

УДК: 004.94

DOI: 10.53816/20753608_2021_3_98

СУПЕРКОМПЬЮТЕРНЫЙ ДВОЙНИК ПОДВОДНОГО СНАРЯДА SUPERCOMPUTER DUPLICATE OF UNDERWATER MISSILE

По представлению чл.-корр. РАН И.М. Смирнова

И.В. Спири¹, К.В. Иванов², П.В. Ермаков², С.А. Беляков², И.В. Евтушенко², А.В. Голяков²

¹АО «НИИИ», ²ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

I. V. Spirin, K. V. Ivanov, P. V. Ermakov, S. A. Beljakov, I. V. Evtushenko, A. V. Goljakov

Статья содержит краткий обзор разработанной технологии суперкомпьютерного моделирования процессов функционирования противолодочных и противоторпедных боеприпасов, оснащенных подводным снарядом, в соответствии с их полной схемой применения. Технология реализована с использованием комплексных суперкомпьютерных моделей в виде программно-методического комплекса (ПМК) «Двойник-ПС». Описаны задачи, решаемые с помощью ПМК, и методы их решения. Приводится описание архитектуры и проблемно-ориентированного графического пользовательского интерфейса ПМК. Рассмотрены некоторые аспекты применения ПМК в интересах решения прикладных научно-технических задач.

Ключевые слова: боеприпасы, суперкомпьютерный двойник, подводный снаряд, ЛОГОС, инженерный анализ, имитационное моделирование, разработка боеприпасов.

The article includes brief overview of developed technologies of supercomputer simulation of antisubmarine and antitorpedo ammunition's operation and maintenance. These ammunitions are equipped with underwater missile according to the complete scheme of application. The technology is implemented by means of complex supercomputer samples represented by program-methodical system «Duplicate-PS». The tasks are described, which are solved by means of this system, and methods of their solving. Here are presented architectural description and task-oriented graphic user interface. Here are analyzed some aspects of program-methodical system's application in solving science and technology objectives.

Keywords: ammunition, supercomputer duplicate, underwater missile, LOGOS, engineering review, simulated service test, development of ammunition.

Введение

Актуальность статьи подтверждается тем, что на сегодняшний день моделирование — неотъемлемая часть любой опытно-конструкторской работы (ОКР). Помимо очевидной возможности сокращения объема лабораторно-стен-

довой отработки и полигонных испытаний, за счет моделирования достигается оптимизация режимов испытаний, минимизируются работы по изменению облика изделия в связи с непредвиденными результатами испытаний, сокращается цикл и повышается общее качество проектирования [1]. Применение суперкомпьютерных

двойников¹ изделий позволяет снизить затраты на экспериментальные исследования, делая возможным более глубокий анализ функционирования создаваемого изделия, позволяя тем самым рассмотреть большее количество вариантов его реализации.

В данной статье авторы ограничиваются кратким обзором разработанной технологии суперкомпьютерного моделирования процессов функционирования боеприпасов класса «подводный снаряд» в соответствии с их полной схемой применения с использованием комплексных суперкомпьютерных моделей в интересах отработки и оптимизации конструкторских решений, определения эффективности применения новых образцов боеприпасов данного класса.

Под технологией суперкомпьютерного моделирования подразумевается совокупность объединенных в программно-методический комплекс (ПМК) средств моделирования с использованием суперкомпьютера основных систем и физических процессов функционирования боеприпасов класса «подводный снаряд» и методов (методик) их применения для решения научно-технических задач.

Объект и задачи моделирования

Объектами моделирования в рамках разработанной технологии являются боеприпасы, включающие в свой состав «подводный снаряд»² (ПС), процесс применения которых подразумевает воздушный (неуправляемый) и подводный (управляемый) этапы.

Для воздушного этапа рассматриваются следующие способы доставки:

– сбросом с носителя, в качестве которого выступают существующие и перспективные авиационные противолодочные комплексы (варианты с раскрытием парашютно-поплавковой тормозной системы или без раскрытия);

– выстрелом реактивного снаряда из корабельной пусковой установки.

Процесс самонаведения на подводном участке производится с использованием пассивно-активной гидроакустической системы обнаружения и пеленгации ПС. Предусматриваются варианты моделирования информационного обмена между снарядами, применяемыми в группе.

Для подводного участка допускаются варианты движения снаряда только под действием гравитационных, инерционных и гидродинамических сил, а также с учетом тяги маршевого реактивного двигателя.

Поражение подводных целей производится путем фугасного, кумулятивного или кумулятивно-фугасного действия боевой части (БЧ) по сигналам от контактно-неконтактного датчика цели.

Для боеприпасов рассматриваемого класса выделены следующие актуальные задачи, в решение которых может быть заинтересован разработчик (производитель боеприпаса):

- 1) расчет аэродинамических характеристик изделия;
- 2) оценка параметров движения изделия на воздушном участке траектории;
- 3) расчет прочности конструктивных элементов изделия;
- 4) оценка характеристик рассеяния на воздушном участке траектории;
- 5) расчет параметров движения и режимов обтекания изделия на участке входа в воду;
- 6) оценка параметров движения изделия на участке входа в воду;
- 7) расчет нагрузочных характеристик на конструктивных элементах изделия;
- 8) расчет гидродинамических характеристик изделия;
- 9) расчет уровня шумового сигнала на приемных элементах гидроакустической антенны;
- 10) оценка параметров движения изделия под действием волнения моря;

¹ Суперкомпьютерный двойник — система взаимосвязанных моделей, обеспечивающая моделирование значимых процессов и явлений, происходящих при эксплуатации изделия с целью прогнозирования и оптимизации тактико-технических характеристик и режимов работы изделия на основе сквозного суперкомпьютерного моделирования, выполняемого как на этапе проектирования, так и на этапе эксплуатации изделия.

² Подводный снаряд — основной составной элемент противолодочного боеприпаса, отделяющийся, самонаводящийся и поражающий подводные цели кумулятивным или фугасным действием боевой части.

11) оценка влияния взаимодействия боеприпасов на точность определения координат цели;

12) оценка эффективности алгоритмов управления ПС;

13) оценка параметров гидроакустического взаимодействия ПС с целью с учетом гидрологических особенностей акватории;

14) оценка параметров работы неконтактного гидроакустического датчика цели при взаимодействии с целью в ближней зоне;

15) расчет параметров работы кумулятивно — фугасной БЧ при взаимодействии с целью с учетом конструктивных особенностей цели и уязвимости ее элементов;

16) комплексная оценка эффективности применения изделия с использованием модели функционального поражения цели.

Методы решения задач

Для успешного решения задач, перечисленных в предыдущем разделе, требуется применение различных методов моделирования. Например, задачи 1, 3, 8 традиционно решаются методом инженерного анализа. Под методом инженерного анализа понимается численное моделирование физических процессов с целью изучения их свойств [2–4]. Метод инженерного анализа реализован в таких продуктах как: ЛОГОС [5], Simulia ABAQUS [6], ANSYS Workbench [7], Altair HyperWorks [8], Comsol Multiphysics [9] и др. В то же время метод инженерного анализа не позволяет получить решение для задач 11, 14,

16, требующих в процессе решения учета комплексного взаимодействия множества объектов, каждый из которых обладает собственным поведением. Решение задач такого типа обеспечивает метод имитационного моделирования. Под методом имитационного моделирования понимается численное моделирование процессов функционирования сложной системы взаимодействующих объектов (ССВО)³ с целью изучения поведения этой системы [2, 3].

Архитектура и пользовательский интерфейс программно-методического комплекса

ПМК «Двойник-ПС», реализующий технологию суперкомпьютерного моделирования процессов функционирования боеприпасов класса «подводный снаряд», включает вербальное описание (в виде интерактивного электронного технического руководства) и программную реализацию расчетных методик, которые обеспечивают решение задач, перечисленных ранее.

В состав ПМК входят модули инженерного анализа и имитационного моделирования, объединенные интеграционной оболочкой, которая включает проблемно-ориентированный графический пользовательский интерфейс (ГПИ), предназначенный для планирования численного эксперимента и обработки его результатов (рис. 1).

В модуле инженерного анализа выполняется расчет параметров функционирования элементов боеприпаса. Затем рассчитанные параметры

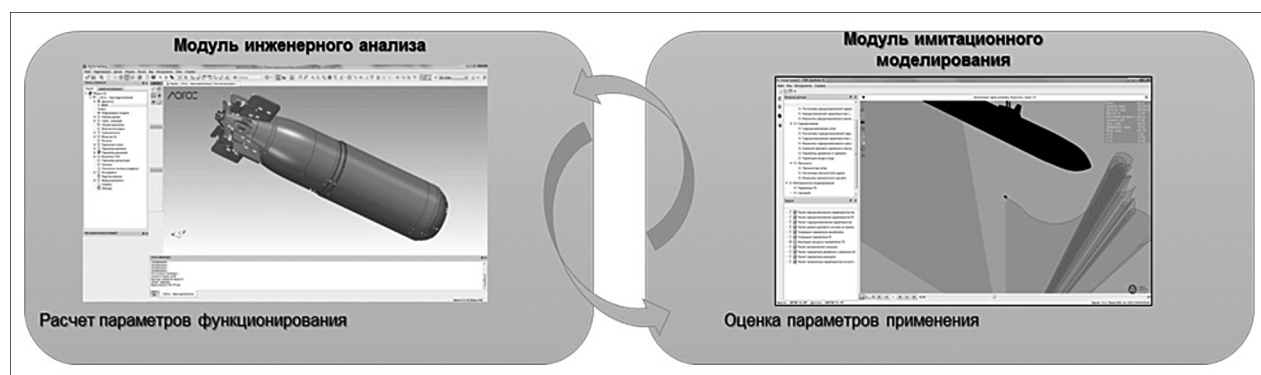


Рис. 1. Основные модули ПМК «Двойник-ПС»

³ Сложная система взаимодействующих объектов — множество взаимосвязанных между собой объектов, обладающих индивидуальным поведением и свойствами; совокупность свойств всех объектов не тождественна совокупности свойств системы в целом.

передаются в модуль имитационного моделирования для проведения комплексной оценки различных аспектов поведения боеприпаса в процессе применения.

Входящий в состав ПМК модуль инженерного анализа создан на основе разрабатываемого «РФЯЦ-ВНИИЭФ» пакета программ ЛОГОС. Модуль имитационного моделирования реализует парадигму мультиагентного моделирования [10, 11], которая состоит в том, что моделируемая система представляется в виде набора агентов, каждый из которых обладает индивидуальным поведением, и параметры функционирования системы в целом определяются как результат сложного взаимодействия агентов, входящих в ее состав.

При создании проблемно-ориентированного графического пользовательского интерфейса ПМК были учтены следующие моменты. В общем случае регламент работы пользователя при проведении исследований с использованием методов инженерного анализа и имитационного моделирования различается (рис. 2). В то же время результаты исследований, полученные методом инженерного анализа, являются исходными данными для проведения исследований методом имитационного моделирования. Кроме того, в процессе решения конкретной задачи методом инженерного анализа коллективом разработчиков изделия, далеко не всегда требуется полное прохождение всей цепочки шагов, приведенной на рис. 2.

Речь идет о случаях, при которых от одного расчета к другому не меняется геометрия изделия, или не требуется генерация новой расчетной сетки (расчеты: гидродинамических характеристик для разных углов атаки, напряженного деформированного состояния для разных материалов и т.д.).

Эта особенность дает возможность использовать заранее подготовленные шаблоны, представляющие собой типовые постановки задач, при проведении исследований с применением метода инженерного анализа.

Система управления компьютерным экспериментом ПМК «Двойник-ПС» (рис. 3) позволяет планировать и проводить моделирование в интересах решения выделенных задач предметной области.

Решение задач методом инженерного анализа

Для решения задач методом инженерного анализа предусмотрены экспертный и интеграционный режимы работы пользователя. Экспертный режим предусматривает использование препроцессора пакета программ ЛОГОС для подготовки модельного эксперимента и анализа его результатов. В этом режиме доступен наиболее полный перечень параметров модели и обеспечивается максимальная «гибкость» при подготовке модельного эксперимента и анализе результатов моделирования. Интеграционный режим подразумевает использование заранее

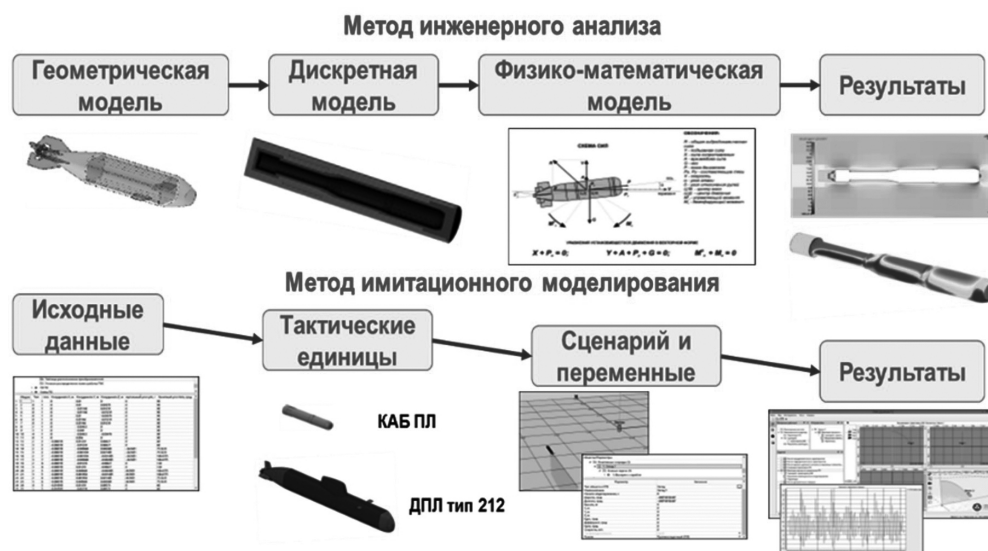


Рис. 2. Порядок работы пользователя

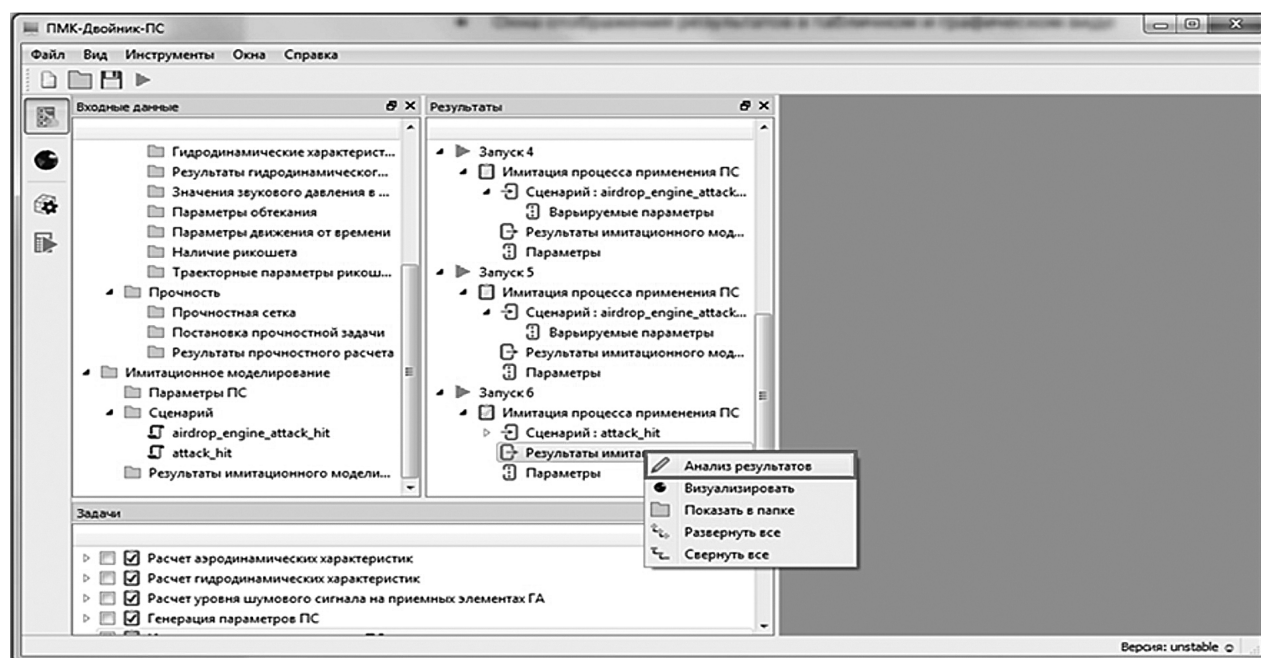


Рис. 3. Графический интерфейс системы управления компьютерным экспериментом ПМК «Двойник-РС»

подготовленных шаблонов файлов входных данных пакета программ ЛОГОС и управление наиболее значимыми параметрами модели посредством ГПИ ПМК.

Применительно к системе управления компьютерным экспериментом, показанной на рис. 3,

работа в интеграционном режиме предполагает запуск пользователем любой из задач окна «Задачи», используя в качестве входных данных файлы, отображаемые в окне «Входные данные» и значения параметров, представленных полем «Параметры» соответствующей задачи (рис. 4).

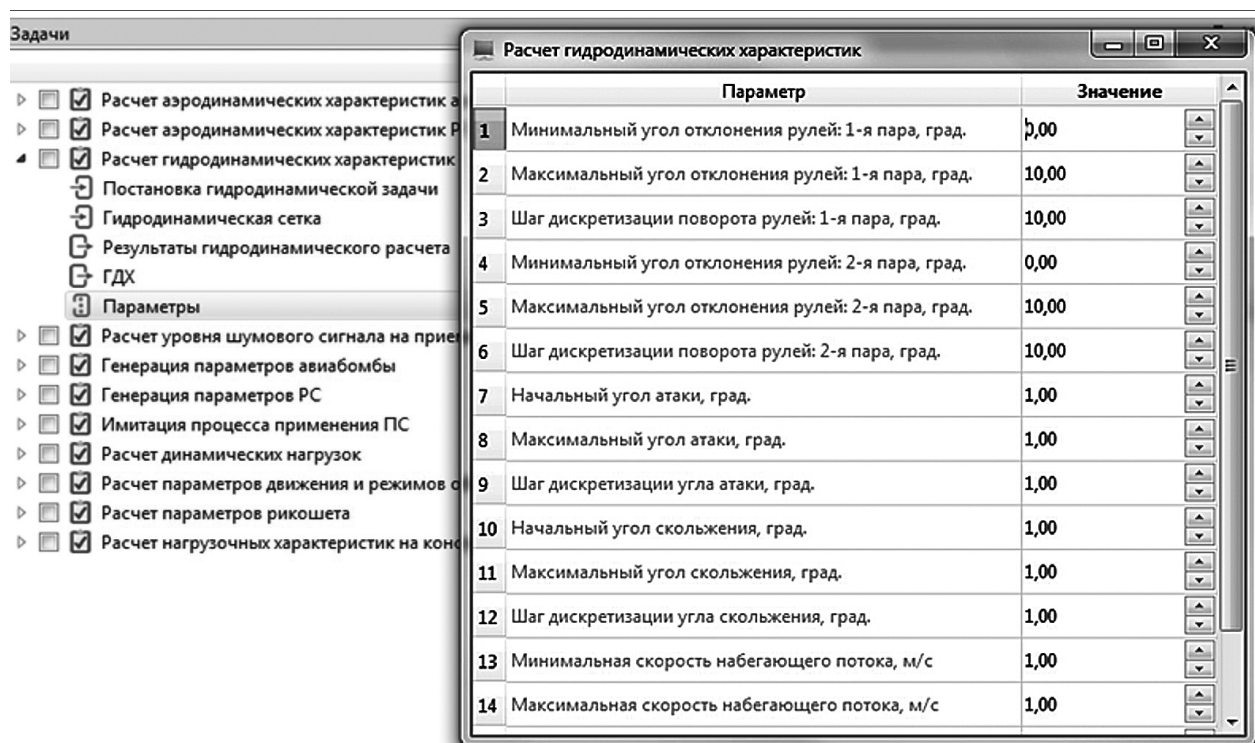


Рис. 4. Параметры задачи «Расчет гидродинамических характеристик»

Состав параметров задачи «Расчет гидродинамических характеристик» подчеркивает «проблемную ориентированность» ГПИ ПМК. Приведенные на рис. 4 параметры не имеют «прямых аналогов» в используемой системе инженерного анализа общего назначения (в данном случае — ЛОГОС), т.е. интерфейс препостпроцессора ЛОГОС не предоставляет возможностей для изменения этих параметров в явном виде. При запуске расчета из ГПИ ПМК на основании заданных значений параметров, приведенных на рис. 4, будут сгенерированы соответствующие файлы входных данных в формате системы ЛОГОС и поданы на вход подходящему решателю. Если окно «Входные данные» не содержит файла с требуемой постановкой задачи, или параметр, значение которого требуется изменить, отсутствует в списке параметров окна «Задача», то для подготовки данных будет вызван препостпроцессор ЛОГОС (экспертный режим).

Данные, полученные в результате решения задач методом инженерного анализа, могут быть поданы на вход задачам, решаемым методом имитационного моделирования. В то же время

эти результаты имеют самостоятельное значение. Их анализ может быть выполнен с помощью ГПИ ПМК (рис. 4) или, для более детального анализа, из окна «Результаты» системы управления компьютерным экспериментом может быть запущен препостпроцессор ЛОГОС.

Решение задач методом имитационного моделирования

При решении задач методом имитационного моделирования необходимо сначала задать нужную конфигурацию моделируемых объектов с помощью конструктора тактических единиц, ГПИ которого представлен на рис. 5.

Применительно к ПС конструктор позволяет установить такие параметры модели как: наличие или отсутствие маршевого двигателя на подводном участке; способ наведения; тип зондирующего сигнала; гидродинамические характеристики; алгоритмы работы системы управления и др. Связь с модулем инженерного анализа реализована через раздел «Параметры, рассчитанные в ЛОГОС». Этот раздел может

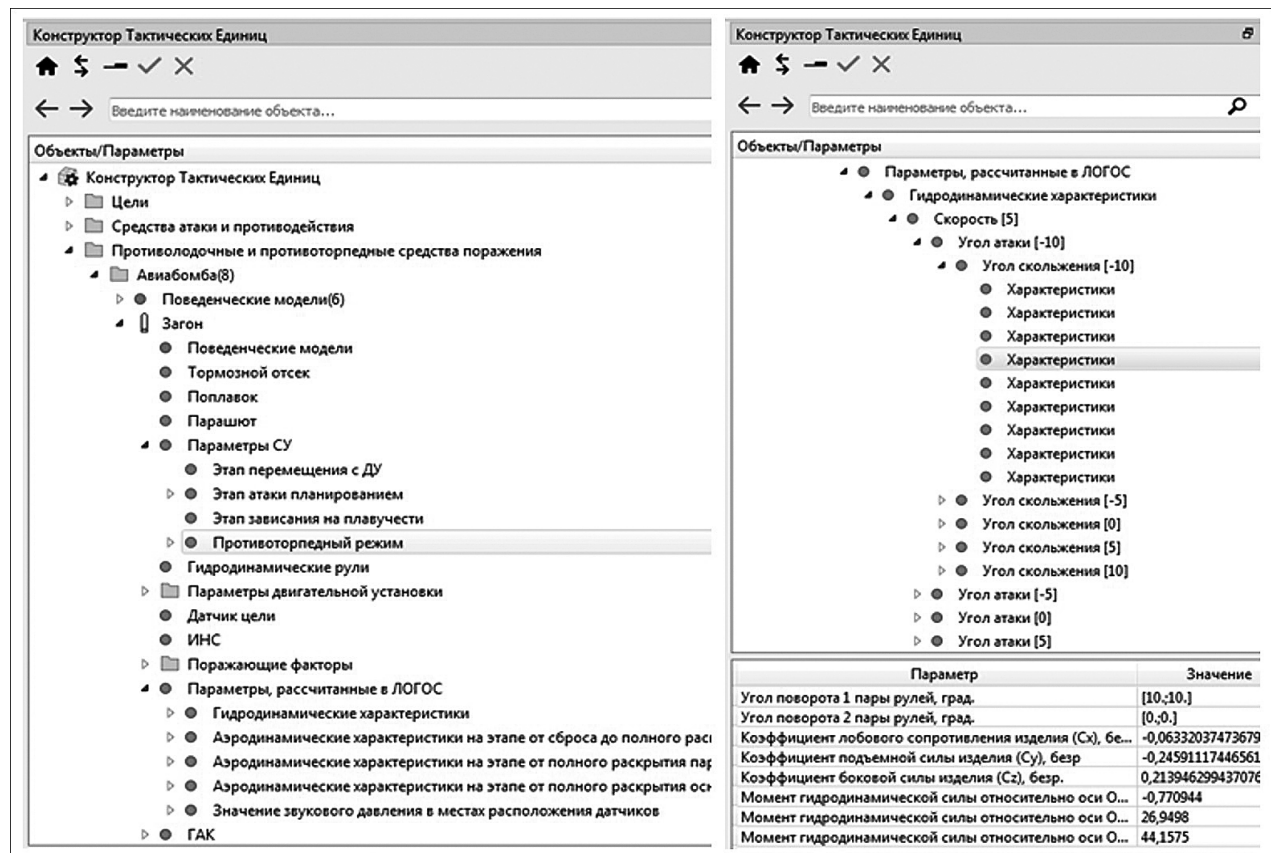
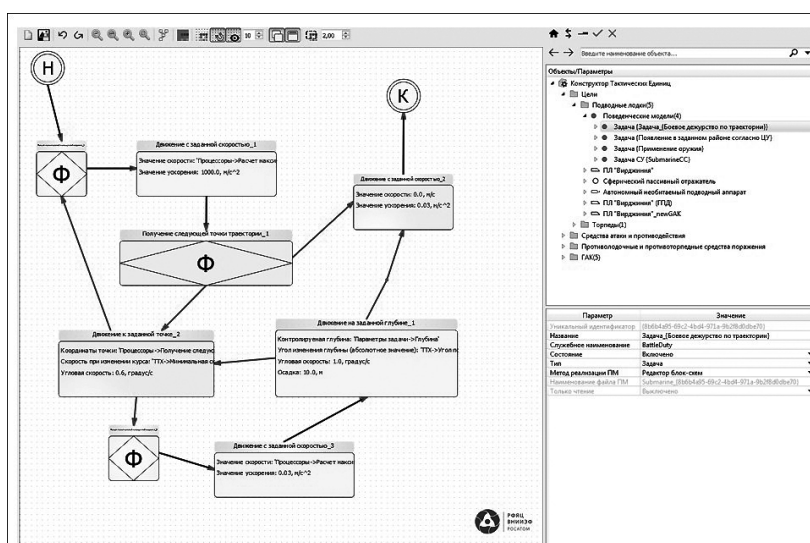


Рис. 5. Графический интерфейс конструктора тактических единиц

заполняться пользователем вручную, а может быть сформирован автоматически на основании результатов расчетов задач, выполненных методом инженерного анализа, представленных окном «Результаты» системы управления компьютерным экспериментом (рис. 3) посредством технологии «Drag & Drop». Особого внимания заслуживает узел «Поведенческие модели». Этот узел позволяет пользователю ПМК самостоятельно сформировать алгоритмы поведения моделей в типовых ситуациях. Применительно к модели ПС это могут быть, например: алгоритм фильтрации сигналов, принимаемых гидроакустическим датчиком от дна или

алгоритм определения места нахождения цели по сигналам, принимаемым гидроакустическим датчиком от зеркальных точек. Для целей в качестве поведенческих моделей могут выступать: алгоритм маневрирования подводной лодки в процессе уклонения от ПС; алгоритм применения подводной лодкой средств гидроакустического противодействия и т.п. Программирование алгоритмов может выполняться с помощью ГПИ встроенной в ПМК системы программирования одним из двух способов: с помощью редактора блок-схем (рис. 6, а) или с помощью языка программирования Python (рис. 6, б).



а

```

326 # проверим, что поиск дна включен в КТЕ
327 if not data_dispatcher.is_bottom_detect_on():
328     return False
329
330 # проверим, что количество полученных ранее измерений достаточно для классификации дна
331 if self.numberMeasure < data_dispatcher.get_bottom_detect_measuring_required():
332     return False
333
334 # парсим JSON-рапорт (смотрите описание функции для расшифровки значений ключей)
335 parsed_report = json.loads(report)
336 distance = parsed_report["ocDist"]
337 angle_OX = parsed_report["ocAngleOX"]
338 angle_OY = parsed_report["ocAngleOY"]
339 angle_OZ = parsed_report["ocAngleOZ"]
340
341 # классифицируем рапорт
342 if distance < 0:
343     return False
344
345 is_dist_const = fabs(depth_value - distance) < data_dispatcher.get_bottom_distance_error()
346 if 0 < depth_value else False
347 if is_dist_const and pl.Vec3(angle_OX, angle_OY, angle_OZ).length() < pow(10, -5) or
348 angle_OX < data_dispatcher.get_bottom_angle_error():
349     return True
350
351 return False
352
353 def get_filtered_report(self, reports: pl.typeVecOfStrings, mirror_mode: int) -> str:
354     """
355     Brief:
356     Получить отфильтрованный рапорт
357     Args:
358     reports: коллекция рапортов
359     mirror_mode: режим фильтрации (0 - по максимальной амплитуде; 1 - по дистанции)
360
361     """
362     if reports.empty():
363         return ""
364
365     max_amplitude = -float("infinity")
366     min_distance = float("infinity")
367     result = reports[0]
368
369     for report in reports:
370         try:
371             parsed_report = json.loads(report)
372         except:
373             pass
374 
```

б

Рис. 6. Графический интерфейс системы программирования моделей поведения: а — редактор блок-схем; б — редактор кода

После того, как состав моделей определен, исследователю необходимо сформировать сценарий модельного эксперимента. Сценарий определяет первоначальные места расположения боеприпаса и цели, тактику применения боеприпаса, модель поведения цели, состояние природной среды и другие параметры, определяющие исследуемый вариант применения изделия. На рис. 7 приведен пример сценария, который может использоваться для модельного эксперимента по оценке эффективности применения серии боеприпасов класса «подводный снаряд».

Согласно этому сценарию, от одного расчетного случая к другому цель будет появляться в пределах заданной области с различными значениями параметров «глубина» и «скорость».

Результаты имитационного моделирования доступны пользователю для анализа в виде визуально воспроизводимой динамической картины происходящего и в виде аналитических зависимостей (графиков, таблиц, гистограмм, рис. 8).

Заключение

Суперкомпьютерное моделирование — метод, обеспечивающий дополнительные возможности сокращения технических рисков и сроков разработки, а также снижения стоимости этапов жизненного цикла создаваемых изделий, гарантированного достижения требований по боевой и эксплуатационной эффективности, предъявляемых к изделию заказчиком.

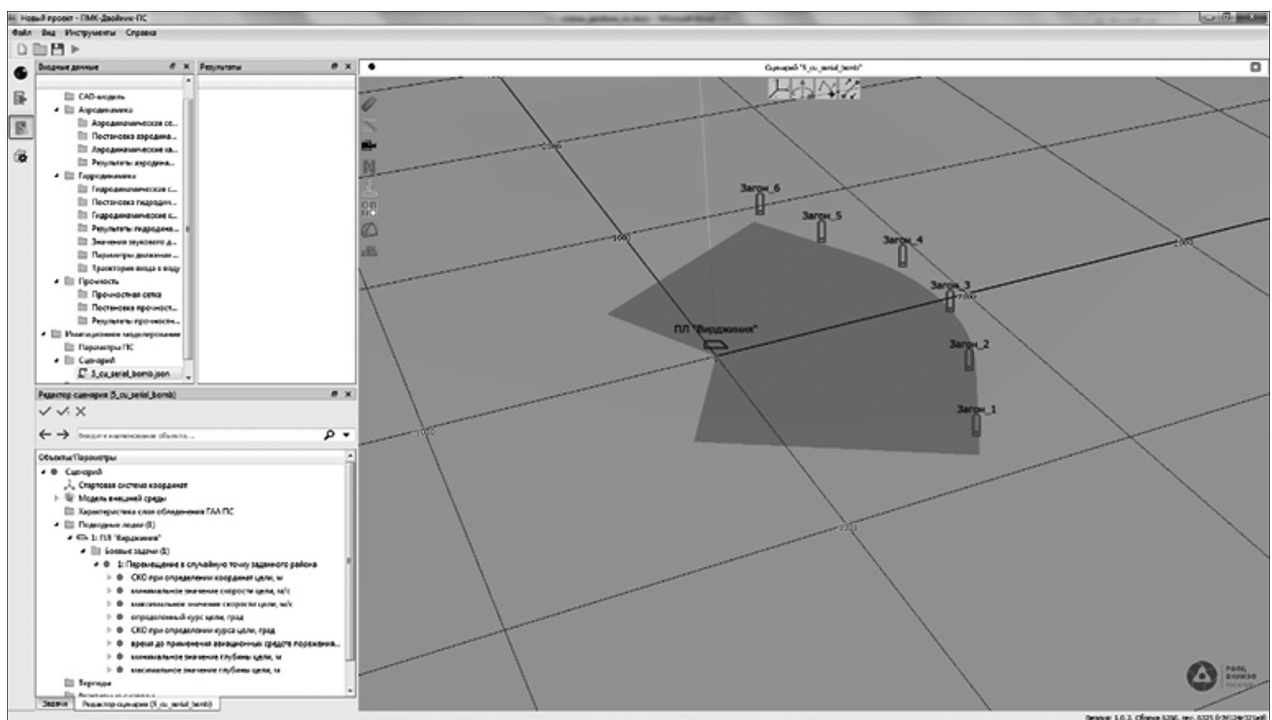


Рис. 7. Графический интерфейс редактора сценариев

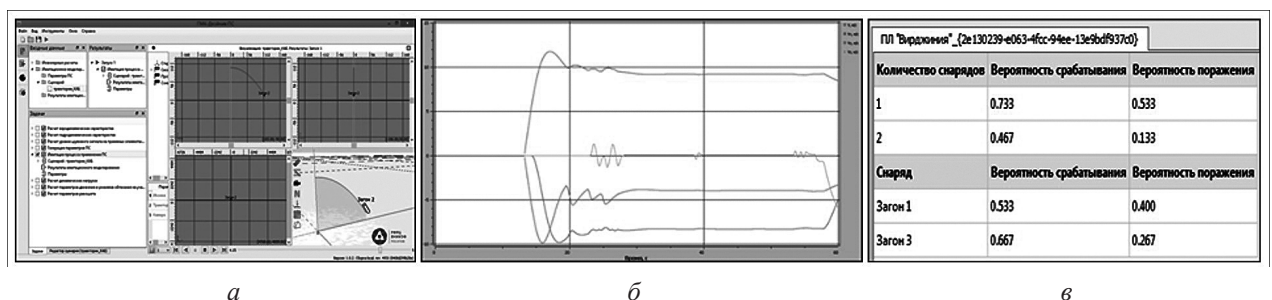


Рис. 8. Инструменты анализа результатов расчетов:

а — визуализация динамической картины; б — графики; в — таблицы

Обзорно рассмотренная в данной статье технология суперкомпьютерного моделирования процессов функционирования противолодочных и противоторпедных боеприпасов, включающих в свой состав ПС, в соответствии с их полной схемой применения с использованием комплексных суперкомпьютерных моделей по основному предназначению может использоваться на практике для:

- обоснования основных тактико-технических и технических характеристик боеприпасов с учетом условий и особенностей их боевого применения;

- отработки и оптимизации конструкторских и технических решений, принимаемых в ходе разработки боеприпасов;

- расчётной оценки эффективности применения боеприпасов применительно к определенным заказчиком перечням типовых целей и тактических ситуаций.

Ключевой особенностью рассмотренной технологии, реализуемой ПМК «Двойник-ПС», является применение сопряженных модулей инженерного анализа и имитационного моделирования, что позволяет выполнять комплексную оценку принимаемых инженерных решений — от конкретных значений тактико-технических и технических характеристик до оценки влияния этих решений на итоговую эффективность применения изделия.

Литература

1. Горчица Г.И., Ишук В.А. Проблемы применения и направления развития систем моделирования в интересах сопровождения создания перспективных комплексов вооружения // Известия РАРАН. 2018. № 4 (104). С. 15–22.

2. ГОСТ Р 57412-2017 Компьютерные модели в процессах разработки, производства и эксплуатации изделий. Общие положения. — М.: Стандартинформ. 2018.

3. ГОСТ Р 57700.22-2020 Компьютерные модели и моделирование. Классификация. — М.: Стандартинформ. 2020.

4. ГОСТ Р 57188-2016 Численное моделирование физических процессов. Термины и определения. — М.: Стандартинформ. 2017.

5. Пакет программ инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования: Официальный сайт ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». [Электронный ресурс]. URL: <http://logos.vniief.ru>. (Дата обращения 01.04.2021).

6. Официальный сайт Simulia ABAQUS [Электронный ресурс]. 1992. URL: <http://www.3ds.com/ru/produkty-i-uslugi/simulia/produkty/abaqus>. (Дата обращения 07.04.2021).

7. Официальный сайт ANSYS [Электронный ресурс]. 1992. URL: <https://www.ansys.com>. (Дата обращения 02.04.2021).

8. Официальный сайт Altair HyperWorks [Электронный ресурс]. 2001. URL: <https://www.altair.com/hyperworks>

9. Официальный сайт Comsol Multiphysics [Электронный ресурс]. 2006. URL: <https://www.comsol.ru>. (Дата обращения 02.04.2021).

10. Люгер Д.Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем: Пер. с англ. — М.: Издательский дом «Вильямс». 2003. 864 с.

11. Швецов А.Н. Агентно-ориентированные системы: от формальных моделей к промышленным приложениям // Всероссийский конкурсный отбор обзорно-аналитических статей по приоритетному направлению «Информационно-телекоммуникационные системы». 2008. С. 75–76.