## NEW POSSIBILITIES OF POST-PROCESSING THE COMPUTATIONAL RESULTS FOR STRENGTH PROBLEMS IN «LOGOS» SOFTWARE PACKAGE

A. I. Lopatkin, V. V. Zhirnov, D. S. Kondratiev, V. V. Lomtev, E. V. Nesterov

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov

The report presents new capabilities of the parallel post-processing system ScientificView. The realized functionalities are mostly meant for processing the results of simulation produced using the program module of «LOGOS» package for strength problems However, a part of the developed algorithms are universal and can be used for post-processing the results produced with other solvers.

Key words: LOGOS software package, parallel post-processing system ScientificView, post processing, strength.

УДК 532/519.6

368

## ПРИМЕНЕНИЕ ПАКЕТА ПРОГРАММ ЛОГОС ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СУДОСТРОЕНИЯ

И. О. Маношина, А. С. Козелков, С. В. Лашкин, В. В. Курулин, А. С. Кривонос, Н. В. Тарасова, Ю. А. Циберева, И. Д. Блажнов, Е. С. Романова

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров

Представлены первые результаты решения следующих задач по тематике судостроения с использованием пакета программ ЛОГОС [1] (разработка ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»): обтекание цилиндра, вращение кругового диска с постоянной угловой скоростью в ограниченном пространстве, обрушение водяного столба жидкости, падение тела в воду, затопление тела, затопление модели судна, моделирование лодки на волнах, вращение корабельного винта VP1304 в открытой воде и др. Проведено сравнение физических характеристик, полученных по результатам численного моделирования, с экспериментальными данными и теоретическими исследованиями.

*Ключевые слова*: пакет программ ЛОГОС, судостроение, верификационный базис, свободная поверхность, внешнее обтекание, вращение, затопление.

## Введение

В РФЯЦ-ВНИИЭФ создан пакет программ ЛОГОС [1], предназначенный для промышленного 3D-моделирования. Он позволяет моделировать процессы аэро-, гидро-, газодинамики, тепломассопереноса, турбулентного перемешивания и прочности с использованием ресурсов современных супер-ЭВМ. Пакет ориентирован на применение эффективных численных методов с использованием неструктурированных сеток, состоящих из произвольных многогранников. В состав пакета входит ПреПостПроцессор, предназначенный для импорта и обработки CAD/FEM/CFD-моделей, генерации поверхностных и объемных сеток, имеющий визуальную среду для подготовки расчетной модели и интерактивную систему инженерной визуализации.

Разработанный пакет программ инженерного анализа ориентирован на моделирование широкого круга физических процессов в интересах проектирования перспективных наукоемких изделий промышленности.

В настоящее время ведутся работы по адаптации пакета программ ЛОГОС для решения задач судостроительной промышленности. Данный процесс включает в себя реализацию и проведение полномасштабного тестирования физико-математических моделей, эффективных математических методик и высокопараллельных алгоритмов для численного моделирования на супер-ЭВМ физических процессов, характерных для практических задач судостроительной промышленности с требуемой в судостроительной отрасли точностью.

#### Верификация пакета программ ЛОГОС по тематике судостроения

Моделирование задач по тематике судостроения является одним из наиболее сложных классов задач вычислительной гидродинамики. Задачи этого класса встречаются во многих инженерных и научных проблемах и играют большую роль в природе и технике. Отметим, что экспериментальные и натурные исследования таких задач сопряжены со значительными трудностями и затратами, поэтому оценка степени достоверности численных методов, моделирующих такие течения, является очень актуальной задачей.

Верификационные задачи корабельной гидродинамики требуют рассмотрения объектов с большими геометрическими размерами и режимов моделирования с высокими числами Рейнольдса. Отсюда возникает необходимость построения тонкого пограничного слоя в расчетных моделях, требующих высокого сеточного разрешения (40–160 млн. ячеек даже на задачах моделирования отдельных частей объектов морской техники).

Решение сложных задач судостроительной промышленности требует реализации сложных физико-математических моделей, эффективных математических методик и высокопараллельных численных алгоритмов, а также больших вычислительных мощностей для численного моделирования на супер-ЭВМ.

В рамках работ по тематике судостроения создан верификационный базис, в который вошли следующие классы задач:

- моделирование внешнего обтекания тел;

- моделирование вращающихся тел, винтов и движителей;

- моделирование течений со свободной поверхностью;

- моделирование движения и затопления твердых тел в задачах со свободной поверхностью;

 моделирование движения и маневрирования моделей судов с учетом вращения движителей;

- моделирование процессов кавитации.

Решение поставленных задач необходимо для проведения верификации и адаптации многофункционального пакета программ инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования ЛОГОС под специализированные задачи судостроительной промышленности с целью внедрения в технологический цикл проектирования и модернизации объектов морской техники.

## Решение верификационных задач по тематике судостроения с использованием пакета программ ЛОГОС

В разделе представлены результаты расчетов ряда тестовых и верификационных задач, которые на данный момент решены в пакете программ ЛОГОС.

Особое внимание уделяется вопросам моделирования объектов морской техники на водной поверхности и вращения движителей.

Следует отметить, что на данный момент разработчики пакета ЛОГОС приступили к вопросам адаптации кода для моделирования обтекания водной средой объектов морской техники и их движителей с учетом их взаимодействия (вращение и перемещение).

В ближайших планах также значится верификация физико-математических моделей для расчета процессов кавитации.

Рассмотрим некоторые примеры верификационных задач.

#### 2.1. Обтекание цилиндра

Рассматривается задача нестационарного обтекания круглого цилиндра потоком вязкого несжимаемого нетеплопроводного воздуха [2 – 5].

Геометрия задачи представляет собой цилиндр, расположенный на некотором расстоянии от края области. При обтекании цилиндра потоком воздуха позади него образуется правильная последовательность вихрей, вращающихся попеременно вправо и влево. Подобная последовательность вихрей называется вихревой дорожкой Кармана. При малых числах Рейнольдса порядка Re ≤ 30 обтекание тела происходит с образованием стационарной замкнутой отрывной зоны в его кормовой части. При увеличении числа Рейнольдса течение за телом становится нестационарным, неустойчивым, что приводит к разрушению отрывной зоны и отрыву вихрей поочередно то справа, то слева

Расчетные параметры выбраны таким образом, чтобы получить ламинарный поток с числом Рейнольдса Re = 250. С целью количественной проверки полученных результатов рассчитываются число Струхаля и коэффициент лобового сопротивления, которые сравниваются с экспериментальными данными.

Рассматриваемую задачу можно решать в разных постановках:

1. Цилиндр неподвижно закреплен в области и обтекается набегающим с некоторой скоростью потоком воздуха;

2. Воздушная среда изначально неподвижна, а цилиндр движется в ней с некоторой скоростью.

## Первый вариант постановки – цилиндр неподвижно закреплен в области и обтекается набегающим с некоторой скоростью потоком воздуха

Геометрия расчетной области представлена на рис. 1, блочно-структурированная сетка – на рис. 2. Голубой точкой обозначена ячейка слежения. Количество ячеек расчетной сетки: 32532.



Рис. 1. Геометрия расчётной области



Рис. 2. Сеточная модель

В процессе расчета вычисляются компоненты силы давления и силы трения, исходя из которых, определяются компоненты суммарной силы *Fx*. Исходя из этого, вычисляется коэффициент лобового сопротивления:

$$C_x = \frac{F_x}{0.5 \cdot \rho \cdot u^2 \cdot S},\tag{1}$$

где *Fx* – суммарная сила,

ρ – плотность среды,

u – скорость потока на входе,

*S* – площадь цилиндра.

Периодичность нестационарного процесса характеризуется числом Струхаля:

$$St = \frac{D}{T \cdot u},\tag{2}$$

где *D* – диаметр цилиндра, *T* – период колебаний в системе.

На рис. 3 показаны поля распределения скорости и давления, полученные на момент времени t = 100 с. В табл. 1 приведены численные результаты расчета в сравнении с эксперимен-тальными данными [2-5].



Рис. 3. Поле распределения скорости

Таблица 1

#### Результаты расчета

	Эксперимент	ЛОГОС	Отклонение (%)
Число Струхаля	0,1895	0,1869	1,4
Коэффициент лобового сопротивления	1,4	1,4868	6,2

Второй вариант постановки задачи – воздушная среда изначально неподвижна, а цилиндр движется в ней с некоторой скоростью

Расчетная сетка представляет собой сетку с перекрытиями и состоит из двух накладывающихся друг на друга сеток:

1. Внешняя сетка – прямоугольник толщиной в одну ячейку;

2. Сетка, окружающая цилиндр, которая будет двигаться вместе с ним, скользя по внешней сетке.



Рис. 4. Составные сетки и итоговая расчетная сетка

## 372 СУПЕРВЫЧИСЛЕНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

После построения интерполяционного шаблона с применением технологии «Химера» фрагмент расчетной сетки, состоящей из ячеек, участвующих в расчете, на начальный момент времени выглядит следующим образом:



Рис. 5. Фрагмент расчетной сетки

Далее положение цилиндра относительно внешнего региона будет изменяться по мере его движения.

Ниже на рисунках приведено поле распределения скорости (рис. 6).



Рис. 6. Поле распределения скорости

В табл. 2 приведены численные результаты расчета в сравнении с экспериментальными данными [2-5].

## Таблица 2

Численные результаты

	Эксперимент	ЛОГОС	Отклонение (%)
Число Струхаля	0,19	0,185	-2,6
Коэффициент лобового сопротивления:	1,38	1,37	-0,7

Результаты численных расчетов, полученные с использованием двух постановок задачи, хорошо согласуются с экспериментом и друг с другом.

# Вращение кругового диска с постоянной угловой скоростью в ограниченном пространстве

В задаче рассматривается вращение цилиндра в вязкой несжимаемой жидкости с заданными параметрами среды: плотность  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ , вязкость  $\mu = 0,00114 \text{ кг/м} \cdot \text{c}$  [6]. Рассматриваются различные режимы вращения диска (таблица 3).

Таблица 3

373

i entities spuidentin diretta				
Режим	об/сек	рад/сек	Re	LOG10(Re)
1	1,01037	6,34837	501187,23363	5,7
2	2,01596	12,66667	1000000,00000	6
3	4,02237	25,27332	1995262,31497	6,3
4	8,02569	50,42691	3981071,70553	6,6
5	20,15963	126,66667	1000000,00000	7

Режимы вращения диска

Геометрия задачи и пример расчетной модели представлены на рис. 7. Высота вращающегося цилиндра 0,008 м, диаметр 0,6 м.



Рис. 7. Геометрия задачи: а - схема эксперимента; б - расчетная модель

Для каждого режима построена своя гексагональная сетка с измельчением в области пластины. На пластине задан пограничный слой толщиной 0,005 м, количество ячеек в пристеночном слое и толщина первой пристеночной ячейки подобраны для каждого режима таким образом, чтобы значение Y + на пластине было около 1. Далее на рис. 8 показаны сечение расчетной сетки и сетка вблизи пластины для 1 режима.



Рис. 8. Сеточная модель: а - сечение расчетной сетки; б - расчетная сетка вблизи пластины

Параметры расчетных сеток для различных режимов приведены в табл. 4.

## Таблица 4

Режим	Количество ячеек сетки	Количество слоев в пограничном слое	Толщина первой пристеночной ячейки, м
1	1 174 544	19	3,2e-05
2	1 081 027	20	~ 2,7e-05
3	1 122 737	25	~ 1,1e-05
4	1 310 024	29	5e-06
5	1 189 437	33	2,5e-06

#### Параметры расчетных сеток

Все расчеты проводились в турбулентном режиме с моделью  $k-\omega$  (SST ALL). Использовались улучшенные пристеночные функции, учитывающие вращение поверхности.

По результатам расчетов оценивается коэффициент момента инерции вращающегося цилиндра:

$$C_m = \frac{M}{\frac{\rho}{2}\omega^2 R^5},\tag{3}$$

где М – момент действующей на цилиндр силы трения,

ω – число оборотов,

*R* – радиус.

Проводится сравнение с экспериментальными данными [6]. В табл. 5 представлены полученные по пакету ЛОГОС значения коэффициентов в сравнении с экспериментальными данными.

Таблица 5

Режим	lg(Re)	Y+	Ст эксперимент	Ст ЛОГОС	delta, %
1	5,7	0,94	0,011152	0,011321	1,51
2	6	1,39	0,009879	0,009929	0,50
3	6,3	1,0275	0,008765	0,00878	0,17
4	6,6	0,915	0,00779	0,007879	1,14
5	7	1,03	0,006705	0,006803	1,46

## Значения расчетных величин

На рис. 9 представлен график зависимости коэффициента момента инерции от числа Рейнольдса.



Рис. 9. График зависимости коэффициента момента инерции от числа Рейнольдса

Из графика видно, что расчетные и экспериментальные данные хорошо согласуются друг с другом. Расчетная погрешность не превышает 2 % для всех режимов вращения (табл. 5).

#### 2.3. Обрушение водяного столба жидкости

В задаче рассматривается обрушение столба жидкости (воды) на дно резервуара. Результаты экспериментального исследования обрушения столба жидкости представлены в [7]. Параметры экспериментальной установки и положение границы раздела фаз (жидкость-воздух) в начальный момент времени приведены на рис. 10.



Рис. 10. Схема экспериментальной установки

Для проведения численного моделирования была построена блочно-структурированная сеточная модель, состоящая из 8400 ячеек: в горизонтальном направлении располагается 120 ячеек, в вертикальном – 70. На левую, правую и нижнюю стенки накладывалось граничное условие прилипания, на переднюю и заднюю стенку – скольжение, сверху фиксировалось статическое давление.

На рис. 11,а приведены результаты численного моделирования, полученные с использованием пакета программ ЛОГОС. Результаты приведены для различных моментов времени: 0,0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 и 1,0 с. На рис. 11,6 показаны результаты численного моделирования, полученные в работе [7]. На рис. 11,в приведены фотографии эксперимента [7].

В момент времени t = 0,2 с передняя кромка водяного столба встречается с препятствием, формируя мощный всплеск вверх перед препятствием. Высота всплеска и форма образованной каверны хорошо согласуются, как между расчетами, так и с экспериментом [7]. Затем образованная всплеском волна достигает правой границы модельной (экспериментальной) области, гидравлический удар об эту стену порождает волну. На момент времени t = 0,6 с приходится самая активная стадия обрушения, образованной волны. При этом расчетные результаты показывают образование воздушного кармана около правой границы области, по форме примерно совпадающего для обоих расчетных случаев. Фотография эксперимента позволяет его идентифицировать. В момент 1,0 с жидкость встречается с левой стенкой.



t = 0,2 c

Рис. 11. Обрушение плотины: а) результаты численного моделирования ЛОГОС; б – результаты численного моделирования [7]; в – экспериментальные данные [7]



Рис. 11. Окончание

Из представленных результатов видно, что численные результаты, как по нестационарным характеристикам (время образования и обрушения волны), так и по форме свободной поверхности дают хорошее качественное согласование как между собой так и с экспериментом.

На рис. 12 представлено изменение высоты столба жидкости вдоль левой стенки резервуара с течением времени. Высота столба жидкости по левой стенке резервуара и время – величины безразмерные.

При вычислении высоты столба жидкости погрешность результатов численного моделирования ЛОГОС относительно экспериментальных данных не превышает 1 %.

При определении положения передней кромки жидкости погрешность результатов численного моделирования ЛОГОС относительно экспериментальных данных колеблется от 3,4 до 9,6 %.

При вычислении высоты столба жидкости погрешность результатов численного моделирования ЛОГОС относительно экспериментальных данных не превышает 1 %.

При определении положения передней кромки жидкости погрешность результатов численного моделирования ЛОГОС относительно экспериментальных данных колеблется от 3,4 до 9,6 %.

Видно, что численные результаты, полученные по ПК ЛОГОС, дают хорошее качественное и количественное согласование с экспериментом и численным решением, приведенным в работе [7].



Рис. 12. Зависимость высоты столба жидкости на левой стенке резервуара от времени

#### 2.4. Падение тела в воду

В задаче моделируется падение твердого шара в воду с небольшой начальной скоростью. Подобный эксперимент проводился для шаров из разных материалов и изложен в работе [8].

Параметры численной схемы приведены на рис. 13. Шар радиусом r = 1,27 см непосредственно перед столкновением с водной поверхностью имеет скорость V = 2,17 м/с. Уровень воды h в начальный момент времени составляет 0,2 м. Расчетная область представляет собой цилиндр радиусом R = 0,25 м и высотой H = 0,2254 м.

Рассматривалось два расчетных случая: в первом случае шар из полипропилена и плотность его составляла 0,86 от плотности воды, во втором – из стали с плотностью 7,86 относительно плотности воды.



Рис. 13. Параметры численной схемы

Для моделирования этой задачи была построена блочно-структурированная сеточная модель, измельченная в области движения твердого тела и состоящая из 800000 ячеек (рис. 14). На левую, правую и нижнюю стенки накладывалось граничное условие прилипания потока, сверху фиксировалось статическое давление.



Рис. 14. Дискретная модель: а – общий вид; б – измельчение сетки в области движения твердого тела

На рис. 15 показана динамика погружения стального шара в воду: а) экспериментальные фотографии [8]; б) результаты численного моделирования, построенные для соответствующих моментов времени. Серым цветом выделена жидкая фаза, сплошной черной линией отмечена граница раздела фаз, шар выделен черным цветом. В момент t = 5,9 мс шарик полностью погружается под воду. В момент t = 54,9 мс над поверхностью шарика начинает образовываться каверна, формирование которой к моменту времени t = 68,9 мс заканчивается по результатам численного моделирования и полностью завершается в эксперименте.



Видно хорошее качественное согласование численных и экспериментальных результатов.

Рис. 15. Погружение стального шара в воду: а – экспериментальные фотографии [8]; б – результаты численного моделирования

На рис. 16 показано изменение глубины погружения шарика в воду с течением времени. Приведены результаты для двух расчетных случаев. Теоретические результаты приведены в работе [8].



Рис. 16. Изменение глубины погружения в воду центра масс шарика от времени

Погрешность результатов моделирования относительно теоретических результатов составляет:

- для полипропиленового шарика 5,8 %;
- для стального шарика 22,2 %.

## 2.5. Затопление модели судна

Данная задача посвящена изучению процесса затопления уменьшенной модели судна с повреждениями в дне и в борте. Моделируются сложные движения корпуса модели в связи с изменяющимися свойствами плавучести в результате затекания воды внутрь корпуса в процессе затопления. В частности, учитываются взаимодействие корпуса с возникающими волнами, действие втекающей внутрь воды на корпус корабля и его кручение. Эта задача характеризуется высокой степенью нелинейности происходящих процессов, в связи с чем построение точной теоретической модели затруднено. Результаты численных расчетов сравниваются с экспериментальными данными, представленными в работе [9].

Внешняя область моделирования – бассейн размером 0,5 x 0,6 x 0,7 м, который заполнен водой до высоты 0,4 м. Тело представляет собой полый параллелепипед со скругленным основанием, массой 2,15 кг. Размеры тела составляют 0,35 x 0,17 x 0,13 м, толщина стенок – 0,01 м (рис. 17). На верхней крышке тела вдоль центральной линии сделаны 6 отверстий радиусом 0,01м, используемые для подвешивания тела над водой, а также для уменьшения влияния воздуха на тонущее тело (рис. 17) [9].

Поскольку основной причиной, приводящей к затоплению судов в реальности, является повреждения борта или дна, то рассмотрено два случая (модели): а) имеется отверстие диаметром 0,09 м в центре донной части тела и б) имеется отверстие диаметром 0,09 м сбоку тела.

В начальный момент времени тело подвешено на нити так, что касается дном уровня воды (рис. 17), затем нить перерезают и тело начинает тонуть.



Рис. 17. Размеры и начальное положение тела: а – размеры тела, б – начальное положение

При численном моделировании рассматривается окрестность тела размером 0,5 м х 0,6 м х 0,7 м. Расчетная сетка представляет собой сетку с перекрытиями, состоящую из двух накладывающихся друг на друга регионов: 1) внешняя сетка – параллелепипед указанных размеров, 2) сетка, окружающая стенки тела, которая двигается вместе с ним, скользя по внешней сетке. Внешняя граница сетки, привязанной к телу, помечена как интерфейсная.

В модели с боковым отверстием для учета вращения тела дополнительно задается тензор инерции (кг/м<sup>2</sup>):

$$\hat{J} = \begin{vmatrix} 0,031898 & -0,000013 & 0 \\ -0,000013 & 0,035416 & 0 \\ 0 & 0 & 0,01083 \end{vmatrix}.$$
(4)

Оси инерции привязаны к центру масс. Параметры сред воды и воздуха приведены в табл. 6.

Таблица 6

Параметры сред				
Вода Воздух				
Молекулярная вязкость, µ, кг/(мс)	0,00101	1,85e-05		
Плотность, р, кг/(м <sup>3</sup> )	998,2	1,205		

Для данной задачи при помощи средств препроцессора ЛОГОС были построены расчетные сетки размерностью ~ 800000 ячеек. Пример расчетной сеточной модели представлен на рис. 18.



Рис. 18. Расчетная сетка (модель б)

Результаты расчетов сравниваются с результатами экспериментов, описанных в [9]. Во время проведения экспериментов была произведена фотосъемка. На рис. 19 приведено сравнение экспериментальных фотографий и численных результатов для модели с отверстием в дне (модель а).



Рис. 19. Сравнение экспериментальных фотографий и численных результатов (модель а): a - t = 0,1c, b - t = 0,3c, b - t = 0,6c, r - t = 1,12c, d - t = 1,4c, e - t = 2c

Благодаря действию силы тяжести и втекающей внутрь корпуса воды возникает направленное вертикально вниз ускорение. На кадрах, представленных на рис. 19, можно увидеть, что когда поверхность воды находится над отверстием в дне, внутри корпуса формируется столб воды в форме гриба. С увеличением глубины погружения силы выталкивания увеличиваются, а скорость погружения уменьшается. Скорость уменьшается до нуля к моменту времени t = 0,3 с, и модель начинает всплывать. Количество воды, находящейся внутри модели, уменьшается до тех пор, пока корпус всплывает до наивысшей точки при t = 0,6 с. В этот момент объем воды, затекшей внутрь, составляет половину всего внутреннего объема модели. Такие движения модели повторяются периодически. Модель полностью заполняется водой и окончательно тонет при t = 2 с.

На рис. 20 представлено аналогичное сравнение экспериментальных фотографий и численных результатов для модели с боковым отверстием (модель б).



Рис. 20. Сравнение экспериментальных фотографий и численных результатов: a – t = 0,15 c, б – t = 0,25 c, в – t = 0,3 c, г – t = 0,65 c, д – t = 1,05 c, e – t = 2 c, ж – t = 2,9 c, 3 – t = 7 c, и – t = 9 c

Когда левый борт модели поврежден, центр масс смещается ближе к правому борту. В начальный момент времени центр водоизмещения расположен между центром масс и левым бортом, что является причиной возникновения момента, наклоняющего судно в сторону правого борта. Из кадров, представленных на рис. 20, видно, что при t = 0,15 с плавающее тело погружается в воду и, когда отверстие в стенке модели становится ниже уровня воды, вода начинает затекать внутрь корпуса и угол наклона тела возрастает. Чем больше тело погружается в воду, тем сильнее возникающая выталкивающая сила, производящая обратное ускорение. При t = 0.25 с втекающая вода приводит к неустойчивости модели, скорость погружения уменьшается до нуля и поврежденная сторона начинает всплывать. Далее при уменьшении глубины погружения скорость всплытия уменьшается. По мере затекания воды внутрь корпуса жидкость разворачивается после столкновения со стенками, что порождает вращательный момент, направленный к левому борту судна. Расположение центра водоизмещения (плавучести) снова сдвигается к правому борту. После действия обоих возвращающих моментов угол крена уменьшается. По мере повторения действия таких моментов, период колебаний становится больше и амплитуда колебаний тела по вертикали уменьшается. Количество затекающей внутрь воды увеличивается в процессе погружения и уменьшается в процессе всплытия. После нескольких периодов колебаний в вертикальном положении при t = 7 с движение модели становится стабильным вплоть до t = 9 с, когда тело полностью погружается в воду.

В результате практического эксперимента были получены графики изменения вертикальной скорости тела и угла крена. Эти данные сравнивались с результатами численного эксперимента.

382

На рис. 21 представлены сравнительные результаты экспериментальных и расчетных данных по изменению вертикальной составляющей скорости тела со временем. На рис. 22 представлено изменение угла крена со временем для эксперимента и численного расчета для модели.



Рис. 21. Вертикальная составляющая скорости тела : а – модель а, б – модель б



Рис. 22. Угол крена тела для модели с боковым отверстием (модель б)

Сравнение расчетных и экспериментальных данных показывает, что на начальном этапе погружения они очень близки, как качественно, так и количественно. Это видно как из кадров поля фазового распределения, так и из графиков.

Далее на конечной стадии затопления при погружении тела полностью в воду наблюдается более медленное по сравнению с экспериментом затухание колебаний движения тела в вертикальной плоскости в обоих случаях (модель а и модель б). Особенно это различие заметно для модели а, где на момент времени t = 2 с эксперимент показывает, что тело полностью погрузилось под воду и начинает тонуть. Расчетные данные же говорят о том, что тело продолжает колебаться вблизи поверхности, постепенно погружаясь все глубже под воду.

#### 2.6. Моделирование лодки на волнах

Решается задача моделирования лодки на волнах с целью определения сопротивления корпуса лодки [10]. Общий вид задачи представлен на рис. 23. Масса лодки составляет 823,0451 кг. Моделирование выполнено для масштабируемой модели лодки с коэффициентом масштабирования 31,6. Только половина геометрии моделируется с использованием симметричных граничных условий.



Рис. 23. Общий вид задачи

С целью определения коэффициента сопротивления корпуса лодки в эксперименте его буксировали по водной поверхности. При проведении численного моделирования корпус лодки остается неподвижным. Движение лодки моделируется с использованием набегающего потока со скоростью, равной движению лодки и противоположно направленной.

Расчеты проведены в нестационарной постановке. Свойства жидкости, параметры геометрии, граничные условия приведены в табл. 7. Для аппроксимации конвективных слагаемых используется схема UD – первого порядка точности.

Таблица 7

Свойства жидкости, параметры геометрии, граничные условия

Свойства жидкости	Параметры геометрии	Граничные условия
Плотность: p = 997,561 кг / м <sup>3</sup> Вязкость: µ = 0,001 кг / м·с	Длина расчетной области: L = 36 м Высота расчетной области: K = 27 м Ширина расчетной области: 18 м	Вход (верхняя, нижняя и боковая граница набегающего потока): Inlet, v = 2,196 м/с. Выход (боковая граница вниз по течению): Pressure, гидростатическое давление. Средняя плоскость корпуса лодки: Symmetry. Боковая стенка расчетной области: Symmetry.

На рис. 24 показана расчетная сеточная модель, построенная для решения задачи. Количество ячеек сетки 517136. Расчетная сетка неравномерная, имеет сгущение вблизи корпуса лодки. Это необходимо для того, чтобы уменьшить численную диффузию расчетного метода.

Поступательное движение тела задано под действием сил, вращательное движение задано под действием моментов сил. Расчет проведен до момента времени 160 с, тип течения – турбулентный.



Рис. 24. Расчетная сеточная модель

Для наглядности происходящих процессов на рис. 25 представлено решение задачи на момент времени t = 5 с. На рис. 26 показано распределение волн в окрестности корпуса лодки на тот же момент времени.



Рис. 25. Лодка на водной поверхности на момент времени t = 5 с



Рис. 26. Распределение волн в окрестности корпуса лодки на момент времени t = 5 с

График зависимости положения Z координаты лодки от времени по вертикальной оси представлен на рис. 27.



Рис. 27. Перемещение лодки по вертикальной оси Z в зависимости от времени

По вертикальной оси наблюдаются затухающие колебания тела в пределах 0,07 м, что соответствует физике процесса.

Сравнение с экспериментальными данными проводится по значению коэффициента сопротивления корпуса лодки:

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot A},\tag{5}$$

где *F*<sub>d</sub> – общая сила лобового сопротивления,

*v* – скорость лодки,

А – масштабируемая площадь корпуса лодки.

В табл. 8 приведены значения величин для определения коэффициента сопротивления лодки.

Таблица 8

Значения величин для определения коэффициента сопротивления лодки

	Значение
Сила лобового сопротивления, F <sub>d</sub> , H	62,5
Скорость лодки, v, м/с	2,196
Масштабируемая площадь корпуса лодки, <i>А</i> , м <sup>2</sup>	9,55275

Сила лобового сопротивления, указанная в таблице, получена из расчета в пакете программ ЛОГОС.

В табл. 9 приведены результаты расчета коэффициента сопротивления корпуса лодки в сравнении с экспериментальными данными [10].

Таблица 9

Результаты расчета коэффициента сопротивления корпуса лодки в сравнении с экспериментальными данными

С <sub>d</sub> (ЛОГОС)	С <sub>d</sub> (эксперимент)	Погрешность
0,003120	0,003711	15,9

Результаты получены на достаточно грубой сеточной модели. С целью улучшения результатов моделирования необходимо провести серию расчетов на сеточную сходимость.

## 2.7. Вращение корабельного винта vp1304 в открытой воде

Геометрия задачи, представленная на рис. 28, приведена в Potsdam Propeller Test Case (PPTC) VP1304 [11]. Рассматривается вращение винта, закрепленного на валу в открытой воде. Данную задачу предлагается решать в двух постановках. В первом варианте предлагается рассматривать только винт и небольшую окрестность вокруг винта, второй вариант предполагает рассмотрения всей области.



Рис. 28. Геометрия для задачи моделирования корабельного винта в открытой воде

## Постановка 1

Рассмотрим вращение с постоянной угловой скоростью корабельного винта в трубе, заполненной вязкой несжимаемой жидкостью (рис. 29).



Рис. 29. Вариант расчетной модели корабельного винта в трубе, заполненной вязкой несжимаемой жидкостью

Расчеты проведены для различных значений относительной поступи винта Ј:

$$J = \frac{V_A}{n \cdot D},\tag{6}$$

где *V*<sub>A</sub> – поступательная скорость, *n* – скорость вращения винта, *D* – диаметр винта.

В табл. 10 представлены свойства жидкости, параметры геометрии, граничные условия. Вращение корабельного винта в пакете программ ЛОГОС моделируется заданием вращения жидкости в регионе и стенок самого винта.

Расчеты проведены в стационарной постановке с использованием *k*- $\omega$  (SST ALL) модели турбулентности с автоматическим определением зоны пограничного слоя. Параметры турбулентности приведены в табл. 11. Для аппроксимации конвективных слагаемых используется схема UD – первого порядка точности.

Таблица 10

Свойства жидкости	Параметры геометрии	Граничные условия
<i>Плотность:</i> ρ = 998,67 кг/м <sup>3</sup> <i>Вязкость:</i> μ = 0,001068 кг/м⋅с	Диаметр винта: D = 0,25 м Длина расчетной области: 0,2 м Диаметр расчетной области: 0,325 м	Вход: Inlet, $V_A$ =2,25; 3, 3,75; 4,5; 5,25 м/с. Выход: Pressure, $P = 101325$ Па. Стенки винта: WallNoSlip, движение границы – Вращение, вектор оси {0;0;1}, скорость вращения $n = 15$ об/сек ( $\omega = 94,25$ рад/сек). Боковая стенка: Pressure, $P = 101325$ Па.

Свойства жидкости, параметры геометрии, граничные условия

Таблица 11

## Параметры турбулентности

Параметры турбулентности	Величина
Интенсивность	0,05
Длина перемешивания	0,001

386

Для проведения расчетов используется сеточная модель из 4,27 млн ячеек, построенная в препроцессоре ЛОГОС методом отсечения (рис. 30). Параметры сеточной модели приведены в табл. 12.



Рис. 30. Расчетная сетка корабельного винта

## Таблица 12

#### Параметры сеточной модели

Параметры сеточной модели	Величина
Базовый размер ячейки, м	0,0045
Толщина пограничного слоя, м	0,0009
Число пограничных слоев	3

Сравнение результатов численного моделирования проводится по значениям коэффициента упора, коэффициента момента, кпд гребного винта (рис. 31):

$$K_T = \frac{T}{\rho \cdot n^2 \cdot D^4},\tag{7}$$

где *T* – сила тяги.

$$K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot n^2 \cdot D^5},\tag{8}$$

где *Q* – момент силы тяги.

$$\eta_0 = \frac{J}{2\pi} \cdot \frac{K_T}{K_O} \,. \tag{9}$$

Значение *у*<sup>+</sup> для данной сеточной модели не превышает 110. Результаты расчетов в пакете программ ЛОГОС сравниваются с экспериментальными данными [11].



Рис. 31. Экспериментальные [11] и расчетные значения коэффициента силы упора, коэффициента момента и кпд гребного винта (постановка 1)

## Постановка 2

388

Теперь рассмотрим задачу вращения винта морского движителя, закрепленного на валу и помещенного в достаточно большую область.

Вращение винта в открытой воде моделируется с использованием интерфейса MRF (Moving Reference Frames) между вращающимся и статическим регионами расчетной области (рис. 32). Использование данного подхода позволяет значительно сократить затраты на вычислительные ресурсы и упростить используемые физико-математические модели и алгоритмы при моделировании вращающихся объектов в водной среде по сравнению с явным моделированием вращения объекта с использованием движущихся сеток. При этом используемый подход позволяет происходящих физических получить качественную картину процессов И определить гидродинамические характеристики объектов морской техники с допустимой в судостроительной отрасли точностью.



Рис. 32. Схема расчетной области для задачи моделирования корабельного винта в открытой воде

Расчетная область представлена на рис. 33 и состоит из вращающегося и неподвижного регионов. Вращающийся регион представляет собой цилиндрическую область, окружающую винт.



Рис. 33. Расчетная модель

Расчеты проведены для различных значений относительной поступи винта Ј.

В табл. 13 представлены свойства жидкости, параметры геометрии, граничные условия. Вращение корабельного винта в пакете программ ЛОГОС моделируется заданием вращения жидкости в регионе и стенок самого винта.

Расчеты проведены в стационарной постановке с использованием *k*- $\omega$  (SST ALL) модели турбулентности с автоматическим определением зоны пограничного слоя. Параметры турбулентности приведены в табл. 14. Для аппроксимации конвективных слагаемых используется схема UD – первого порядка точности.

Таблица 13

Свойства жидкости	Параметры геометрии	Граничные условия
Плотность: р = 998,67 кг/м <sup>3</sup> Вязкость: µ = 0,001068 кг/м·с	Диаметр винта: D = 0,25 м Размеры расчетной области: 1,75 м×1,75 м×4,705 м Диаметр расчетной области: 0,325 м	Вход: Inlet, $V_A$ =2,25; 3; 3,75; 4,5; 5,25 м/с. Выход: Pressure, $P$ = 101325 Па. Стенки винта: WallNoSlip, движение границы – Вращение, вектор оси {0;0;1}, скорость вращения $n$ = 15 об/сек ( $\omega$ = 94,25 рад/сек). Боковые стенки: Symmetry Вал: WallNoSlip Граница между подвижным и неподвижным регионами: Interface внутренний

Свойства жидкости, параметры геометрии, граничные условия

## Таблица 14

#### Параметры турбулентности

Параметры турбулентности	Величина
Интенсивность	0,05
Длина перемешивания	0,001

Для проведения расчетов используется сеточная модель на 4,7 млн ячеек. Для подвижного региона используется расчетная сетка из предыдущей задачи. Сетка для неподвижного региона построена отдельно методом отсечения. Данные сетки сшиты узел в узел в препроцессоре ЛОГОС, на границе между подвижным и неподвижным регионами задается внутренний интерфейс.

Сечение сеточной модели вблизи винта показано на рис. 34.



Рис. 34. Сечение сеточной модели вблизи винта

390

Сравнение результатов численного моделирования проводится по значениям коэффициента упора, коэффициента момента, кпд гребного винта. Результаты расчетов в пакете программ ЛОГОС сравниваются с экспериментальными данными [11].

На рис. 35 приведены результаты расчетов в пакете программ ЛОГОС в обеих постановках.



Рис. 35. Экспериментальные [11] и расчетные значения коэффициента силы упора, коэффициента момента и кпд гребного винта (1 – первая постановка, 2 – вторая постановка)

Результаты расчетов с использованием интерфейса MRF между вращающимся и статическими регионами лучше согласуются со значениями экспериментальных данных. Моделирование одного винта с небольшой его окрестностью дает результаты с большей погрешностью из-за оказываемого влияния границ.

Результаты моделирования рассмотренной задачи по пакету программ ЛОГОС качественно совпадают с экспериментальными данными. С целью улучшения результатов моделирования корабельного винта VP1304 в открытой воде для определения его гидродинамических характеристик необходимо провести серию расчетов на сеточную сходимость, а также исследовать влияние толщины первой пристеночной ячейки на результаты расчетов.

Для иллюстрации на рис. 36 приведено поле модуля скоростей в окрестности винта, полученное из расчета в пакете программ ЛОГОС.



Рис. 36. Поле модуля скоростей в окрестности винта

Данная задача также может быть решена в пакете программ ЛОГОС с использованием сеток с перекрытием (технология «Химера»). Однако, проведение такого расчета требует значительно больших вычислительных ресурсов по сравнению с описанным выше подходом к моделированию вращающихся винтов в водной среде. Следует отметить, что при решении более сложных практических задач судостроения с моделированием движущихся объектов морской техники в большинстве случаев без использования технологии «Химера» не обойтись.

## Заключение

В настоящее время создан отечественный пакет программ ЛОГОС, предназначенный для промышленного 3D-моделирования. Получены первые результаты верификационных расчетов по тематике судостроения.

Проведено сравнение физических характеристик, полученных по результатам численного моделирования, с экспериментальными данными и теоретическими исследованиями. Качественная картина протекания процессов также имеет хорошее согласование с экспериментами.

Применительно к задачам судостроения в настоящее время проводится адаптация кода. Значительные доработки и развитие функционала пакета программ ЛОГОС проводятся в части моделирования:

- плавания тел на водной поверхности;
- движения и маневрирования моделей судов с учетом вращения движителей;
- процессов кавитации.

Разработчики кода готовы к сотрудничеству, проведению дальнейшей верификации кода на различных тестах и рассмотрению новых задач в судостроительной отрасли.

## Литература

1. Дерюгин Ю. Н., Зеленский Д. К., Глазунов В. А. и др. Многофункциональный пакет программ ЛОГОС: физико-математические модели расчёта задач аэро-, гидродинамики и теплопереноса: Препринт № 111. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013.

2. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974.

3. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1973.

4. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей в двух томах. – М.:Мир,1991.

5. Ландау Л. Д., Лифшиц В. М. Гидродинамика. – М.: Наука, 1988.

6. Дорфман Л. А. Гидродинамическое сопротивление и теплоотдача вращающихся тел. – М.: Физматлит, 1960.

7. Ubbink O. Numerical prediction of two fluid systems with sharp interfaces: PhD thesis. Imperial College, University of London. – 1997.

8. Aristoff J. M. et al. The water entry of decelerating spheres // Phys. Fluids, Am. Inst. Phys. – 2010. - No. 22.

9. A-man Zhang, Xue-yan Cao, Fu-ren Ming, Zhi-Fan. Investigation on a damaged ship model sinking into water based on three dimensional SPH method. Zhang College of Shipbuilding and Ocean Engineering. – Harbin 150001, China: Harbin Engineering University.

10. [Electronic resource]. Mode of access: http://www.simman2008.dk/KCS/.

11. [Electronic resource]. Mode of access: http://www.sva-potsdam.de/en/propulsion/.

## APPLICATION OF PROGRAM PACKAGE LOGOS TO SOLVE SHIPBUILDING PROBLEMS

I. O. Manoshina, A. S. Kozelkov, C. V. Lashkin, V. V. Kurulin, A. S. Krivonos, N. V. Tarasova, Yu. A. Tsibereva, I. D. Blazhnov, E. S. Romanova

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov

First results of simulations with the LOGOS program package (developed at RFNC-VNIIEF) are presented for the following shipbuilding problems: the problem of a flow around a cylinder, the problem of

## 392 СУПЕРВЫЧИСЛЕНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

a circular disc rotating at a constant angular velocity in restricted space, downfall of water column, the problem of a body falling into water, the problem of a sinking body, the problem of sinking model ship, simulation of a boat on the waves, rotation of propelling screw VP1304 in free water, etc. The physical parameters obtained according to the numerical simulation results were compared with the available experimental data and theoretical studies.

Key words: LOGOS program package, shipbuilding, verification basis, free surface, rotation.

УДК 004.416.6

## КОЛЛЕКТИВНЫЙ ДОСТУП К ФАЙЛОВЫМ ДАННЫМ НА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ С РАЗЛИЧНОЙ АРХИТЕКТУРОЙ В БИБЛИОТЕКЕ ЕФР

## К. К. Олесницкая, И. А. Антипин, М. А. Петрова

# Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров

В докладе представлен обзор функциональных возможностей библиотеки ЕФР версии 3.3 для организации коллективного доступа к файловым данным на вычислительных системах с различной архитектурой.

Ключевые слова: ЕФР, библиотека ЕФР, коллективный доступ к файловым данным.

## Введение

Для решения задач эффективного<sup>1</sup> доступа к файловым данным на вычислительных системах (ВС) с различной архитектурой в математическом отделении РФЯЦ-ВНИИЭФ разрабатывается кроссплатформенная библиотека ЕФР [1].

Для прикладных пакетов программ библиотека ЕФР предоставляет единый функциональный интерфейс работы с файловыми данными и единый формат представления расчетных данных. Что позволяет сохранять все необходимые данные как для продолжения счета в рамках одного пакета программ, так и для продолжения счета в рамках нескольких пакетов программ при сопряженных расчетах, а также для передачи в другой пакет программ при поэтапных расчетах.

Использование библиотеки ЕФР в подавляющем большинстве пакетов программ математического отделения позволяет сосредоточить решение проблем файлового доступа на программном уровне в рамках библиотеки и освободить разработчиков пакетов программ от необходимости менять свои методы чтения/записи, при переходе между вычислительными системами с различной архитектурой.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Эффективный доступ – это использование стратегии доступа к файловым данным с учетом аппаратных и файловых ресурсов конкретной BC