

УДК 629.124

EDN ZHQOPT

В.В. Князьков
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОЗДУХА ДВИЖЕНИЮ СУДНА

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

Рассмотрены возможности численного моделирования в *SolidWorks Flow Simulation* при выполнении расчетов сопротивления воздуха движению судна. Постановка такой задачи обусловлена тем, что экспериментальные методы изучения сопротивления движению судов широко применяются при выполнении научно-исследовательских работ, когда разрабатываются формы обводов вновь проектируемых судов, а также при оценке ходкости построенных судов. Модельные испытания, которые проводят при проектировании судов, позволяют провести надежное сравнение эффективности различных вариантов проектируемого судна. В качестве менее затратной и более удобной альтернативы модельным испытаниям в настоящее время используют численное моделирование с применением специализированных программ и приложений.

Ключевые слова: проектирование судна, испытание моделей, сопротивление воздуха движению судна, численное моделирование.

Введение

Обязательным этапом проектирования современного судна при оценке его ходкости являются модельные испытания [1]. Модельные испытания в опытовых бассейнах позволяют определить сопротивление воды движению судна и выполнить надежное сравнение эффективности различных вариантов судна в процессе разработки формы обводов. Аэродинамические характеристики судов обычно исследуют в аэродинамических трубах [2].

Внедрение в практику проектирования технологий численного моделирования позволяет значительно повысить качество изделий, экономить время и снижать затраты, связанные с проектированием и испытанием выпускаемой продукции. Современные системы автоматизированного проектирования позволяют точно и достоверно моделировать поведение разрабатываемого изделия и/или его моделей в реальных условиях, начиная с самых ранних этапов. Принято считать, что программный комплекс *SolidWorks* является одним из лидеров в сфере включения разнообразных инструментов и, в частности, инженерного анализа в среду проектирования [3]. Один из наиболее востребованных расчетных модулей семейства *Simulation* – модуль *Flow Simulation*. Данный модуль позволяет моделировать потоки жидкости и газа для вычисления различных характеристик: скорости потока, давления, температуры и т.д. [4].

В данной статье представлены результаты обтекания неподвижного корпуса судна движущимся потоком воздуха с целью определения воздушного сопротивления при движении судна, полученные с помощью модуля *Flow Simulation* и сравнение их с результатами приближенных вычислений.

Объект исследования

В качестве объекта для исследований выбран сухогрузный теплоход проекта 17310 (тип «Россия»). Судно предназначено для перевозки генеральных, насыпных грузов, включая зерно, навалочных грузов, леса и контейнеров международного образца в трюмах и на люковых крышках. Это однопалубное судно с баком и развитым ютом, кормовым расположением машинного отделения, с расположением жилых и служебных помещений в кормовой поло-

вине судна, грузовыми трюмами в носовой части. У судна прямой наклонный форштевень (рис. 1, а) и транцевая корма (рис. 1, б).



а)



б)

Рис. 1. Сухогрузный теплоход типа «Россия» – проект 17310
(фото с сайта fleetphoto.ru)

Определение воздушного сопротивления при проектировании судна

Водоизмещающие суда двигаются на границе двух сред. Гидроаэродинамические силы, действующие со стороны воды и воздуха на движущееся судно, представляют собой сумму элементарных сил, распределенных по его поверхности, и зависят от их плотности и вязкости. Плотность воздуха при температуре 15 °С и давлении 1013 ГПа составляет $\rho_A=1,226 \text{ кг/м}^3$. Это значение используют при расчете аэродинамических сил, действующих на надводную часть судна. Удельный вес сопротивления воздуха в общем балансе сопротивления, особенно при отсутствии ветра, невелик и составляет всего 1,5–3,5 %. В условиях ветреной погоды роль сопротивления воздуха уже значительна и при встречном ветре может достигать 10–15 % [1].

Для расчета силы сопротивления воздуха применяется следующая формула

$$R_{AA} = C_{AA} \frac{\rho_A v_A^2}{2} F_T \quad (1)$$

где C_{AA} – коэффициент воздушного сопротивления. Пределы изменений коэффициента воздушного сопротивления для транспортных судов $C_{AA}=0,7 \dots 1,2$;

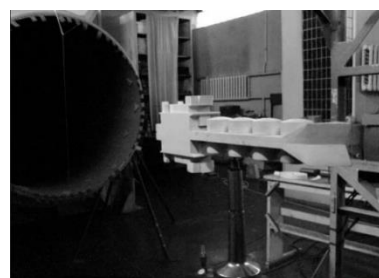
F_T – характерная площадь (обычно это площадь проекции надводной части корпуса судна на плоскость мидель-шпангоута);

v_A – скорость воздуха (при отсутствии ветра $v_A=-v$, а v – скорость движения судна, м/с); При наличии ветра $v_A=-v \pm v_{\text{ветр}}$ (легкий ветер: $v_{\text{ветр}}=2,5 \text{ м/с}$, что соответствует трем баллам по шкале Бофорта).

При наличии ветра надводная часть корпуса судна находится в неоднородном поле скоростей, изменяющемся по высоте. Поэтому эксперименты по определению сопротивления воздуха (коэффициента сопротивления) в этом случае проводят с моделями надводной части корпуса, расположенными на специальном экране, установленном в рабочей части аэродинамической трубы (рис. 2 а) [2]. В случае отсутствия ветра испытывают дублированные модели надводной части корпуса в однородном потоке (рис. 2, б) [5].



а)



б)

Рис. 2. Экспериментальное определение коэффициента сопротивления воздуха с использованием: а – специального экрана; б – дублированной модели

Постановка задачи

Для выполнения расчетов были разработаны твердотельные модели [6] сухогрузного теплохода (рис. 1). Модели представлены на рис. 3, а, б. Площадь проекции надводной части корпуса судна на плоскость мидель-шпангоута (рис. 3, в) составляет $F_T = 134,45 \text{ м}^2$.

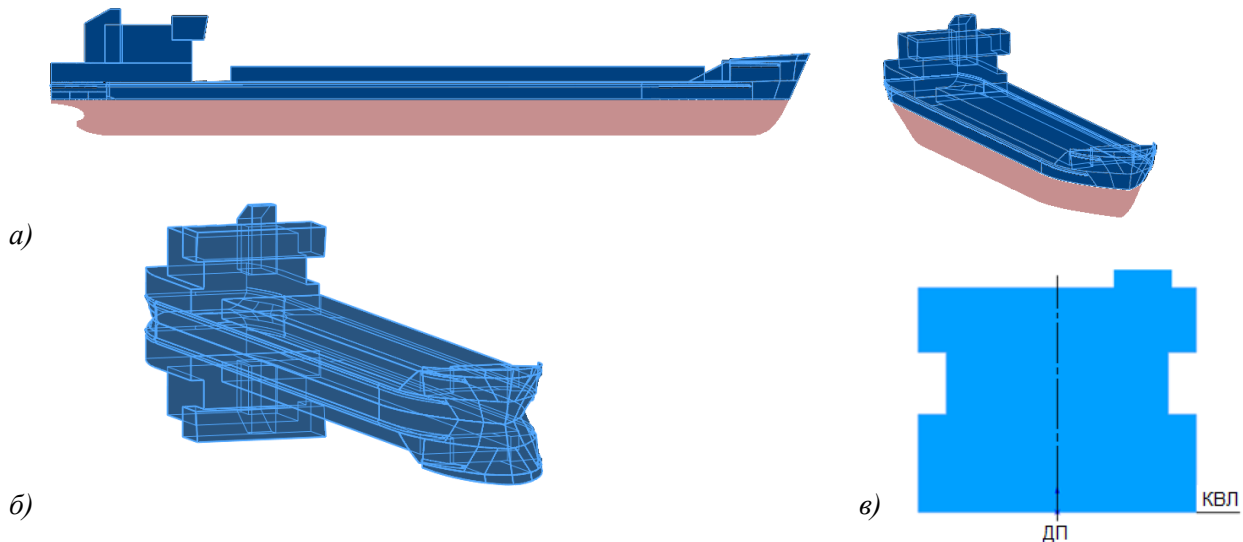


Рис. 3. Твердотельные модели (а, б) и проекция надводной части корпуса на плоскость мидель-шпангоута (в)

Для задания условий задачи воспользуемся функцией *Мастер проектов*, которая автоматически создает новый проект и позволяет задать имя проекта и создать новую или выбрать существующую конфигурацию (рис. 4, а). По умолчанию для расчетов сохраним систему СИ, а градусы Кельвина изменим на градусы Цельсия (рис. 4, б).

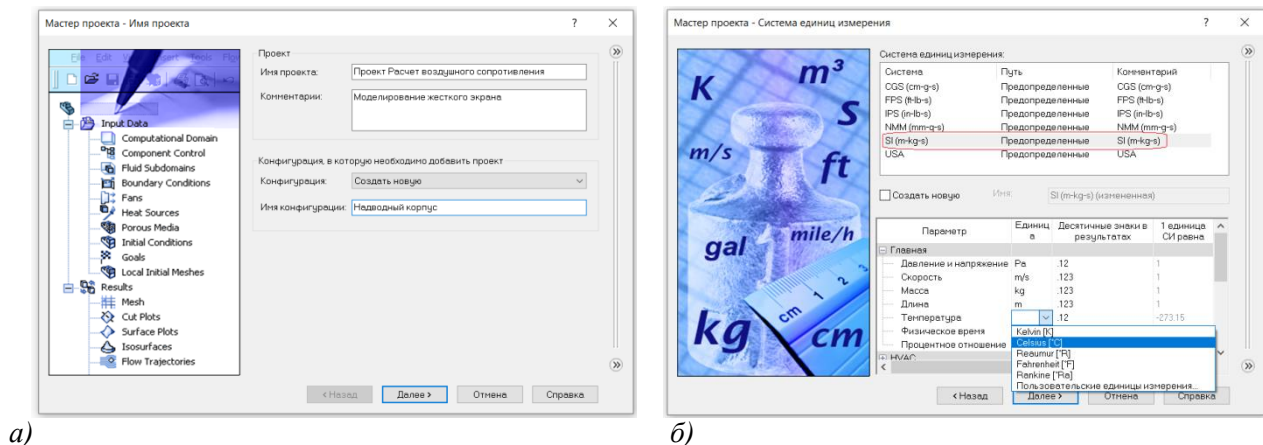


Рис. 4. Начало работы

Для обтекания твердого тела задаем тип задачи *Внешняя*. Поскольку в задаче рассматривается поток, меняющийся со временем, нужно задать условие *Нестационарность*. Назначим *Общее время* задачи и *Временной шаг* выдачи результатов (эти параметры можно оставить по умолчанию и/или уточнить в ходе решения задачи). Выбирая условие *Гравитация*, обязательно нужно проверить, чтобы ускорение свободного падения было направлено корректно (рис. 5, а).

Следующий шаг – выбор текучей среды, в нашем случае это воздух (*Air*; рис. 5, б). Характеристики течения сохраняем по умолчанию.

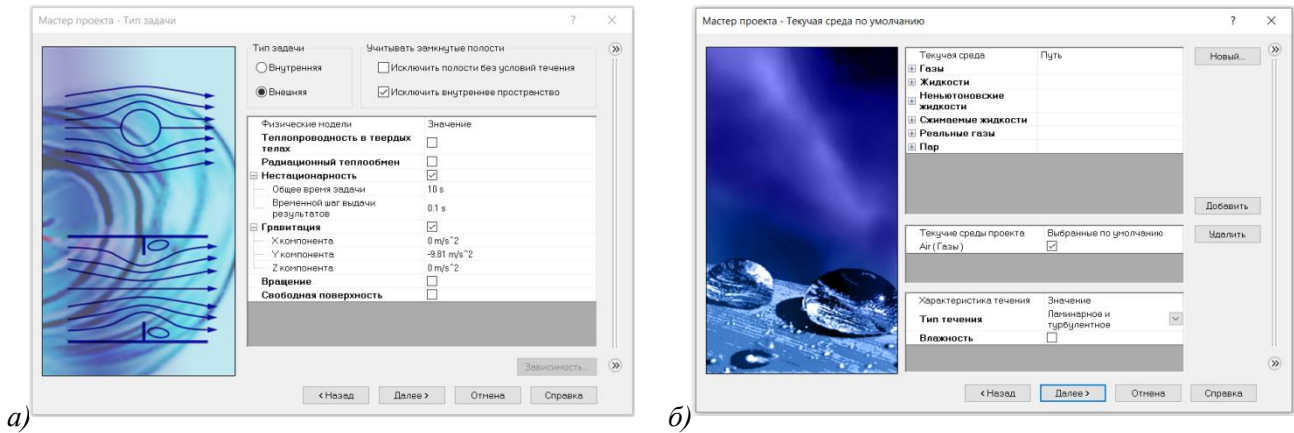


Рис. 5. Выбор типа задачи (а) и текучей среды (б)

Также сохраним параметр условия на стенке по умолчанию (*Адиабатическая стенка*) и зададим надбавку на шероховатость (рис. 6, а). В окне *Начальные и внешние условия* (рис. 6, б) введем скорость потока по оси *x* в противоположном направлении. Кроме постоянного значения скорость потока может быть задана с помощью зависимостей, табличных значений или формулы (кнопка *Зависимость*, рис. 6, б).

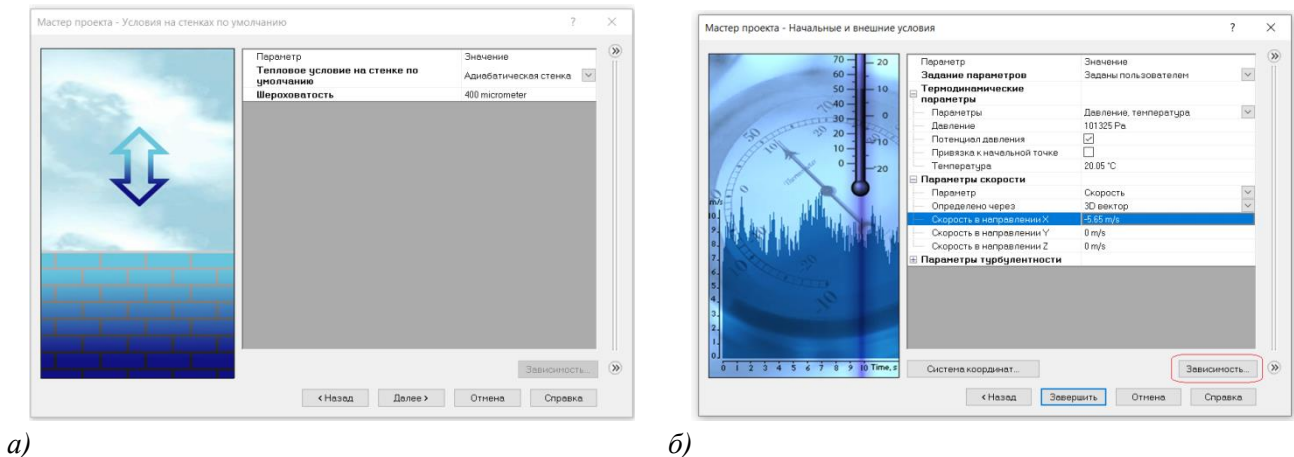


Рис. 6. Выбор условий на стенке (а) и начальных условий задачи (б)

Расчеты воздушного сопротивления судна

Расчетную область и ее размеры будем назначать в зависимости от конфигурации модели через задание координат области. Для дублированной модели в направлении оси *y* удобно использовать симметрию относительно плоскости КВЛ (рис. 7, а, б).

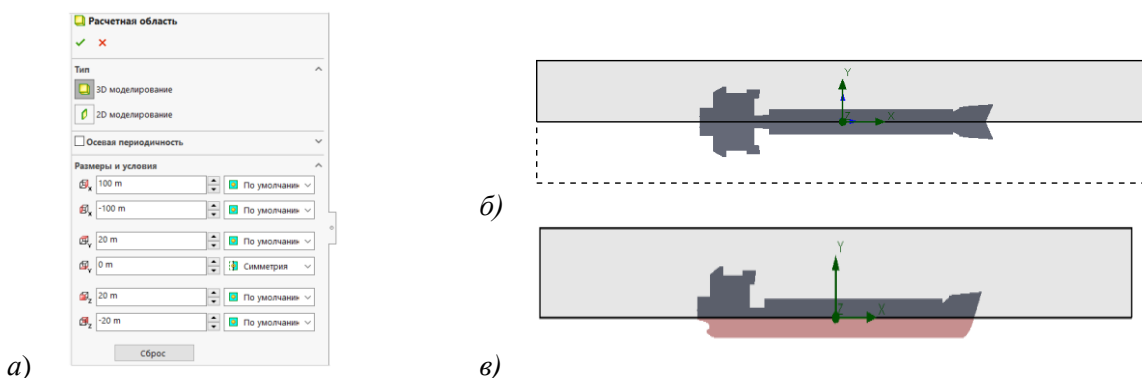


Рис. 7. Расчетная область для дублированной модели с учетом ее симметрии (а, б) и при наличии жесткого экрана (в)

Используя вкладку *Опции управления расчетом* основного меню *Flow Simulation*, назначают условия для выполнения расчета (рис. 8). Для этого задаем *Сходимость целей* и *Физическое время* выполнения расчета. По умолчанию время переходит из *Мастера проектов* и его можно корректировать. Во вкладке *Адаптация сетки* установим максимально допустимое число ячеек при их дроблении: 7 500 000. Для *Стратегии адаптации* сетки выберем условия *Периодически* и *Физическое время*. От этого параметра зависит, в какие моменты расчета будет выполняться адаптация сетки.

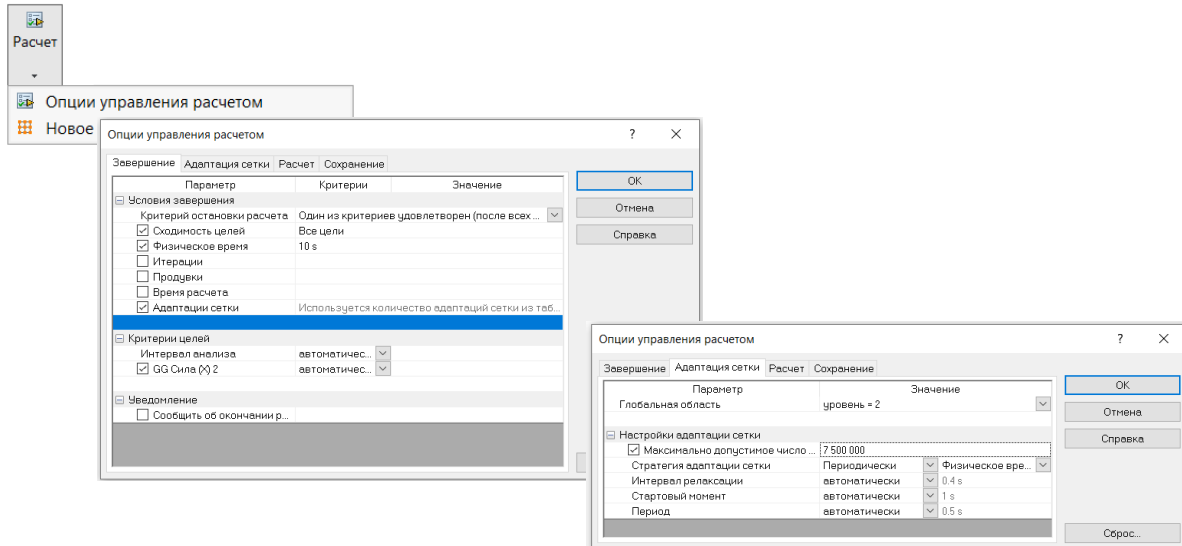


Рис. 8. Опции управления расчетом

В качестве *Глобальной цели* определим силу по оси *x*, которая будет соответствовать силе сопротивления воздуха в глобальной системе координат. Для выполнения расчета необходимо выполнить настройку *Базовой сетки*. Выбранные граничные условия *Реальная стенка* и *Глобальная цель* после их выбора отобразятся в *Дереве анализа Flow Simulation* (рис. 9)

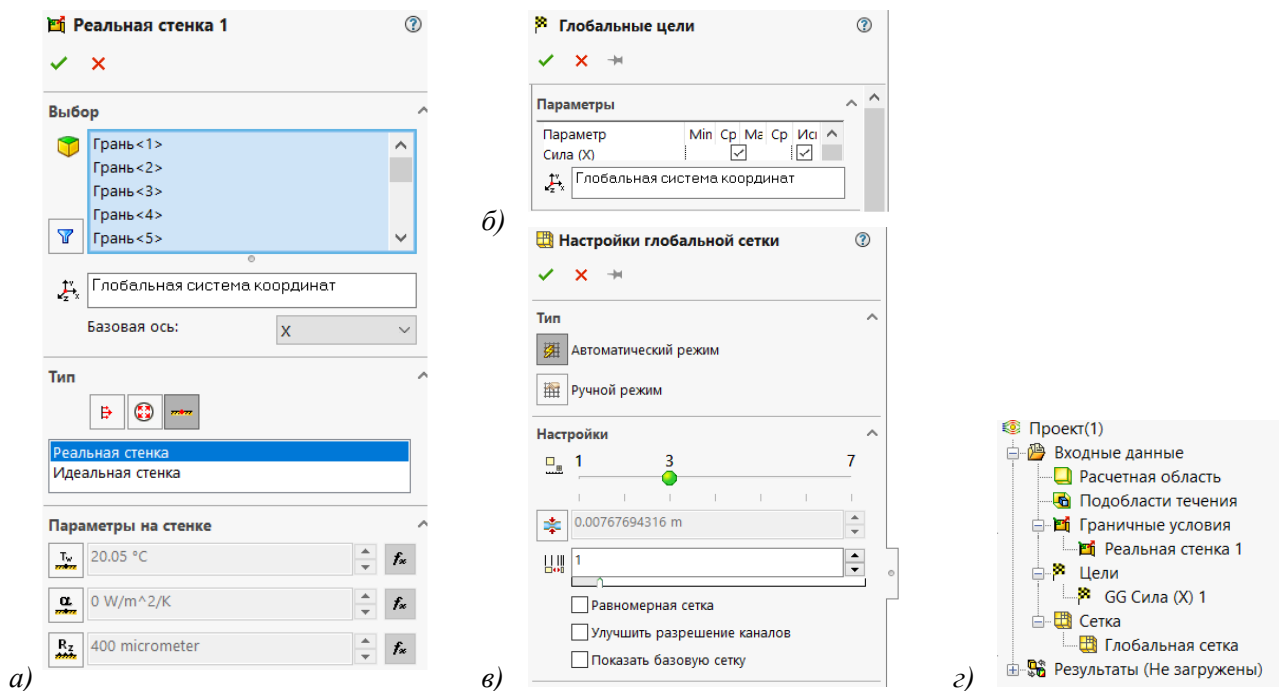


Рис. 9. Выбор граничных условий (а), глобальной цели (б), настройка базовой сетки (в) и Дерево анализа (г)

Расчет завершится, как только будет достигнута сходимость указанных для расчета целей. Условие сходимости целей может определяться автоматически или задаваться в режиме *вручную*. Условие для завершения расчета, например, в *автоматическом* режиме – размах амплитуды колебаний цели на *Интервале анализа*, который отсчитывается от текущей итерации, становится ниже значения *Критерия* сходимости цели, цель считается сошедшейся (рис. 10).

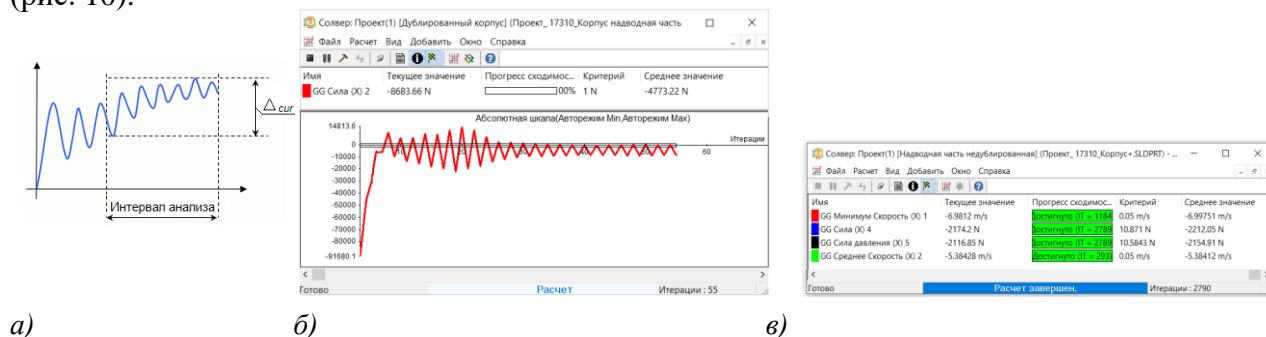


Рис. 10. Условие завершения расчета (а), фрагмент диаграммы сходимости цели (б) и таблица целей (в)

Основные результаты и выводы

Для визуализации распределения параметров течения и исследования полученных результатов *Flow Simulation* предоставляет множество различных элементов и инструментов обработки результатов. Можно построить картинку, например, в любом сечении или на выбранных гранях или поверхностях модели. На рис. 11 приведены примеры визуализации результатов выполненных расчетов.

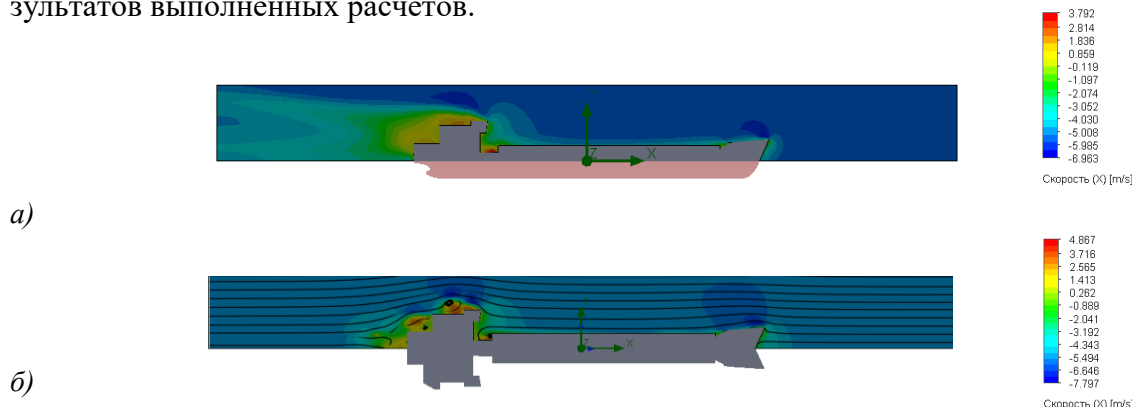


Рис. 11. Эпюры распределения скорости потока в ДП: а – при наличии жесткого экрана; б – дублированная модель

На рис. 12 приведены *Картинки в сечении*, для которых в качестве типа отображения выбрана сетка. Из эпюр видно, что сетка автоматически уточнилась в местах завихрения воздушного потока и там, где скорость потока существенно отличается от заданного значения.

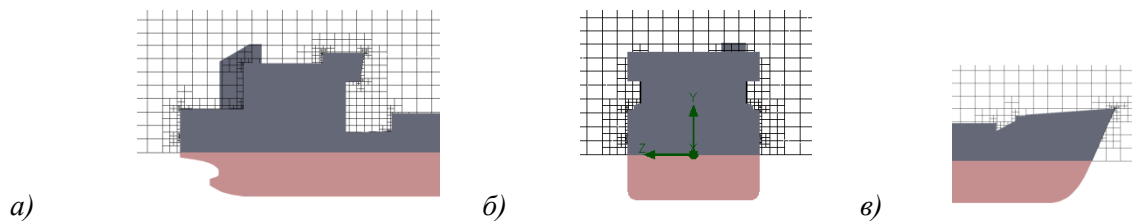


Рис. 12. Тип картины в сечении *Сетка*

Значение силы сопротивления можно посмотреть, открыв вкладку *Цели*. Результаты выполненных расчетов по формуле (1) и численных расчетов при отсутствии ветра и скорости движения судна $v=5,65$ м/с приведены в табл. 1.

Таблица 1.
Результаты расчетов сопротивления воздуха

Коэффициент сопротивления воздуха C_{AA}		0,8	1,0	1,2
Приближенный расчет R_A , кН		2,15	2,68	3,22
Численный расчет	Дублированная модель		$R_A=2,52$ кН; $C_{AA}=0,94$	
	Наличие жесткого экрана	Ветер отсутствует	$R_A=2,17$ кН; $C_{AA}=0,81$	
		Наличие ветра $v=2,5$ м/с	$R_A=4,95$ кН; $C_{AA}=0,89$	

Таким образом:

- полученные значения численных расчетов сопротивления воздуха попадают в диапазон вычислений по формуле (1) для рекомендуемых [1] значений коэффициента сопротивления;
- численные расчеты для модели при наличии жесткого экрана и для дублированной модели дают достаточно близкие значения коэффициентов сопротивления (разница составляет 5 %);
- приведенные примеры свидетельствуют о достоверности получаемых результатов и демонстрируют эффективность численного моделирования внешнего воздушного потока в *SolidWorks Flow Simulation*;
- полученные результаты могут быть использованы при проектировании судов.

Библиографический список

1. **Войткунский, Я.И.** Сопротивление воды движению судна: учебник / Я.И. Войткунский. – Л.: Судостроение, 1988. – 288 с.
2. Тренажерный комплекс. Крыловский государственный научный центр [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://krylov-centre.ru> (дата обращения 25.10.2023).
3. **Алямовский, А.А.** SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи / А.А. Алямовский. – СПб: БХВ-Петербург, 2012. – 448 с.
4. **Салимов, М.** Анализ внешнего потока в SolidWorks Flow Simulation // CADMASTER. 2021. № 2. С. 42-45.
5. Модель судна в аэродинамической трубе СПГУВК.JPG [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Файл:Модель_судна_в_аэродинамической_трубе_СПГУВК.JPG (дата обращения 25.10.2023).
6. **Князьков, В.В.** SolidWorks. Проектирование судов: учеб. пособие / В.В. Князьков. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2018. – 228 с.