

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «ЛОГОС»
ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ РАСЧЕТОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ
ИНЖЕНЕРНЫХ БОЕПРИПАСОВ**

**APPLICATION OF «LOGOS» SOFTWARE PACKAGE FOR PROCEEDING
STRENGTH ANALYSIS DURING DEVELOPMENT OF ENGINEER AMMUNITION**

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

И.В. Спири

АО «НИИИ»

I.V. Spirin

Приводится краткий обзор возможностей отечественного мультифизического программного комплекса (ПК) «ЛОГОС» для проведения инженерного анализа прочности элементов конструкции инженерных боеприпасов. Описываются особенности: импорта и доработки геометрических моделей, ручной или полуавтоматической генерации и/или импортирования различных вариантов дискретных (сеточных) моделей, формирования статических и динамических физико-математических моделей, проведения вычислений и аналитической обработки полученных результатов. Все перечисленные особенности были выявлены в ходе участия в разработке, освоении и эксплуатации программно-методического комплекса «Двойник-ПС».

Ключевые слова: инженерный анализ, прочность, напряженно-деформированное состояние, CAE-среда.

In this article we can find short review of possibilities of local multiphysic software packages LOGOS to carry out engineering review of structural components' strength of engineer ammunition. Here are described peculiarities of import and geometrical model's reprocessing, manual or semi-automated production and/or importing different variations of discrete (grid) models, creation of static and dynamic physico-mathematical models, performing calculations and analytical processing of received results. All listed peculiarities were identified during development, application and maintenance of «DUPPLICATE-PC».

Keywords: engineering review, strength, strain-stress state, CAE- environment.

На сегодняшний день наиболее постоянным мировым трендом в области инженерии является максимальная автоматизация всех процессов, составляющих в своей совокупности разработку нового изделия. Наиболее очевидными целями тренда являются освобождение конструктора от рутинных действий, обеспечение согласованности групповой работы и максимально полная реализация вычислительных возможностей компью-

теров в ходе моделирования. Стал широко распространенным термин «цифровой двойник», как некий цифровой аналог реального объекта или процесса в любой из своих трактовок [1–3].

Отечественная отрасль боеприпасов не может развиваться, игнорируя мировые тенденции, чем и подтверждается актуальность данной статьи.

Этапу разработки инженерного боеприпаса по располагаемым данным и востребованности

наиболее полно соответствует «виртуальный прототип», как разновидность «цифрового двойника».

Под «виртуальным прототипом» в пределах данной статьи понимается набор моделей, обеспечивающих приемлемый по точности прогноз поведения реального объекта (инженерного боеприпаса).

Модели, имитирующие физические процессы, происходящие с инженерным боеприпасом на всех этапах его функционирования и в фазах жизненного цикла, могут существовать (создаваться, эксплуатироваться, модифицироваться и т.д.) только в особой среде, которая поддерживается специальным программным обеспечением (CAE-системы).

Одним из отечественных представителей такого программного обеспечения является программный комплекс (ПК) «Логос», разработанный ФГБУ «РФЯЦ-ВНИИЭФ» [4] (ГК «Росатом»). В комплект коммерческого пакета входят препроцессор, 4 решателя, постпроцессор Scientific View и несколько утилит. Автор имеет возможность эксплуатировать модуль инженерного анализа программно-методического комплекса (ПМК) «Двойник-ПС», реализованный на базе «Логос-5.3.18» и «Логос-5.3.19».

Область физики твердого тела (прочностные расчеты), выступающая в данной статье ограничителем, соответствует всему вышесказанному в полной мере.

Именно этому разделу физики соответствуют поддерживаемые ПК «Логос» расчеты:

- статического напряженно-деформированного состояния;
- линейного и нелинейного динамического нагружения детали или сборки (конструкции);

- собственных частот детали (конструкции, модальный анализ);

- коэффициента запаса прочности;

- теплопереноса в твердом теле;

- совмещения перечисленных расчетов в любом сочетании.

В модуле инженерного анализа ПМК «Двойник-ПС», как и в других CAE-системах, решение каждой из задач инженерного анализа предполагает последовательные действия пользователя по неизменному алгоритму (рис. 1).

Все модели (геометрическая, дискретная, физико-математическая) неразрывно логически связаны между собой, а их создание по отдельности бессмысленно.

Возможности ПК «Логос» по созданию (корректировке) геометрических моделей довольно ограничены и сосредоточены на инструментах упрощения (рис. 2, выделение).

Полностью функциональны и удобны инструменты работы с 3D-примитивами, используемыми для осесимметричного упрощения (половина, четверть, сектор и т.д.) путем проведения логической операции (объединение, пересечение, вычитание).

Опыт проведения вычислительных экспериментов доказал целесообразность использования для сложных операций с 3D-геометрией специализированного редактора (FreeCAD [5], SOLIDWORKS [6], Компас [7] и др.), поддерживающего экспортное представление в один из совместимых форматов (*.stl, *.stp, *.step, *.igs, *.iges).

В этом случае создание геометрической модели сводится к импорту файла и проведению специальных проверок корректности совокупности загруженных точек, ребер и граней.

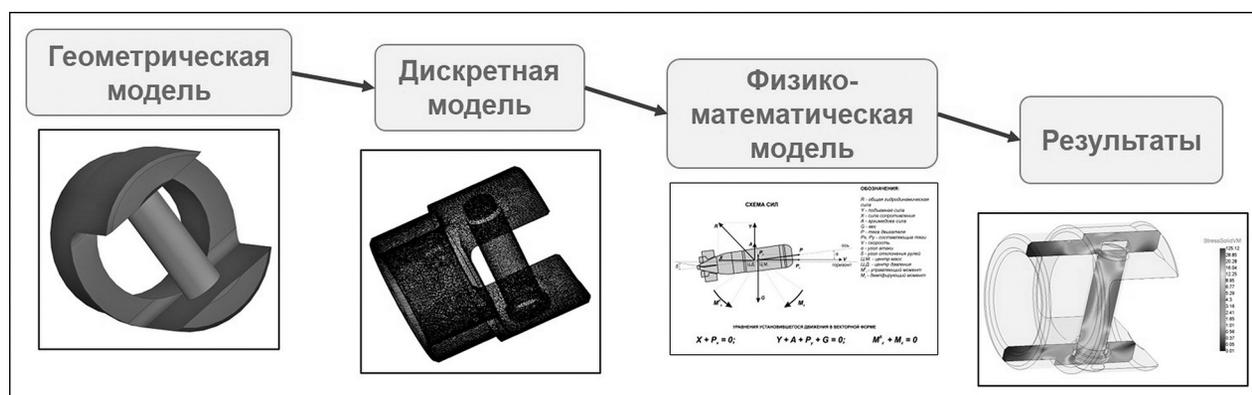


Рис. 1. Алгоритм проведения прочностного расчёта

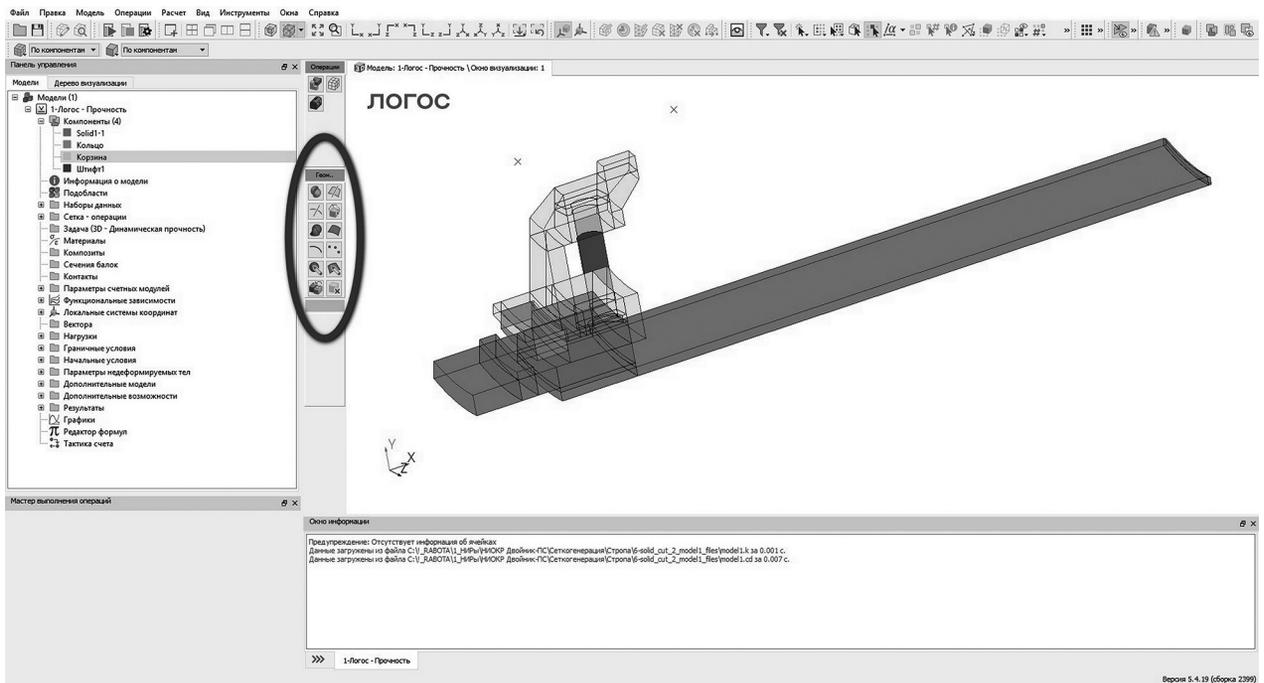


Рис. 2. Подготовка геометрической модели в ПК «Логос»

Автор надеется, что развитие геометрических инструментов ПК «Логос» продолжится, и в ближайшем будущем практическая необходимость стороннего 3D-редактора исчезнет, как у зарубежных программ-аналогов.

Дискретное (сеточное) моделирование в ПК «Логос» реализуется традиционным подходом, предполагающим как ручное, так и автоматизированное выполнение всех действий.

Результатом ручного режима является упорядоченная блочная дискретная модель, полученная после создания и ассоциирования с геометрическими элементами топологических блоков, количественно согласованного разбиения ребер, построения сетки на грани и ее «протягивания». Такие модели наиболее трудоемки в создании, однородны по структуре и максимально устойчивы при проведении вычислений.

Содержательно, процесс создания блочной топологии в ПК «Логос» напоминает математическое «округление» квадратного, совмещенное с «оквадрачиванием» круглого, реализованное в самом сложном программном варианте.

Пример топологических блоков и сечение блочной сетки, полученное на их основе в интерфейсе препроцессора «Логос», представлены на рис. 3.

В автоматизированном режиме используются возможности генератора тетраэдральной (4-узловые, 10-узловые и др.) сетки или различные сочетания с вышеописанными инструментами ручного построения.

Примеры как блочных, так и тетраэдральных сеток, построенных средствами ПК «Логос», приведены на рис. 4.

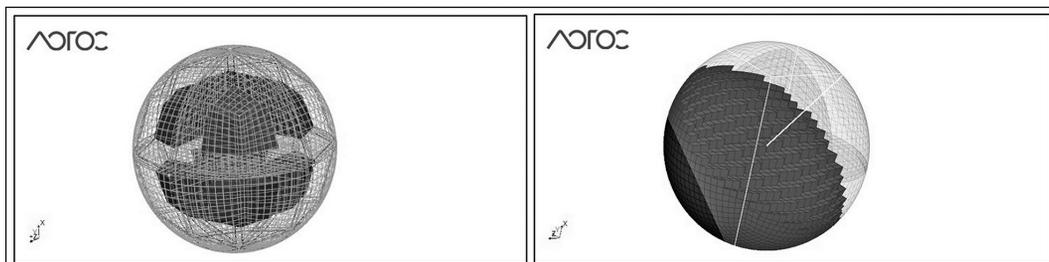


Рис. 3. Топологические блоки и сечение сетки

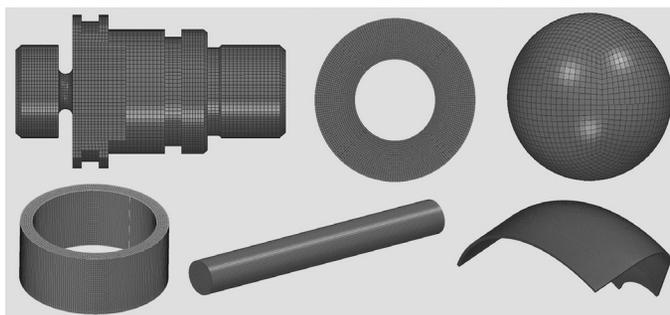


Рис. 4. Примеры расчётных сеток, построенных в ПК «Логос»

Содержание рис. 4 доказывает практическое отсутствие ограничений дискретной модели со стороны 3D-геометрии. Однако располагаемые вычислительные мощности и квалификация пользователя ограничивают максимальное количество узлов и степень подробности сетки.

Кроме объемных (3D) в ПК «Логос» поддерживаются плоские (2D или оболочечные) и линейные (1D) составные элементы дискретной модели.

Сетка может не только генерироваться собственными средствами, но и импортироваться в ПК «Логос» из совместимых форматов, а именно: *.vtk, *.vtu, *.inp, *.ngeom, *.cgns, *.cga, *.bdf, *.nas, *.geo, *.efr, *.mesh, *.k, *.msh, *.vrt, *.cdb, *.tec. В этом случае для построения дискретной модели могут использоваться специализированные программы (мешеры), а действия пользователя сводятся к проверкам корректности загрузки точек, ребер и блоков сетки.

Физико-математическая модель в «Логосе» создается последовательным созданием регионов, группировкой наборов узлов и граней сетки, присвоением регионам материалов и моделей их поведения, вводом ограничений и нагрузок применительно к наборам узлов и граней, выбором тактики счета и варианта вывода результатов, а также других необходимых параметров в зависимости от решаемой задачи.

Важнейшим преимуществом ПК «Логос», воспринимаемым на начальном этапе освоения как недостаток, является полная несвязанность элементов геометрической и дискретной моделей. Иными словами, приложить постоянную силу или закрепить от перемещения по одной из осей набор узлов сетки, выбранный по ассоциации с геометрическим ребром или гранью, невозможно. Необходимо предварительно вручную сформировать эти наборы.

Очевидным преимуществом описанная особенность «Логоса» становится при рассмотрении примера приложения силы к внутренней поверхности отверстия в радиальном направлении (рис. 5).

Понимание того, что передаточным звеном для силы является цилиндр (стержень) равного или меньшего, чем у отверстия, диаметра, делает наиболее реалистичным нагружение набора узлов, соответствующего не более чем половине внутренней грани в направлении вектора силы (рис. 5 справа). Нагружение всей внутренней грани отверстия (рис. 5 слева) не соответствует реальности.

В ПК «Логос» этот набор может быть сформирован произвольным выбором вручную уже после создания дискретной модели, а в большинстве других программах-аналогах требуется заблаговременное соответствующее нагружение разделение грани на этапе подготовки геометрической модели.

Именно расширенная номенклатура инструментов выбора узлов, ребер, граней сетки для формирования различных (даже взаимопроникающих) наборов обеспечивает описанное преимущество ПК «Логос».

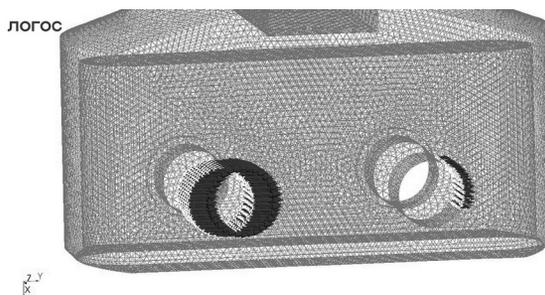


Рис. 5. Нагрузка в виде силы, приложенной к наборам узлов

Визуализация некоторых вариантов нагрузок и закреплений, определяющих физическую модель, приведена на рис. 6.

Содержание рис. 6 доказывает практическое отсутствие ограничений физико-математической модели со стороны геометрии и сетки.

Перечень возможных ограничений, закреплений и нагружений в ПК «Логос» не уступает лучшим из зарубежных аналогов (ANSYS [8], COMSOL [9], Simcenter [10]), что позволяет создавать приемлемо реалистичные физико-математические модели.

Неблагоприятной особенностью релиза «Логос-5.3.18», устраненной в «Логос-5.3.19», является то, что нагрузка на набор узлов вводится числом в номинале для одного узла, т.е. необходим пересчет общей нагрузки на набор узлов в нагрузку на один узел из этого набора.

Необходимые свойства материалов и параметры моделей их поведения (деформация, разрушение, теплопроводность и т.д.) вводятся в соответствующих закладках интерфейса препроцессора. Каждому из созданных регионов (наборов ячеек дискретной модели) может быть присвоен собственный материал, количество которых не ограничено.

К сожалению, в состав коммерческого релиза ПК «Логос» не входит библиотека материалов, что вынуждает осуществлять поиск значений множества коэффициентов и характеристик по справочникам или в доступных библиотеках программ-аналогов.

Тактика проведения расчета определяется его типом, располагаемыми вычислительными мощностями и предполагаемым содержанием аналитической постобработки результатов.

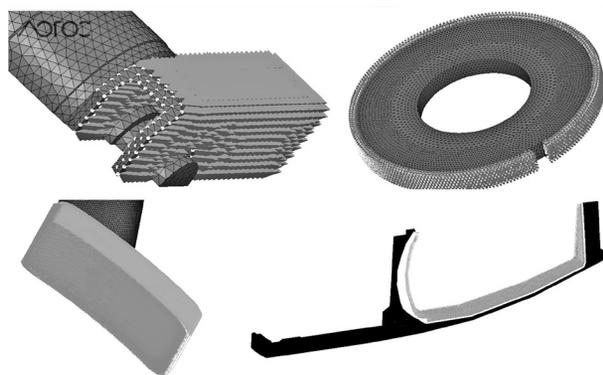


Рис. 6. Примеры задания граничных условий

Вычисления достаточно автоматизированы и могут проводиться в последовательном или параллельном режимах на локальном хосте или в клиент-серверной сети, с периодической записью данных в нескольких поддерживаемых форматах (*.efr, *.d3plot).

Для просмотра, постобработки и анализа полученных результатов используется постпроцессор Scientific View, входящий в состав поставки ПК «Логос». Каждая запись данных содержит ячеечные и узловые значения множества переменных, которые могут отображаться в виде цветной или контурной изоповерхности, векторного поля, свободно ориентируемого плоского сечения, графика и др. (рис. 7).

Scientific View позволяет выбрать наиболее подходящие палитры, создать наглядные графики в научном или инженерном стиле, схемы и картины распределения величин. Также средствами визуализатора Scientific View можно создавать видеоролики с анимацией деформаций, что является несомненным удобством не только для инженера-расчетчика, но и для конструктора.

Все детали, приведенные на рис. 7, используются в конструкции различных инженерных боеприпасов, в интересах разработки, модернизации или сопровождения серийного производства, прочностные расчеты которых и проводились.

Сравнение содержания рис. 7 с картинками, получаемыми в программах-аналогах [9, 10], показывает примерное соответствие возможностей ПК «Логос» в визуализации и постобработке. Количественно-верификационные подходы показывают отклонения значений, полученных в различных программах [3–7], в пределах $\pm 15\%$.

Таким образом, ПК «Логос» является программным продуктом, который в области физики твердого тела (прочностных расчетов) практически не уступает по возможностям, превосходит по гибкости, но значительно сложнее зарубежных аналогов в эксплуатации.

Описанные в данной статье особенности были выявлены в ходе 20-месячной эксплуатации ПК «Логос» и модуля инженерного анализа ПМК «Двойник-ПС», доказавшей, что ограничения его применимости в типовых прочностных расчетах при разработке инженерных боеприпасов отсутствуют.

В заключение отметим, что отечественный ПК «Логос» на текущем этапе развития уже

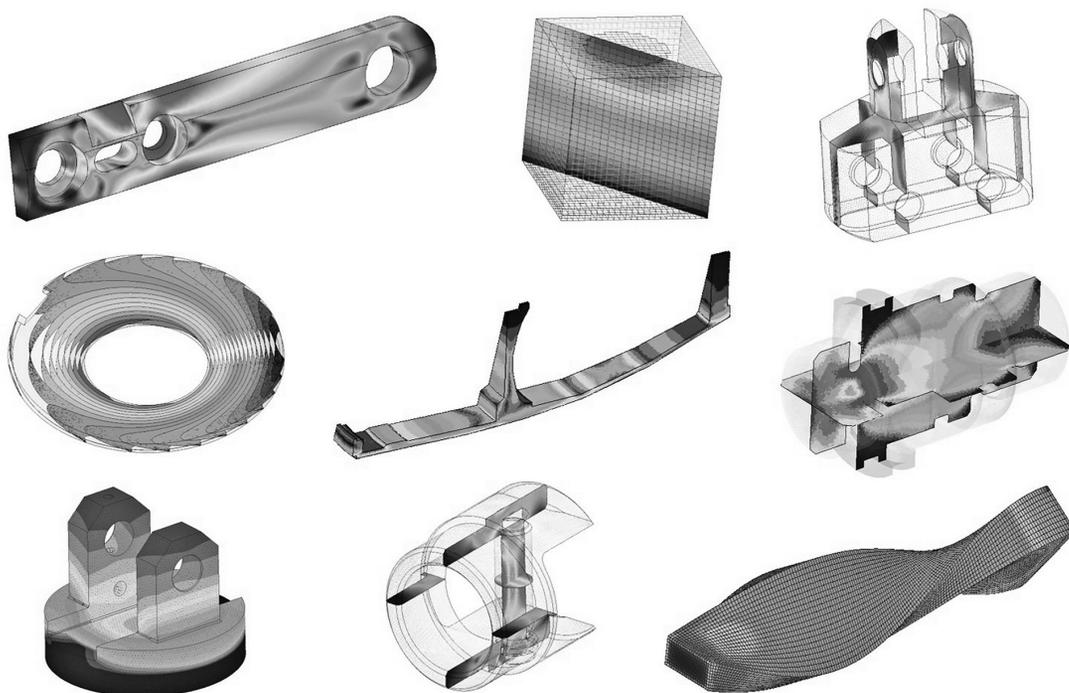


Рис. 7. Примеры визуализации результатов расчётов

является эффективным инструментом инженерного анализа, а с учетом тренда на дальнейшую цифровизацию отрасли боеприпасов, необходимо продолжение его всестороннего совершенствования до уровня, соизмеримого с лучшими зарубежными аналогами.

Литература

1. Красковский Д. Итоги и прогнозы // САПР и графика. 2020. № 12. С. 6–17.
2. ГОСТ Р 57700.21-2020 Компьютерное моделирование в процессах разработки, производства и обеспечения эксплуатации изделий. Термины и определения. — М.: Стандартинформ. 2020. 8 с.
3. ГОСТ Р 57700.22-2020 Компьютерное моделирование в процессах разработки, производства и обеспечения эксплуатации изделий. Классификация. — М.: Стандартинформ. 2020. 6 с.
4. Официальный сайт ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»: [Электронный ресурс]. 2017. URL: <http://logos.vniief.ru/products/logos/> (Дата обращения: 11.03.2021).
5. Официальный сайт FreeCAD (Juergen Riegel's): [Электронный ресурс]. 2002. URL: <https://www.freecadweb.org> (Дата обращения: 04.02.2021).
6. Официальный сайт SOLIDWORKS: [Электронный ресурс]. 1995. URL: <https://www.solidworks.com>. (Дата обращения: 08.02.2021).
7. Официальный сайт КОМПАС: [Электронный ресурс]. 2016. URL: <https://kompas.ru> (Дата обращения: 08.02.2021).
8. Официальный сайт ANSYS: [Электронный ресурс]. 1992. URL: <https://www.ansys.com> (Дата обращения: 26.02.2021).
9. Официальный сайт Comsol Multiphysics: [Электронный ресурс]. 2006. URL: <https://www.comsol.ru> (Дата обращения: 01.03.2021).
10. Официальный сайт Siemens PLM Software: [Электронный ресурс]. 2000. URL: <https://www.plm.automation.siemens.com> (Дата обращения: 01.03.2021).