Рис. 2.36. 3D-модель корпуса подводной лодки проекта 971

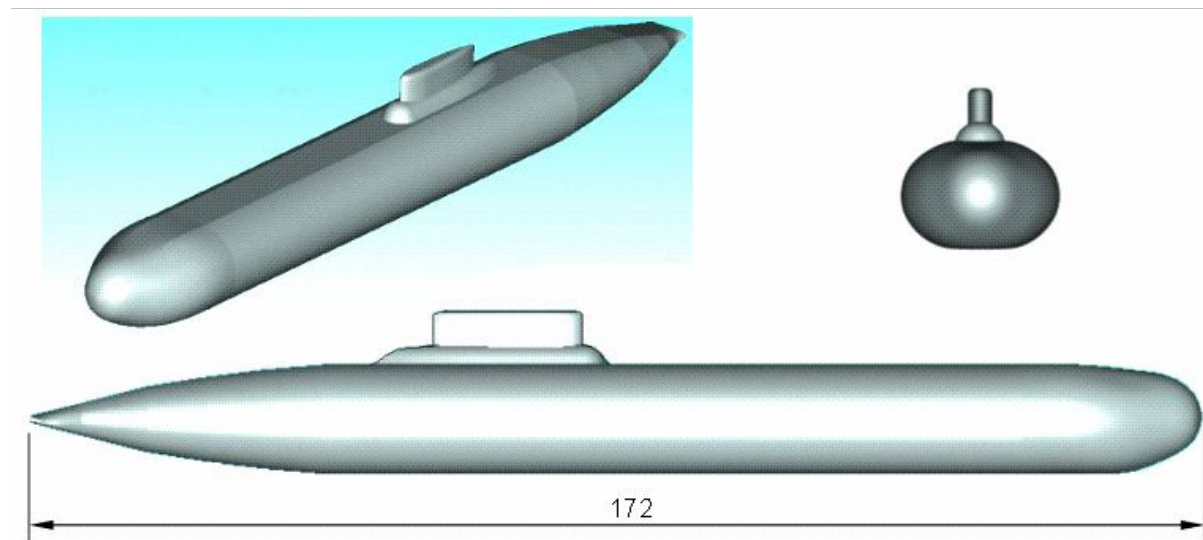


Рис. 2.37. 3D-модель корпуса подводной лодки проекта 941 (без рулей)

Технология подготовки расчётной модели в системе Flow-3D в целом не отличается от той, что описана в задаче об обтекании крыла в (раздел 2.1). Изменяется только то, что по оси Y расширяются размеры расчётной области, и число ячеек по этой оси будет составлять порядка 30 или более. Следует учесть симметрию корабля, поэтому граничные плоскости расчётной области по ширине следует расположить в ДП и на расстоянии от борта ПЛ порядка ширины корпуса.

На рис. 2.38 – 2.44 представлены поля скоростей и давлений от движения подводных кораблей. Обозначения на рисунках: L – длина корабля; H – глубина погружения. На рис. 2.45 – 2.46 даны распределения давлений по продольному сечению ледового поля.

Анализ течений показывает, что вытянутое по длине судно образует при движении поле скоростей и давлений, зависящее от удлинения судна, а также от размеров, формы и положения по длине судна рубки.

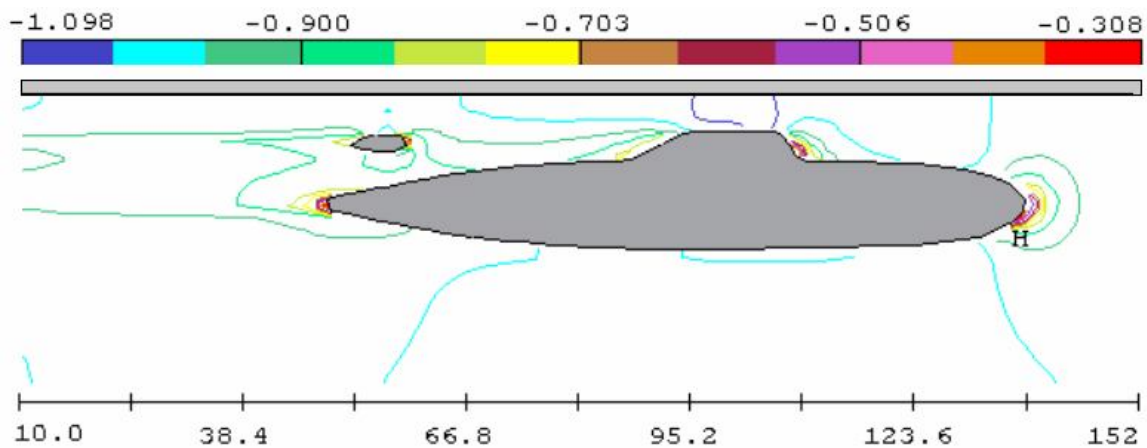


Рис. 2.38. Поле скоростей (м/с) от движения ПЛ пр. 971 ($H/L = 0,15$; $V_x = 1$ м/с)

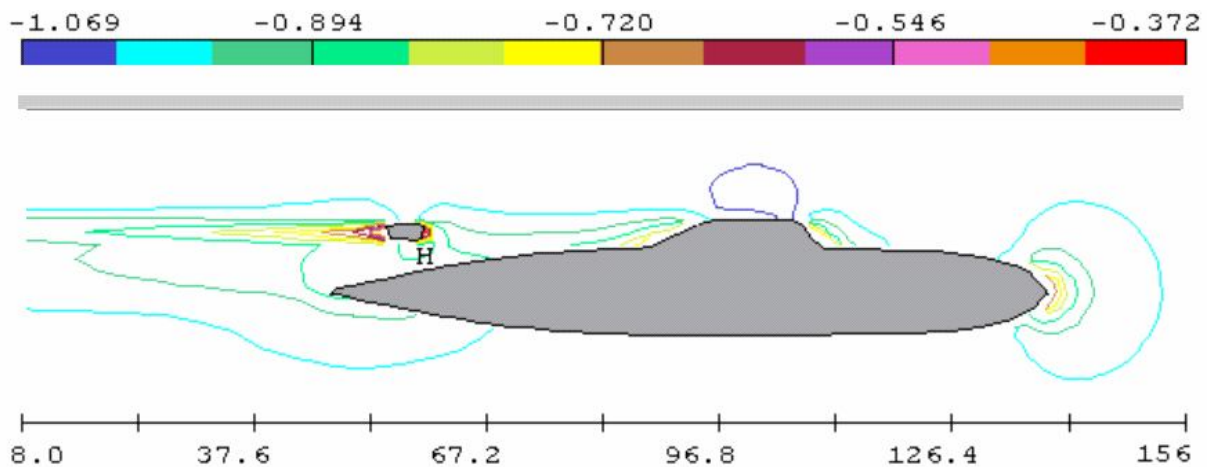


Рис. 2.39. Поле скоростей (м/с) от движения ПЛ пр. 971 ($H/L = 0,25$; $V_x = 1$ м/с)

Приближённо течение вокруг основного корпуса может быть представлено в виде двух возмущений в оконечностях. При наличии цилиндрической вставки (пр. 941) они почти не взаимодействуют. Чем меньше удлинение корпуса, тем сильнее взаимодействие носа и кормы. При движении ПЛ вблизи поверхности льда образуются две области повышенного давления на лёд – носовая и кормовая, и область пониженного давления (присасывания) между ними. Рубка увеличивает силу присасывания.

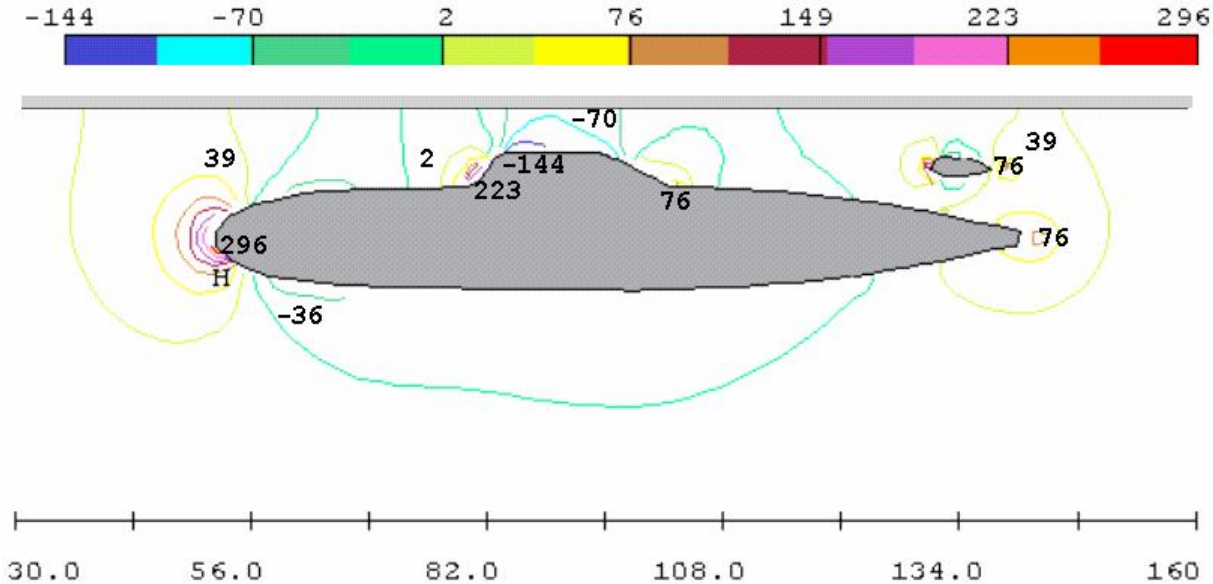


Рис. 2.40. Поле давлений (Па) от движения ПЛ пр. 971 ($H/L = 0,15, V_x = 1 \text{ м/с}$)

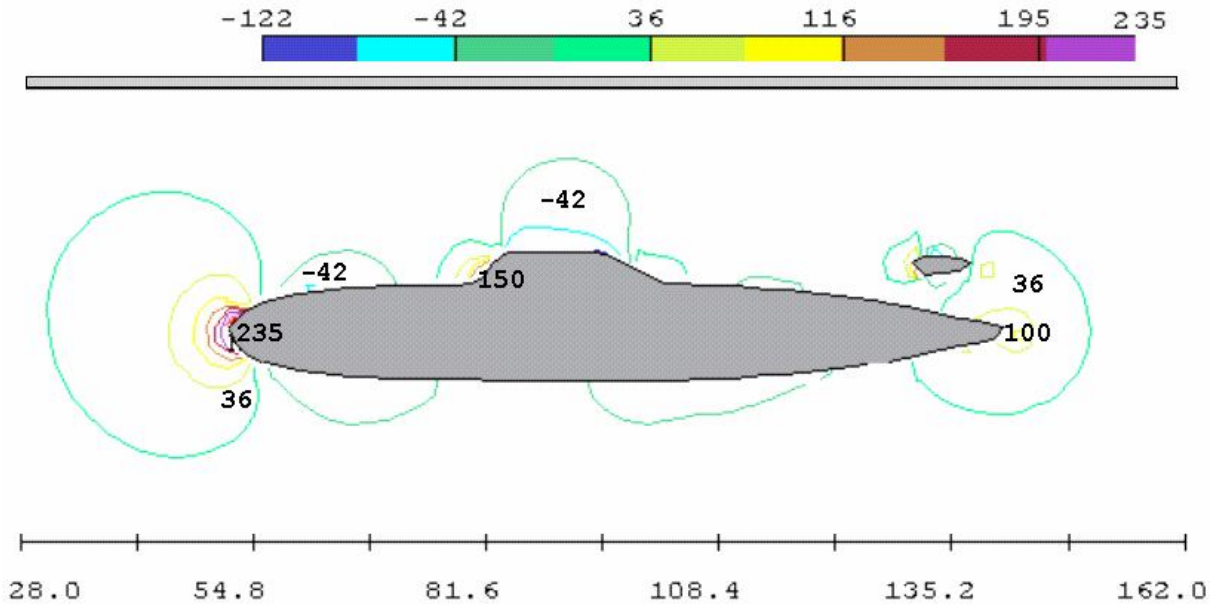


Рис. 2.41. Поле давлений (Па) от движения ПЛ пр. 971 ($H/L = 0,3, V_x = 1 \text{ м/с}$)

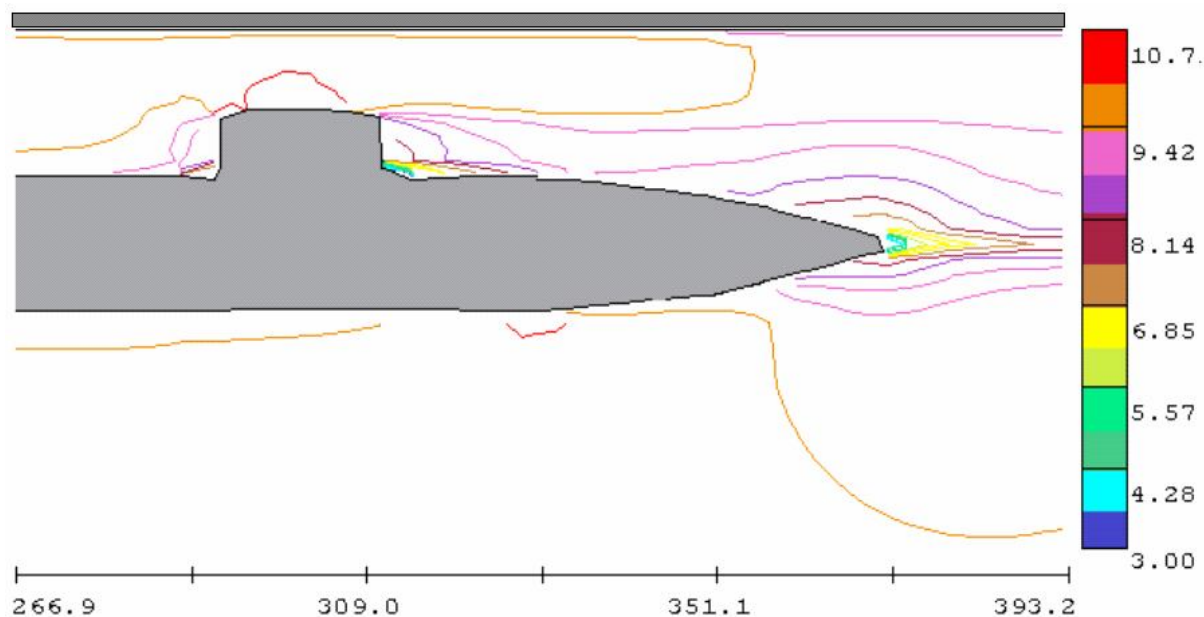


Рис.2.42. Поле скоростей (м/с) от движения ПЛ пр. 941
($H/L = 0,15$. $V_x = 10$ м/с)

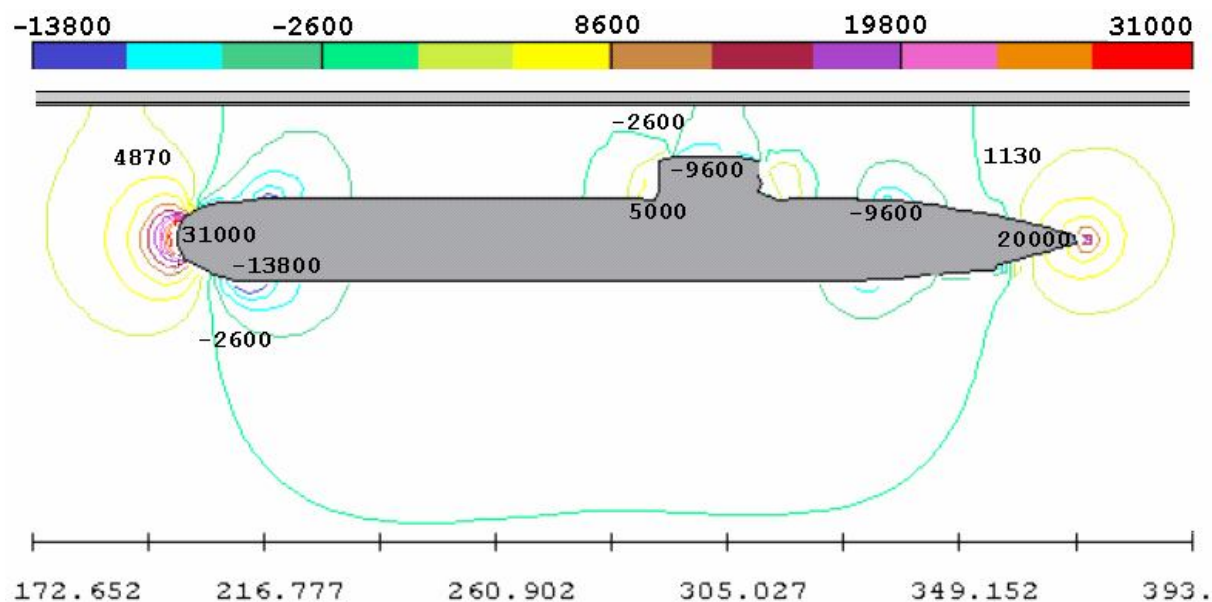


Рис. 2.43. Поле давлений (Па) от движения ПЛ пр. 941
($H/L = 0,15$. $V_x = 10$ м/с)

Обтекание рубки зависит от формы. Рубку, близкую по форме к вертикальному цилиндру (пр. 941), линии тока огибают преимущественно по ватерлиниям. В результате воздействие на ледовую поверхность такой рубки относительно невелико.

Над рубкой с плавными очертаниями батоксов (пр. 971) образуется более существенная область пониженного давления (рис. 2.45).

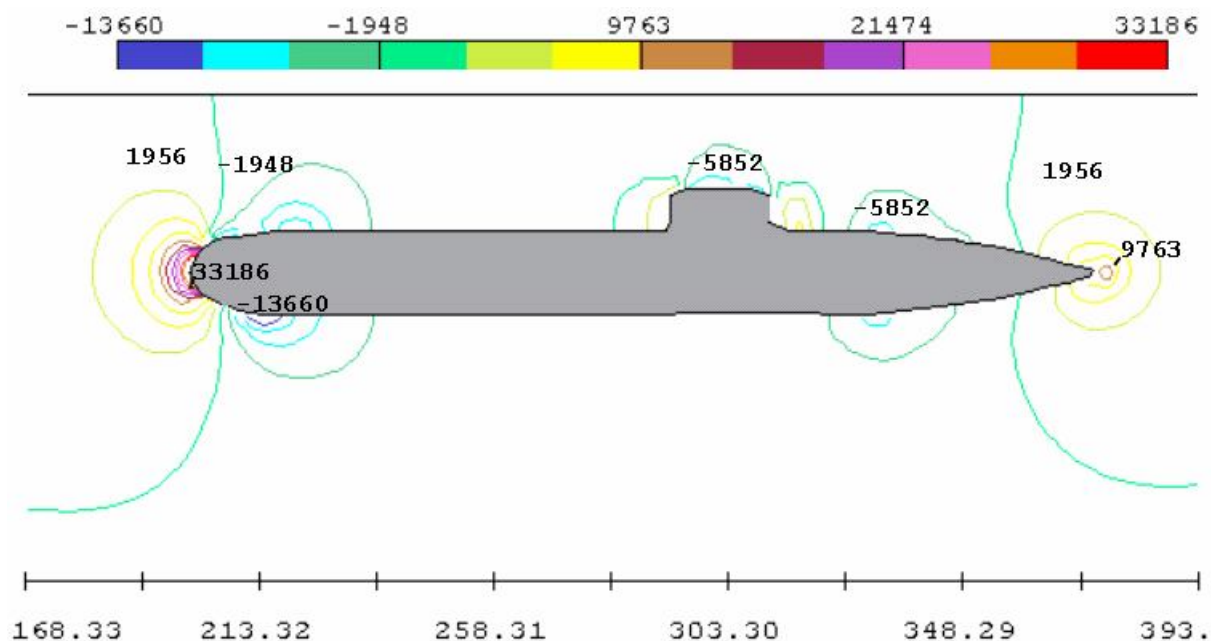


Рис. 2.44. Поле давлений (Па) от движения ПЛ пр. 941 ($H/L = 0,2$; $V_x = 10$ м/с)

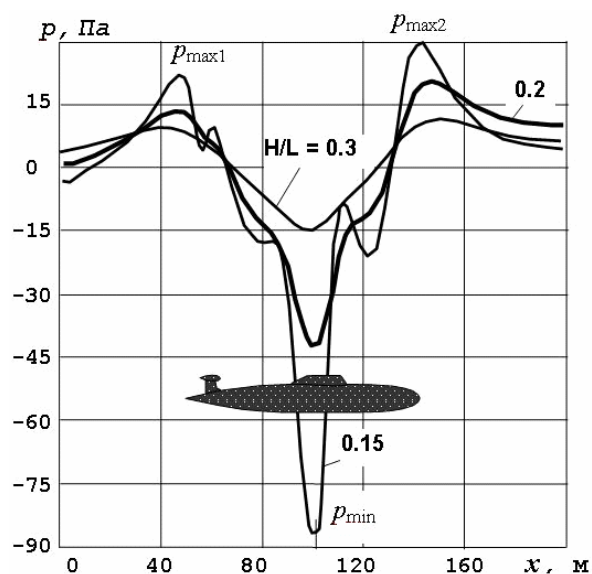


Рис. 2.45. Распределения давлений от движения ПЛ пр. 971 по продольному сечению ледяного поля ($V_x = 1$ м/с)

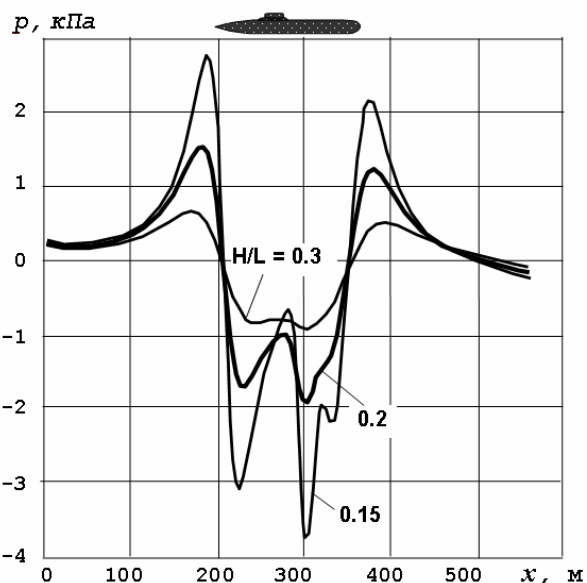


Рис. 2.46. Распределения давлений от движения ПЛ пр. 941 по продольному сечению ледяного поля ($V_x = 10$ м/с)

Если рубка смещена в нос или в корму от мидель-шпангоута корабля (точнее, от области минимума давления, образуемого системой из носового и кормового возмущений), то влияние рубки может оказаться обратным. Так у ПЛ пр. 941 область пониженного давления от рубки смещена в кор-

му, а область повышенного давления от рубки (подтормаживания потока перед рубкой) накладывается на район пониженного давления от корпуса. Вследствие этого пик пониженного давления в средней части корпуса уменьшается.

В результате наблюдается, на первый взгляд парадоксальный эффект, заключающийся в том, что ПЛ пр. 941, имеющая существенно большее водоизмещение, чем ПЛ пр. 971, оказывает на ледяную поверхность меньшее гидродинамическое воздействие. Таким образом, форма и место расположения рубки, а также форма корпуса ПЛ, в частности, наличие цилиндрической вставки, существенно влияют на перераспределение гидродинамических сил на поверхность ледяного покрова.

2.4.3. Сопротивление воды при движении надводного корабля

Выполним в системе Flow-3D анализ сопротивления воды движению моторной яхты с главными размерениями: $L = 9,2$ м; $B = 3,0$ м; $T = 0,35$ м (рис. 2.47). Построение расчётной модели выполняется аналогично, как в рассмотренных ранее примерах, поэтому описание стандартных действий опустим или приведём кратко.

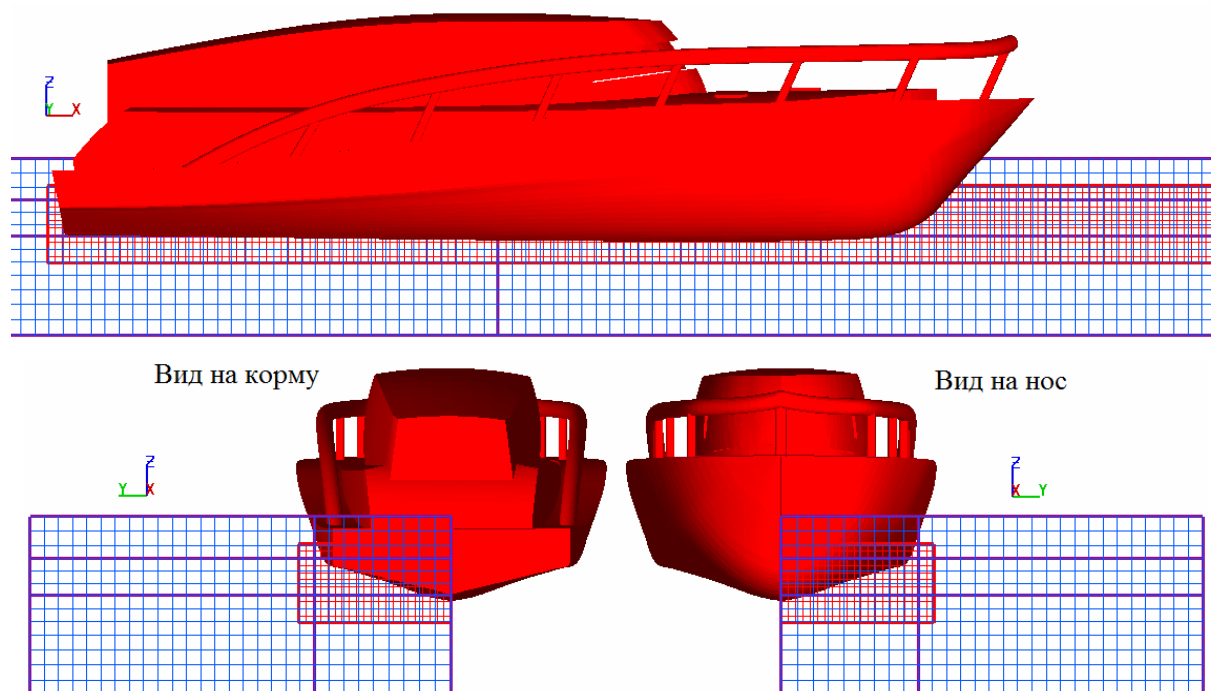


Рис. 2.47. Модель моторной яхты

На вкладке **General** настроим: **Finish Time** = 4 с; **Interface tracking** → **Free Surface or Sharp Interface**; **Flow mode** → **incompressible**; **Number of fluids** → **One fluid**; **Simulation units** → **SI**.

На вкладке **Physics** выбираем турбулентный режим движения: **Viscosity and turbulence** → **Viscous flow, Turbulence models** → **RNG model**. В разделе **Gravity** введите ускорение свободного падения по оси **Z**: -9.8 м/с^2 . На этой же вкладке в разделе **Moving and simple deforming objects** и включите режим задания движущихся объектов: **Activate general moving objects (GMO) model**.

На вкладке **Fluids** определяем свойства жидкости: главное меню **Materials** → **Fluids Database** → **Water at 293K** → **Load Fluid 1** → **OK** → **OK** → **Close**.


Перейдем далее на вкладку **Meshing & Geometry**. Создайте блок расчётной сетки: в строке дерева свойств **Mesh – Cartesian** щёлкните правой кнопкой мыши и выберите **Add a mesh block**. Отредактируйте размеры расчётной сетки: **Total cells** = 60 000; размеры, м: по оси **X** – от 0 до 22 м; по оси **Y** – от 0 до 4 м; по оси **Z** – от -1,3 до 0,4 м).

Задайте граничные условия (раздел **Boundaries**): для **X min**, **X max** и **Y max** → **Specified velocity** → **X velocity** = -16 м/с; для **Y min** → **Symmetry**; для **Z min**: **Wall**.

Длина расчётной области принята малой и используется принцип обращённого движения (задано течение навстречу судну) для того, чтобы уменьшить число ячеек расчётной сетки и уменьшить, таким образом, вычислительные затраты.

Для повышения точности расчёта введём дополнительную сетку (в строке **Mesh – Cartesian** щёлкните правой кнопкой мыши и выберите **Add a mesh block**). Размеры второй расчётной сетки: **Total cells** = 40 000; размеры, м: по оси **X** – от 9,08 до 19,43 м; по оси **Y** – от 0 до 1,45 м; по оси **Z** – от -0,61 до 0,14 м).

Зададим начальные условия (раздел **Initial** → **Global**). Во всей расчётной области начальная скорость течения, как на границах: **Velocities** → **X direction**: - 16 м/с. **Pressure**: **hydrostatic pressure in z direction**. В строке **Fluid Initialization** выберите: **Use fluid elevation** и укажите уровень воды: **Initial fluid elevation**: 0 м.

Установим в расчётную область модель яхты в формате STL. В меню графического окна нажмите кнопку  и загрузите файл модели. С помощью группы свойств **Transformations** расположите субкомпонент в расчётной области (рис. 2.47).

Далее зададим движение модели. Несмотря на применение обращённого движения, оставить судно неподвижным в данном случае будет неверно, так как заранее неизвестно, каким будет его дифферент и подъём в режиме глиссирования.

В списке свойств компонента раскройте **Component Properties** → **Type of Moving Object**: **Coupled Motion** → **Edit**. В открывшемся окне

Moving Object Setup установите параметры движения на нескольких страницах.

На странице **Motion Constraints**: в списке **Type of Constraints** выберите **6 degrees of freedom**; в разделе **Translational and rotational options** установите режим **Coupled motion** (вызванное движение) для степеней свободы по оси **Z (translations)** и вокруг оси **Y (rotation)**. Для остальных степеней свободы поставьте условие **Prescribed motion** (заданное движение).

На странице **Mass Properties**: в списке выберите **Define integrated mass properties** и введите массу судна (**Total mass**): 2000 кг, а также координаты центра тяжести судна (**Initial mass center location**) в общей (не корабельной!) системе координат. Также введите моменты инерции судна относительно центра масс. Для данного примера введите значения: $I_{11} = 600 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $I_{22} = 7000 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $I_{33} = 600 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $I_{12} = 300 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $I_{13} = 100 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $I_{23} = 300 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

На странице **Initial/Prescribed Velocities** установите нулевые значения всех скоростей (для движений по оси **Z** и вокруг оси **Y** – начальные скорости, а по остальным степеням свободы – заданные нулевые скорости за весь период движения).

Перейдите на вкладку **Simulation** для проведения расчёта.

В главном меню выберите **Simulate** → **Preprocess simulation** → **Yes**. Если по окончании работы препроцессора станет активной кнопка с красной надписью **Warnings & Errors**, посмотрите предупреждения. Вероятно, будет предупреждение (Warning): «**** This is a light moving object problem, ** the implicit GMO method is recommended**». В этом случае вернитесь на вкладку **Physics** и в разделе **Moving and simple deforming objects** → **Moving object/fluid coupling** включите режим **Implicit**.

После учёта предупреждений повторите запуск препроцессора. Если ошибок нет, то начнём расчёт: **Simulate** → **Run simulation**.

По окончании расчёта перейдите на вкладку **Analyze** → **3D**. Для просмотра корабельных волн (деформации свободной поверхности) в цвете в списке **Color variable** выберите **Free surface elevation**. Границы области просмотра выбираются в разделе **Limits**, а диапазон времени задаётся в поле **Time Frame**. Для того, чтобы увидеть модель яхты, пометьте галочкой опцию **STL** (внизу формы). Нажмите кнопку **Render**.

Происходит переход на вкладку **Display**, где в графическом окне показываются кадры движения яхты (рис. 2.48). В поле слева отображается контрольная панель со списком кадров. Переход по кадрам можно выполнять кнопками **Next / Previous**. Чтобы увидеть судно целиком (с учётом симметрии относительно ДП) в меню графического окна выберите **Tools** → **Symmetry**, в появившемся окне отметьте **Y direction** и нажмите кнопку **Apply**. Для настройки цветов выберите **Tools** → **Options** → **Color**.

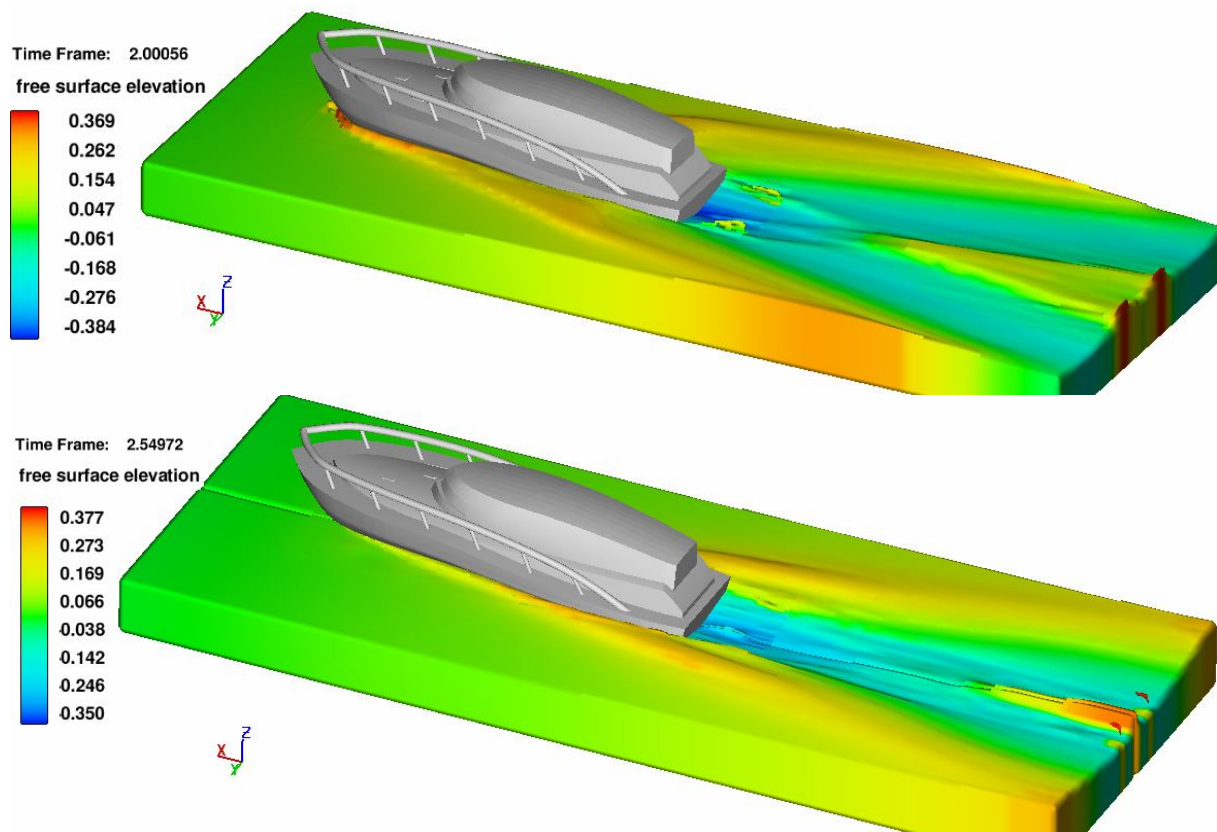


Рис. 2.48. Волны от движения яхты при скоростях 10 и 16 м/с

На вкладке **Probe** сформируем графики зависимостей результатов от времени. В разделе **Data source** выберите **General history**. Затем в списке **Data variables** пометьте строки, начинающиеся с «Component 1 GMO»:

- mass center z-coordinate – положение центра масс по оси Z ;
- mass center z-velocity – скорость центра масс по оси Z ;
- angular y-velocity in body system – угловая скорость вокруг оси Z ;
- x-pressure force in space system – сила сопротивления давления (по оси X);
- x-shear force in space system – сила сопротивления трения (по оси X);
- fluid x-force (pressure + shear) – общая сила сопротивления (по оси X);
- fluid z-force (pressure + shear) – подъёмная сила (по оси Z).

Далее нажмите кнопку **Render** для вывода результатов расчёта.

На рис. 2.49 представлено вертикальное движение центра масс яхты при разных скоростях движения (данные графиков в текстовом виде экспортированы в Excel, где оформлены).

На скорости 16 м/с наблюдается незатухающее вертикальное раскачивание. При этом происходят и угловые колебания (изменения дифферента – на рисунках не показаны). Эти колебания, с одной стороны, вызваны погрешностями расчётной модели (недостаточно мелкой сеткой, ограничением расчётной области и влиянием граничных условий), что приводит к неустойчивости процесса вычислений. С другой стороны, если математи-

ческая модель корректна и не имеет больших погрешностей, то, как правило, вычислительная неустойчивость связана с неустойчивостью самого физического процесса. То есть при малых возмущениях движение яхты при этой скорости неустойчиво. Роль погрешностей расчётной модели в реальных условиях могут играть такие факторы, как небольшое волнение, влияние ветра и пр. Это может привести к таким явлениям, как дельфинирование и рикошетирование. Они опасны тем, что колебания могут быть нарастающими и вызвать опрокидывание на большой скорости.

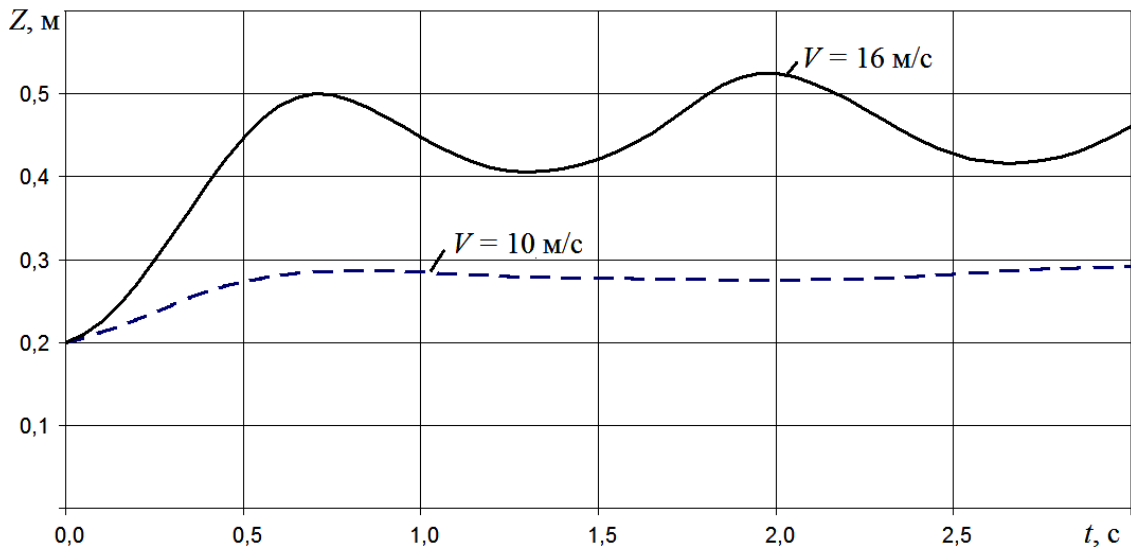


Рис. 2.49. Подъем центра масс яхты при разных скоростях движения

На рис. 2.50 и 2.51 сопоставлены силы сопротивления яхты при разных скоростях движения.

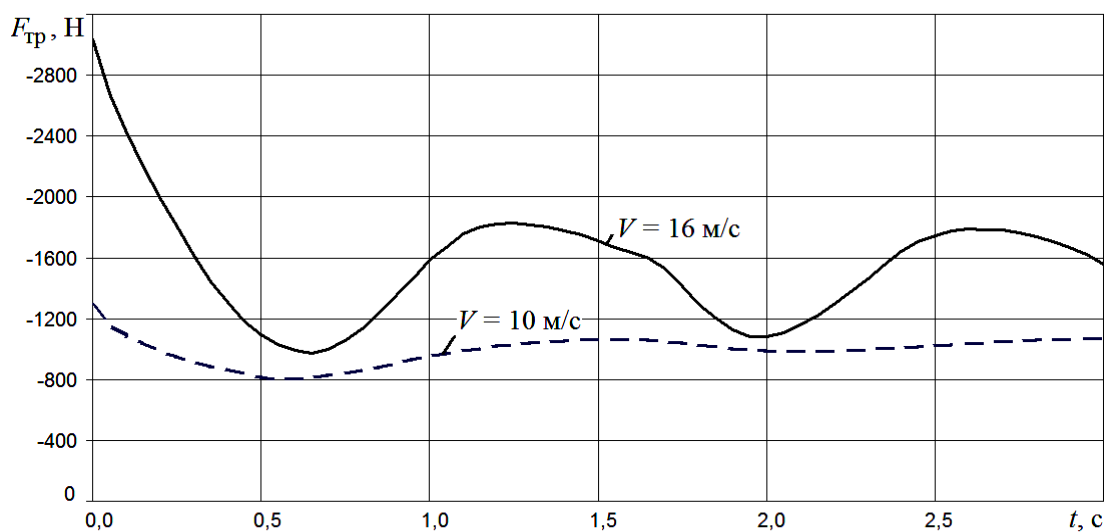


Рис. 2.50. Изменение силы сопротивления трения яхты

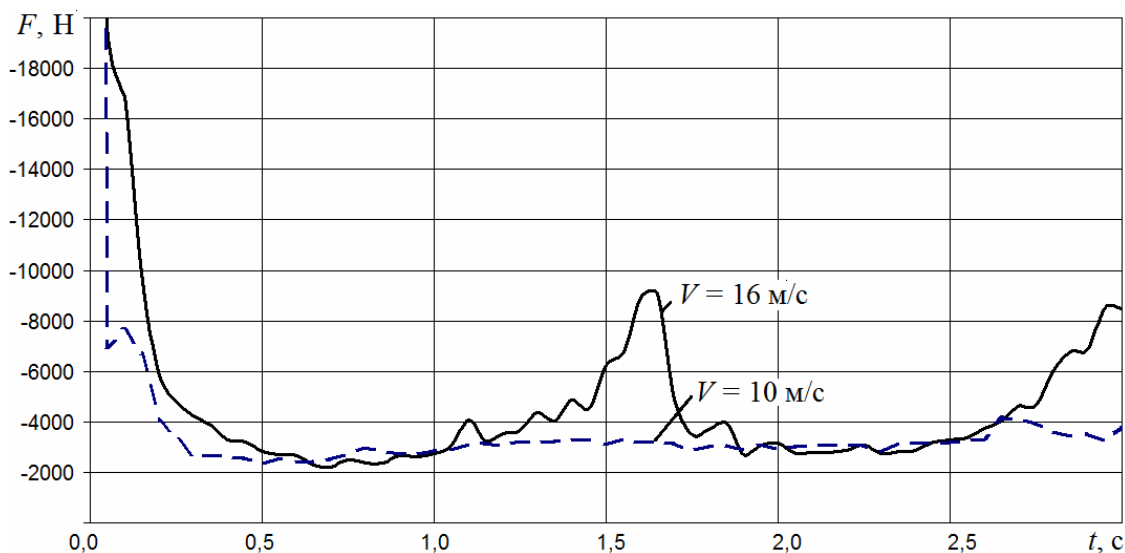


Рис. 2.51. Изменение общей силы сопротивления яхты

2.4.4. Гидродинамика корпуса буксира

Рассмотрим пример расчёта гидродинамики морского буксира «Важис» (проект 1710). После постройки этого судна на Амурском судостроительном заводе, в ходе проведения ходовых испытаний обнаружилось проблемы в работе эхолота. При превышении скорости 12 узлов он практически переставал работать. Для выяснения причины этой проблемы был выполнен расчёт.

Так как интерес представляет особенность обтекания корпуса в районе эхолота, то рассмотрим только носовую часть корпуса. На рис. 2.52 приведена модель носовой части буксира. По ширине расчётная область ограничена ДП судна и плоскостью, отстоящей от ДП на ширину корпуса (учитывается симметрия относительно ДП).

На границе расчётной области перед носом судна ($X = 14$ м) зададим скорость потока (8,2 м/с). Скорость течения на противоположной границе неизвестна, поэтому на границе $X = 0$ введём приближённое условие $p = 0$. В действительности поле давлений в этой плоскости неоднородно, но, учитывая, что она удалена от места расположения эхолота ($X = 5$ м), допустим, что эта неоднородность мало влияет на поле давлений в интересующем нас районе. Рассмотрим только избыточные гидродинамические давления, поэтому силы гравитации учитывать не будем.

Результаты расчётов представлены на рис. 2.53 – 2.55. Анализируя их видно, что в результате резкого изменения кривизны батокса в районе $X = 6$ м течение ускоряется, образуя область отрицательного давления (до -20 кПа), величина которого соизмерима с гидростатическим (30 кПа). Область отрицательного давления начинается от скега (выступающего киля в

ДП в носовой части) и перемещается к скуле в средней части. Наличие сбега приводит к дополнительным пульсациям давления даже при малой качке или малом изменении курса. В результате образуется область турбулентности, в том числе с появлением кавитации. Это и является основной причиной нарушения работы эхолота.

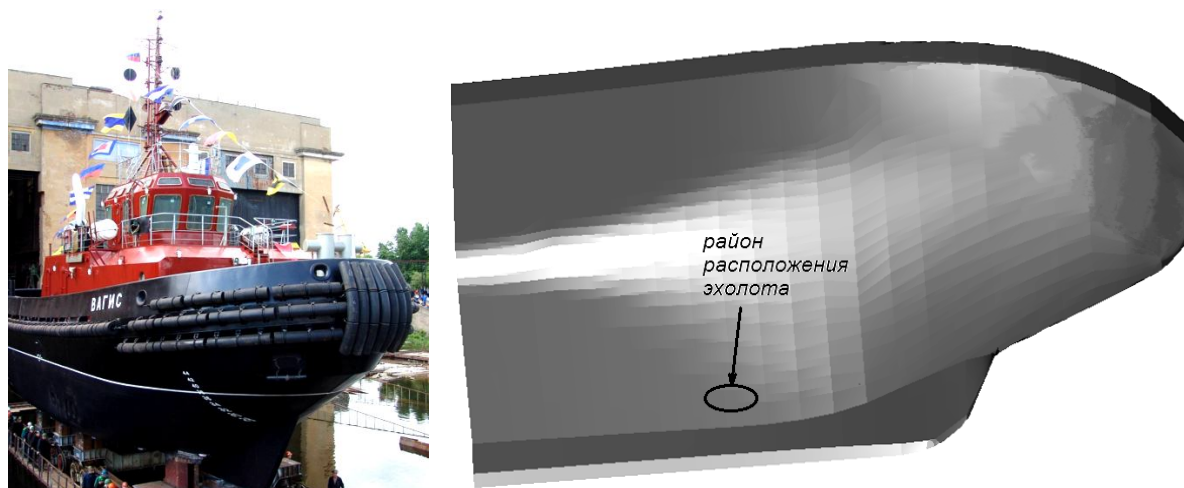


Рис. 2.52. Буксир и 3D-модель его носовой части

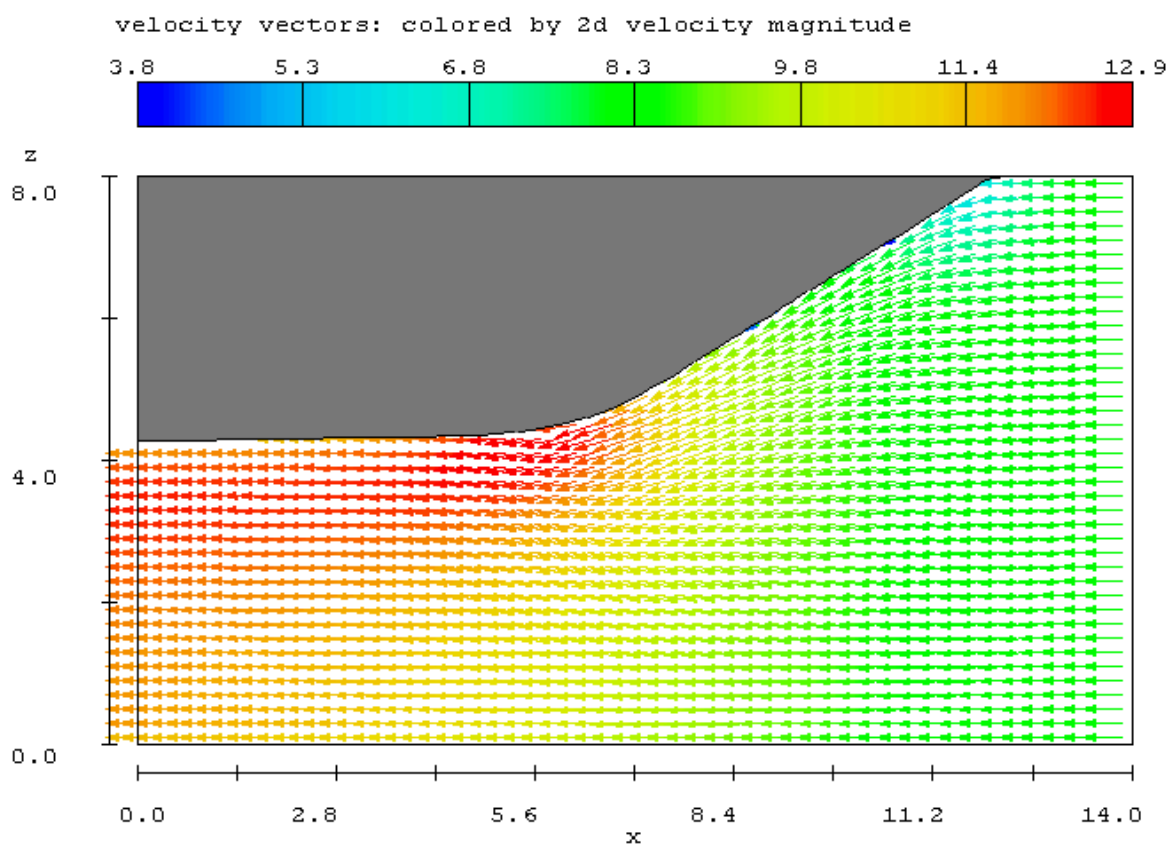


Рис. 2.53. Поле скоростей в продольном сечении (в районе эхолота)

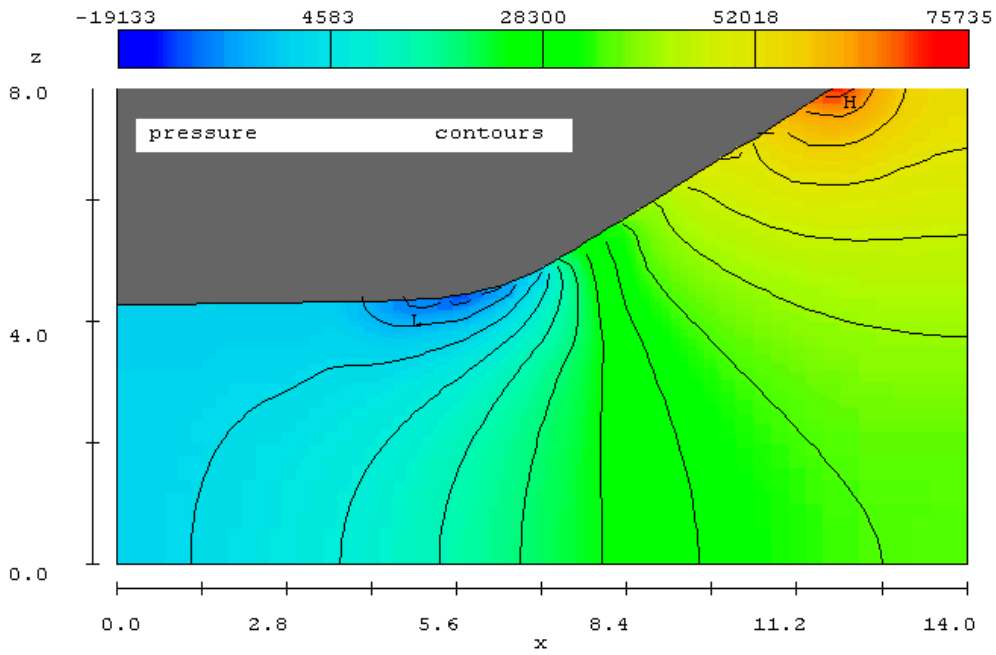


Рис. 2.54. Поле гидродинамических давлений в продольном сечении

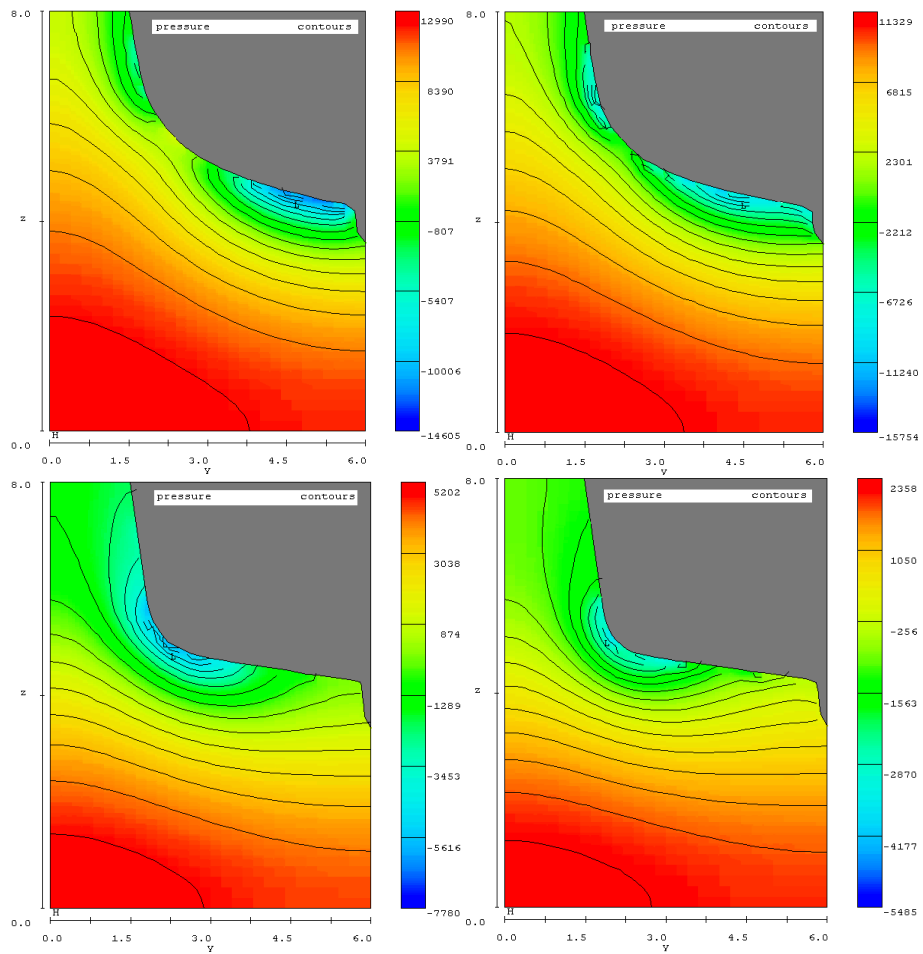


Рис. 2.55. Поле гидродинамических давлений в поперечных сечениях ($X = 5$ м; 4,5 м; 2,4 м; 1,0 м)

3. КАЧКА КОРАБЛЯ

3.1. Модели волнения

Волнение воды образуется в результате действия периодических нагрузок (от пульсаций ветра на поверхности воды или от колебаний тел в воде) или при любом другом возмущении (корабельные волны – при движении корабля, импульсные волны – при ударе о воду и пр.) Волны, образующиеся непосредственно в районе возмущения, называются вынужденными. При удалении от района возмущения волны становятся свободными. При встрече с препятствиями образуются отражённые волны.

Модели волнения рассмотрены в учебном пособии [7]. Рассмотрим их области применения и способы задания в системе Flow-3D. Прежде всего отметим, что есть два разных способа задания волнения: 1) в виде граничного условия; 2) с помощью движущегося тела (волнопродуктора).

Рассмотрим первый способ. Для этого в разделе свойств сетки **Mesh – Cartesian** → **Mesh block 1** → **Boundaries** нажмите кнопку для границы, из которой в расчётный объём будут входить волны. В открывшемся окне, в разделе **Boundary type** выберите тип граничного условия **Wave**. Затем в разделе **Wave Definition** выберите модель волнения и нажмите кнопку **Definition** для ввода параметров волн (рис. 3.1).

Морские свободные волны (зыбь) достаточно достоверно моделируется в виде потенциального движения невязкой и несжимаемой жидкости. Теоретически наиболее простой является линейная модель волн (**Linear**), профиль которых имеет форму синусоиды:

$$z_w(x, t) = r \cdot \sin(kx - \omega t),$$

где r – амплитуда волн, $\omega = 2\pi/\tau$ – круговая частота, τ – период; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

В теории линейных волн используются следующие допущения:

- скорости в волне небольшие и их квадратом в уравнениях движения можно пренебречь

$$v^2 = (\nabla \varphi)^2 = 0;$$

- крутизна волн является малой величиной ($h_w/\lambda \rightarrow 0$, где h_w и λ – высота и длина волн) – это позволяет перенести граничные условия на реальной волновой поверхности на плоскость $z = 0$.

Крутизна свободных волн на глубокой воде обычно составляет: 1/20 – в закрытых морях и прибрежных водах; 1/30 – в открытом море. При такой малой крутизне линейная теория волн приводит к удовлетворительным результатам и поэтому широко используется на практике.

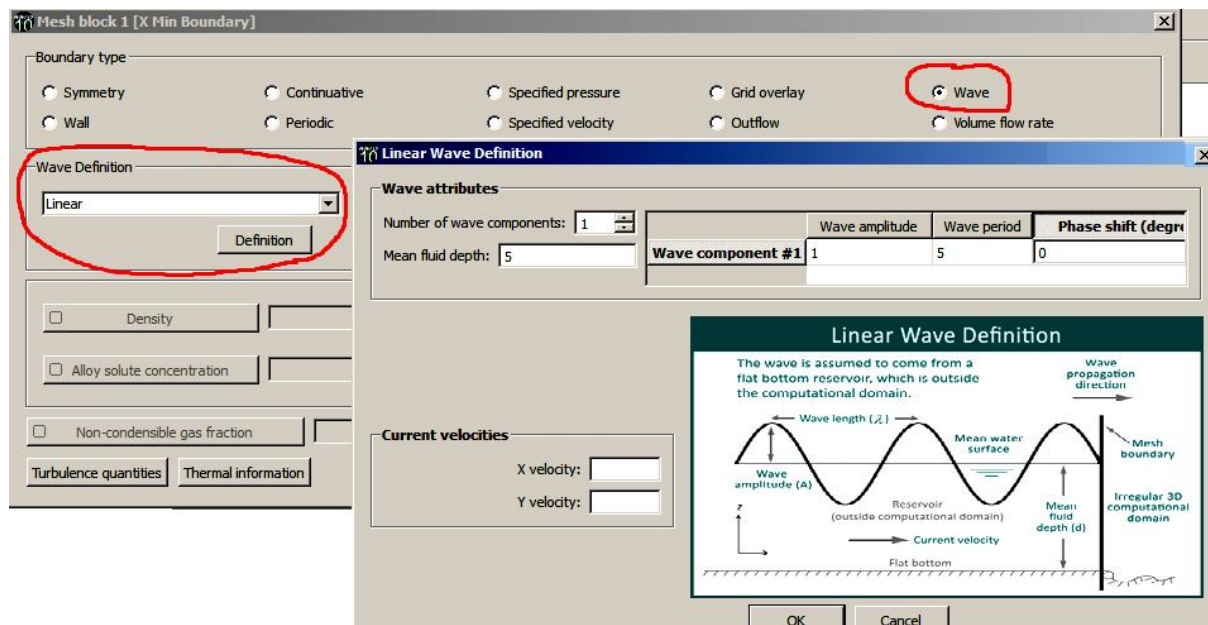


Рис. 3.1. Задание волнения

На рис. 3.1 показано окно для задания параметров линейных волн. Они включают:

- **Number of wave components** – число компонентов группы накладывающихся друг на друга волн разной длины и частоты (для регулярного волнения равно 1);
- **Mean fluid depth** – средняя глубина воды;
- **Wave amplitude** и **period** – амплитуда и период волн;
- **Phase shift** – сдвиг фазы в начальный период времени;
- **Current velocities** – скорости течения (необязательно).

В условиях ветра, в присутствии противотечений, ограниченных глубин, резких перепадов глубин, сложных очертаниях береговой линии и при наличии некоторых других факторов крутизна волн может существенно возрастать, а их форма существенно отличаться от синусоиды.

Для моделирования таких волн применяются нелинейные теории, в частности, теория Стокса (**Stokes**). Форма волн Стокса зависит от их крутизны. С ростом высоты волн (при неизменной длине) вершины становятся более острыми, а подошвы – более пологими.

Волны Стокса предельной высоты (**Cnoidal**) имеют наибольшую крутизну $h/\lambda = 1/7$ и угловатые гребни (рис. 3.2). Такая модель соответствует разрушающемуся реальному волнению, когда на гребнях образуются срывы потока в виде так называемых «барашков» (волны вспениваются).

Применение теории волн Стокса применяется при отношении глубины к длине волн $H/\lambda > 0.1$. Для акваторий с меньшими глубинами удовлетворительные результаты можно получить при использовании теории

кноидальных волн Кортвега-де Фриза. На рис. 3.3 показаны области применения рассмотренных волновых теорий

Для задания волн Стокса следует ввести: **Wave height** – высоту волн; **Mean fluid depth** – среднюю глубину воды; **Wavelength** – длину волн или **Wave period** – период волн. Можно добавить также скорости течения (**Current velocities**).

Разнообразное волнение можно получить путём введения в расчётную область специального движущегося тела – волнопродуктора. Особенно этот способ незаменим при моделировании волн на малых глубинах. Проблема применения волнопродуктора состоит в том, что для получения волн необходимой формы необходимо экспериментально подбирать форму и параметры колебаний волнопродуктора.

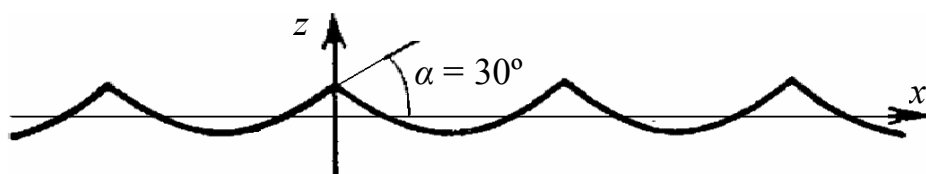


Рис. 3.2. Предельные волны Стокса

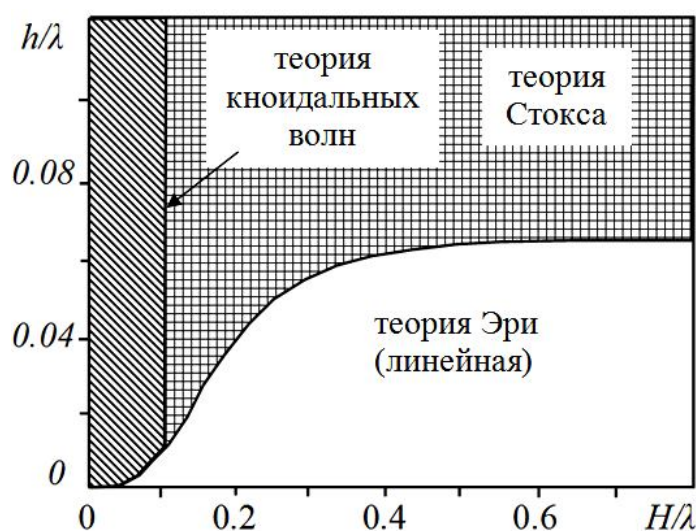


Рис. 3.3. Диаграмма применимости разных теорий волн

Для моделирования одиночной волны (**Solitary**) следует указать: **Wave height** – высоту волн; **Mean fluid depth** – среднюю глубину воды; **Distance from wave crest to boundary** – расстояние от вершины волны до границы (половину длины волны).

Нерегулярное случайное волнение (**Random**) задаётся в виде энергетического частотного спектра, который характеризует распределение энергии волнения по частотам. На практике применяются типовые обобщённые спектры: Пирсона – Московича (**Pierson – Moskowitz**); Джонсвап (**JON-**

SWAP) и др. Указания по применению спектров приводятся в нормативных и справочных изданиях [3].

При задании спектра Pierson – Moskowitz требуется указать скорость ветра (Wind speed). Связь скорости ветра с параметрами волн можно определить по таблице 3.1. Спектр Пирсона-Московица предназначен только для условий океана и открытых морей с полностью развитым волнением.

Таблица 3.1

Статистические параметры морских волн по спектру Пирсона – Московица

Скорость ветра W		Балльность по шкале Бофорта	Значительная высота волн $H_{1/3}$, м	Средний период τ , с	Средняя длина волн λ , м
узлов	м/с				
10	5,14	2	0,6	2,7	22
15	7,72	3	1,5	4,0	50
20	10,3	4	2,2	5,3	89
25	12,9	5	3,6	6,7	140
30	15,4	6	5,0	8,0	200
40	20,6	7	8,9	10,7	355
50	25,7	8	13,9	13,4	554

При задании спектра JONSWAP требуется кроме скорости ветра (Wind speed) указать ещё два параметра:

– fetch length – длина разгона волн. Она определяет длину, на которой при постоянной скорости ветра W волны увеличиваются в размере до формирования полностью развитого волнения с периодом $\tau_{\max} = 0.526W$. Длина разгона L и время действия ветра t связаны соотношением:

$$\frac{gt}{W} = 17.3 \left(\frac{gL}{W^2} \right)^{0.8};$$

– peak enhancement factor γ – коэффициент усиления пика спектра, который может принимать значения от 1,0 до 7,0 (среднее значение $\gamma = 3,3$). При $\gamma = 1$ спектр приближённо соответствует спектру Пирсона – Московица. Чем он больше, тем структура волнения более регулярная и близкая к зыби, то есть энергия волн более сконцентрирована на одной частоте.

Спектр JONSWAP обычно характеризует волновые условия закрытых морей или прибрежных районов и применяется при анализе гидродинамики морских прибрежных сооружений или качки судов ограниченного района плавания. Но он неприменим для условий мелководья и ограниченной глубины.

3.2. Кратко об остойчивости судна

Характер поперечной качки судна зависит в первую очередь от отношения частоты волнения к собственным частотам бортовой и вертикальной качки. В свою очередь, собственные частоты бортовой качки тесно связаны с параметрами, определяющими остойчивость судна. В связи с этим напомним некоторые основные параметры остойчивости.

При вынужденном крене судна с углом ϕ возникает момент M_ϕ , обусловленный противодействием силы веса и архимедовой силы с некоторым плечом l :

$$M_\phi = mgl = mgh \cdot \sin \phi, \quad (3.1)$$

Здесь $h = r - a$ – поперечная начальная метацентрическая высота, r – поперечный метацентрический радиус, a – расстояние между центром тяжести и центром величины при положении судна на ровный киль. Для остойчивого судна момент M_ϕ стремится выпрямить судно (восстанавливающий момент). При потере остойчивости момент стремится опрокинуть судно.

Метацентрический радиус r прямо пропорционален моменту инерции площади ватерлинии I_x :

$$r = I_x / V, \quad (3.2)$$

где V – объёмное водоизмещение судна.

С учётом (3.2) формулу (3.1) можно представить в виде:

$$M_\phi = \rho g I_x \cdot \sin \phi - mga \cdot \sin \phi = M_\phi + M_\epsilon. \quad (3.3)$$

Здесь первое слагаемое называется моментом остойчивости формы, второе – моментом остойчивости веса.

Плот имеет большой момент остойчивости формы, в то время как M_ϵ близок к нулю (центр тяжести почти совпадает с центром величины). Большой остойчивостью формы обладает также катамаран – из-за большого значения I_x . Большую остойчивость веса имеет яхта с узким корпусом (при спущенном парусе) – благодаря балластному киллю.

3.3. Определение собственных периодов качки

3.3.1. Приближённые формулы

В условиях штормового плавания корабля наиболее опасные случаи возникают при его резонансной качке, когда период волн совпадает с собственным периодом качки. Поэтому определение собственных периодов качки корабля имеет большое значение. Для этой цели существуют инженерные методики, однако в случаях нестандартных форм корпуса они не

всегда позволяют достичь приемлемой точности. Для некоторых случаев существуют приближённые формулы, в частности

$$\tau_3 = 2\pi \sqrt{\frac{m + a_{33}}{\rho g S_0}}; \quad \tau_4 = 2\pi \sqrt{\frac{I_{\xi\xi} + a_{44} - (a_{24}^2 / (m + a_{22}))}{mgh}}; \quad \tau_5 = 2\pi \sqrt{\frac{I_{\eta\eta} + a_{55}}{mgH}},$$

где τ_3, τ_4, τ_5 – собственные периоды вертикальной, бортовой и килевой качки соответственно, m – масса судна, a_{ij} – присоединённые массы, S_0 – площадь ватерлинии, $I_{\xi\xi}, I_{\eta\eta}$ – моменты инерции масс корабля относительно продольной и поперечной осей, h и H – начальная поперечная и продольная метацентрические высоты.

Для вычисления моментов инерции массы судна также применяются приближённые формулы:

формула Дуайра:
$$I_{\xi\xi} = \frac{m}{12} (B^2 + 4z_{go}^2);$$

формула Шиманского:
$$I_{\xi\xi} = m \left(\frac{\alpha^2 B^2}{11,4\delta} + \frac{H_s}{12} \right);$$

формула Ремеза:
$$I_{\xi\xi} \approx 0,125mB^2;$$

формула Павленко:
$$I_{\eta\eta} = 0,065 \alpha m L^2,$$

где B – ширина судна, z_{go} – аппликата центра масс над ОП, α – коэффициент полноты ватерлинии, δ – коэффициент общей полноты, H_s – высота борта, L – длина судна.

Вычисление собственных периодов качки по приближённым формулам затрудняется тем, что входящие в них присоединённые массы a_{ij} сами зависят от периодов качки, что требует применения метода последовательных приближений. В связи с этим существуют более простые приближённые формулы:

$$\tau_3 \approx 2 \sqrt{\frac{\delta}{\alpha} (T + 0,4\alpha B)}, \quad \tau_3 \approx 2,5\sqrt{T};$$

$$\tau_5 \approx 2 \sqrt{\frac{\delta}{\alpha} (T + 0,42\varphi^2 B)}, \quad \tau_5 \approx 2,5\sqrt{T},$$

$$\tau_5 \approx k_\psi \sqrt{T}, \quad k_\psi = \sqrt{3,14\delta(3 - 2\alpha) + 2,53 \frac{\alpha}{3 - \alpha} \frac{B}{T}};$$

$$\tau_4 \approx \frac{k_\theta B}{\sqrt{h}} \quad \text{– капитанская формула,}$$

где T – осадка судна, φ – коэффициент продольной полноты, k_θ – размерный коэффициент, определяемый различными справочными и руководящими документами [3]. Рекомендованные значения k_θ даны в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Коэффициент бортовой качки k_θ

Пассажирские морские суда	0,75 – 0,85
Грузовые морские суда	0,8 – 0,9
Лесовозы с палубным грузом	0,8 – 0,86

Капитанская формула применяется и для решения обратной задачи – оценки остойчивости судна путём определения метацентрической высоты. Для этого вначале измеряют собственный период бортовой качки.

3.3.2. Пример расчёта в системе Flow-3D

Определим в системе Flow-3D собственный период поперечной качки и метацентрическую высоту судна (рис. 3.4). Предположим, что судно призматическое, с большим удлинением корпуса. Это позволяет пренебречь пространственным обтеканием и рассмотреть плоскую задачу. Построение расчётной модели выполняется аналогично, как в рассмотренных ранее примерах, поэтому описание приведём сокращённо.

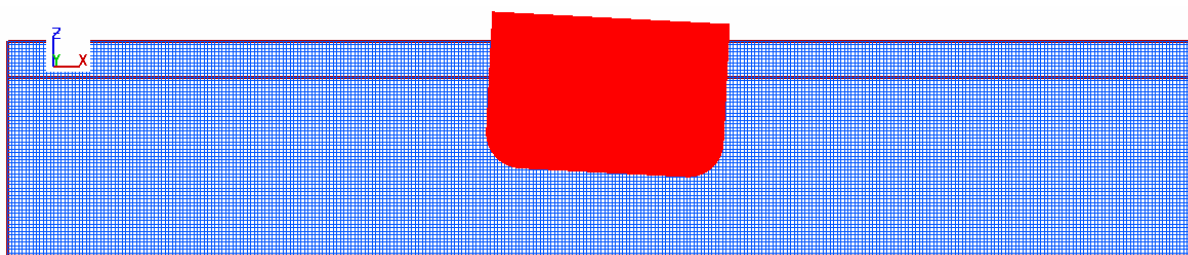


Рис. 3.4. Модель для расчёта свободной поперечной качки судна

На вкладке **General** настроим: **Finish Time** = 40 с; **Interface tracking** → **Free Surface or Sharp Interface**; **Flow mode** → **incompressible**; **Number of fluids** → **One fluid**; **Simulation units** → **SI**.

На вкладке **Physics** выбираем турбулентный режим движения: **Viscosity and turbulence** → **Viscous flow**, **Turbulence models** → **RNG model**. В разделе **Gravity** введите ускорение свободного падения по оси Z : – 9.8 м/с². На этой же вкладке в разделе **Moving and simple deforming ob-**


jects и включите режим задания движущихся объектов: **Activate general moving objects (GMO) model**.

На вкладке **Fluids** определяем свойства жидкости: главное меню **Materials** → **Fluids Database** → **Water at 293K** → **Load Fluid 1** → **OK** → **OK** → **Close**.

Перейдем далее на вкладку **Meshing & Geometry**. Создайте блок расчётной сетки: в строке дерева свойств **Mesh – Cartesian** щёлкните правой кнопкой мыши и выберите **Add a mesh block**. Отредактируйте параметры расчётной сетки: **Total cells = 40 000**; **Y direction** → **Total cells = 1**. Размеры сетки, м: по оси **X** – от 0 до 100; по оси **Z** – от -15 до 3; по оси **Y** – от 0 до 1.

Задайте граничные условия (раздел **Boundaries**): для **Y min**, **Y max**: **Symmetry**; для **X min**, **X max**, **Z min**: **Wall**; для **Z max**: **Continuative**.

Создайте в системе AutoCAD (или другой системе CAD) 3D-модель блока судна в виде stl – файла с размерами: $B = 20$ м; $H_s = 13$ м; радиус скулы – 3 м; длина – 1 м.

На основе этой модели создайте компонент и субкомпонент (кнопкой  в меню графического окна). Если необходимо, поверните и переместите его, как показано на рис. 3.4, с осадкой $T = 8$ м (так, чтобы ОП модели судна была на уровне $Z = -8$ м) и поворотом вокруг оси **Y** на 3° .

Для задания движения компонента в списке свойств задайте **Component Properties** → **Type of Moving Object** → **Coupled Motion**. Нажмите кнопку **Edit** – для редактирования свойств движущегося тела.

В открытом окне на вкладке **Motion Constraints** задайте опции движения, как на рис. 2.28. Далее перейдите на вкладку **Initial/Prescribed Velocities** и задайте скорости, равные нулю по всем степеням свободы.

Далее перейдите на вкладку **Mass Properties** и задайте параметры инерции тела (рис. 3.5). В списке выберите **Define integrated mass properties** и введите массу m , кг:

$$m = \rho(B \cdot T \cdot 1 - S_b) = 1000(20 \cdot 8 - 4) = 156000,$$

где вычитаемая площадь $S_b = (4R^2 - \pi R^2)/2$, $R = 3$ м – радиус скулы.

Положение центра тяжести (на 2 м ниже ВЛ) и моменты инерции укажите, как на рис. 3.5. Момент инерции вокруг оси **Y** вычислите приближённо: по формуле Дуайра: $I_{\xi\xi} = 7,08 \cdot 10^6$ м⁴ или по формуле Ремеза: $I_{\xi\xi} = 7,81 \cdot 10^6$ м⁴. Остальные моменты инерции в данном примере можно задать произвольно, так как вокруг осей **X** и **Z** задано движение со скоростью, равной нулю.

Для вычисления гидродинамических сил и метацентрической высоты в списке свойств компонента **Component properties** → **Output** отметьте галочками все свойства (**v Pressure and Shear Force**, **v Metacentric height**).

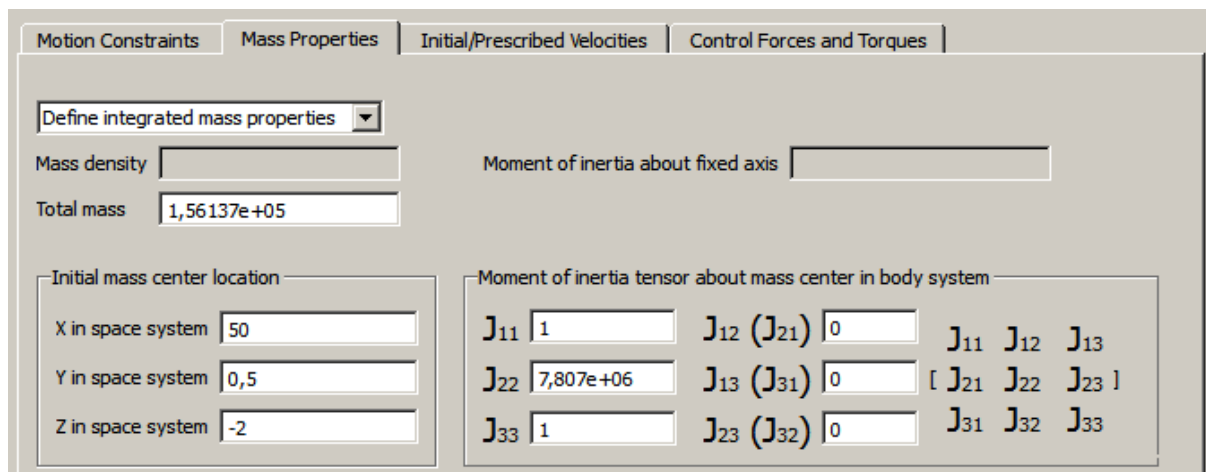


Рис. 3.5. Задание параметров инерции судна

Зададим начальные условия (раздел Initial → Global).

В строке Pressure выберите: hydrostatic pressure in z direction. В строке Fluid Initialization выберите: Use fluid elevation и укажите уровень воды: Initial fluid elevation = 0.

Выполним анализ результатов расчёта. Перейдите на вкладку Analyze → Probe. В разделе Data variables отметьте строки Component 1 GMO: angular Y velocity in body system; metacentric height for Y rotation. В разделе Output form выберите режим Graphical и нажмите кнопку Render. На рис. 3.6 представлены графики изменения во времени угловой скорости и метацентрической высоты.

Для более точного определения параметров в разделе Output form выберите режим Text. Вычислив разницу времени между пиками угловой скорости, получим, что период колебаний в среднем равен 10,5 с. Начальная метацентрическая частота $h_0 = 1,9$ м.

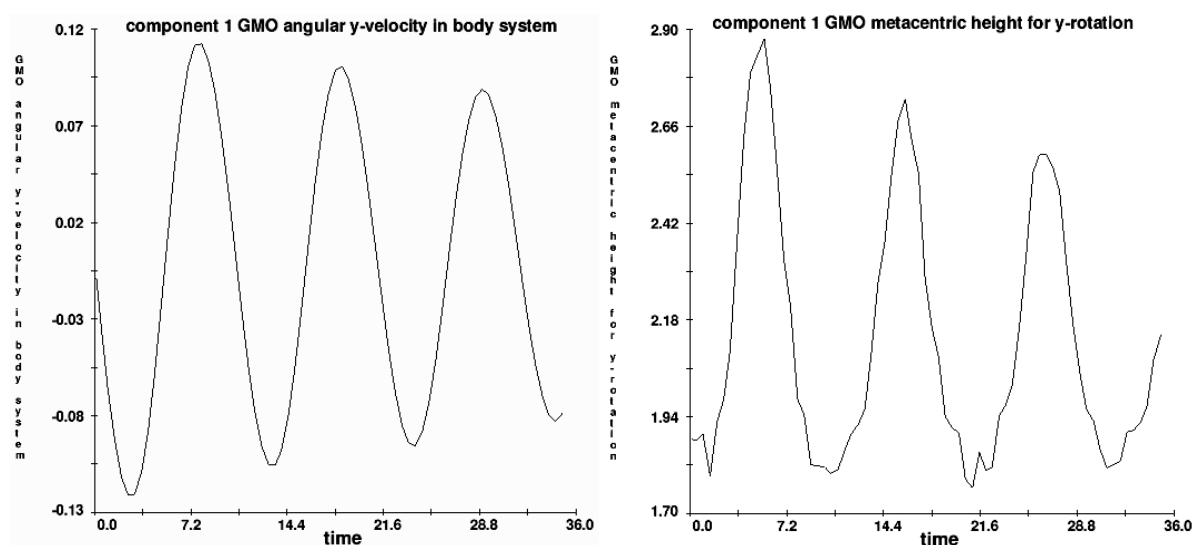


Рис. 3.6. Изменения угловой скорости и метацентрической высоты

К сожалению, в результатах расчётов отсутствуют данные об углах крена. Однако их можно получить путём численного интегрирования по времени угловой скорости ω :

$$\int_t \omega dt \approx \varphi_0 + \sum_i \omega_i \Delta t,$$

где $\varphi_0 = 3^\circ$ – начальный угол крена, ω_i – рассчитанные значения угловой скорости, Δt – шаг по времени. Выполнить это можно в системе Excel, предварительно экспортировав соответствующие текстовые табличные данные.

На рис. 3.7 показано изменение углов крена судна. Обратите внимание, что судно качается в наклоненном состоянии. Это говорит о его низкой остойчивости. Действительно, если увеличить начальный угол крена, то в процессе качки произойдёт потеря остойчивости.

Если опустить центр тяжести, то увеличится h и качка будет более устойчивой, однако более резкой. При резкой качке для достаточно точного определения метацентрической высоты и динамических характеристик потребуется более густая расчётная сетка.

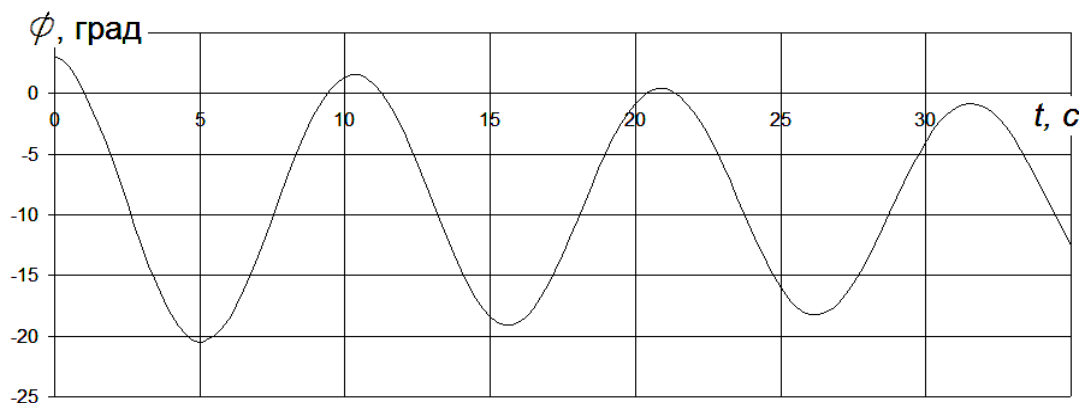


Рис. 3.7. Изменения углов крена

3.3.3. Задания

1. Выполнить расчёт свободной качки судна (рис. 3.4) при тех же исходных данных при различном положении центра тяжести по высоте. Сравните результаты расчётов с приближёнными расчётами по капитанской формуле.

2. Выполнить расчёт свободной качки судна (рис. 3.4) при тех же исходных данных, добавив к модели судна скуловые кили. Насколько эффективны скуловые кили как успокоители качки?

3. Выполнить расчёт свободной вертикальной качки судна (рис. 3.4) при тех же исходных данных. Сравните с расчетом по приближённой формуле.

3.4. Поперечная качка на волнении

Построение расчётной модели для анализа качки на волнении в целом не отличается от расчёта свободных колебаний. Отличие состоит только в том, что не нужно задавать начальный угол крена судна, а в граничном условии (например, для границы X_{min}) следует определить параметры волнения, как объясняется в разделе 3.1.

Кроме того, на параметры качки могут существенно повлиять волны, отражённые от стенок расчётного бассейна. Для уменьшения влияния отражённых волн следует границы бассейна удалить как можно дальше от качающегося судна. При этом потребуются увеличить число ячеек сетки, что приведёт к росту вычислительных затрат. Другим способом погашения отражённых волн является применение граничного условия **Continuative**.

Рассмотрим далее основные виды и особенности поперечной качки судов, предполагая, что теперь Вы сможете их смоделировать в системе Flow-3D.

Следует отметить, что формулы (3.1) – (3.3) характеризуют начальную остойчивость (до углов крена порядка 10°). Об остойчивости на больших углах крена более точное представление дают диаграммы статической и динамической остойчивости. На этой же основе выполняется нормирование остойчивости. Тем не менее, диаграммы остойчивости не могут полностью охарактеризовать остойчивость судна в условиях шторма, а нормы остойчивости не дают полной гарантии от опрокидывания судов. Это связано с тем, что существуют ситуации, о которых диаграммы остойчивости не дают полного представления. Эти ситуации связаны со сложными динамическими (переходными) процессами качки на реальном, особенно штормовом волнении, когда существуют порывы ветра, взаимное влияние разных видов качки, изменение положения центров тяжести и величины, курса и скорости судна, удары волн, заливание палубы, смещение грузов.

Моделирование штормовых ситуаций может выполняться на основе численного моделирования.

3.4.1. Качка на различных волнах

Рассмотрим относительно простые, но показательные случаи поведения судов на волнении.

Качка на длинных волнах. Собственный период качки меньше, чем период волнения, и судно сравнительно плавно огибает профиль волн. При этом, при хорошей остойчивости формы (например, плот) диаметральной плоскости судна стремится оставаться перпендикулярной волновой поверхности (рис. 3.8). При большой остойчивости веса и малой остойчивости формы (морская вежа, классическая яхта с балластным килем и спущенным парусом)

наблюдается преимущественно вертикальная качка (без существенного крена – рис. 3.9). Для большинства же морских судов характерна совместная бортовая и вертикальная качка (рис. 3.10), причём характер наклонов и вертикальных перемещений за период волны зависит от соотношений: моментов остойчивости веса и формы; собственных частот бортовой и вертикальной качки; гидростатических, инерционных и демпфирующих сил.

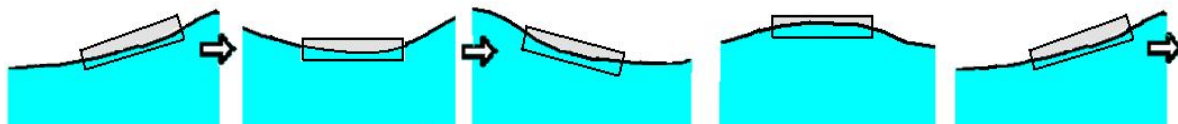


Рис. 3.8. Поперечная качка плота

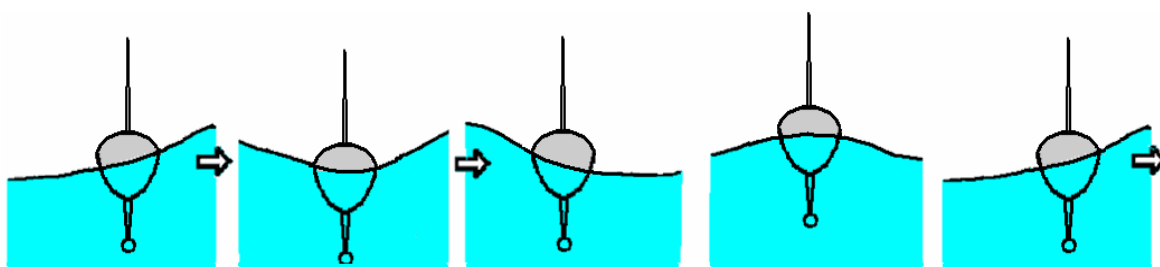


Рис. 3.9. Поперечная качка яхты с балансирным килем

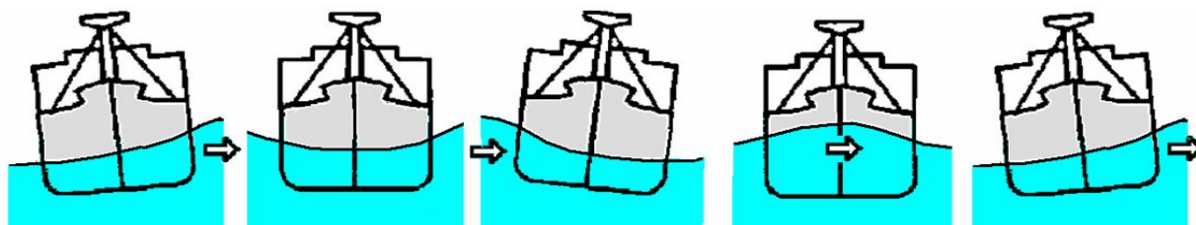


Рис. 3.10. Поперечная качка морского судна на длинных волнах

Качка на коротких волнах. Если собственный период качки судна больше, чем период волны, то за один период прохождения волны оно не успевает развить наибольший угол крена. Борт судна встречается с гребнем волны «на противоходе», что при вынужденной качке приводит к повышению ускорений и ограничению размахов качки (рис. 3.11).

Резонансная качка наступает при сближении собственного периода качки судна с периодом волн. Амплитуда углов крена значительно возрастает (рис. 3.12). При этом наибольший крен наблюдается на подошве и на вершине волны.

Резонансная качка вполне вероятна, если период собственных бортовых колебаний судна менее 12 с. При собственном периоде более 16 с резонанс маловероятен.

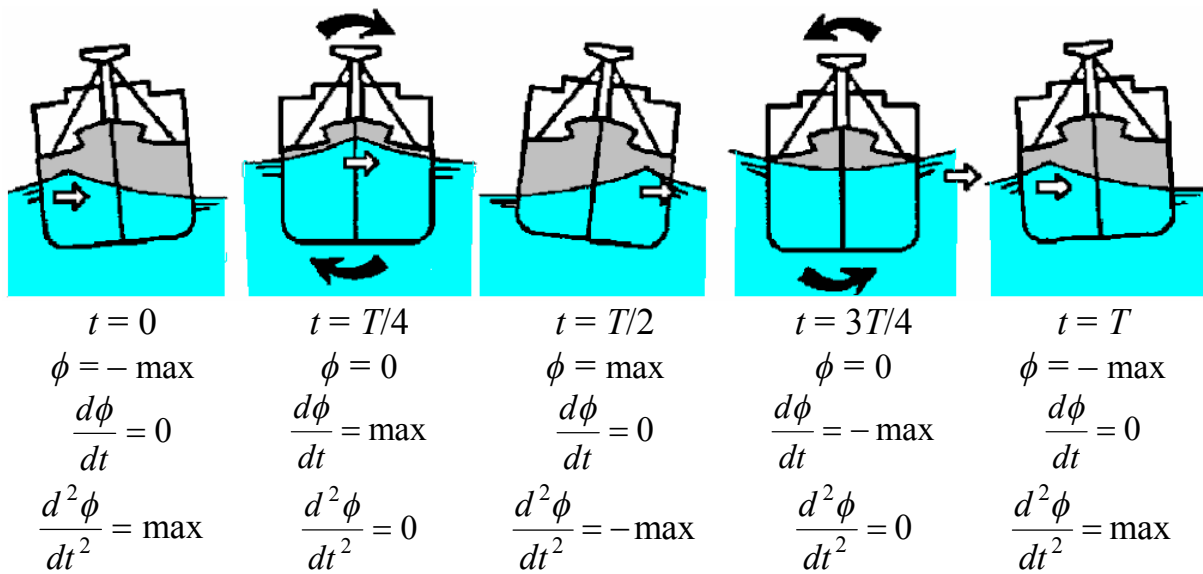


Рис. 3.11. Поперечная качка морского судна на относительно коротких волнах

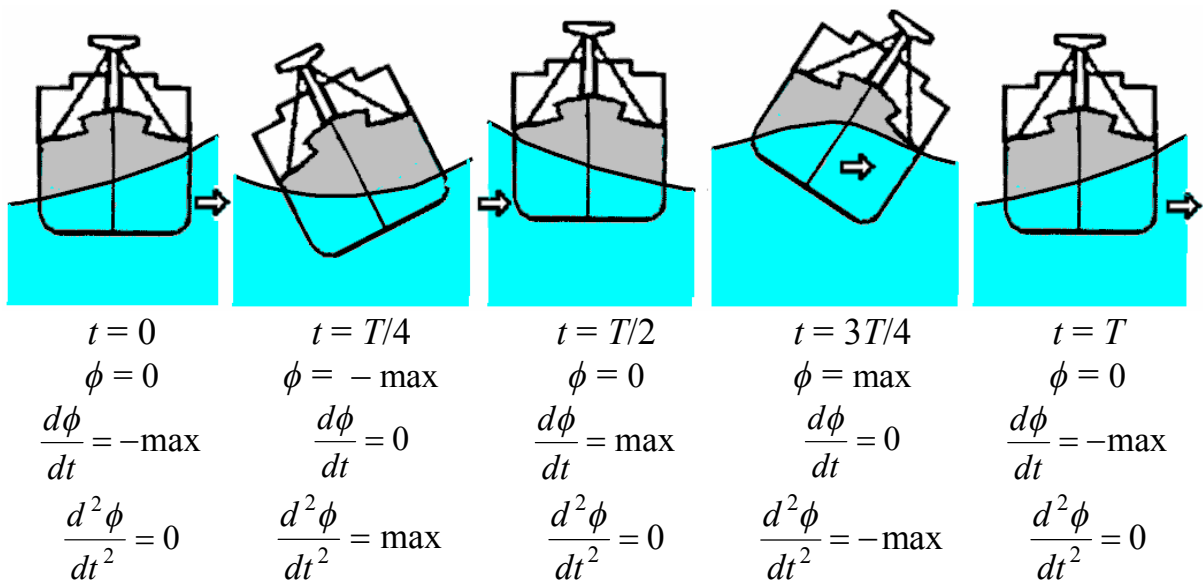


Рис. 3.12. Резонансная поперечная качка морского судна

На рис. 3.13 показана зависимость амплитуды углов крена от возвышения центра тяжести судна. Она показывает, что для большинства судов существует оптимальное положение центра тяжести, при котором бортовая качка минимальна.

У судов, нагруженных тяжёлым грузом, занимающим нижнюю часть трюма, центр тяжести понижен. Остойчивость судна чрезмерная. В результате возникают повышенные ускорения при бортовой качке, приводящие к

морской болезни людей, повышенным динамическим нагрузкам на груз, оборудование и конструкции судна, что может привести к смещению или срыву с креплений груза, нарушению работы оборудования и повреждениям конструкций.

При высоком центре тяжести судно становится недостаточно устойчивым. При этом увеличивается собственный период качки (приближаясь к периоду волн), резко растёт амплитуда вынужденной бортовой качки, вплоть до потери устойчивости и опрокидывания судна.

При оптимальном положении центра тяжести судно имеет плавную качку с относительно небольшими ускорениями и амплитудами углов крена.

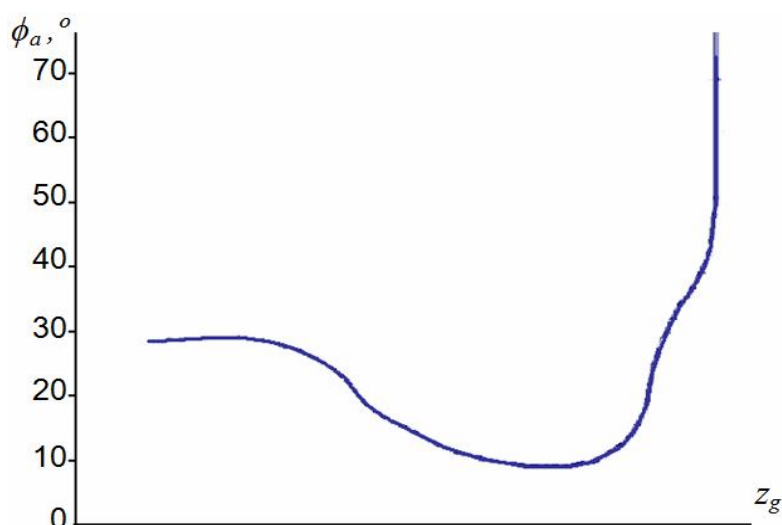


Рис. 3.13. Влияние положения центра тяжести судна на амплитуду угла крена при бортовой качке

Следует отметить, что при ходе на косых курсах бортовая качка может оказаться даже более сильной, чем в положении лагом к волне, если кажущийся период волны совпадет с периодом судна на тихой воде.

Внешние (кренящие или восстанавливающие) моменты, образующиеся при штормовой качке, обусловлены сложным сочетанием гидродинамических и аэродинамических сил. Гидродинамические силы могут иметь различный характер. В штормовых условиях на фоне сил Фруда – Крылова существенную роль играют **дополнительные силы**.

В теории качки судов дополнительные дифракционные силы F_D определяются в предположении их потенциальности. При анализе поперечной качки на крутых и коротких штормовых волнах это допущение может приводить к существенным погрешностям. На рис. 3.14 представлены результаты компьютерного моделирования поперечной качки по технологии CFD. Очевидно, что в данном случае на процесс качки оказывают существенное влияние сразу несколько дополнительных факторов:

- вихреобразование в районе скул судна;
- разрушение волны при взаимодействии с судном;
- заливание палубы;
- удары волны в борт и рубку.

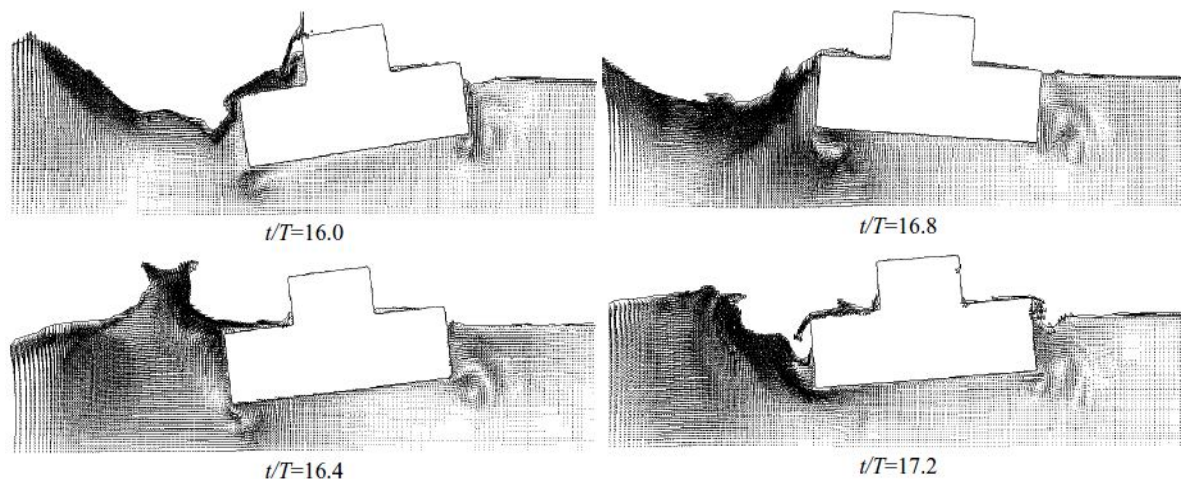


Рис. 3.14. Взаимодействие судна и штормовой волны

3.4.2. Задания

1. Выполнить расчёты поперечной качки судна прямоугольного поперечного сечения в соответствии с данными таблицы 3.3. Как влияет на качку варьируемый параметр? Номер варианта задания определяется по журналу группы.

Таблица 3.3

Варианты заданий

Параметр	Ед. измерения	Варианты				
		1	2	3	4	5
Ширина	м	15	15	15	15	10
Высота	м	10	5	10	5	15
Осадка	м	5	2.5	5	2.5	5
Амплитуда волн	м	1	1	1	1	1
Период волн	с	7	7	5 – 9	5 – 9	7
Z ц.т. от ОП	м	3 – 7	1 – 4	4.5	4	3 – 7

2. Выполнить расчёты поперечной качки судов, шпангоуты которых изображены на рис. 3.15. Суда считать призматическими. Размеры и параметры волн выбрать самостоятельно. Как влияет на качку изменение размера x ?

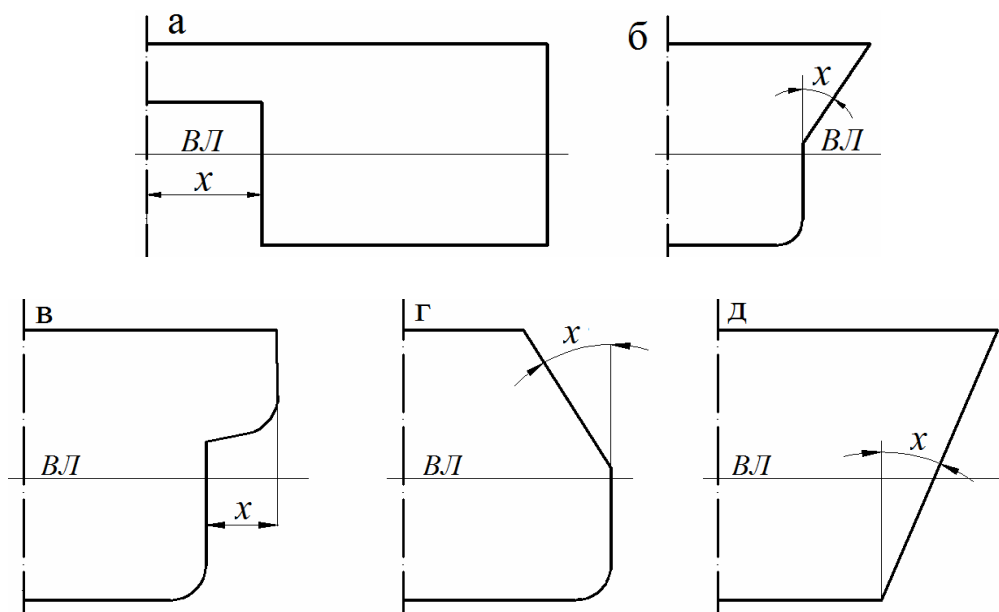


Рис. 3.15. Варианты корпусов судов

3.5. Моделирование продольной качки

Построение расчётной модели для анализа продольной качки судна на волнении в системе Flow-3D в целом не отличается от расчёта движения судна, рассмотренного в разделе 2.4.3. Отличие состоит только в том, что навстречу судну задаётся граничное условие с заданным волнением.

Рассмотрим некоторые особенности продольной качки, которые Вы можете исследовать путём самостоятельных численных экспериментов.

3.5.1. Особенности продольной качки в условиях шторма

При сильном шторме суда как правило стараются удерживать навстречу волнам, так как положения лагом и на попутных курсах опасны и могут привести к опрокидыванию.

Период килевой (как и вертикальной) качки существенно (часто в несколько раз) меньше периода бортовой качки. Так как на встречном волнении кажущиеся периоды волн уменьшаются, то можно заключить, что при курсе судна против волн его килевая и вертикальная качка могут находиться в резонансе с волнением. Однако вследствие того, что продольная качка имеет существенное демпфирование, её резонанс не проявляется так явно, как при поперечной качке.

На волнах, длина которых существенно больше длины судна, продольная качка судна происходит примерно так же, как показано на рис. 3.8 и 3.16, а: судно огибает профиль волн, его палуба остаётся примерно параллельной волновой поверхности. Такая качка происходит с амплитудами, определяемыми углами склона и высотами волн. Она имеет относительно плавный, умеренный характер и встречается обычно у небольших судов на пологих волнах.

Длина средних и крупных судов примерно соответствует длине основных волн в открытом море. В этом случае, если кажущийся период волн близок к собственному периоду килевой качки, амплитуды качки достигают наибольших значений (рис. 3.16, б). На волнах с меньшим периодом (или с увеличением скорости судна) двигаясь навстречу волнам, судно при ходе с вершины волны не успевает достичь наибольшего дифферента на нос и врежется в склон следующей волны. Такой режим килевой качки, как и резонансный, считается неблагоприятным, так как приводит к повышению ускорений и ударам волн в носовую оконечность (рис. 3.16, в).

С уменьшением длины (и периода) волн амплитуда килевой качки уменьшается. Уменьшаются также и гидростатические и гидродинамические нагрузки на судно. С увеличением скорости судна также уменьшается кажущийся период волн и амплитуда килевой качки, однако вертикальная качка, ускорения и гидродинамические силы при этом растут.

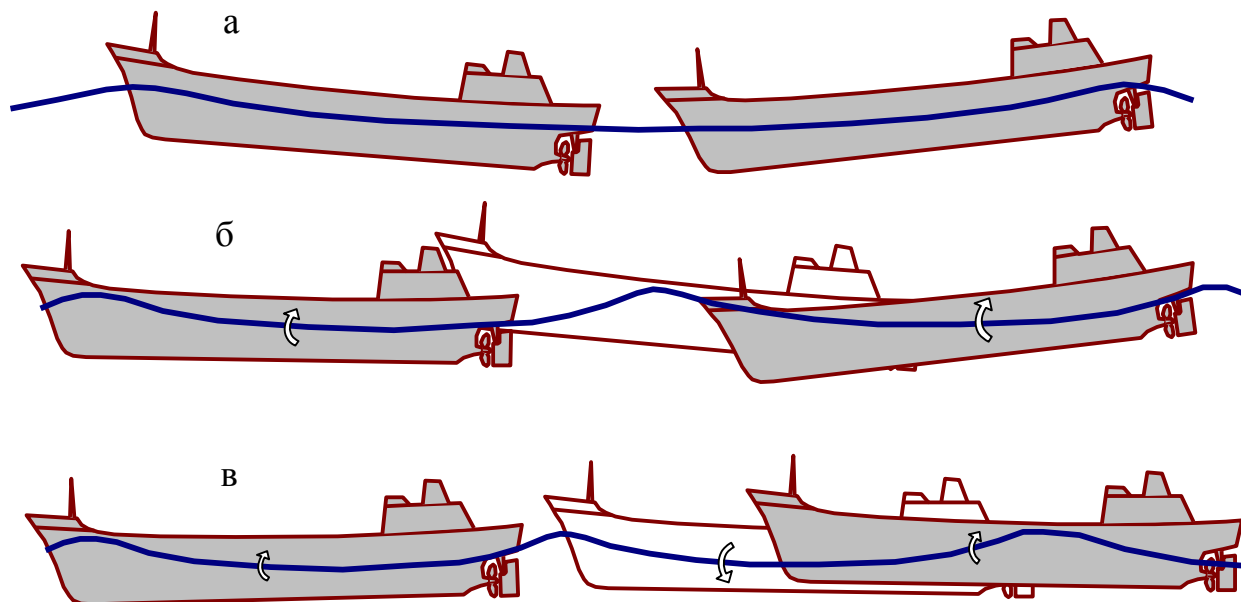


Рис. 3.16. Килевая качка:

а – на длинных волнах; б – на волнах средней длины (в районе резонанса);
в – на более коротких волнах

Продольная остойчивость типичного (вытянутого в длину) судна на порядок больше поперечной. Однако даже при малых углах дифферента судна вертикальные перемещения его оконечностей при килевой качке становятся большими. В результате на волнении возможны такие эффекты, как заливание или оголение оконечностей.

На продольную качку судна существенно влияет продольный момент инерции ватерлинии (МИВ), который определяется формой корпуса. Суда с малым МИВ (с острыми оконечностями) испытывают меньшие ускорения и перемещения при килевой качке. Наименьший МИВ имеют суда с малой площадью ватерлинии (СМПВ), что обеспечивает им высокую мореходность на волнении.

Во время качки МИВ является переменной величиной, особенно при наклонных бортах. При развале бортов в средней части обычно увеличивается амплитуда вертикальной качки, а существенный развал бортов в оконечностях способствует возрастанию килевой качки из-за увеличения гидродинамических нагрузок при входе оконечностей в волну (бортовой слеминг). При завале бортов на уровне ватерлинии уменьшаются гидродинамические нагрузки и, как следствие, уменьшается продольная качка. Суда, имеющие острую носовую оконечность с завалом борта, испытывают на встречных волнах небольшую килевую качку и малые ударные нагрузки в нос, что позволяет им двигаться с повышенной скоростью, «пронизывая» волны.

Килевая качка судна зависит также от продольного момента инерции масс. Вследствие вытянутости корпуса судна по длине его продольный радиус инерции и момент инерции масс имеют большие величины. В результате при килевой качке в оконечностях возникают большие вертикальные ускорения и динамические нагрузки на конструкции носа и кормы.

Особенно это характерно для большинства грузовых судов (с машинным отделением в корме) в балластном состоянии, когда для удифферентовки судна принимается балласт в носовые цистерны, то есть массы концентрируются к оконечностям.

Скорость судна на волнении всегда меньше, чем в тихую погоду, по следующим причинам:

- 1) растёт сопротивление движению судна в результате воздействия волн и ветра, а также от качки и рыскания судна на курсе;
- 2) снижается тяга гребных винтов, особенно в случае их работы «в разнос», когда они частично или полностью оголяются на подошвах волн;
- 3) ограничивается (либо автоматической системой, либо механиком) используемая мощность двигателей для его защиты от перегрузок при резких изменениях частоты вращения (при работе «в разнос»);
- 4) намеренно снижается скорость судна судоводителем при возникновении опасных для судна или груза ударов корпуса о волны (слеминг), заливания палубы и надстроек, чрезмерных ускорений при качке.

Для различных судов дополнительное сопротивление на волнении зависит от формы обводов, соотношения главных размерений и продольного распределения грузов. Определяющее влияние оказывают отношение ширины к длине B/L , коэффициент общей полноты и относительный продольный радиус инерции массы судна, увеличение которых приводит к росту дополнительного сопротивления. Дополнительное сопротивление относительно больше у судов с полными обводами.

Задача расчёта продольной качки судов на встречном волнении является комплексной и очень важной, так как она тесно связана с разными проблемами мореходности (ходкости, остойчивости, устойчивости на курсе и др.) и общей прочности судна.

Для обеспечения мореходности судна на встречном волнении наиболее важным является проектирование формы корпуса, так как существенное изменение распределения по длине судна проектной весовой нагрузки выполнить сложнее. Проблема проектирования оптимальной формы корпуса является чрезвычайно сложной и до сих пор не полностью исследованной. Часто оптимизация формы выполняется только из условий ходкости на тихой воде. В этом случае судно во время шторма может оказаться в опасных ситуациях.

Наибольшее воздействие штормовые волны оказывают на корпус судна выше ватерлинии, поэтому при проектировании судовых обводов рекомендуется подводную часть корпуса оптимизировать из условий ходкости на тихой воде, а надводную – из условий штормового плавания.

При выборе обводов судов из условий мореходности и прочности существуют две основных концепции [4]: 1) обеспечение «разбивания волн»; 2) обеспечение «прорезания волн» (рис. 3.17).

В первом случае судно делается с нависающим над водой форштевнем, развалом бортов в носу, высоким баком или седловатостью. Это позволяет обеспечить хорошую всхожесть на волну и уменьшить заливание палубы на встречных волнах. Вместе с тем, принимая на корпус энергию волн, судно испытывает большое дополнительное сопротивление движению, слеминг и, как правило, значительную продольную качку с большими величинами волнового изгибающего момента и вертикальных ускорений в оконечностях.

Во втором случае предусматривается малый МИВ за счёт заострения оконечностей, исключение развала бортов в носу, – вместо этого применяется борт с завалом в носу и иногда и по всей длине. В результате судно испытывает меньшее сопротивление встречным волнам, разрезая их. Уменьшается килевая качка и днищевой слеминг, исключается бортовой слеминг, уменьшается волновой изгибающий момент. Вместе с тем для такого судна увеличивается заливание палубы.

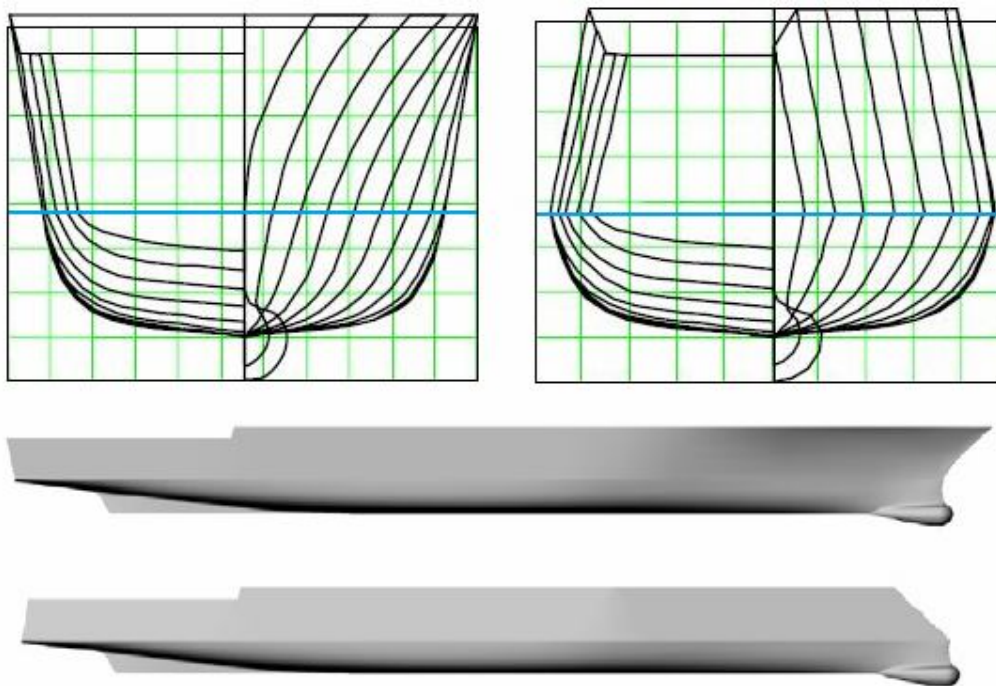


Рис. 3.17. Две концепции обеспечения мореходности корабля

3.5.2. Слеминг

Слемингом называется явление ударов волн в корпус судна. В зависимости от характера ударов выделяются разные виды слеминга.

Днищевой слеминг возникает в процессе продольной качки при оголении носовой оконечности и последующем хлопании о воду (рис. 3.18). Обычно это явление наблюдается при балластных переходах судов, когда осадка носом относительно небольшая. Днищевой слеминг чаще наблюдается у судов с полными обводами и плоским участком днища в носовой оконечности. Вот как описывает удар при слеминге один из моряков: «удар волны был как о подводную скалу, корпус прогнулся настолько, что лопнули натянутые на мачты антенны, вибрация продолжалась около полминуты».

Особенности днищевого слеминга как физического явления определяются в основном совместным выполнением двух условий: 1) оголением днища; 2) входом днища в воду с вертикальной скоростью относительно воды, большей некоторого «порогового» значения. Величина «пороговой» скорости имеет большой разброс, обусловленный случайным характером волнения и качки судна, особенностями формы носовой оконечности, размерами судна, параметрами качки и пр. Ориентировочно она составляет 2 – 4 м/с. Длительность удара составляет доли секунды (обычно менее 0,2 с). Наибольшие давления при днищевом слеминге могут достигать 2 МПа.

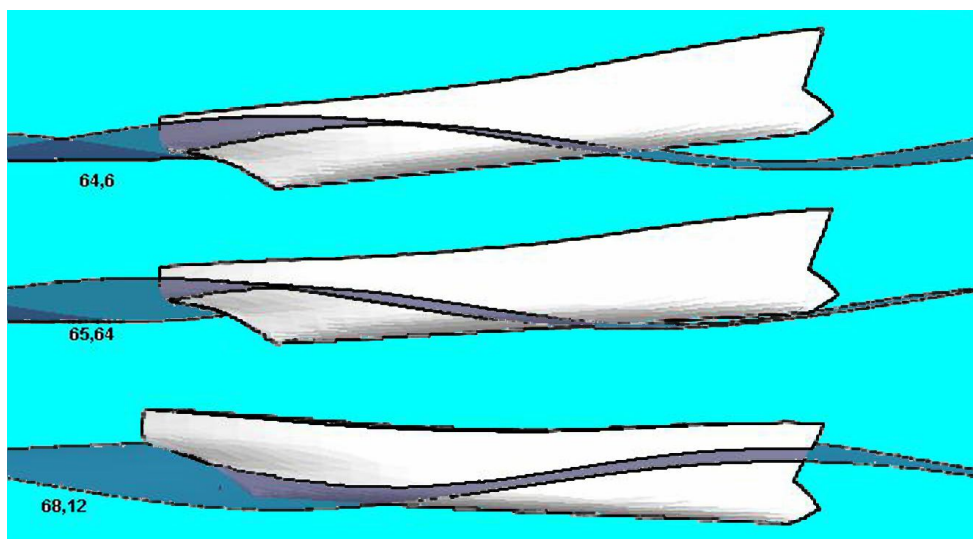


Рис. 3.18. Продольная качка судна с днищевым слемингом

Вероятность опасных ударов при слеминге тем больше, чем больше высота волн и скорость судна. Наблюдаются они на встречном волнении в широком диапазоне курсовых углов. Исключить днищевой слеминг можно снижением скорости судна или увеличением осадки носом.

Бортовой слеминг (или випинг) представляет собой удар о волну наклонными участками борта в носовой оконечности. Он характерен для быстроходных судов с малой полнотой и существенным развалом борта в носовой оконечности. Продолжительность действия нарастающих динамических нагрузок существенно больше, чем при ударе днищем и составляет около 1 с. Наибольшие давления при бортовом слеминге могут достигать 500 кПа и более (рис. 3.19).

При проектировании судна снизить давления и силы удара от бортового слеминга можно путём рационального выбора формы надводной части носовой оконечности, главным образом за счёт уменьшения развала бортов в носу или применяя завал бортов (рис. 3.17).



Рис. 3.19. Бортной слеминг

Непосредственное численное моделирование качки со слемингом представляет огромные проблемы, связанные с тем, что: 1) достоверное определение давлений, быстро изменяющихся во времени, требует применения пространственной модели и очень мелкой расчётной сетки; 2) положение места удара изменяется, поэтому практически очень сложно использовать сгущение сетки в этой области; 3) при днищевом слеминге требуется использовать другую физическую модель, с учётом сжимаемости воды и наличия воздуха.

Поэтому задача качки судна со слемингом решается обычно с разделением её на две разные задачи. Вначале решается задача качки, в которой определяются условия удара о воду. В этой задаче ударные давления вычисляются обычно с большой погрешностью. На втором этапе решается задача об ударе о воду при начальных и граничных условиях, приближённо определённых из решения задачи о качке. Расчётная область ограничивается только местом удара.

При моделировании слеминга центральное место занимает вторая задача – о падении тела на воду. Процесс взаимодействия падающего тела с жидкостью можно представить двумя предельно различными физическими моделями. В первой модели тело имеет практически плоское днище и движение происходит по нормали к днищу и невозмущённой свободной поверхности (плоский удар). Вторая модель соответствует случаю падения тела с килеватым днищем или наклонными бортами, когда контакт тела со свободной поверхностью жидкости происходит под углом.

4. ГИДРОДИНАМИКА МОРСКИХ СООРУЖЕНИЙ

4.1. Взаимодействие волн с берегом

Рассмотрим строение волн на подходе к берегу. Различают четыре зоны трансформации волн по глубине водоема (рис. 4.1).

Первая зона – глубоководная с глубиной $H_1 > 0,5 \lambda$, где дно в этой зоне практически не влияет на форму и размеры волн.

Вторая зона – мелководная с глубиной $0,5\lambda > H_2 > H_{кр}$; где дно водоема начинает оказывать влияние на волновое движение воды. В этой зоне трехмерные волны под влиянием дна преобразуются в двухмерные. Критическая глубина $H_{кр}$ по разным оценкам связана с высотой прибойной волны h_3 соотношением: $H_{кр} \approx (1,1 \div 1,3) h_3$.

Третья зона – зона прибойных волн с глубинами $H_3 \leq H_{кр}$, в пределах которой начинается и завершается разрушение волн. В области критических глубин ($H \approx H_{кр}$) крутизна волны достигает предельной величины, происходит опрокидывание гребня волны с образованием буруна. Вторая и третья зоны в некоторых случаях могут располагаться вдали от берега – в области повышения дна.

Четвертая зона – приурезная, в которой происходит окончательное разрушение волны и образование наката прибойного потока на берег (откос).

Различают три типа разрушения волн при подходе к берегу в зависимости от параметра ξ :

$$\xi = \frac{s}{\sqrt{h/\lambda}},$$

где s – крутизна откоса дна; h/λ – крутизны волны на глубине (рис. 4.2, 4.3):

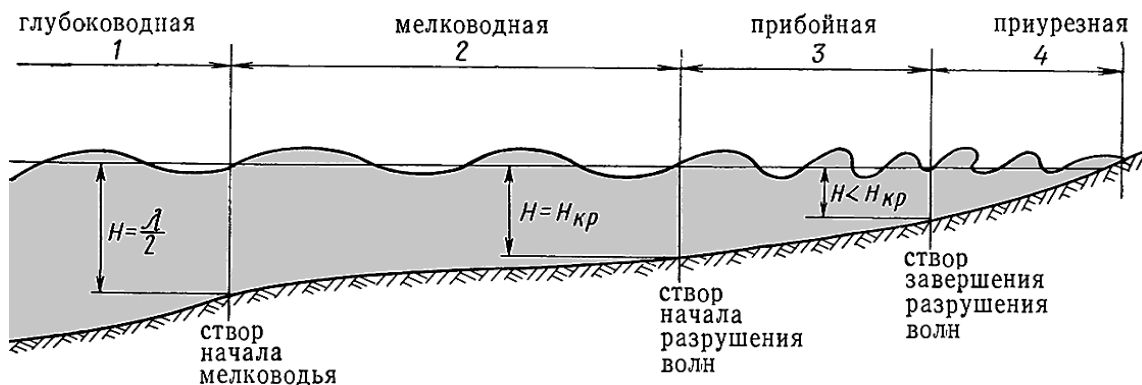


Рис. 4.1. Схема волнения при подходе к берегу

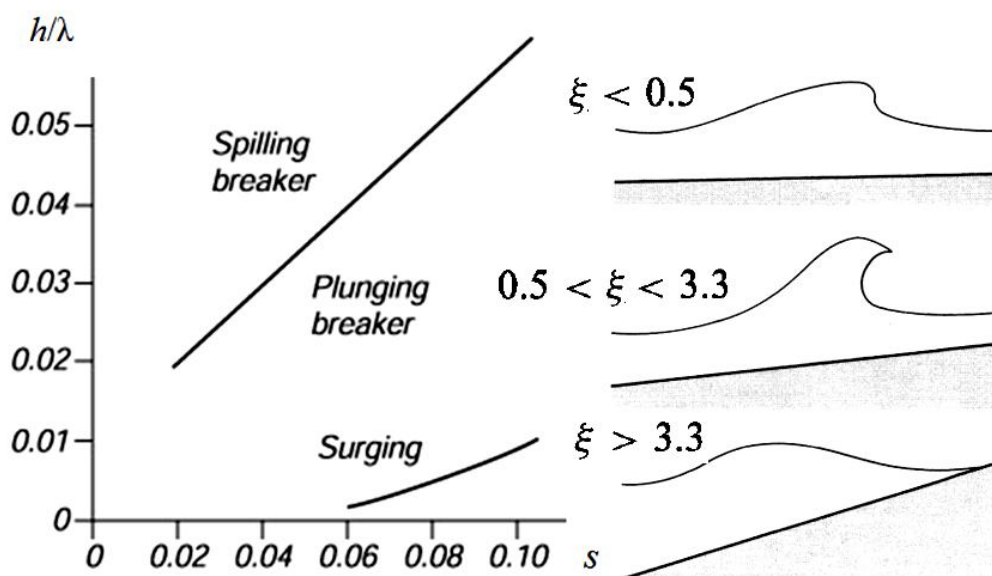


Рис. 4.2. Классификация разрушающихся волн

- spilling breaker (скользящий бурун) – «растекание», «соскальзывание» крутых волн на пологой отмели с постепенной потерей энергии на трение о дно, при котором крутизна переднего склона увеличивается (рис. 4.3, а);

- plunging breaker (ныряющий бурун) – у менее крутых волн на отмели средней крутизны подошва волны тормозится интенсивнее, в результате чего гребень движется быстрее, высота его резко увеличивается, а передний склон нависает над подошвой и обрушивается, «ныряет» сверху вниз (прибой) (рис. 4.3, б);

- surging breaker – пологие волны на крутом откосе образуют «взброс» в виде подъема уровня за счёт отраженных от берега волн. Поскольку трение о дно в данном случае минимальное, волны замедляются меньше и обрушиваются на берег с большей силой. Наибольший взброс образуется на вертикальной стенке при полном отражении и образовании стоячих волн (рис. 4.3, в).

При рассмотрении взаимодействия волн с вертикальной стенкой различают четыре основных типа волнения: стоячие волны, волны переходного типа от стоячих к разбитым, разбитые волны и прибойные волны.

Если волны подходят к сооружениям фронтально, то при достаточно большой глубине ($H > 0,5 \lambda$) у стенки вследствие интерференции прямой и отраженной волны образуется стоячая волна. При этом высота стоячей волны оказывается равной двукратной высоте подходящей волны.

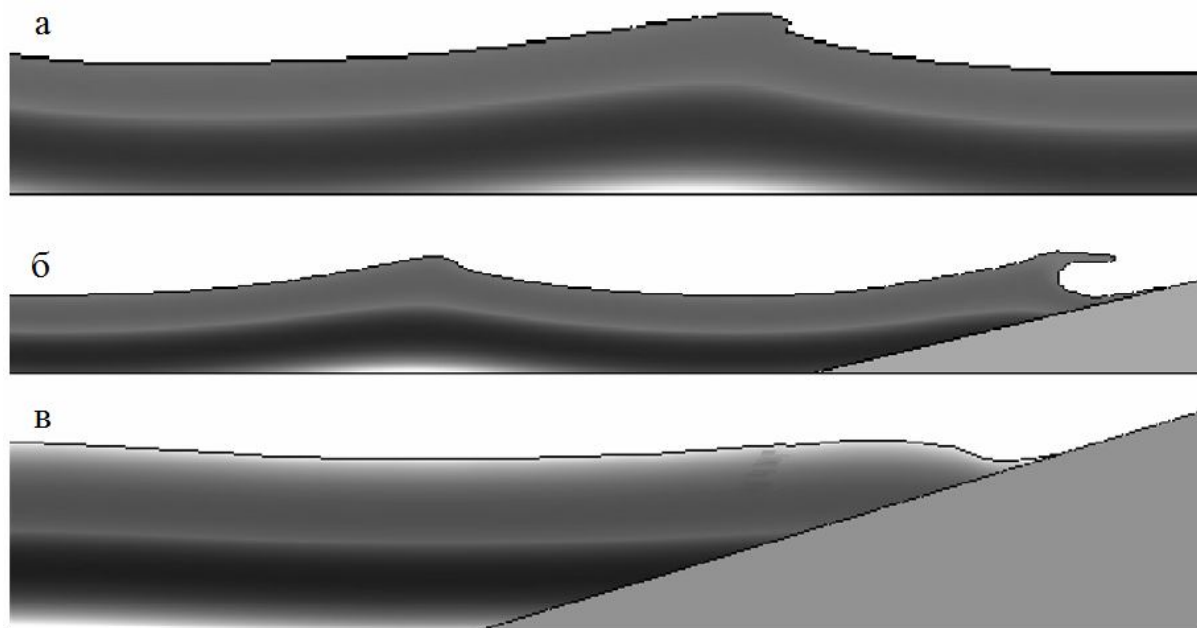


Рис. 4.3. Примеры моделирования разрушающихся волн:
 а – spilling breaker; б – plunging breaker; в – surging breaker

При переходном режиме (на глубине ($H_{кр} < H < 0,5 \lambda$) узлы и пучности волн горизонтально перемещаются (в отличие от стоячих волн). По мере уменьшения глубины над основанием стенки (бермой) H_6 горизонтальные составляющие скорости возрастают. В результате высота взброса волн на стенку значительно больше, чем при стоячих волнах (высота гребня значительно выше впадины). Такое явление наблюдается до глубины над бермой $H_6 = 1,25 h$. При дальнейшем уменьшении глубины H_6 гребни волн в пучностях поднимаются выше, воздействие волн на стену сопровождается всплесками с разрушением и отрывом гребня.

Наконец, при глубине $H_6 = 0,7h$ происходит удар разбитых волн о стенку с характерным хлопком (рис. 4.4). При этом пик давления достигает 1–2 МПа, а время нарастания давления уменьшается до 0,005 с.

При воздействии на вертикальную стенку прибойной волны $H_6 < 0,7h$ давление носит, как и в случае разбитых волн, динамический характер, однако интенсивность его оказывается меньше (до 200–400 кПа), а время действия больше (около 0,05 с). Это объясняется демпфирующим действием пузырьков воздуха в разрушенном гребне прибойной волны.

Характер изменения наибольшего давления при различных типах воздействия волн на стенку приведён на рис. 4.5.

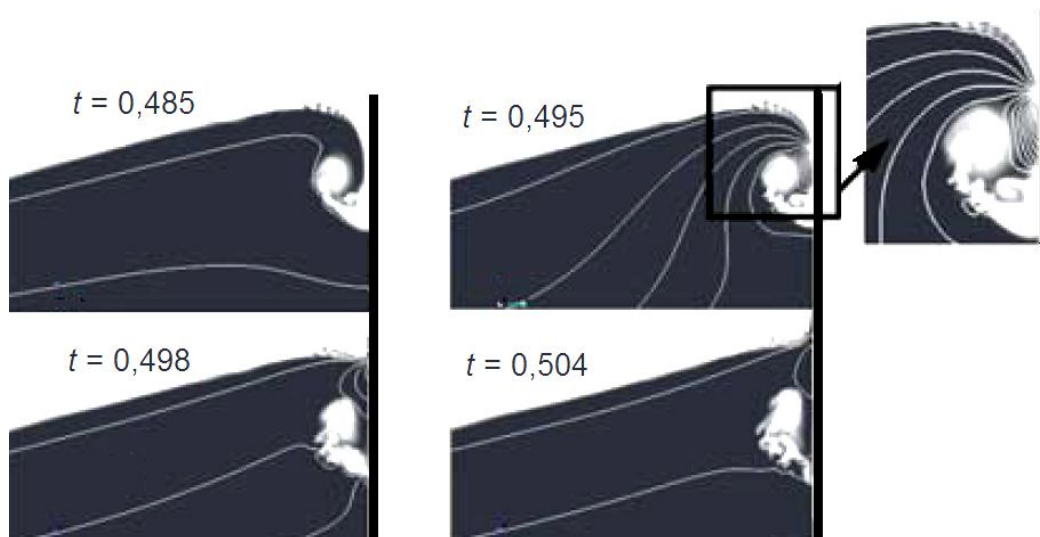


Рис. 4.4. Удар о стенку разбитой волны с хлопком

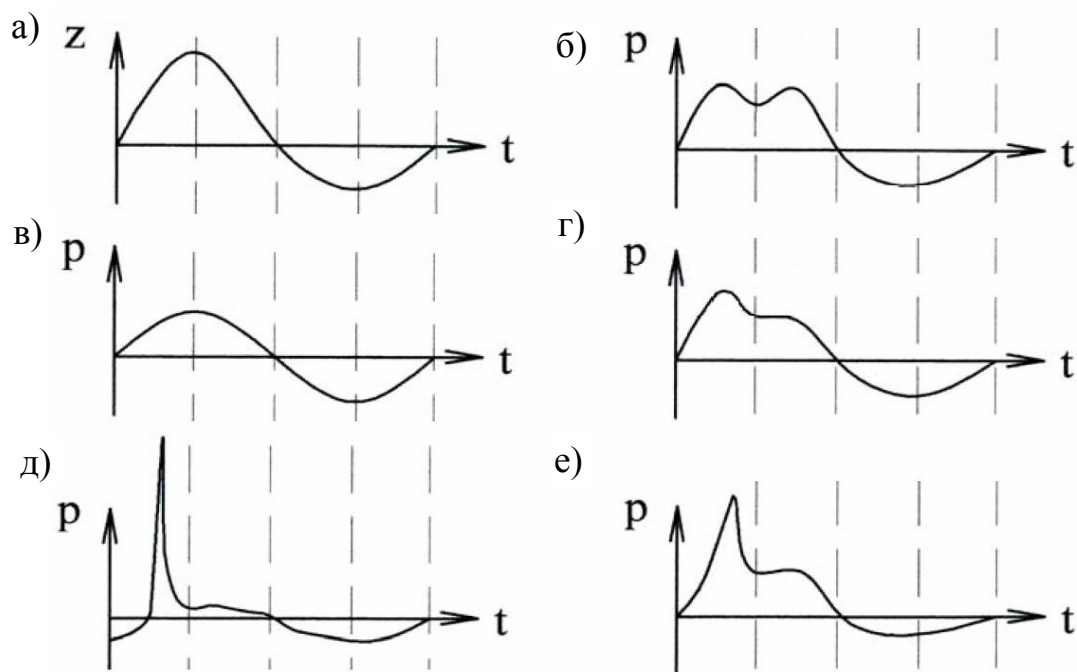


Рис. 4.5. Характер изменения наибольшего давления при различных типах волновых нагрузок на стенку:
 а – характер изменения уровня воды перед стенкой;
 б – стоячая волна при $H > H_{кр}$ и $H_0 > 2h$;
 в – стоячая волна при $H > H_{кр}$ и $H_0 \approx 2h$;
 г – переходный тип при $H > H_{кр}$ и $H_0 < 2h$;
 д – разбитая волна при $H > H_{кр}$ и $H_0 = 0,7h$;
 е – прибойная волна при $H < H_{кр}$

4.2. Преобразователи энергии волн

Морские волны накапливают в себе энергию ветра на значительном пространстве разгона, являясь, таким образом, концентратом энергии. Они обладают более высокой по сравнению с ветром и солнцем плотностью энергии. Удельные мощности волновой энергии у океанского побережья умеренных широт составляет от 30 до 70 кВт/м.

Традиционными являются проблемы уменьшения вредного влияния волн, в частности: успокоение качки судов с помощью скуловых килей, успокоительных цистерн и др. устройств; защита от волн морских и береговых сооружений с помощью волноломов, волногасителей и пр. Однако очевидно более полезным было бы использовать энергию волн на пользу.

Энергия одной волны высотой h и длиной λ на один метр фронта волны определяется в виде:

$$E = \rho g h^2 \lambda / 8.$$

Первые патенты и действующие устройства для использования энергии волн появились в начале XX века: в 1910 г. вблизи г. Бордо демонстрировалась волновая установка мощностью 1 кВт.

В 1935 г. К. Э. Циолковский опубликовал статью «Волнолом и извлечение энергии из морских волн», в которой описал принципиальные схемы трех устройств – аналогов будущих наиболее известных устройств Масуды, Кайзера и Коккерелла.

В настоящее время существует несколько сотен оригинальных технических решений волновых энергетических систем. Имеются примеры использования энергии волн для движения судов. Построено несколько опытно-промышленных волновых электростанций в Великобритании, Норвегии, Исландии, Японии и др. странах. В мире уже около 400 маяков и навигационных буйев получают питание от волновых установок.

Попутно волновые станции могут быть использованы в качестве волноломов и рейдовых причалов, для защиты акваторий портов и сооружений морских промыслов.

В основе изучения волновых энергетических систем лежит анализ гидродинамики их основных рабочих органов – преобразователей энергии волн. Рассмотрим преобразователи энергии волн двух типов [8]:

– Oscillating Wave Surge Converter (OWSC) – система с элементами в виде створок на шарнирах, раскачивающихся от поступательного движения волн;

– Overtopping Wave Energy Converter (OWEC) – система с бассейном, заполняемым путём перелива гребней волн через край. В результате в бассейне образуется повышение уровня воды, которое используется для привода в действие гидротурбины.

4.2.1. Преобразователи типа OWSC

Примером волновых электростанций с преобразователями типа OWSC являются установки «Oyster» компании «Aquamarine Power» (рис. 4.6), расположенные у берегов Великобритании.

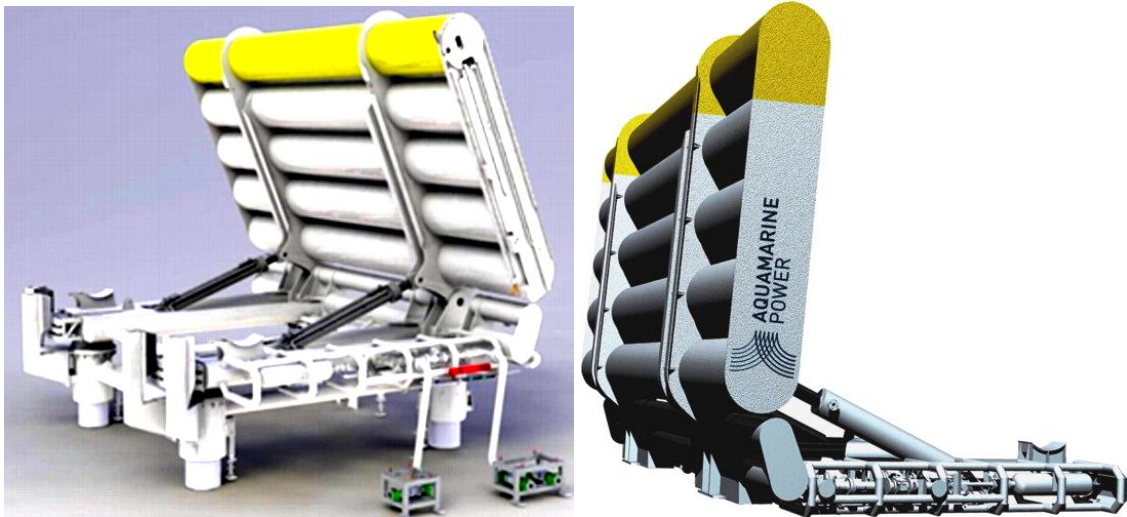


Рис. 4.6. Преобразователь энергии волн «Oyster»

Основным элементом преобразователя «Oyster» является раскачивающаяся от воздействия волн створка, состоящая из цилиндрических поплавков и шарнирно закреплённая на фундаменте. Движение створки передаётся на устройство отбора мощности – поршневой насос. Насос подаёт воду по трубопроводу на турбину, связанную с электрогенератором.

Выполним в системе Flow-3D расчёт преобразователя типа OWSC, расчётная модель которого представлена на рис. 4.7 (приблизённо фундамент не учитываем, считая его сквозной свайной конструкцией).

Начнём новый расчёт (New simulation). На вкладке General настроим: Finish Time = 30 с; Interface tracking → Free surface or sharp interface; Flow mode → incompressible; Number of fluids → One fluid; Simulation units → SI. Размерности всех параметров будем определять в системе СИ.

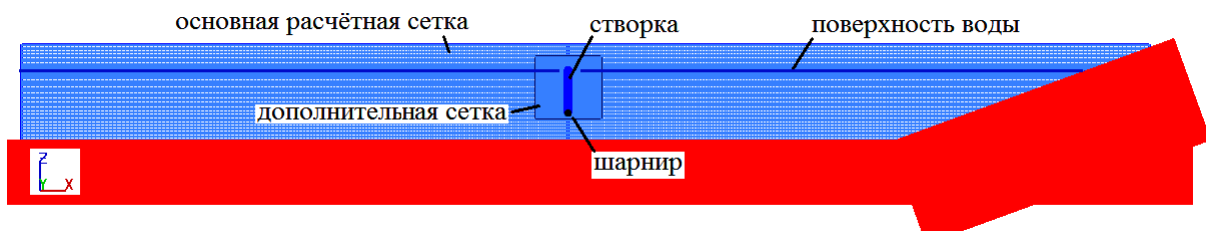


Рис. 4.7. Расчётная модель преобразователя типа OWSC

На вкладке **Physics** выбираем опции:

- Gravity → Z component = -9.8 (ускорение свободного падения);
- Moving and simple deforming options → **Activate general moving objects (GMO) model** (включаем опцию движущихся тел), **Moving object/fluid coupling** → **Implicit** (неявная схема расчёта взаимодействия тела и жидкости).

На вкладке **Fluids** определяем свойства жидкости: в главном меню находим: **Materials** → **Fluids Database** → в списке жидкостей из базы данных находим: **Water at 293K** → **Load Fluid 1** → **OK** → **OK** → **Close**.

Перейдем на вкладку **Meshing & Geometry**. Создайте блок расчётной области: в строке дерева свойств **Mesh – Cartesian** щёлкните правой кнопкой мыши и выберите **Add a mesh block**. Отредактируйте размеры расчётной сетки (см. рис. 4.8):

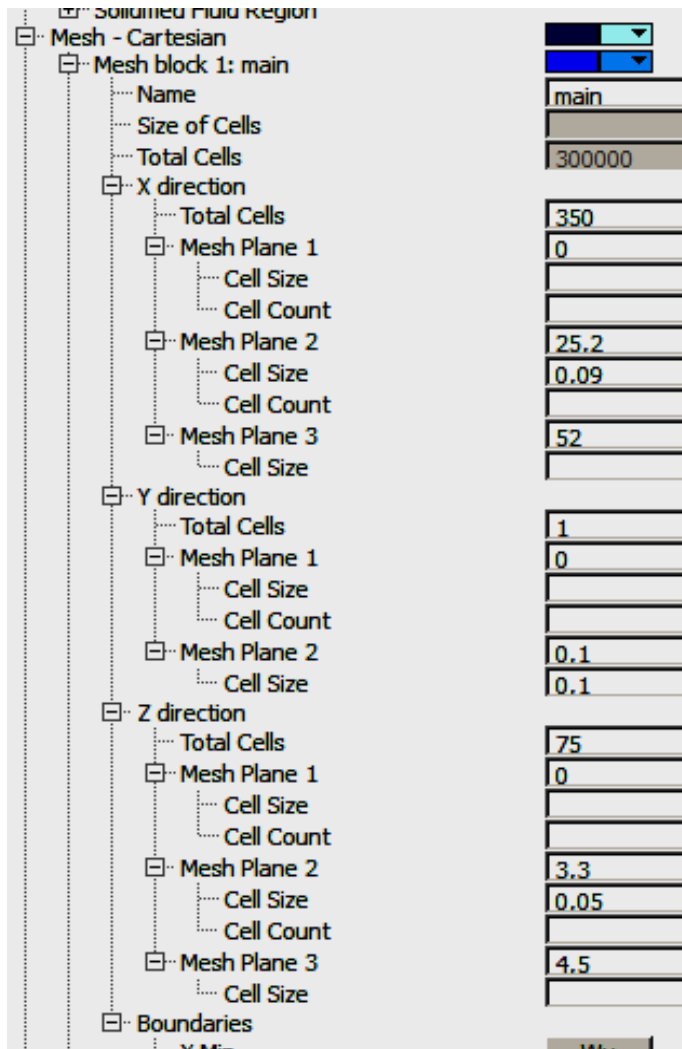


Рис. 4.8. Ввод параметров расчётной сетки

Здесь задаются:

- имя блока (**Name: main**);
- координаты плоскостей сетки (**Mesh Plane**);
- число ячеек сетки (общее – **Total cells** – для всей сетки и/или по координатам);
- размер ячейки (**Cell Size**).

Для того, чтобы повысить точность, в районе створки и у ватерлинии сгустим сетку. Для этого введем дополнительные плоскости – щёлкнем правой кнопкой мыши на строке **Mesh Plane** и выберем **Add**. Затем задаём координату новой плоскости (**New mesh plane**).

Так как рассматриваем плоскую задачу (по оси **Y** течения нет), то по оси **Y** задаем только одну ячейку.

Далее задайте граничные условия (раздел **Boundaries**):

- **X min**: выберете тип: волны (**Wave**); уровень воды (**Fluid elevation**) = 3.2 м; тип волн (**Wave Definition** →

Stokes (Fenton's 5th-order...)); параметры волн для модели Стокса (кнопка Definition): высота волны (Wave height) = 0.5 м; средняя глубина (Mean fluid depth) = 3 м; период (Wave period) = 2.5 с.

Остальные граничные условия:

– X max: Continuable (продолжение); Y min и Y max: Symmetry; Z min: Wall (стенка, дно); Z max: Continuable.

Для повышения точности расчёта в районе движения створки, зададим дополнительную местную сетку (рис. 4.9). Для этого в строке Mesh – Cartesian щёлкните правой кнопкой мыши и выберите Add a mesh block (рис. 4.10).

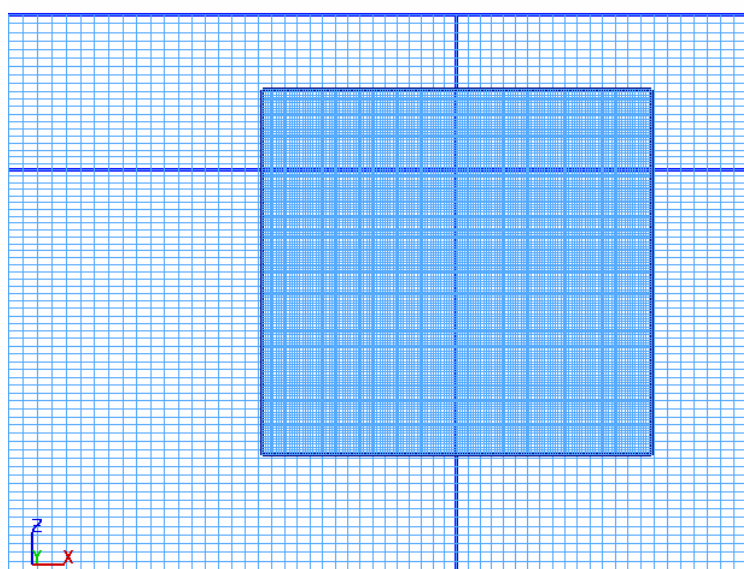




Рис. 4.9. Дополнительная сетка

Задайте параметры этой сетки, а также граничные условия, как показано на рисунке 4.10 (W – Wall; S – Symmetry).

Установим створку преобразователя в виде параллелепипеда – бокса (Box). Для этого нажмите кнопку  на панели управления графическим окном. В появившемся окне Add box subcomponent введите имя flap и размеры створки (рис. 4.11). Затем нажмите ОК, в новом окне введите имя компонента – flap.

Сделаем скругление вверху створки. Для этого к компоненту flap добавим новый субкомпонент  – цилиндр пок (рис. 4.12).

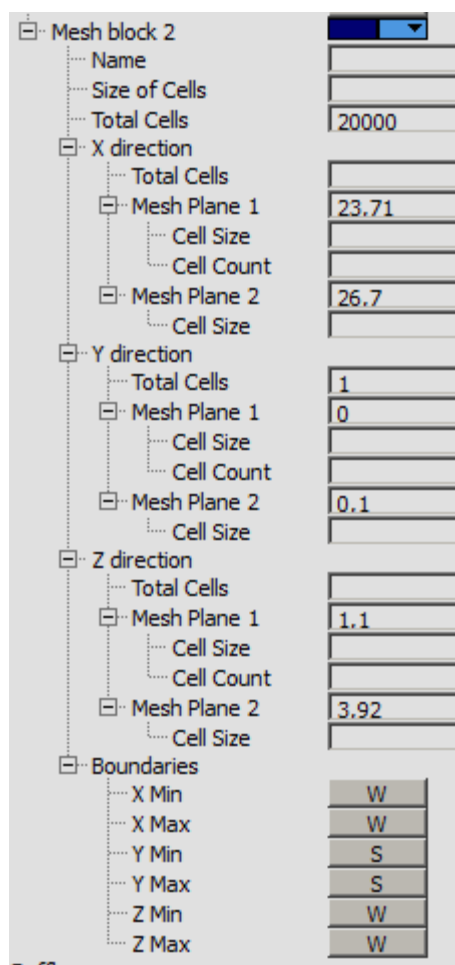


Рис. 4.10. Ввод параметров дополнительной сетки

После введения компонента и субкомпонентов в окне свойств модели появляются соответствующие строки (рис. 4.13), разворачивая которые можно задать или переопределить свойства:

- **Enabled** – включить (отключить);
- **Limiters** – размеры;
- **Transformations** – изменения положения и размеров;
- **Magnifications** – изменение масштаба;
- **Rotations** – повороты;
- **Translations** – перемещения.

Поставим цилиндр **нок** в нужное место и повернём. Для этого в списке свойств задайте поворот **Rotations** и перемещение **Translations**, как на рис. 4.13. Для визуального контроля положения в графическом окне используйте кнопки управления видами.

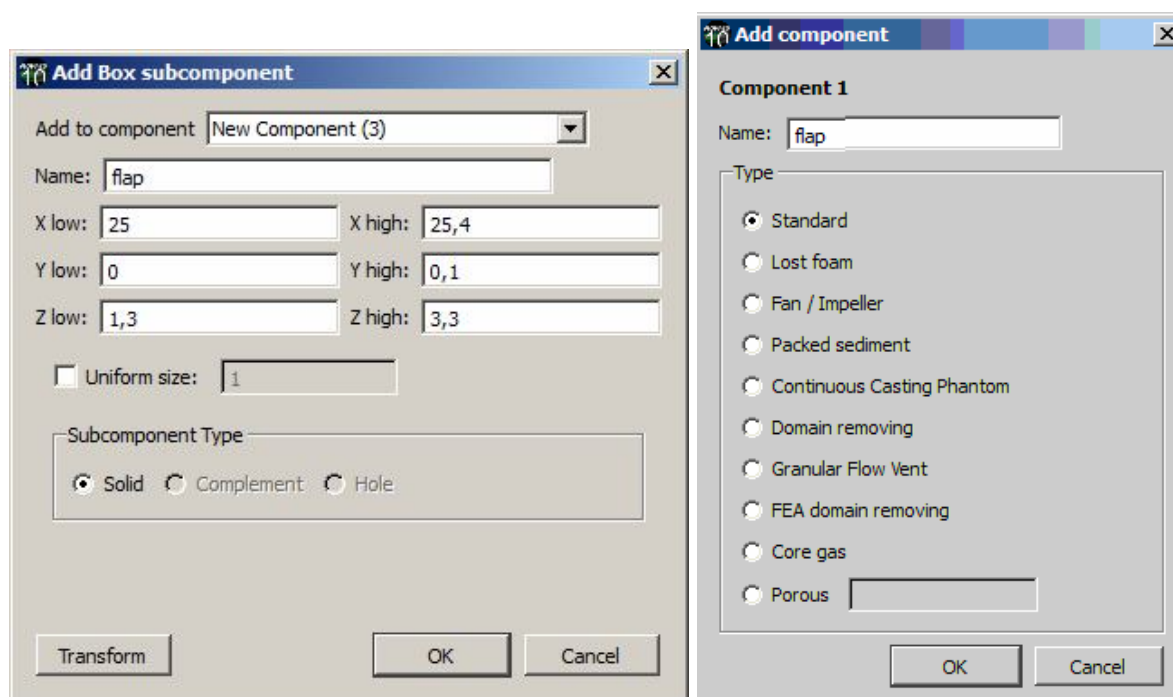


Рис. 4.11. Задание субкомпонента и компонента

Добавим аналогично компонент **bottom** и его субкомпоненты **bottom** (дно) и **bereg** (рис. 4.14).

В результате получится модель, изображённая на рис. 4.7. Выступающие за сетку части неподвижных компонентов не имеют значения – они просто не учитываются в расчёте.

Зададим параметры движения створки. Раскройте в списке свойств для компонента **flap** (Component 1) строку **Component properties**. Задайте **Type of Moving Object** → **Coupled Motion**. Нажмите кнопку **Edit**.

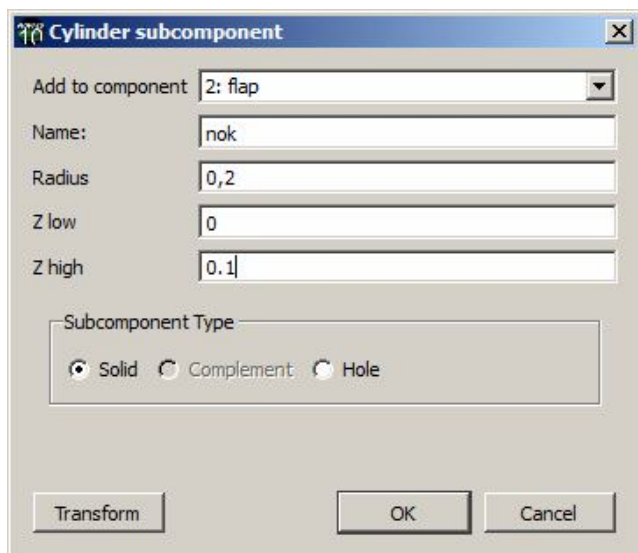


Рис. 4.12. Задание субкомпонента nok

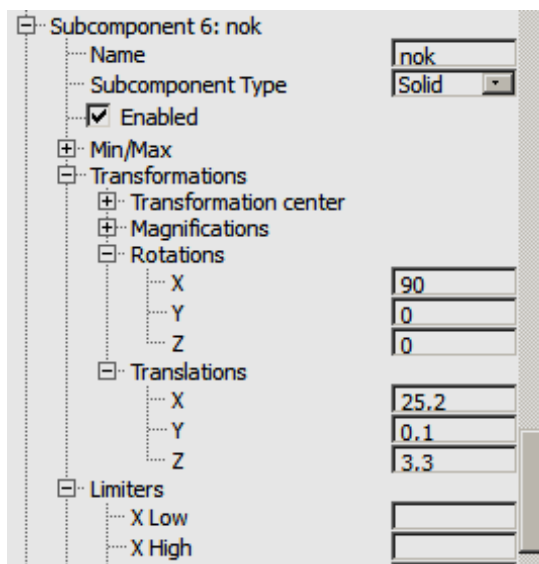


Рис. 4.13. Свойства субкомпонента nok

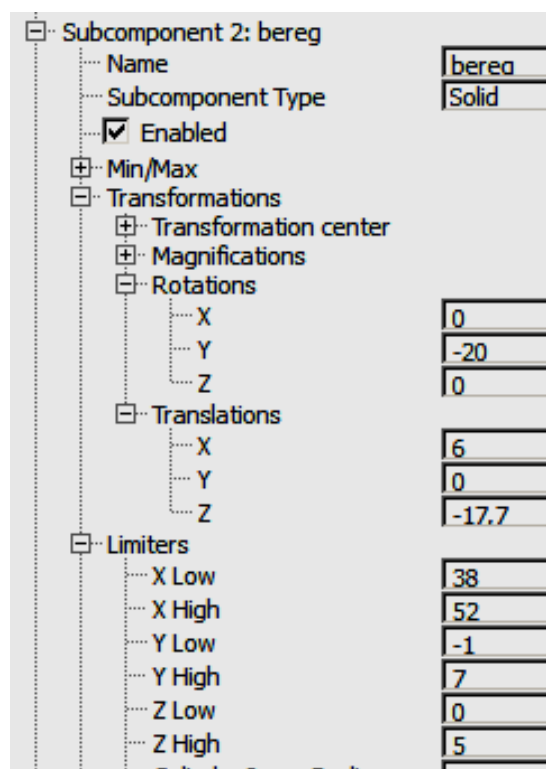
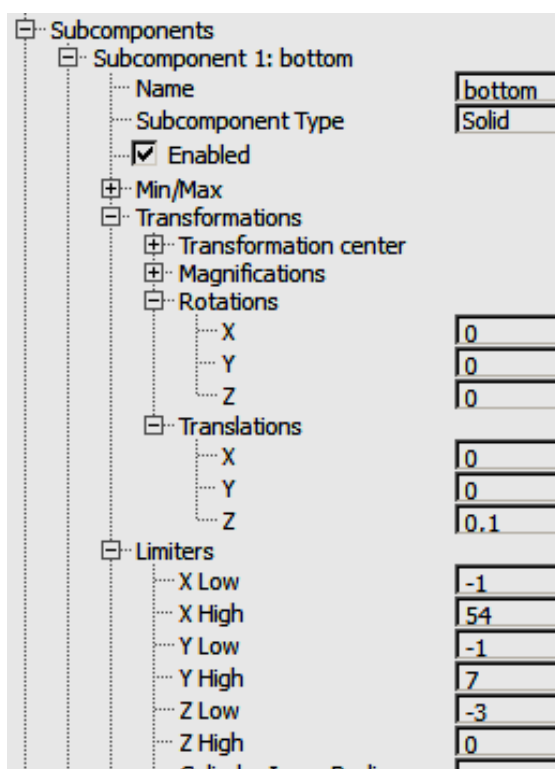


Рис. 4.14. Свойства субкомпонентов bottom и bereg

Установите параметры на нескольких страницах формы:

- Motion Constraints (рис. 4.15);
- Mass Properties: в списке выберите Define Density (считая створку однородной, её массу задаём через осредненную плотность); Mass density = 300 кг/м^3 ;

- Initial/Prescribed Velocities: Y Initial Angular velocity (начальная угловая скорость) = 0 рад/с.

Последнюю страницу (где задаются внешние силы) пропускаем, так как силы на створку определяются волнением. Закрываем форму (ОК).

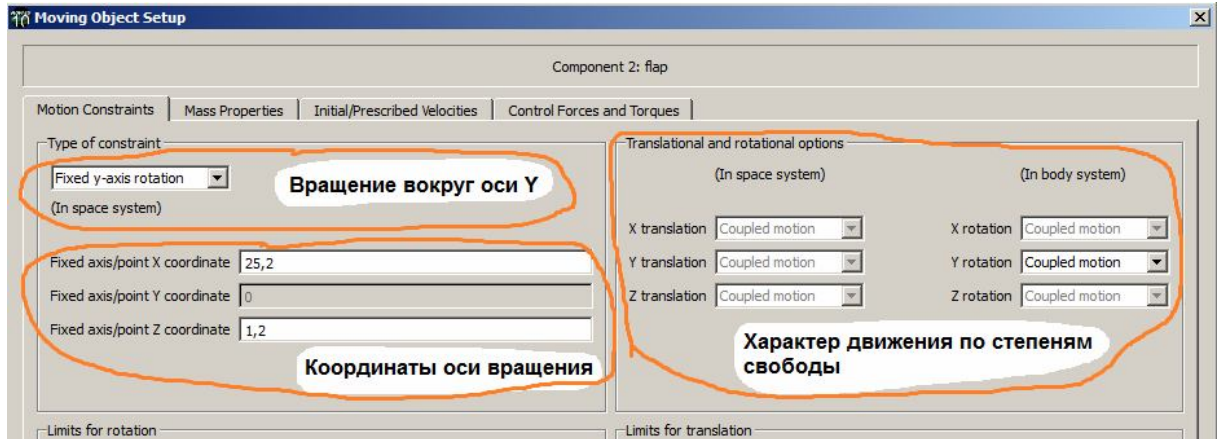


Рис. 4.15. Параметры движения и закрепления компонента flap

Для вычисления гидродинамических сил на створку необходимо в списке свойств Component 1 → Component properties → Output отметить свойство Pressure and Shear Force Output.

Теперь зададим параметры в разделе Initial – начальные условия (рис. 4.16). Начальное давление: гидростатическое по оси Z. Начальное движение жидкости (Fluid Initialization) – определяется граничным условием с заданным волнением (Use wave boundary) Xmin для первого блока сетки: 1 main.

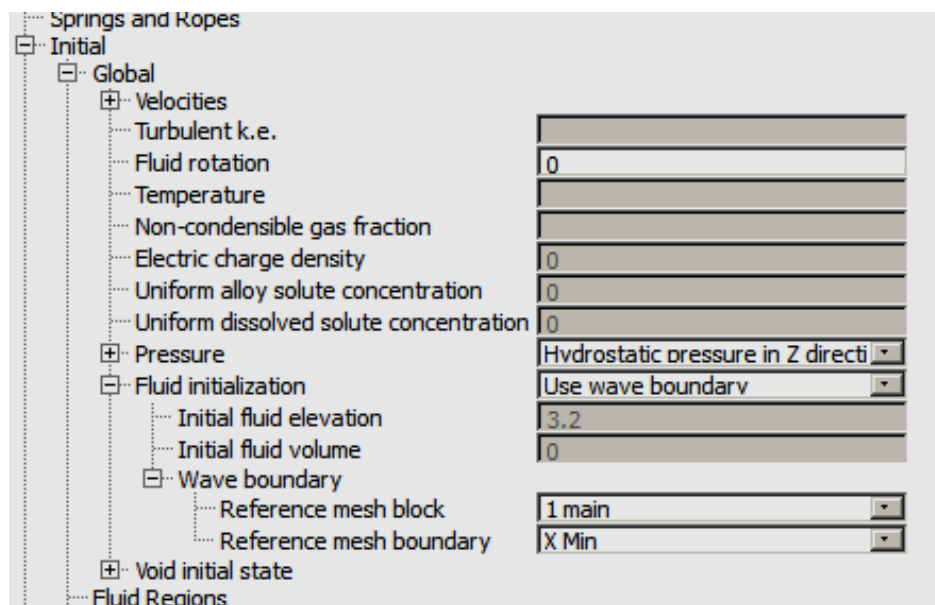


Рис. 4.16. Начальные условия

Далее перейдите на вкладку Output и задайте интервал времени между кадрами 0.2 с в полях Restart data interval, History data interval, Short print interval, Long print interval, Selected data interval.

Описание этапов проведения расчёта и анализа результатов изложено в предыдущих главах. На рис. 4.17 показан один из кадров движения волн и створки с полем давлений.

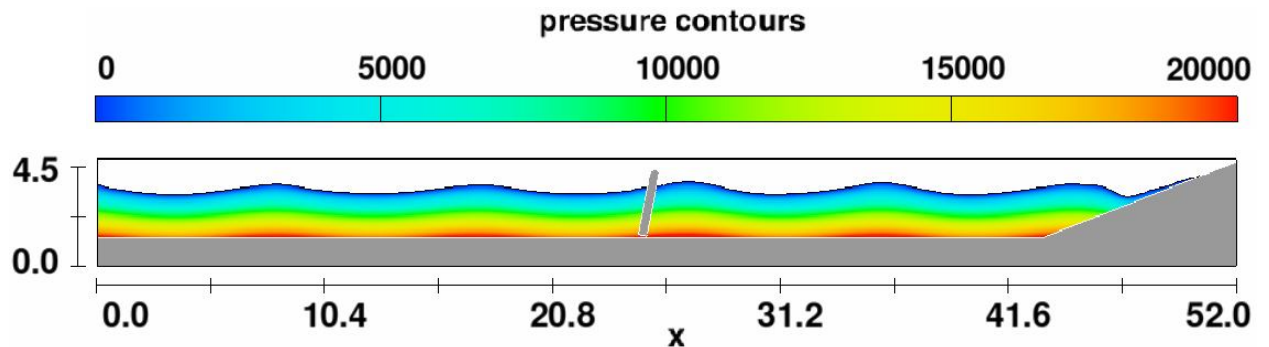


Рис. 4.17. Результаты расчётов: поле давлений

В рассмотренном примере створка свободно качается, сопротивляясь движению волн только за счёт своей плавучести. Такая модель не позволяет получить энергию, которую можно полезно использовать.

Если применить гидравлическое устройство отбора мощности (насос), то его можно учесть в модели. Например, на рис. 4.18 часть створки ниже шарнира играет роль поворачивающейся лопасти, формирующей переменные потоки воды в каналах. Эти потоки можно преобразовать в постоянное течение в одном направлении с помощью системы отводящих каналов (труб) с клапанами (подобно тому, как переменный электрический ток преобразуется в постоянный с помощью диодного моста). Далее энергию потока можно направить на турбину с генератором электрического тока.

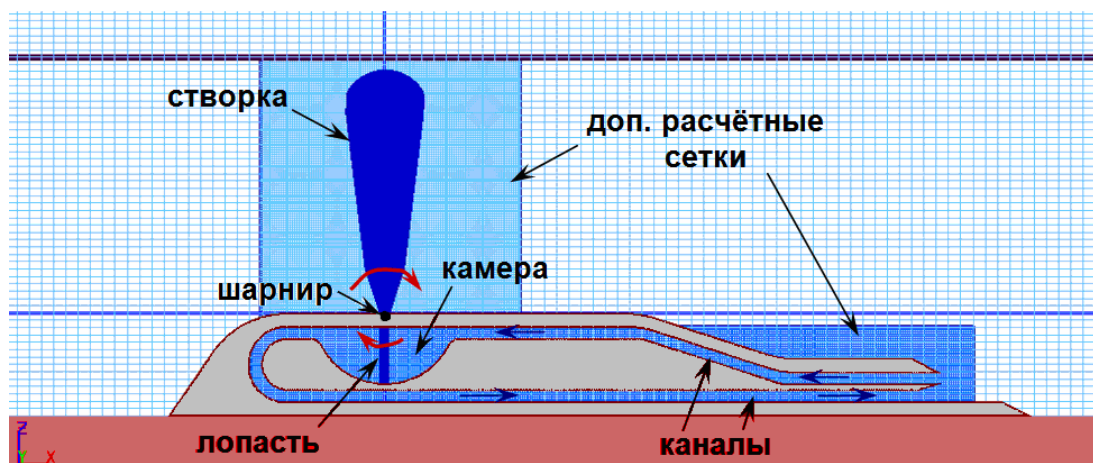


Рис. 4.18. Модель преобразователя OWSC с устройством отбора мощности

Выходная мощность преобразователя энергии может быть вычислена по формуле:

$$N = Q \Delta p ,$$

где $Q = v \cdot S$ – расход воды через каналы, $v(t)$ – скорость течения, S – площадь сечения, $\Delta p = p - p_{st}$ – разность между фактическим давлением в канале $p(t)$ и гидростатическим давлением p_{st} (напор воды).

Выходная энергия:

$$E = \int_0^T N dt .$$

Так как течение в каналах переменное, то выходную энергию за промежуток времени T следует определять путём численного интегрирования мощности. Для этого следует получить зависимости $v(t)$ и $p(t)$ в каналах. Это можно сделать по результатам расчётов следующим образом.

Перейдите на страницу **Analyze** → **Probe**. В разделе **Data variables** выберите строки **pressure** и **x-velocity**. В разделе **Data point** ползунками настройте координаты точки в канале. Если нужная точка находится в дополнительной сетке, то предварительно нужно выбрать эту сетку, нажав кнопку **Mesh block**. Для просмотра графиков скорости и давления в разделе **Output form** выберите опцию **Graphical**, а для получения таблицы значений выберите **Text**.

4.2.2. Преобразователи типа OWEC

Принцип действия преобразователя типа OWEC представлен на рис. 4.19. Основу его представляет резервуар. Волны, переливаясь через фронтальную стенку, заполняют резервуар. В задней стенке имеются отверстия, через которые, при образовании напора воды Δh , образуется поток, приводящий в действие низконапорную турбину с генератором электрического тока. Такие конструкции могут размещаться последовательно вдоль линии берега.

Поступление воды в резервуар при переливе через верхнюю кромку можно оценить с помощью классического уравнения для плотины

$$Q_1 = mL \sqrt{2g} h_1^{1,5} ,$$

где m – коэффициент расхода, L – длина фронта, $h_1 = r - R_c$ – напор, равный возвышению гребня над верхней кромкой (рис. 4.19), r – амплитуда волн. Коэффициент расхода в первом приближении можно принять равным $2/3$.

Расход воды через отверстие (сопло) турбины теоретически равен

$$Q_2 = \mu S_0 \sqrt{2g \Delta h} ,$$

где μ – коэффициент расхода, S_0 – площадь отверстия. Коэффициент расхода при числе Рейнольдса $Re_h > 10^5$ можно принять равным $0,6$.

Изменение уровня воды в резервуаре можно оценить по формуле

$$\frac{dz}{dt} = \frac{S}{Q_1 - Q_2},$$

где S – площадь свободной поверхности воды в резервуаре.

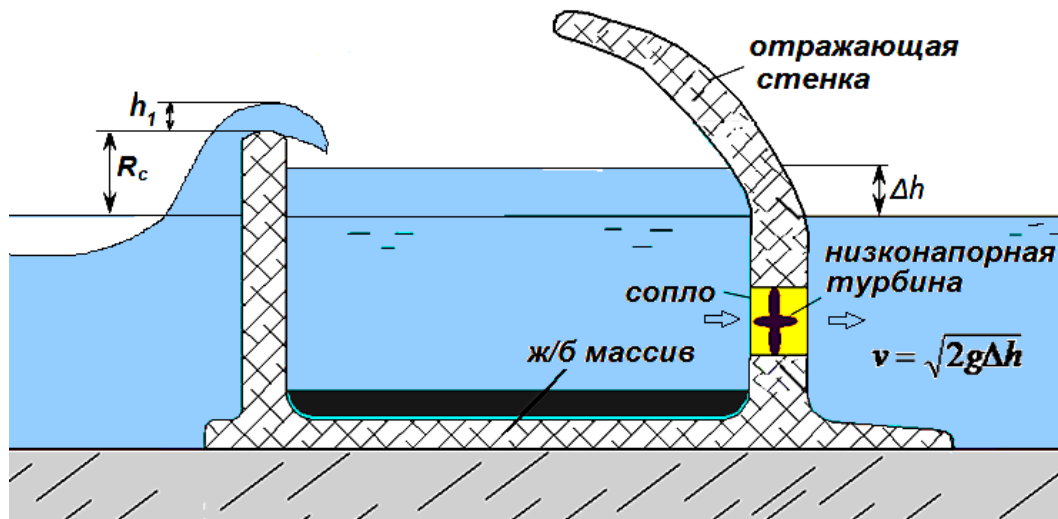


Рис. 4.19. Схема преобразователя типа OWEC

Приведенные здесь формулы не учитывают многие существенные обстоятельства, связанные с гидродинамическими волновыми процессами, поэтому их можно использовать только для грубой оценки.

Для достижения его наибольшей эффективности волнового преобразователя необходимо обеспечить несколько условий:

- максимальный расход воды через гидротурбину;
- уменьшение плескания волн в резервуаре и исключение выплёскивания волн обратно в море;
- минимальное отражение волн от передней стенки и минимальная потеря энергии волны на трение при подходе к передней стенке;
- эффективная работа в широком диапазоне длины и высоты волн.

Для того, чтобы добиться выполнения этих условий, необходимы исследования гидродинамики конструкций разной формы, которые можно провести на основе численных экспериментов.

Расчётные модели в системе Flow-3D для анализа преобразователей типа OWEC принципиально не отличаются от тех, что уже рассмотрены ранее. Разве что в отличие от моделей OWSC, здесь нет подвижных элементов.

На рис. 4.20 – 4.22 приведено несколько примеров с результатами расчётов для преобразователей разной формы. Стрелками на рисунках показаны векторы скорости.

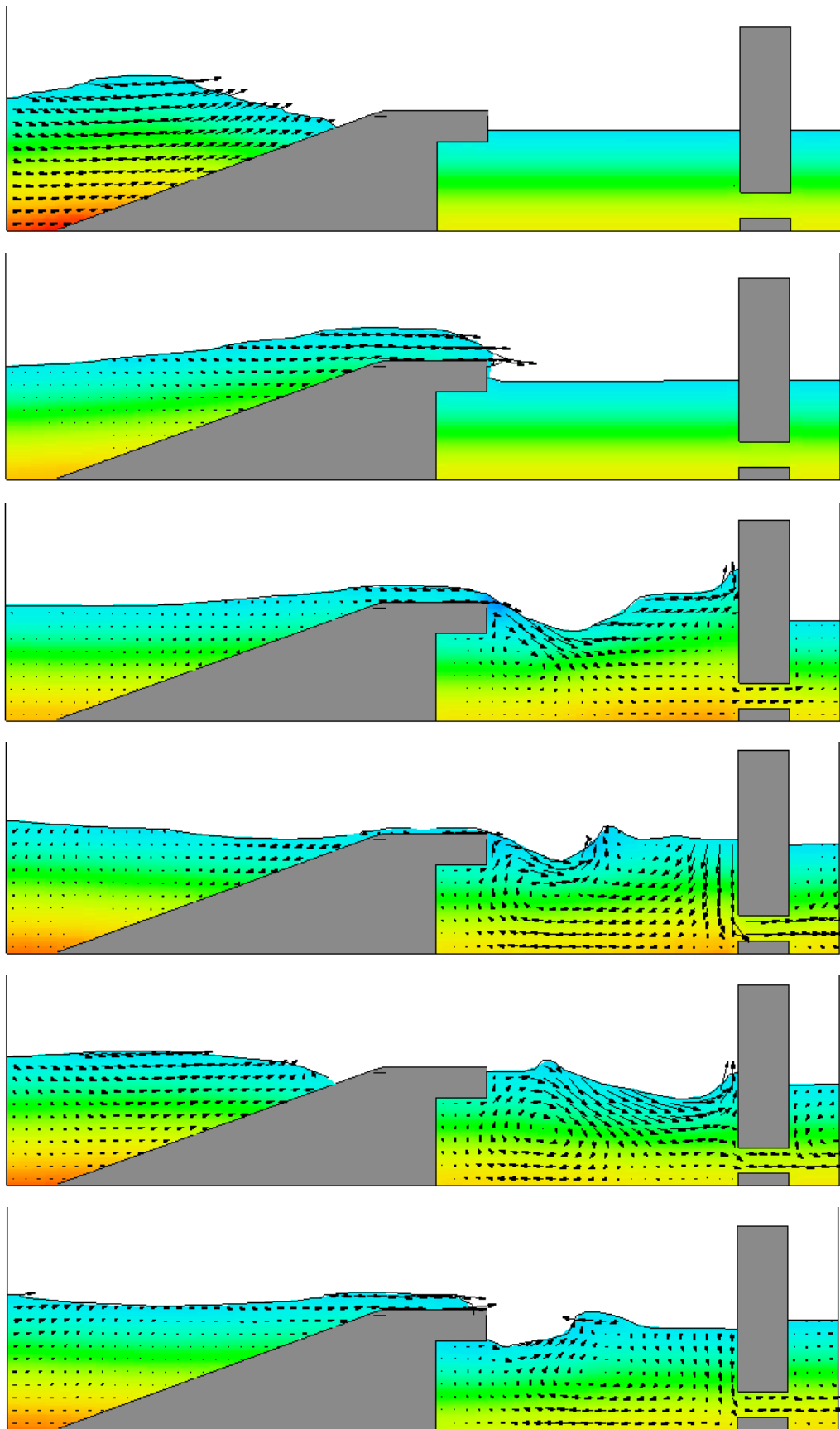


Рис. 4.20. Гидродинамика преобразователя OWEC (вариант 1)

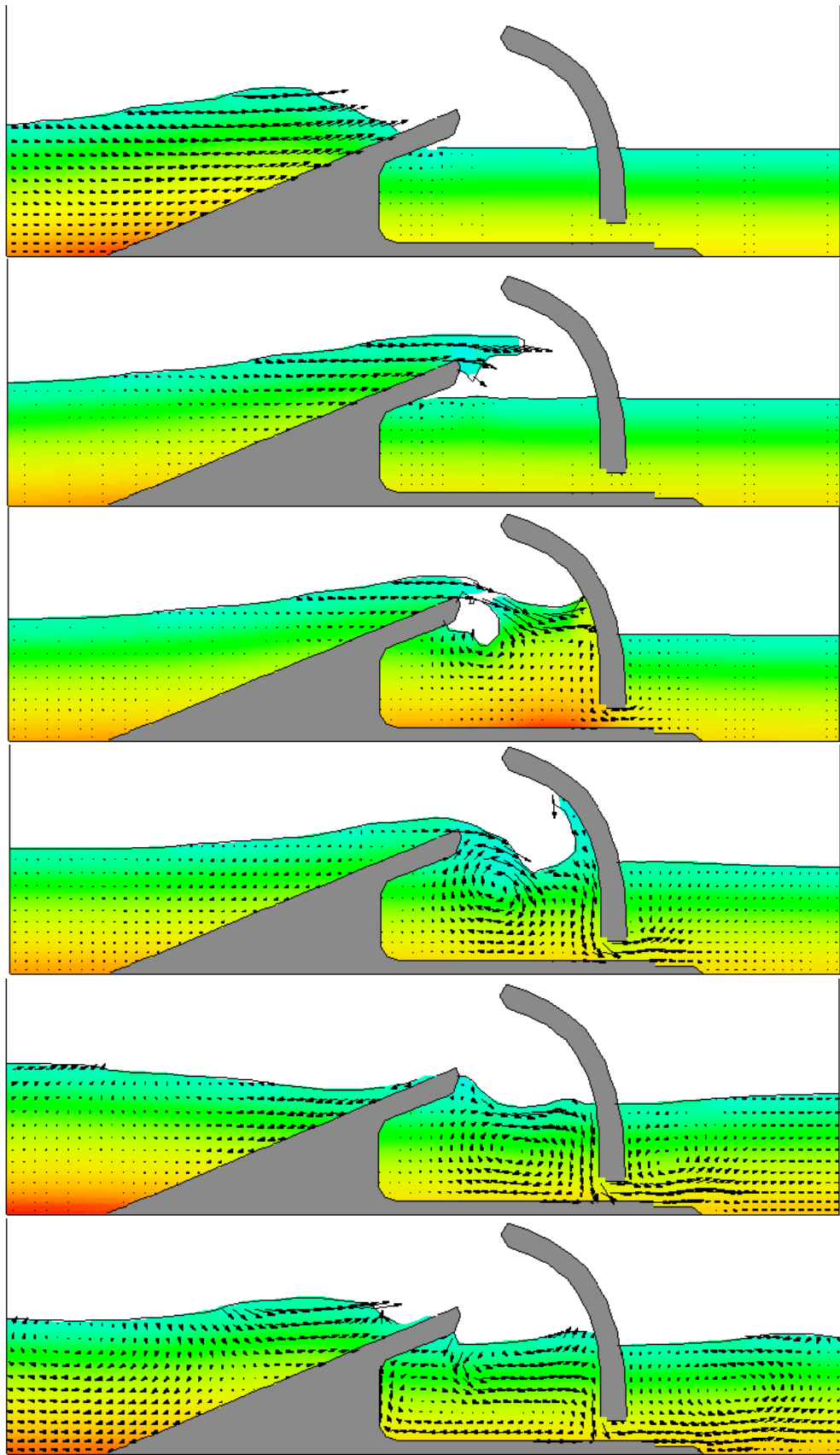


Рис. 4.21. Гидродинамика преобразователя OWEC (вариант 2)

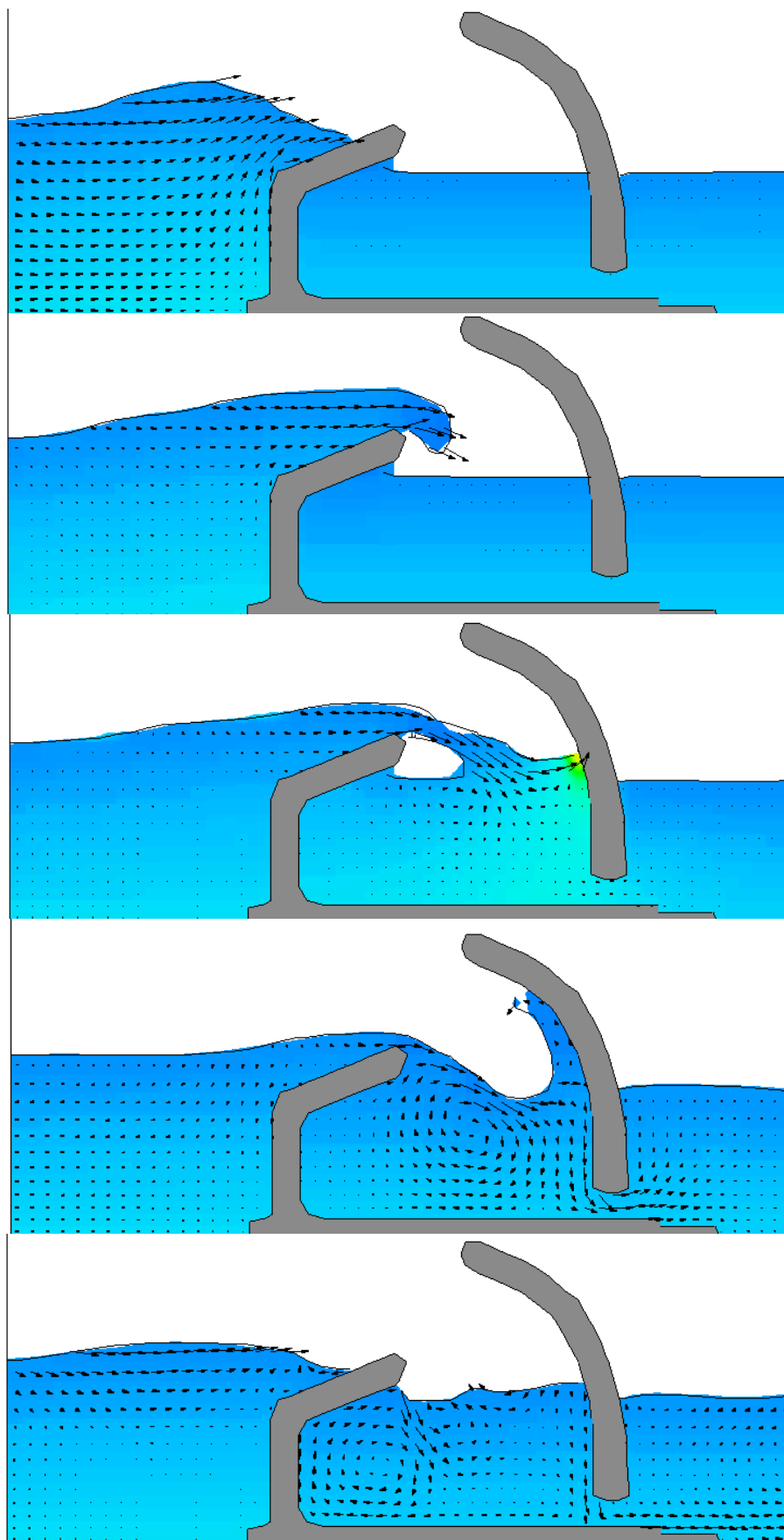


Рис. 4.22. Гидродинамика преобразователя OWEC (вариант 3)

4.3. Задания

1. Выполнить анализ регулярного волнения при наличии постоянного течения по ходу волн и навстречу. Как при этом изменяется форма и высота волн? Параметры волн и течения выбрать произвольно.

2. Выполнить анализ регулярного волнения при ограниченной глубине и наличии участка отмели. Как при этом изменяется форма и высота волн? Параметры волн и форму дна выбрать произвольно.

3. Выполнить анализ наката регулярных волн на берег разной крутизны (от вертикальной стенки до пологого пляжа). Как при этом изменяется форма и высота волн? Параметры волн выбрать произвольно.

4. Выполнить анализ наката регулярных волн на стенки разной формы (рис. 4.23). Как при этом изменяется форма и высота волн? Определить волновые нагрузки на стенку (сила, давление в трёх точках по высоте стенки). В каком случае волновые нагрузки на стенку больше? Параметры волн и размеры стенок выбрать произвольно.

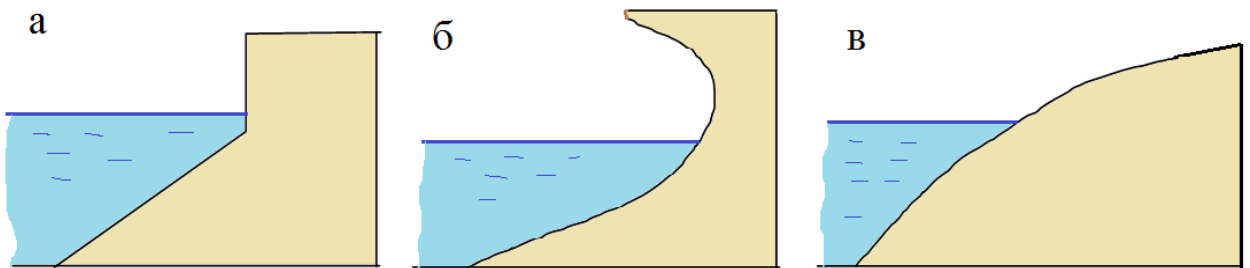


Рис. 4.23. Варианты заданий

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для понимания большинства физических процессов в морской гидродинамике необходимо изучать теорию корабля, обязательно сопоставляя её с реальностью, опытом, хотя бы путём модельного экспериментирования. Однако физический эксперимент не всегда возможен. В этом случае грамотно проведенный компьютерный эксперимент может дать очень многое для понимания реальности.

В данном учебном пособии рассмотрены только некоторые примеры и возможности компьютерного моделирования задач гидромеханики и теории корабля. Если Вы получите навыки работы в системе Flow-3D, то в случае необходимости сможете самостоятельно и относительно быстро освоить моделирование и в других подобных системах, например Flow Vision.

Авторы надеются, что данное пособие позволит:

- бакалаврам – получить понимание и интерес к дальнейшему изучению гидродинамических явлений, сопровождающих процесс эксплуатации кораблей и морских сооружений с применением компьютерных экспериментов;

- магистрантам и аспирантам – выполнять компьютерные эксперименты в научно-практических исследованиях, в первую очередь связанных с инновациями;

- инженерам – решать практические задачи при проектировании и обеспечении эксплуатации морской техники.

Познание – процесс бесконечный. Главное, чтобы для Вас этот процесс представлялся не бесконечно трудным, а бесконечно интересным.

Все вопросы, замечания и предложения можно присылать по адресам электронной почты: chizhium@rambler.ru, kks@knastu.ru.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биркгоф, Г. Гидродинамика / Г. Биркгоф. - М. : ИИЛ, 1963. - 244 с.
2. Прикладные задачи динамики ледяного покрова / Козин В.М., Жесткая В.Д., Погорелова А.В., Чижиумов С.Д., Джабраилов М.Р., Морозов В.С., Кустов А.Н. – М.: Издательство «Академия Естествознания», 2008.- 329 с.
3. Справочник по теории корабля. Том 1 – 3 / Под ред. Я.И. Войткунского. - Л.: Судостроение, 1985. – 440 с.
4. Храмушин В.Н. Поисковые исследования штормовой мореходности корабля. Владивосток: Дальнаука, 2003.-172 с.
5. Чижиумов С.Д. Численные модели в задачах динамики судна. – Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 1999. – 182 с.
6. Чижиумов С.Д. Основы гидродинамики : учеб. пособие / С. Д. Чижиумов. – Комсомольск-на-Амуре : ГОУВПО «КнАГТУ», 2007. – 106 с.
7. Чижиумов С.Д. Основы динамики судов на волнении: учеб. пособие / С. Д. Чижиумов. – Комсомольск-на-Амуре : ГОУВПО «КнАГТУ», 2010. – 110 с.
8. Чижиумов С. Д., Козин В. М., Каменских И. В., Синюкова М. А., Гентова А. А. Преобразование энергии морских волн: моногр. – Комсомольск на Амуре : ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2014. – 174 с.
9. <http://www.cad.ru/flow3d/flow3d.htm> (сайт о программе Flow-3D)
10. <http://www.flow3d.com> (сайт о программе Flow-3D компании FLOW SCIENCE)
11. <http://www.flowvision.ru> (сайт о программе Flow VISION компании «ТЕСИС»)

Учебное издание

Чижиумов Сергей Демидович
Каменских Ираида Витальевна
Бурменский Андрей Дмитриевич

ПРОБЛЕМЫ ГИДРОДИНАМИКИ КОРАБЛЯ
(ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ)

Учебное пособие

Научный редактор - кандидат технических наук, доцент
С. В. Кошкин

Редактор Е. В. Безолукова

Подписано в печать 20.05.2016.
Формат 60 x 84 1/16. Бумага 65 г/см². Ризограф EZ5700E
Усл. печ. л. 7,44. Уч.-изд. л. 7,10. Тираж 50 'гр. Заказ 27955.

Редакционно-издательский отдел
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»
681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.

Полиграфическая лаборатория
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»
681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.