УДК 629.12: 532 ***DOI: 10.46960/2782-5477_2023_4_23***

О.В. Дмитриева, И.Д. Краснокутский

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВОДОИЗМЕЩАЮЩЕГО СУДНА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Нижний Новгород, Россия

Описаны результаты численного моделирования стационарного потока жидкости, набегающего на неподвижный корпус водоизмещающего судна (обращенное движение). Рассмотрены два варианта формы смоченной поверхности судна: эллипсоид вращения и корпус реального судна. Получены кинематические и динамические характеристики движения жидкости и компоненты главного вектора и главного момента гидродинамических сил. Выявлены проблемы, связанные с неустойчивостью решения. Полученный опыт может быть использован для прогнозирования характеристик взаимодействия судна с жидкостью, например, для определения силы сопротивления воды движению судна или для определения поля скоростей жидкости в месте установки движителя.

Ключевые слова: метод конечных элементов, водоизмещающее судно, поле скоростей, поле давлений, вязкость, гравитация, волнообразование, сопротивление воды.

Численное моделирование взаимодействия стационарного потока жидкости с телами и поверхностями является одной из наиболее распространенных задач гидродинамики. Движению водоизмещающего судна в капельной жидкости посвящены несколько разделов дисциплины «Теория корабля», например [1]. Определение кинематических параметров движения корпуса основано на решении дифференциальных уравнений его движения, при этом для вычисления гидродинамических сил используются заранее найденные или экспериментально определенные гидродинамические коэффициенты [2]. В последние десятилетия для решения этой задачи широко применяются численные методы [3]. В интернете размещены многочисленные видеосюжеты, посвященные задачам численного моделирования взаимодействия корпуса судна с водой [4].

Цель работы

Целью данной работы является определение поля давлений и скоростей в жидкости при движении корпуса водоизмещающего судна с постоянной скоростью (Fr < 0,32) в тихой воде. Для ее реализации были сформулированы следующие задачи:

- выбор программного продукта, реализующего численное моделирование;
- практическое применение программного продукта;
- расчет поля давлений и скоростей в жидкости для заданных параметров движения судна, геометрических характеристик корпуса судна и акватории;
- оценка достоверности результатов численного моделирования на основе сравнения с известными решениями.

Методика исследования

Работа выполнена на основе классических методов механики жидкости и газа, методов конечных элементов (объемов), применения систем 3D-моделирования (построение цифровой твердотельной модели корпуса судна) и данных физического эксперимента в опытовом бассейне. В качестве программного продукта, реализующего численное моделирование, выбран пакет прикладных программ ANSYS (ANSYS Customer Number: 602402). Для построения твердотельных моделей использовался пакет прикладных программ *Solid Works*

(с/н 9710004412135426; договор № 31110779827 от 08.11.21), в котором существует опция моделирования движения сплошной среды. На принятие такого решения решающее влияние оказал факт наличия учебных лицензий. Технические возможности используемого компьютера характеризуют тактовая частота (2,5 МГц) и объем оперативной памяти (16 ГБ).

Результаты

Практическая работа в ANSYS началась с моделирования хорошо изученных (есть опыт и адекватная теория) простых (тестовых) состояний и процессов. В первую очередь выполнено моделирование капельной жидкости в поле действия сил тяжести с нулевыми расходами через поверхность входа и выхода. Это соответствует равновесию жидкости. Результат (поле давлений и скоростей) соответствует физике процесса и уравнению гидростатики. Затем выполнено моделирование стационарного движения идеальной капельной жидкости (вязкость отсутствует, плотность одинакова во всех точках расчетной области) в неподвижной круглой трубе при скорости 0,01 % скорости распространения звука и давлении много больше давления насыщенных паров. Вычисления показали неизменность давления по длине трубы и равномерное распределение скорости по сечению, за исключением пристеночной области. В пределах конечного элемента, расположенного вблизи стенки, скорость падает до нуля от значения в ядре потока, обусловленного расходом. Это не соответствует физике процесса, поскольку нет сил вязкости приводящих к торможению жидкости. Получается, что ANSYS «бездумно» приравнивает скорость жидкости на границе конечного элемента к скорости границы расчетной области. В результате количество движения (импульс) жидкости на выходе из трубы оказывается меньше, чем на входе. Это торможение потока эквивалентно сопротивлению трения стенки, чего быть не должно в случае невязкой жидкости.

Моделирование стационарного движения ньютоновской капельной жидкости (вязкость и плотность одинаковы во всех точках расчетной области) в неподвижной круглой трубе при ламинарном режиме движения (Re = 2000) и давлении много больше давления насыщенных паров дало физически предсказуемый результат. Имели место торможение жидкости на поверхности трубы; развитие пограничного слоя; формирование параболической формы эпюры скоростей в поперечных сечениях трубы; падение давления по длине трубы.

Выполнено моделирование взаимодействия стационарного потока идеальной жидкости в круглом цилиндре с эллипсоидом вращения на его оси (рис. 1). Эллипсоид вращения выбран из следующих соображений: гладкая (без локальных выступов и впадин) хорошо обтекаемая поверхность; легко строится встроенными в ANSYS функциями (вращение эллипса относительно продольной оси).

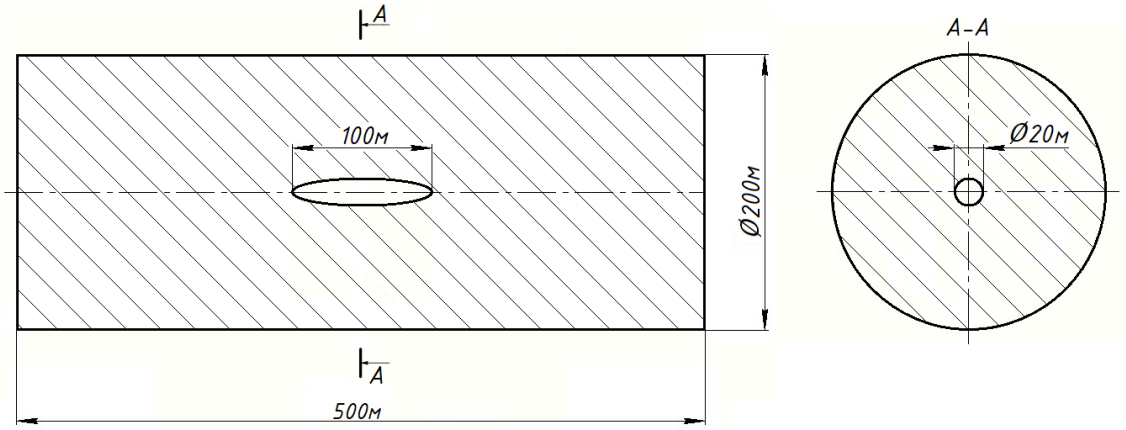

Рис. 1. Цилиндрическая расчетная область с эллипсоидом вращения на его оси

Конечно-элементная сетка для представленной геометрии выполнена с использованием тетраэдрических элементов первого порядка (рис. 2). Общее число элементов сетки составляет 58 9425 элементов.

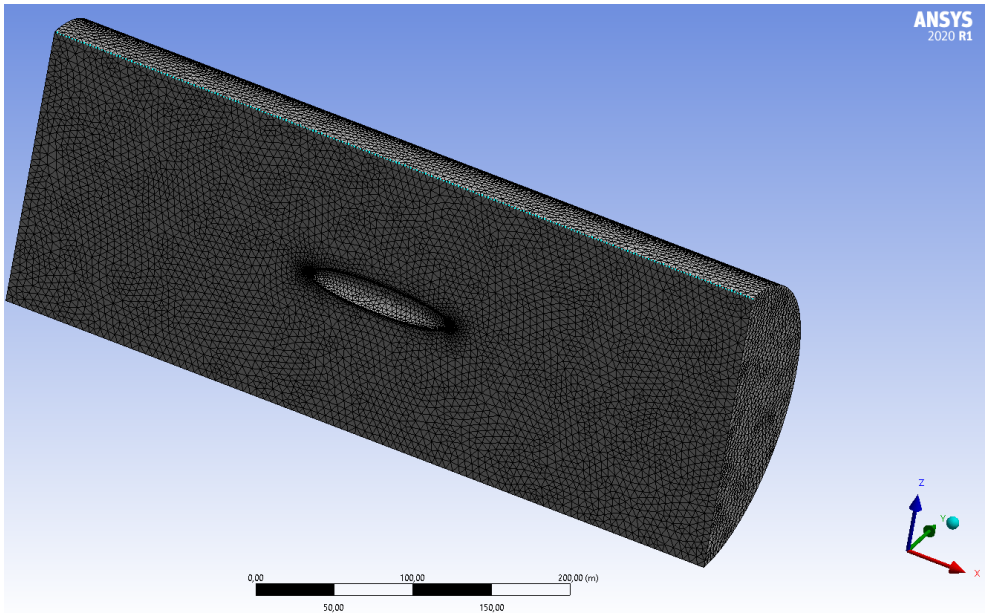

Рис. 2. Цилиндрическая расчетная область

Результаты расчетов для скорости набегающего потока 10 м/с (число Фруда F=0,32) представлены на рис. 3-7.

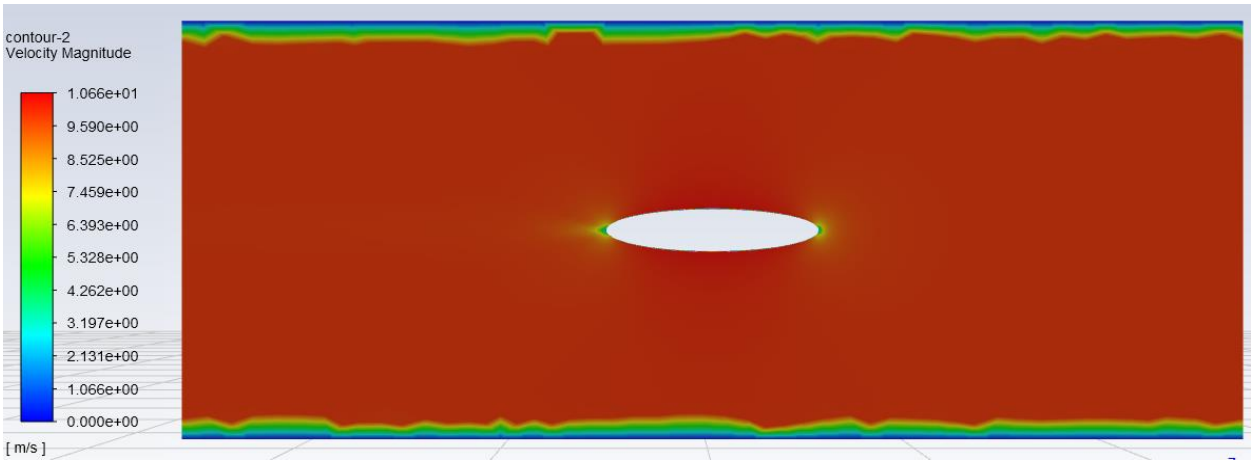

Рис. 3. Поле скоростей в диаметральной плоскости сечения расчетной области

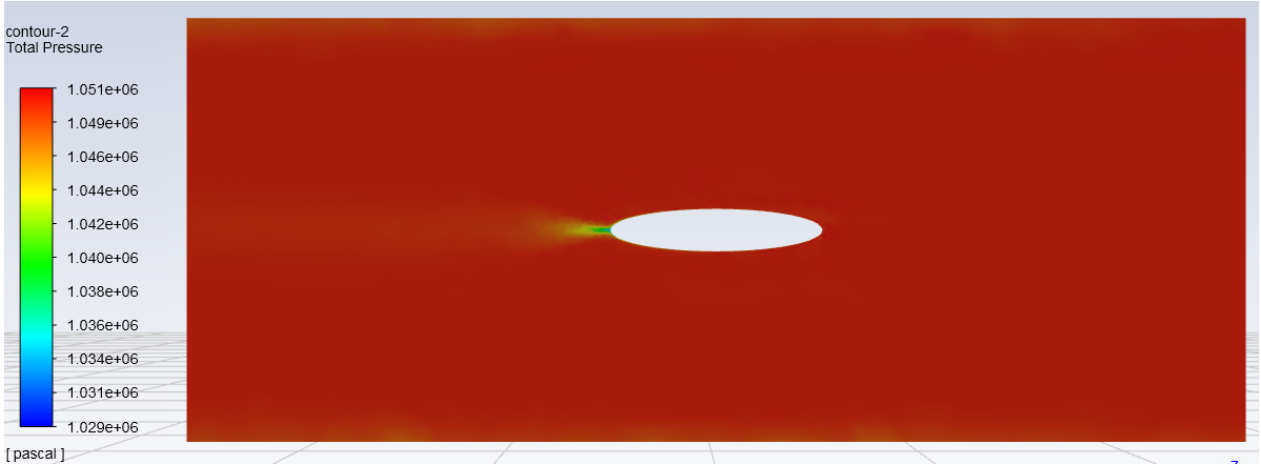

Рис. 4. Поле давлений в диаметральной плоскости сечения расчетной области

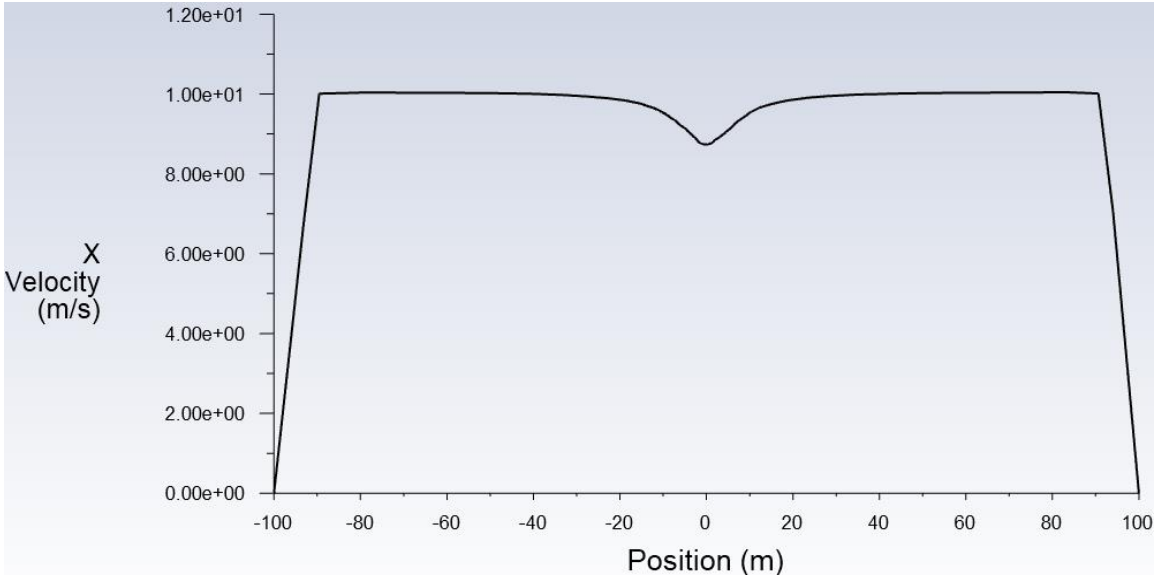

Рис. 5. График $V_x(z)$ перед обтекаемым телом ($x = -55$ м)

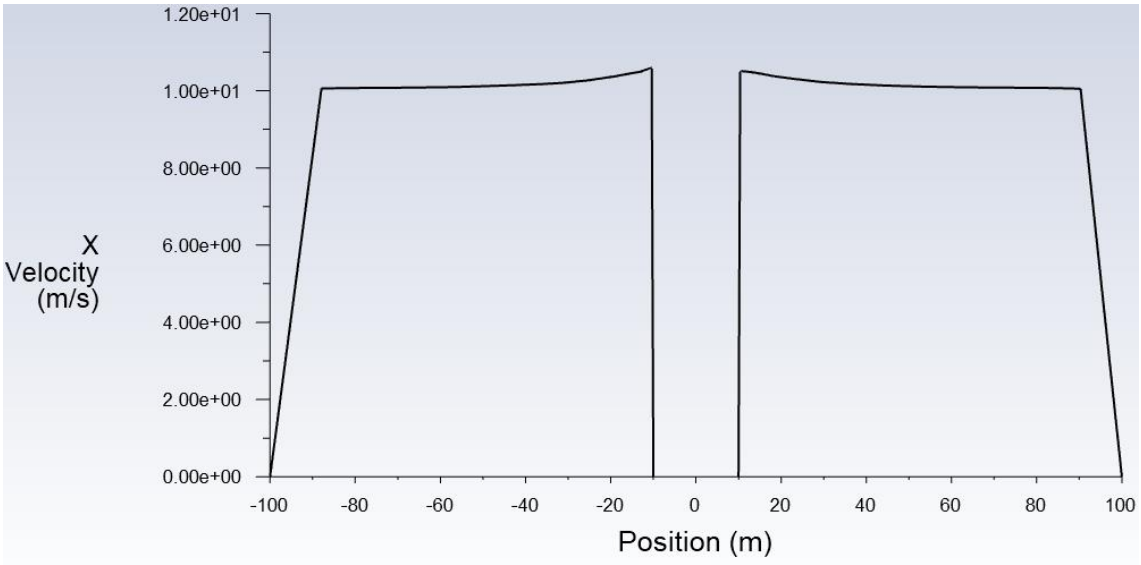

Рис. 6. График $V_x(z)$ в центре обтекаемого тела ($x = 0$ м)

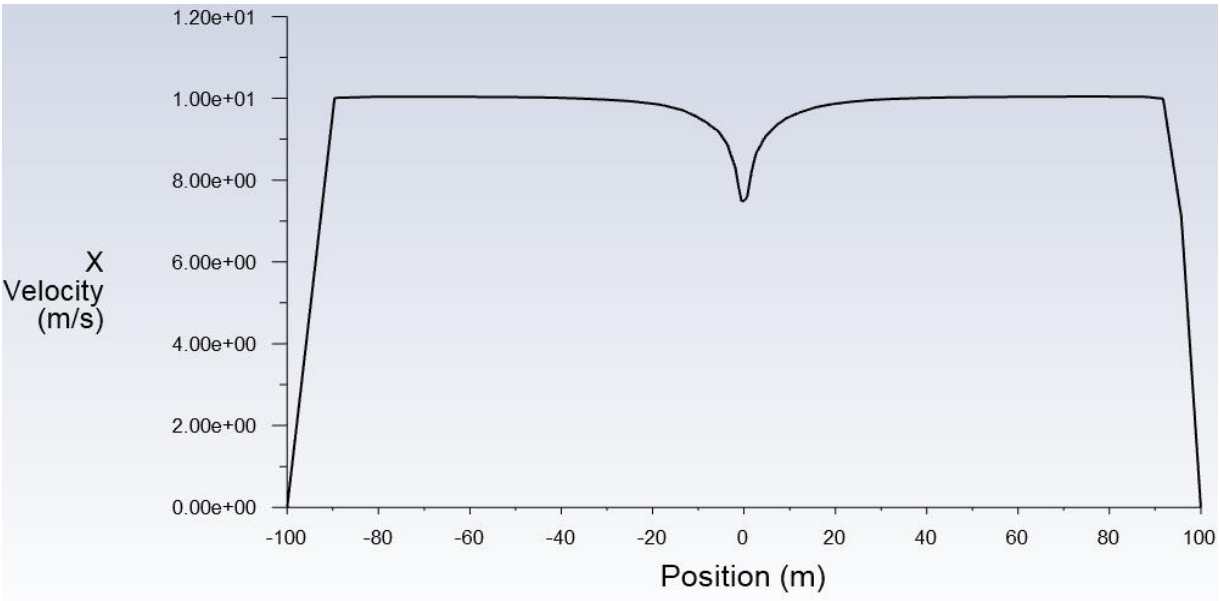

Рис. 7. График $V_x(z)$ за обтекаемым телом ($x = 55$ м)

Поле скоростей и давлений хорошо согласуется с традиционными представлениями гидродинамики, за исключением конечных объемов жидкости, прилегающих к поверхности эллипсоида и боковым стенкам расчетной области. Здесь ANSYS приравнивает скорость жидкости к нулю (скорости неподвижной поверхности). Поэтому, несмотря на заданную нулевую вязкость, формируется пограничный слой и давление в кормовой оконечности заметно меньше, чем в носовой. Сила сопротивления идеальной жидкости оказалась не равной нулю. Она вычислена с помощью встроенного в интерфейс ANSYS калькулятора и составила $\boldsymbol{R}_{\text{ид}}$ = 145 КН.

Выполнено также моделирование взаимодействия стационарного потока вязкой жидкости ($\mu = 0{,}001003\,\frac{\text{кг}}{\text{м}\cdot\text{с}}$; $\rho = 1000\,\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$) в круглом цилиндре с эллипсоидом вращения на его оси при отсутствии сил тяжести (рис. 8-12).

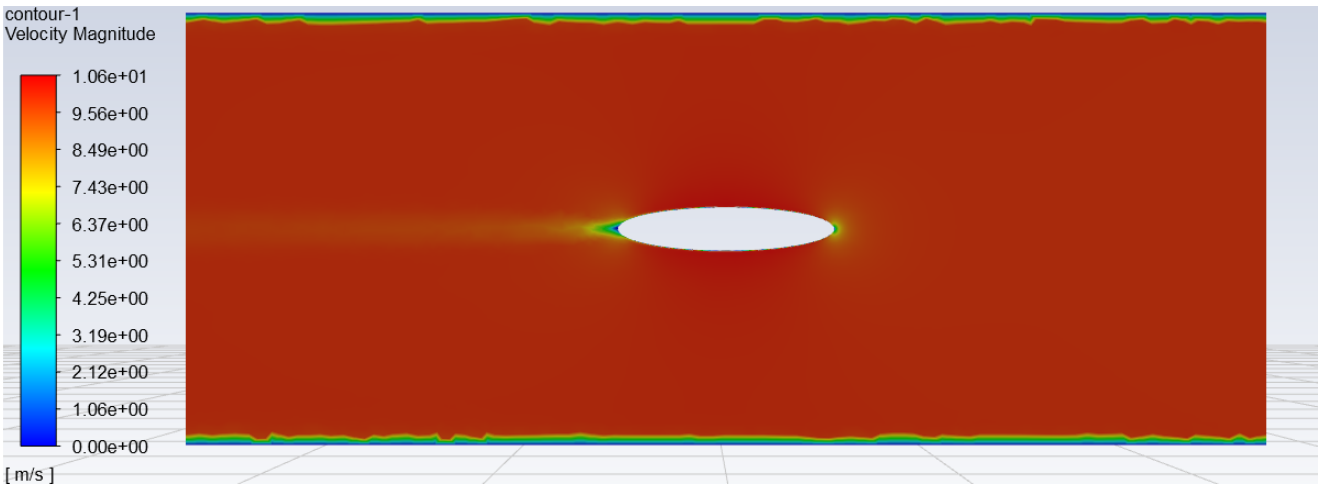

Рис. 8. Поле скоростей в диаметральной плоскости сечения расчетной области

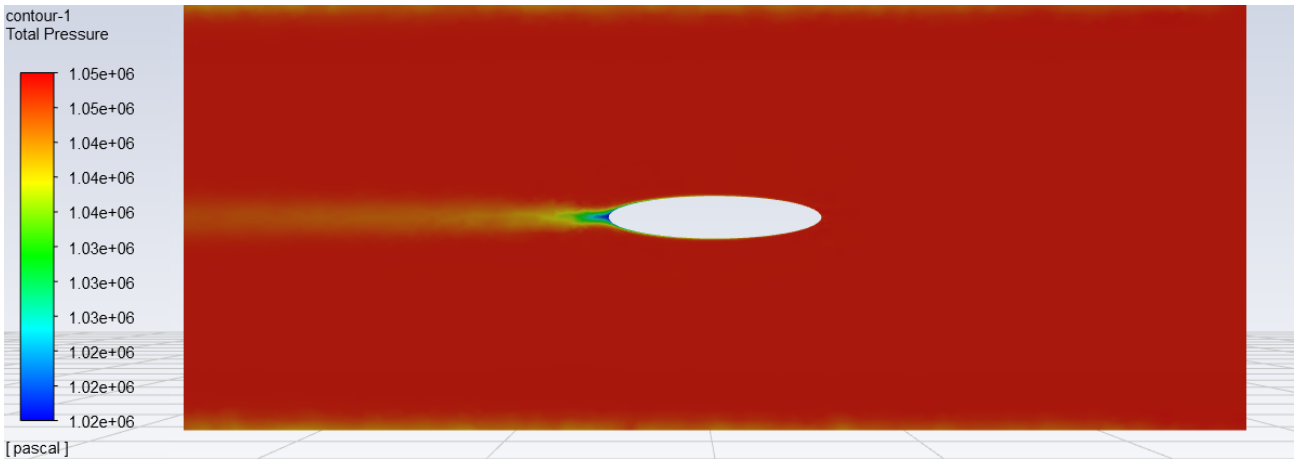

Рис. 9. Поле давлений в диаметральной плоскости сечения расчетной области

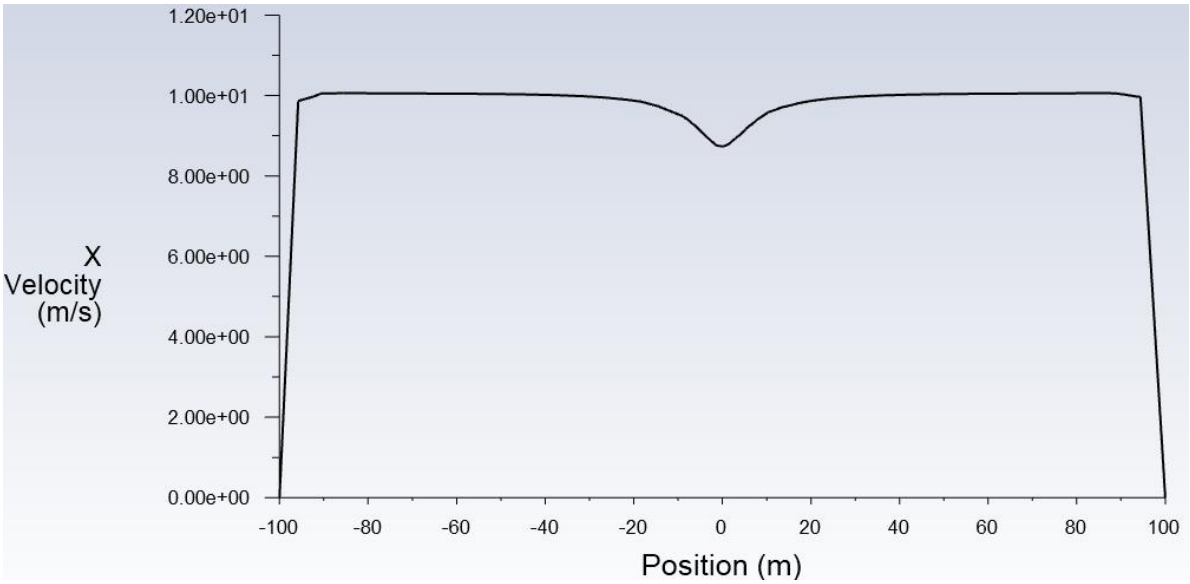

Рис. 10. График $V_x(z)$ перед обтекаемым телом ($x = -55$ м)

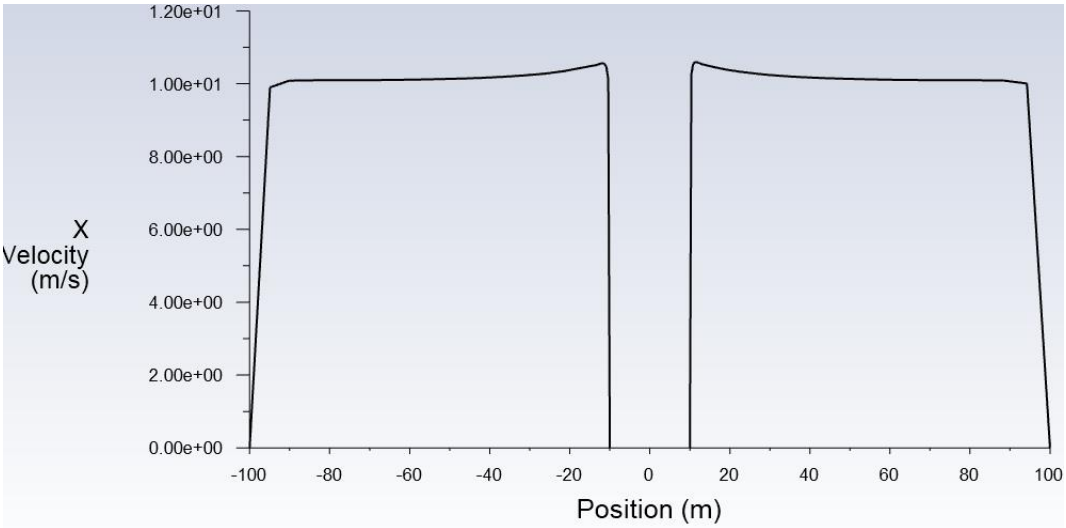

Рис. 11. График $V_x(z)$ в центре обтекаемого тела ($x = 0$ м)

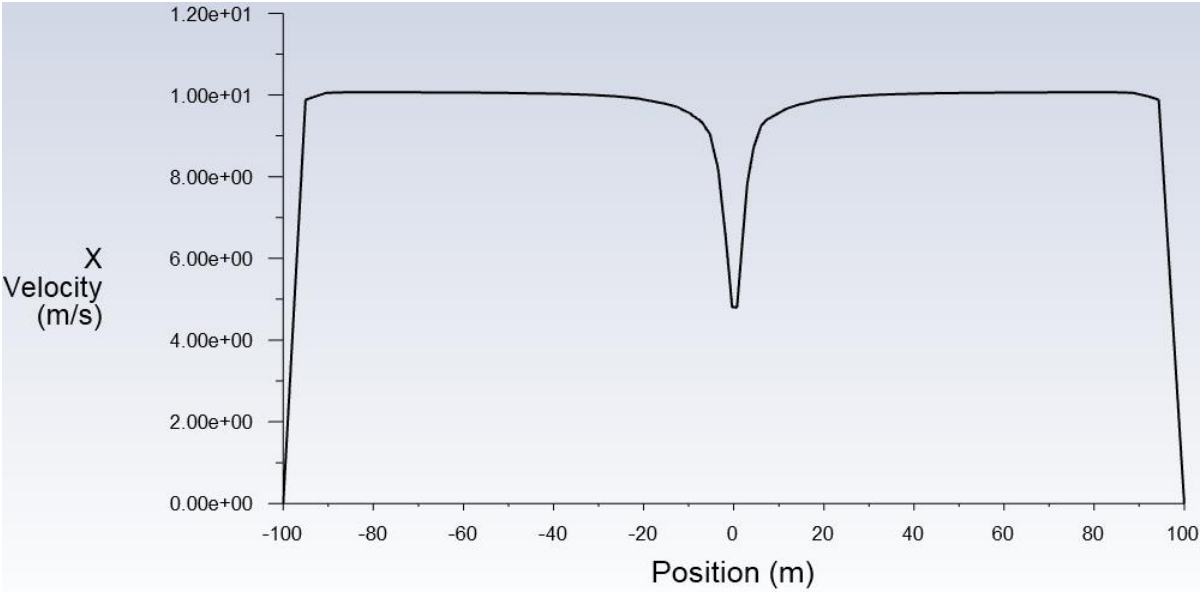

Рис. 12. График $V_x(z)$ за обтекаемым телом ($x = 55$ м)

Сравнение результатов расчетов, отличающихся только вязкостью, показывает, что ANSYS понятно описывает пограничный слой в случае вязкой жидкости и моделирует физически правильные поля скоростей и давлений. Толщина пограничного слоя на поверхности эллипсоида растет от носа к корме, ярко выражена спутная струя, и сопротивление выросло с $\boldsymbol{R}_{\text{ид}}$ = 145 КН до $\boldsymbol{R}_{\text{вязк}}$ = 355 КН. Однако в объемах, примыкающих к боковой границе расчетной области, моделируется торможение жидкости и формирование пограничного слоя, поскольку скорость границы была задана равной нулю. Это искажает распределение давлений в расчетной области по сравнению со случаем реального движения (абсолютного движения) водоизмещающего тела в неподвижной жидкости.

Для оценки влияния этого фактора выполнен расчет с небольшим изменением: боковые границы расчетной области назначены подвижными со скоростью набегающего потока. Результаты моделирования представлены на рис. 13-17.

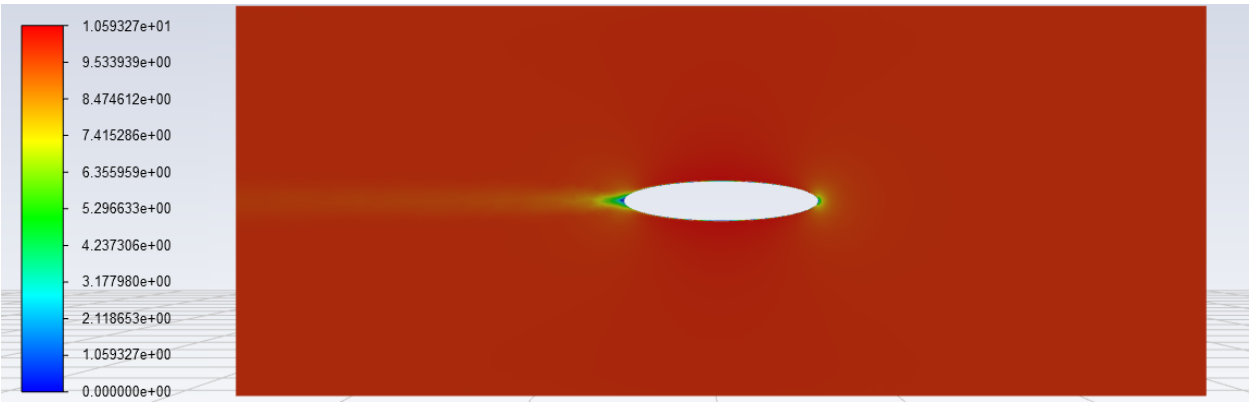

Рис. 13. Поле скоростей в диаметральной плоскости сечения расчетной области

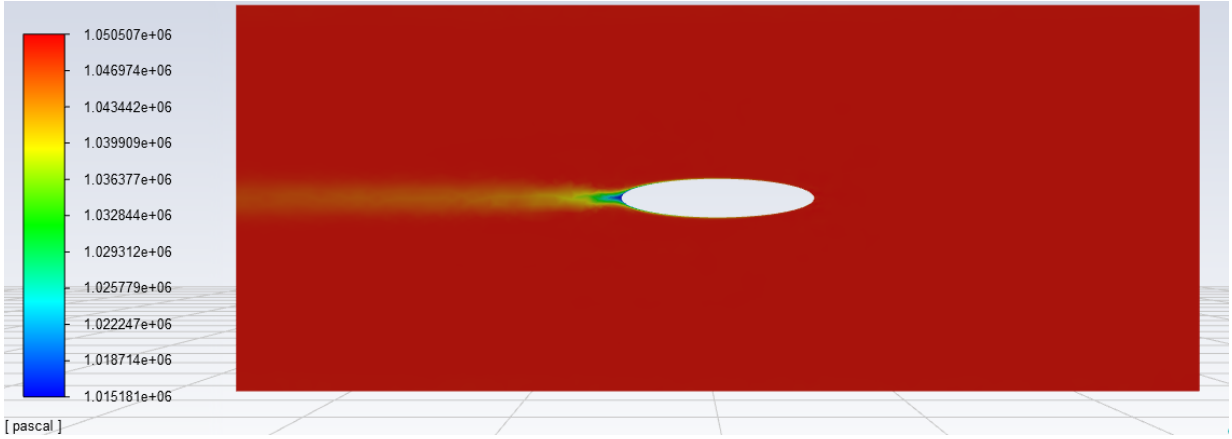

Рис. 14. Поле давлений в диаметральной плоскости сечения расчетной области

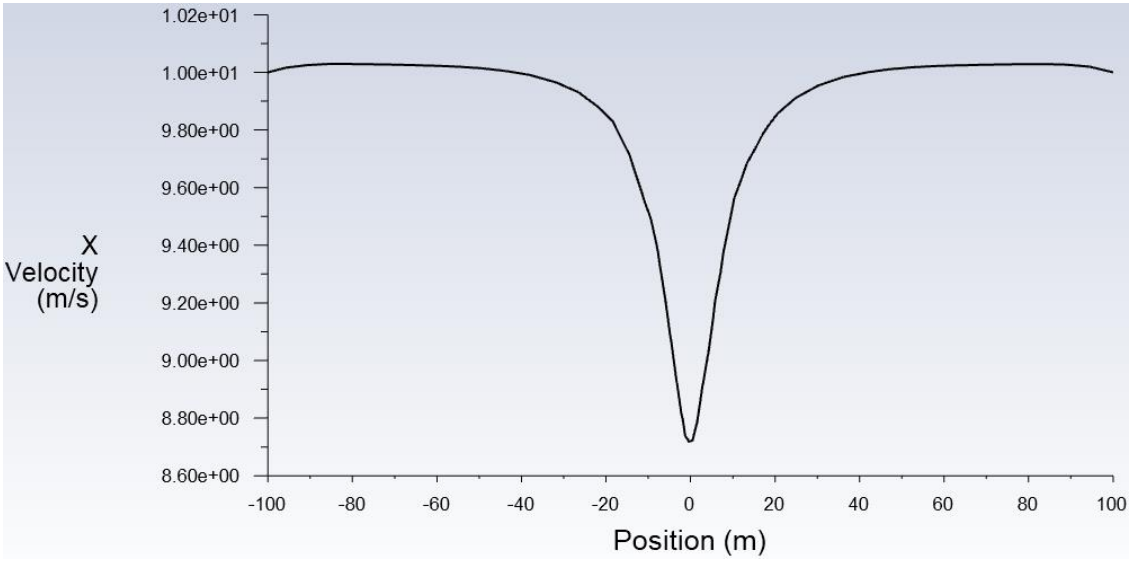

Рис. 15. График $V_x(z)$ перед обтекаемым телом ($x = -55$ м)

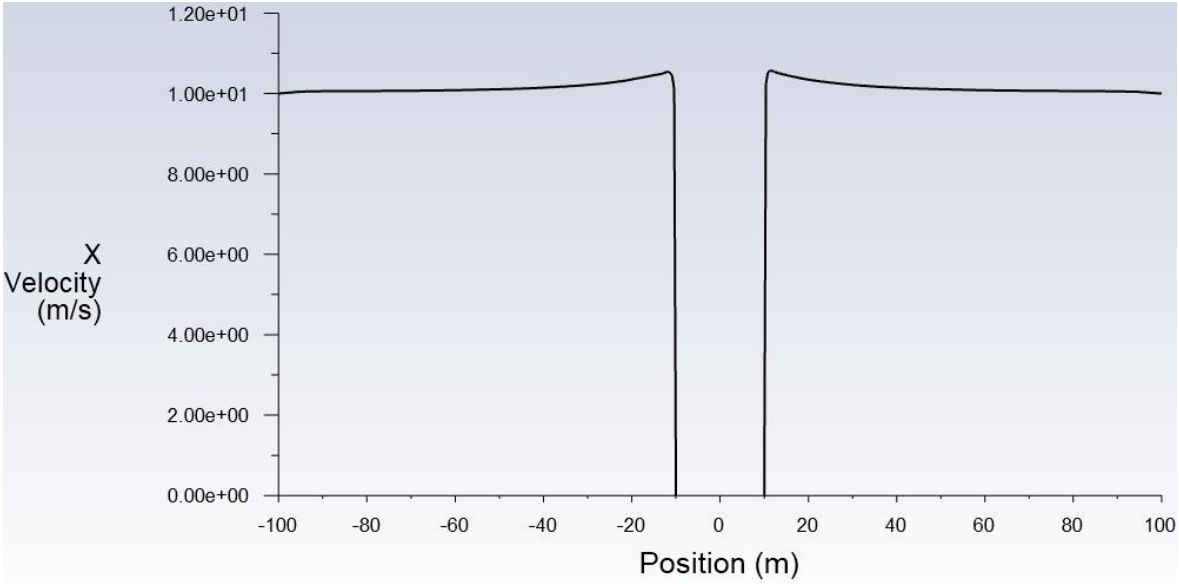

Рис. 16. График $V_x(z)$ в центре обтекаемого тела ($x = 0$ м)

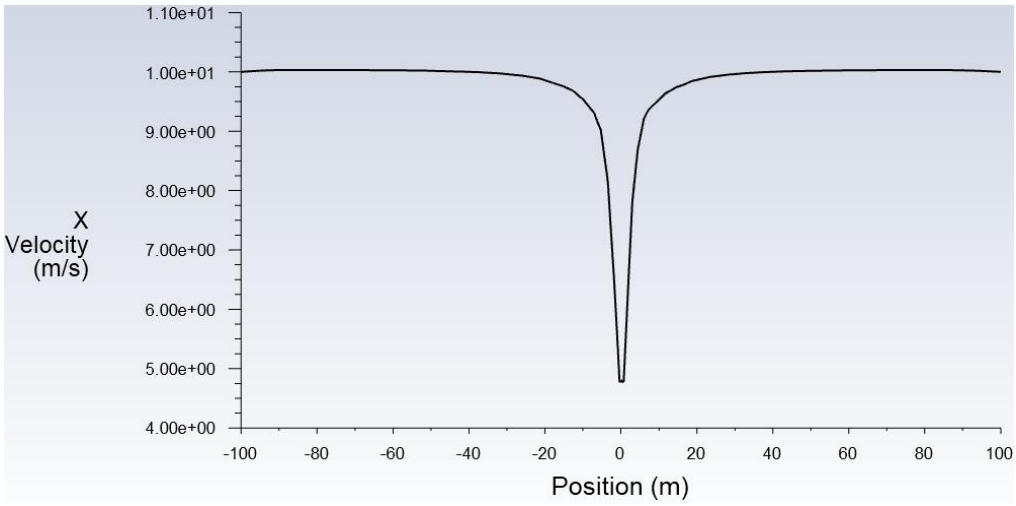

Рис. 17. График $V_x(z)$ за обтекаемым телом ($x = 55$ м)

Полученный результат полностью соответствует физике процесса обращенного движения. Отсутствие торможения на боковых границах расчетной области привело к незначительному уменьшению силы сопротивления ($\boldsymbol{R}_{\text{вязк}}$ = 345 КН) и мало повлияло на поле скоростей и давлений вблизи корпуса водоизмещающего тела.

На следующем этапе выполнено моделирование двухфазного потока при воздействии сил тяжести (тяжелая капельная жидкость со свободной поверхностью). Характеристики расчетной области и положение тела приведены на рис. 18.

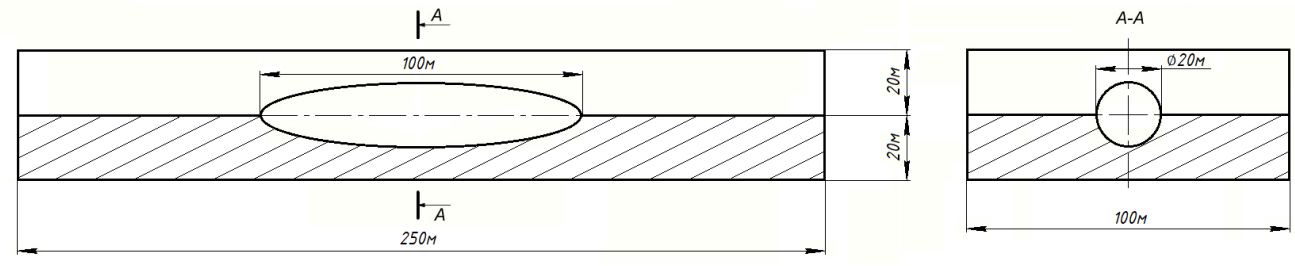

Рис. 18. Расчетная область для двухфазного потока в условиях гравитации

В результате моделирования было получено устойчивое решение, но форма свободной поверхности не соответствовала физике процесса и эмпирическим данным о движении водоизмещающих тел по поверхности воды (рис. 19).

Рис. 19. Поле общих давлений на границе раздела фаз

Добиться результата, который соответствует физике процесса, удалось за счет изменения координат точки оценки сходимости результатов численного моделирования (была за кормой, назначили у борта в районе миделя). В результате получена понятная картина движения жидкости вблизи водоизмещающего тела (рис. 20): система расходящихся и поперечных волн, подпорная волна (характерная при движении водоизмещающих судов в каналах). Сила сопротивления составила $\boldsymbol{R} = \boldsymbol{R}_{\text{вязк}} + \boldsymbol{R}_{\text{волн}}$ = 7,14 МН, т.е. 95 % сопротивления обусловлено волнообразованием, что действительно может иметь место при движении в канале при числе Фруда 0,32.

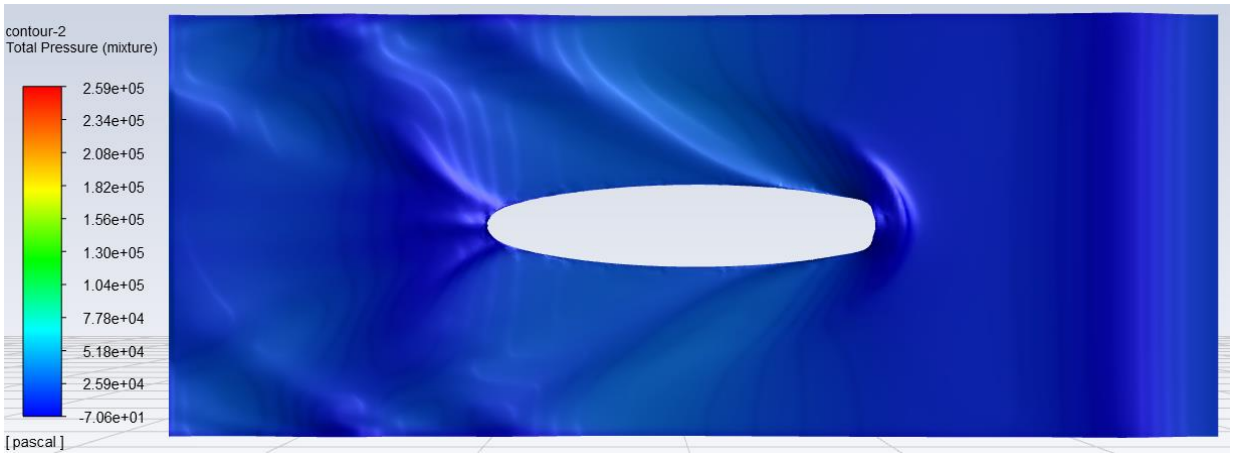

Рис. 20. Поле общих давлений на границе раздела фаз

Для учета влияния поперечных размеров канала было выполнено численное моделирование обращенного движения в увеличенной расчетной области (рис. 21-23).

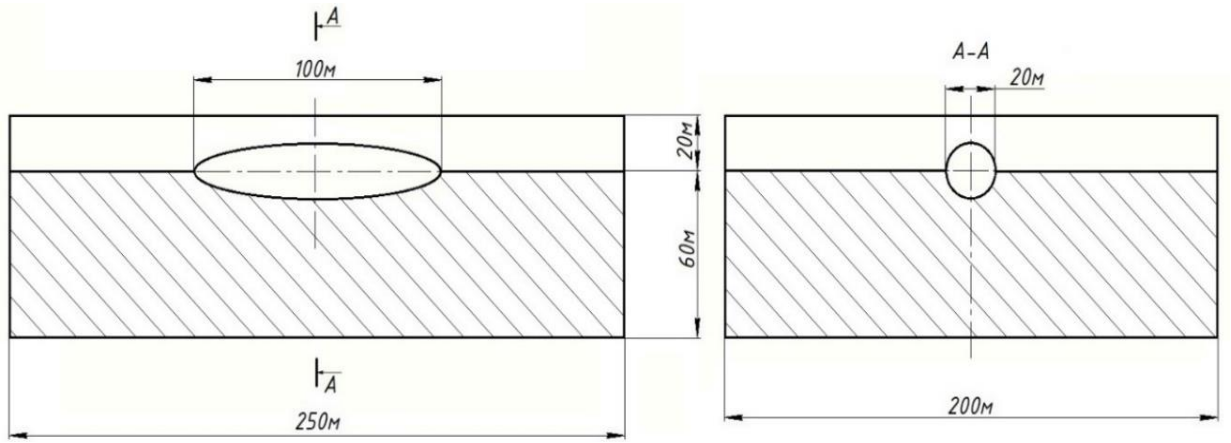

Рис. 21. Геометрические характеристики увеличенной расчетной области

Из рис. 22 и 23 следует, что при выбранном расстоянии до продольных границ расчетной области (боковые стенки и дно) характер волнообразования практически как на свободной воде.

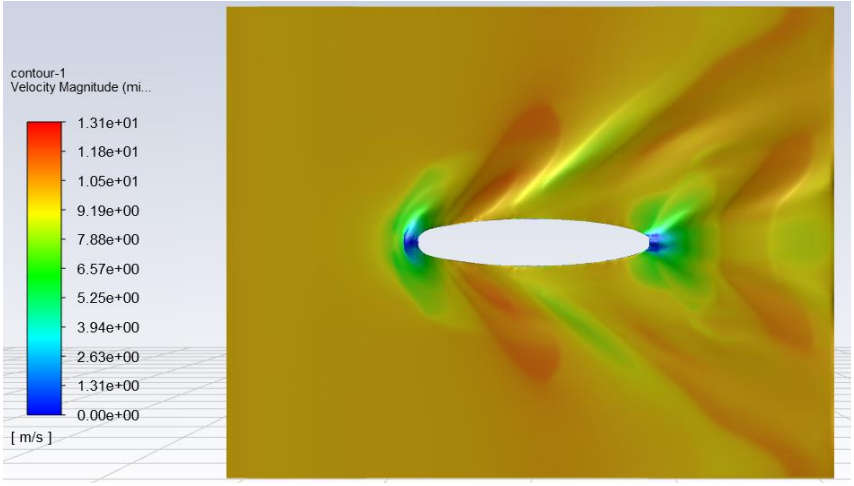

Рис. 22. Поле скоростей на границе раздела фаз

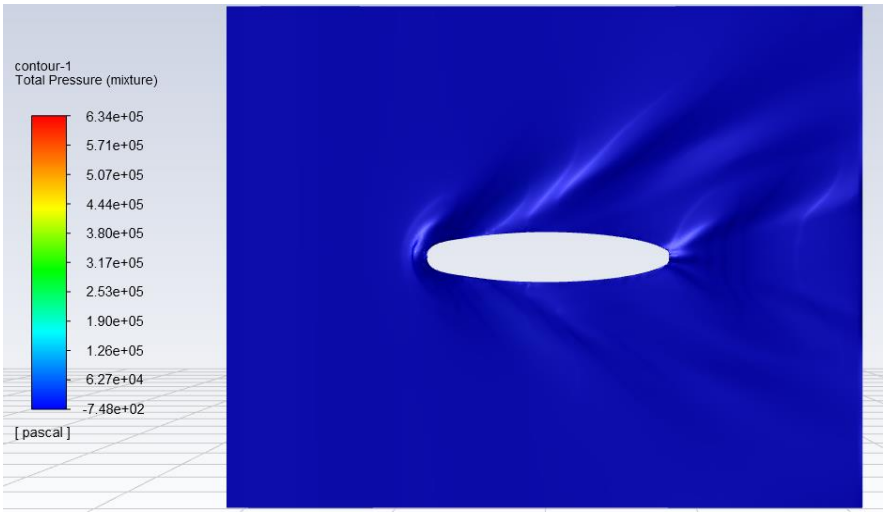

Рис. 23. Поле давлений на границе раздела фаз

Полученные данные о распределении скорости жидкости и давления в расчетной области (рис. 24-28) также свидетельствуют об отсутствии влияния продольных границ расчетной области на поле скоростей и давлений.

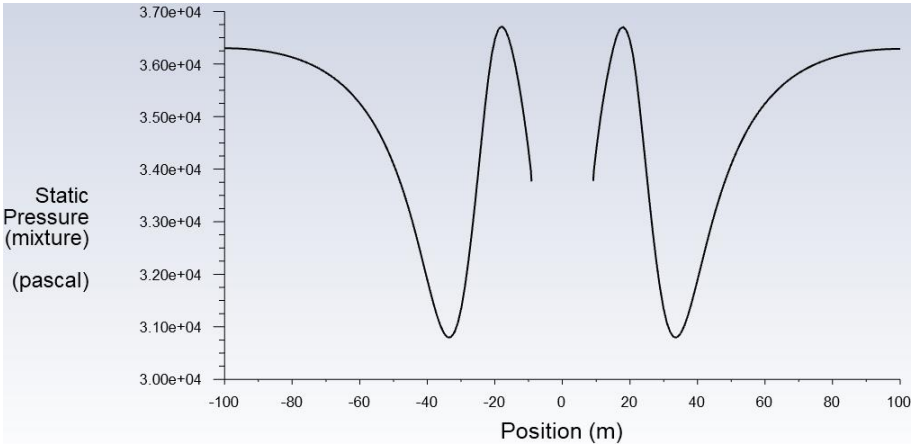

Рис. 24. График статического давления на миделе на глубине 4м ($x = 0$м; $y = -4$м)

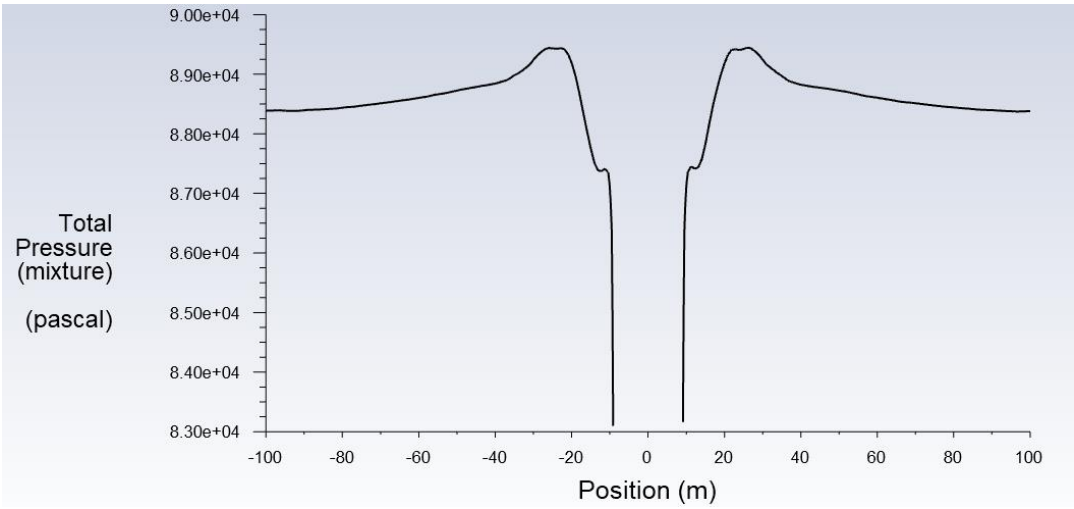

Рис. 25. График абсолютного давления на миделе на глубине 4м ($x = 0$м; $y = -4$м)

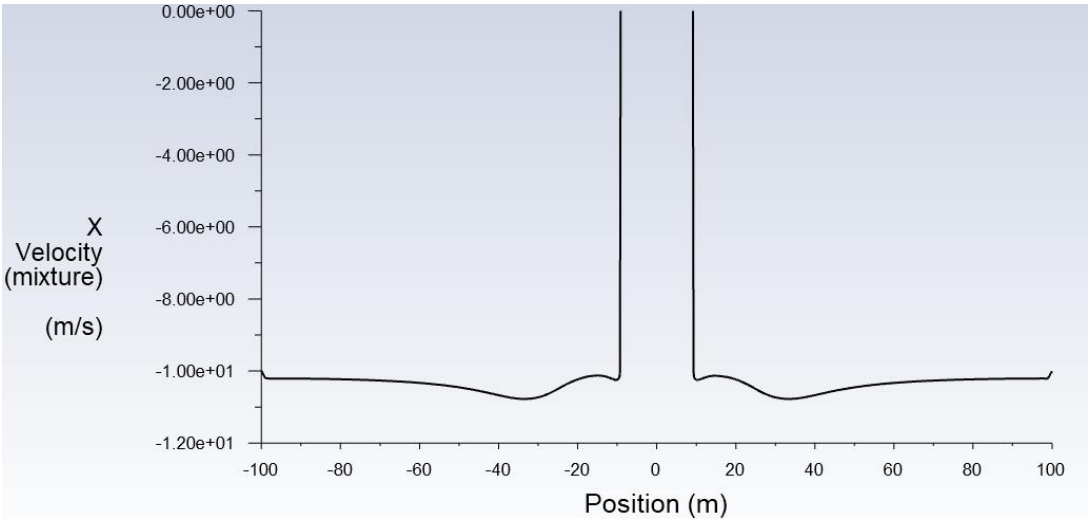

Рис. 26. График $V_x(z)$ на миделе на глубине 4м ($x = 0$м; $y = -4$м)

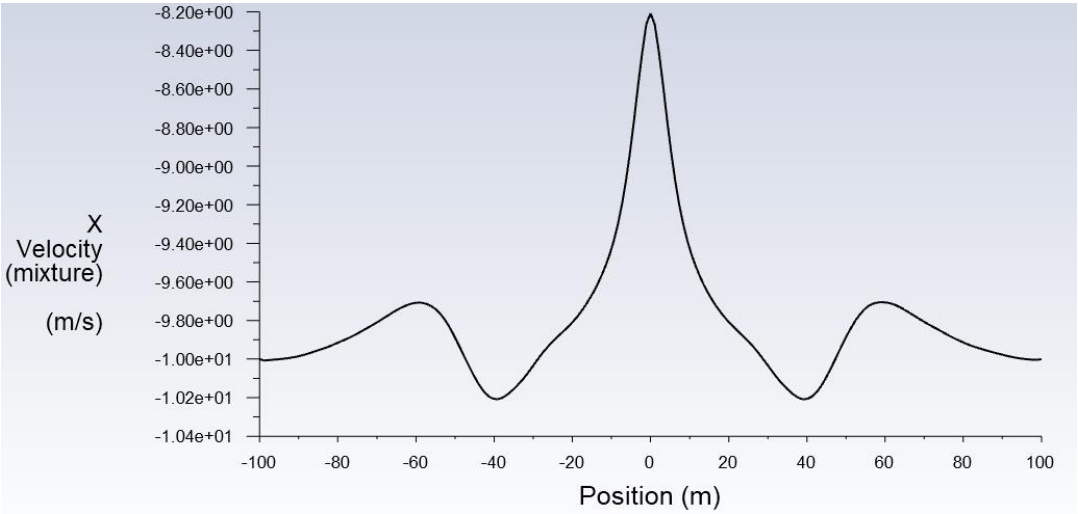

Рис. 27. График $V_x(z)$ за обтекаемым телом на глубине 4м ($x = -51$м; $y = -4$м)

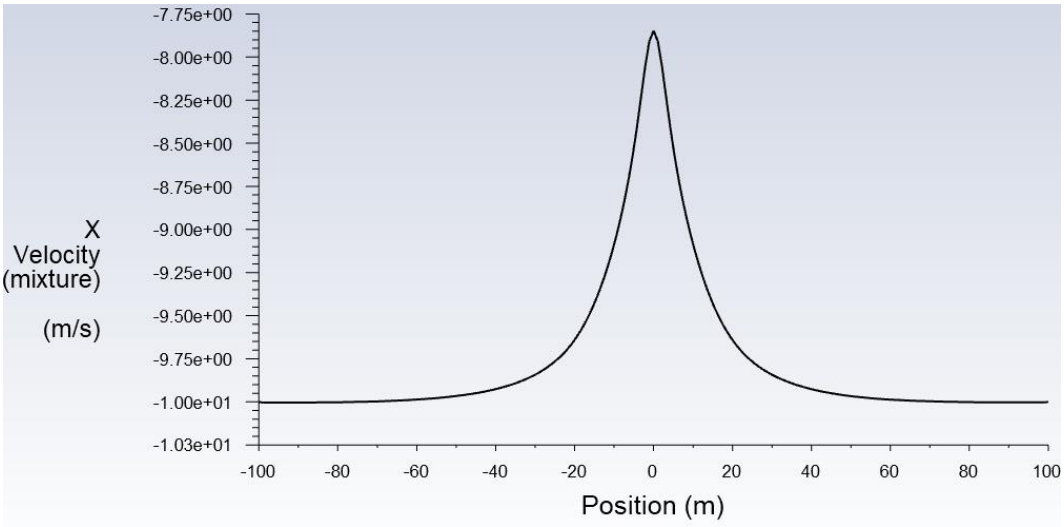

Рис. 28. График $V_x(z)$ перед обтекаемым телом на глубине 4 м ($x = 51$м; $y = -4$м)

Сила сопротивления составила $\boldsymbol{R} = \boldsymbol{R}_{\text{вязк}} + \boldsymbol{R}_{\text{волн}} = 769$ КН. Эффект движения по каналу отсутствует. На следующем этапе была предпринята попытка расчета обтекания водоизмещающего корпуса модели реального судна, для которой известны результаты буксировочных испытаний в опытовом бассейне. Теоретический чертеж, физическая модель и построенная в SolidWorks цифровая твердотельная модель приведены на рис. 29-31.

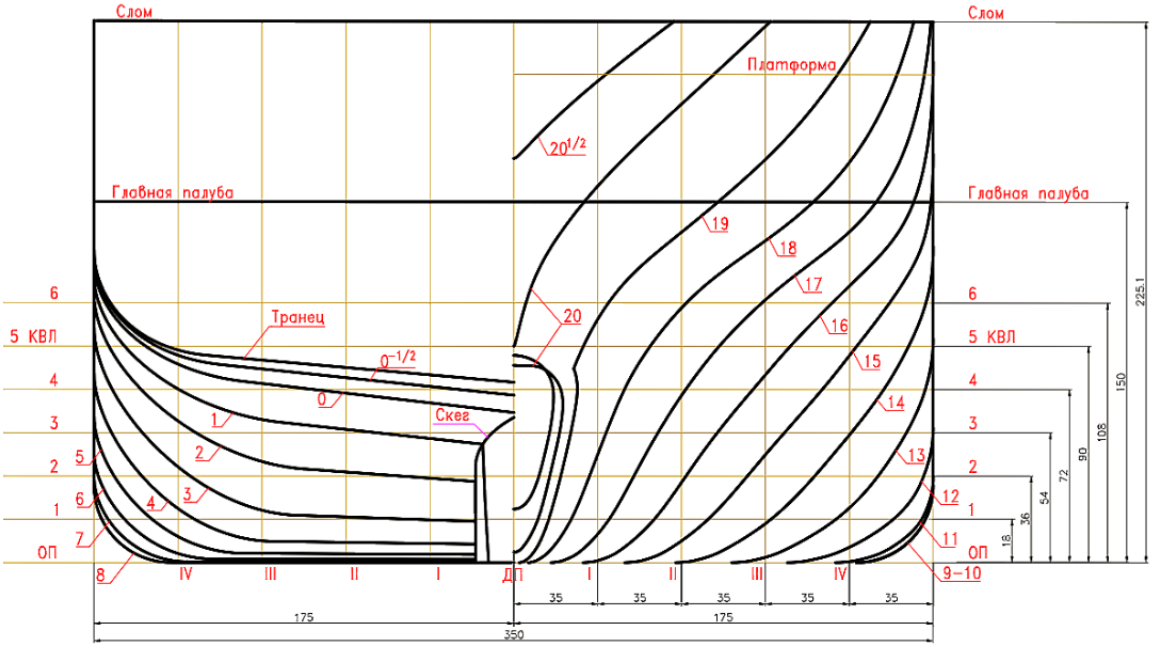

Рис. 29. Проекция «Корпус» теоретического чертежа модели судна CNF22

На этих рисунках видно, что смоченная поверхность не является гладкой и имеет линии стыка элементов гладких поверхностей (киль – днище кормовой оконечности; бульб – борт носовой оконечности).

Рис. 30. Физическая модель судна проекта CNF22 (Масштаб 1:50)

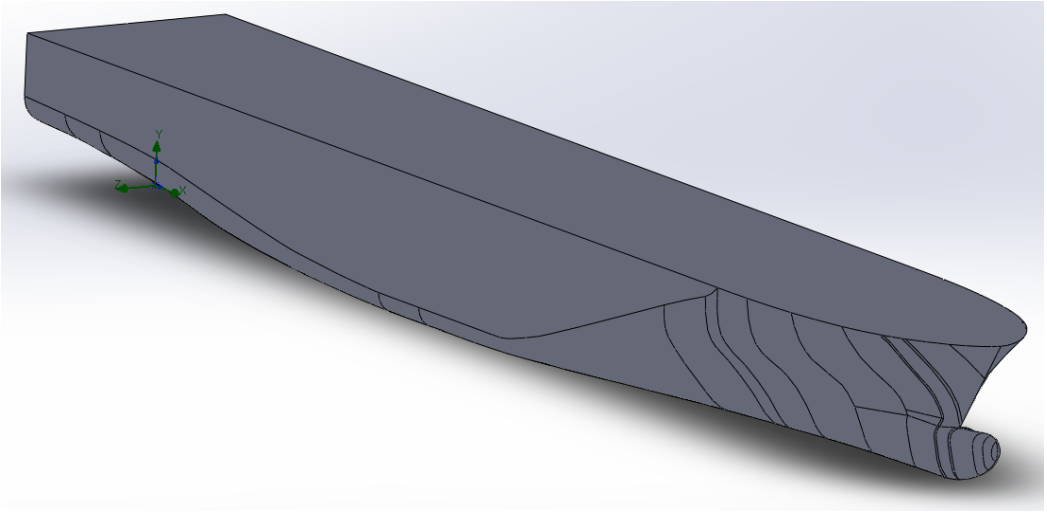

Рис. 31. Цифровая твердотельная модель судна проекта CNF22

Геометрические характеристики расчетной области соответствуют поперечным размерам опытового бассейна (его длина 60 м) и приведены на рис. 32.

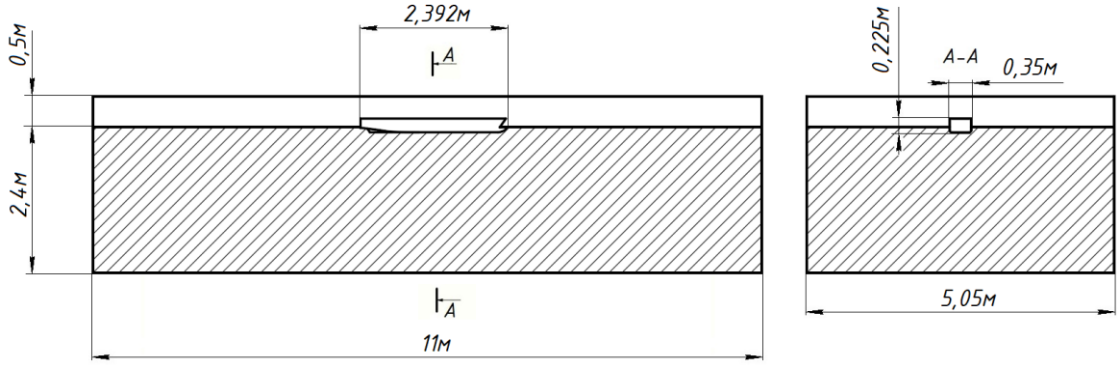

Рис. 32. Геометрические характеристики расчетной области

Конечно-элементная сетка для представленной геометрии построена на основе гексаэдрических элементов первого порядка. Общее число элементов сетки составляет 253292 элемента. В результате численного моделирования не было получено устойчивого стационарного процесса (задача не сошлась). При этом свободная поверхность принимала пенообразную структуру, не соответствующую реальному процессу (рис. 33).

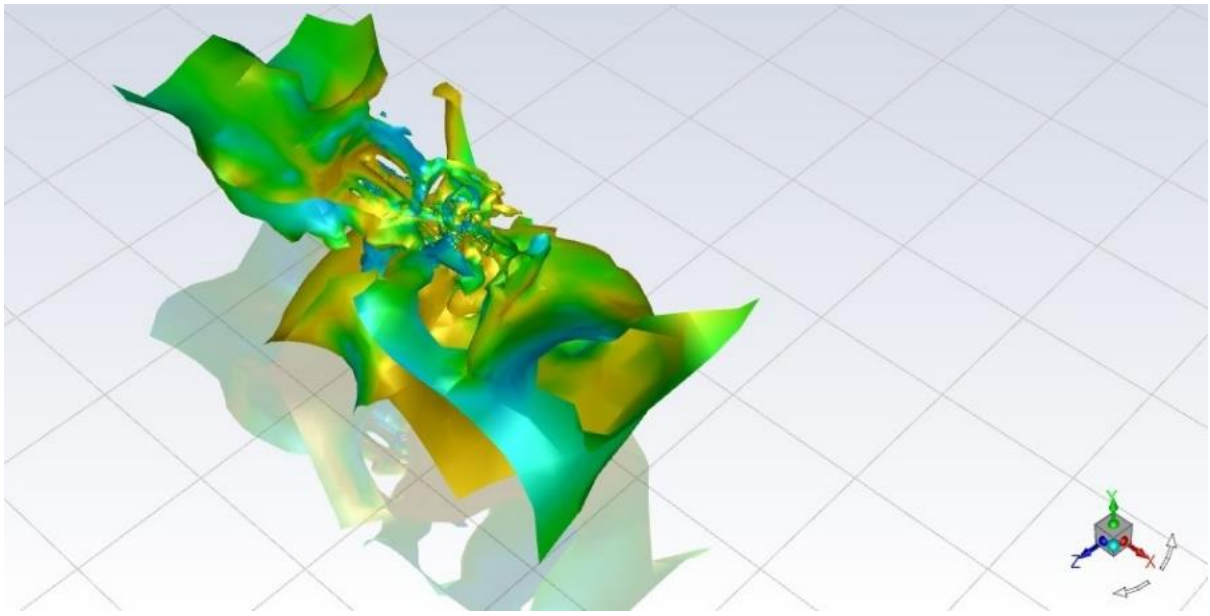

Рис. 33. Свободная поверхность потока жидкости

Отсутствие сходимости может быть вызвано ограниченными возможностями используемого компьютера и острыми кромками смоченной поверхности, которые требуют построения более подробной сетки.

После неудачи в ANSYS была предпринята попытка численного моделирования рассматриваемого случая с использованием возможностей пакета *SolidWorks*, в котором создавалась твердотельная цифровая модель. *SolidWorks* справился с задачей, но полученная сила сопротивления $\boldsymbol{R} = \boldsymbol{R}_{\text{вязк}} + \boldsymbol{R}_{\text{волн}} = 1{,}64$Н на 11,5 % меньше силы, которая была получена в опытовом бассейне $\boldsymbol{R} = \boldsymbol{R}_{\text{вязк}} + \boldsymbol{R}_{\text{волн}} = 2{,}20$ Н. Заметим, что погрешность измерений в опытовом бассейне не превышает 1 %.

Заключение

Использование программного комплекса ANSYS, реализующего численный метод решения физических задач – метод конечных элементов, позволяет получать всю необходимую информацию о кинематических и динамических параметрах потока сплошной среды. Работа программного продукта для простых объектов (гладкая поверхность) возможна даже на компьютерах с ограниченными техническими характеристиками (быстродействие, емкость ОЗУ). Усложнение геометрии смоченной поверхности при грубой сетке может привести к потере сходимости итераций решения. Для получения устойчивого решения необходимо построение более подробной сетки в местах с большой кривизной смоченной поверхности и для острых кромок с использованием более мощных компьютеров.

Библиографический список

1. Войткунский, Я.И. Справочник по теории корабля: в трех томах. Том 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители / под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985. – 768 с.
2. Ваганов, А.Б. Численное моделирование характерных режимов эксплуатации водоизмещающего судна / А.Б. Ваганов, И.Д. Краснокутский // Сборник докладов Всероссийской научно-практической конференции «Современные технологии в кораблестроительном и авиационном образовании, науке и производстве». – Н. Новгород, НГТУ им. Р Е Алексеева, 2016. С. 35-41.
3. Елизарова, Т.Г. Лекции Математические модели и численные методы в динамике жидкости и газа. Подходы, основанные на квазигазодинамических и квазигидродинамических уравнений / Т.Г. Елизарова. – М.: Физический факультет МГУ, 2005. – 224 с.
4. Капранов, И.Е. Моделирование движения корабля при наличии волнения на воде. CAFEM: Видеоурок № 1403. [Электронный ресурс] URL: https://www.youtube.com/watch?v=0gmVWp38KLo (дата обращения 02.11.2023).