

УДК: 623.45

DOI: 10.53816/20753608_2022_3_82

**ОЦЕНКА ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОРАДИОЭЛЕМЕНТОВ
ИНЖЕНЕРНЫХ БОЕПРИПАСОВ**

**EVALUATION OF THERMAL MODES OF ELECTRONIC COMPONENTS
OF ENGINEERING AMMUNITION**

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

И.В. Спирин, А.В. Попов, Т.А. Карамалькин

АО «НИИИ»

I.V. Spirin, A.V. Popov, T.A. Karamal'kin

В статье кратко описаны некоторые из рациональных подходов к численному моделированию тепловых нагрузок, возникающих в процессе функционирования электронных блоков неконтактных взрывательных устройств инженерных боеприпасов, реализуемые в различных образцах специального программного обеспечения. Обоснована теоретически и применена практически методика, сочетающая в себе достаточную точность и простоту. На основании аналитической обработки полученных результатов моделирования тепловых нагрузок электронных блоков различной конструкции проведена сравнительная оценка используемого программного инструментария, а также даны рекомендации по выбору систем автоматизированного проектирования.

Ключевые слова: моделирование, инженерный боеприпас, взрыватель, взрывательное устройство, электроника, электронный блок, электронный компонент, тепло, тепломассоперенос, инженерный анализ.

In this article are briefly described some approaches from rational methods to the simulation thermal loads of electronic components of explosive devices of ammunition realized in different models of special software. They substantiated method that combines sufficient accuracy and simplicity. Based upon analytical processing of given simulation results of thermal capacity of electronic units of different designs here was carried out a comparative assessment of the tools for performing tasks of simulation thermal loads, also were given recommendations on the choice of CAD.

Keywords: simulation, engineer ammunition, detonator, explosive device, electronics, electronic assembly, electronic component, heat, heat and mass transfer, engineering review.

Реализация современных и перспективных требований, предъявляемых к инженерным боеприпасам, возможна исключительно с применением электронных вычислительных и управляющих устройств, созданных на основе микроминиатюрных, микропотребляющих электрорадиоэлементов.

Развитие микроэлектроники обеспечило значительное повышение возможностей по ненконтактному обнаружению, распознаванию и классификации объектов поражения, реализации дополнительных режимов и функций, позволило внедрить интеллектуальные алгоритмы принятия решений. Нормой становится многорежим-

ное взрывательное устройство с мультифизичным датчиком цели, составляющее до 50 % объема и до 85 % стоимости боеприпаса.

Очевидно, что одной из важнейших целей при проектировании взрывательных устройств инженерных боеприпасов является минимизация габаритных и массовых характеристик для обеспечения максимальных возможностей по размещению взрывчатых составов и поражающих элементов.

Решение задач по снижению массогабаритных характеристик достигается за счет увеличения плотности монтажа электрорадиоэлементов в электронных блоках и оптимизации конструкции взрывательного устройства с максимально возможным использованием внутреннего объема. Обеспечение требований по герметичности взрывательных устройств и стойкости к механическим воздействиям в большинстве случаев подразумевает заливку свободных объемов компаундами, что отрицательным образом сказывается на тепловых режимах функционирования электрорадиоэлементов, особенно в условиях граничных температур окружающей среды.

Актуальным является вопрос обеспечения тепловых режимов функционирования электрорадиоэлементов, используемых в конструкциях инженерных мин и взрывателей, время функционирования которых существенно больше по сравнению с другими типами боеприпасов, а технические требования подразумевают применение развитых электронных средств.

Широкий диапазон эксплуатационных температур окружающей среды, высокие требования к функционалу, многорежимность взрывательных устройств и ограниченность в способах теплоотведения определяют высокую степень сложности задачи оценки тепловых режимов функционирования электронных блоков.

На основании изложенного актуальным является вопрос моделирования тепловых режимов, по результатам которого возможно обеспечение заданных условий функционирования электрорадиоэлементов и электронных блоков, а также оптимизации конструкции взрывательных устройств и их составных частей.

Рассмотрение моделирования теплового режима с точки зрения физики позволяет перечислить возможные варианты постановок задач инженерного анализа распределения тепла:

- в твердом мономатериальном теле с различными условиями на внешних и внутренних гранях;
- в сборке нескольких твердых тел из разных материалов, с различными условиями на внешних, внутренних гранях и границах контактов;
- в текущей сплошной несжимаемой или слабосжимаемой однофазной среде;
- совмещение вышеперечисленных в любой комбинации.

В связи с прикладным характером моделирования, важным является достаточное удобство проведения оценки и доступность исходных данных, в связи с чем приемлемы допущения, исключающие из рассмотрения процессы энерговыделения компонентов, как более сложных и глубоких задач, предусматривающих моделирование химических, электростатических, электромагнитных и совмещенных с ними процессов.

Тепловые задачи в перечисленных постановках могут решаться с применением множества систем инженерного анализа (САЕ-систем). Доступностью лицензий программного обеспечения и квалификацией авторов это множество ограничено следующим перечнем:

- открытый математический решатель задач методом конечных элементов FreeFEM++ [1];
- приложение для решения физических задач в 2D постановке Agros2D с использованием решателей HERMES и deal.II [2];
- программа для тепловых, магнитостатических и электростатических конечно-элементных расчетов в 2D постановке FEM-M [3];
- пакет конечно-элементного моделирования мультифизичных процессов с оконным интерфейсом ELMER [4];
- прочностной, кинематический и тепловой решатель с оконным интерфейсом Z88 Autoga [5];
- открытая система автоматизированного проектирования (САПР) FreeCAD в качестве препостпроцессора для теплового и прочностного конечно-элементного решателя CalculiX [6];
- открытая интегрируемая платформа численного моделирования задач механики сплошных сред OpenFOAM [7] в комплекте с препостпроцессором ParaView [8];
- студенческая (бесплатная) версия теплового, прочностного электромагнитного решателя с оконным интерфейсом ELCUT [9];

- модуль инженерного анализа (численного моделирования мультифизических процессов) из состава программно-методического комплекса «Двойник-ПС» (решатели HEAT, TVD и SIMPLE в комплекте с постпроцессором ScientificView, созданные на базе «Логос 5.3.19») [10];
- интегрированные в САПР SolidWorks модули конечно-элементного моделирования Simulation и Flow Simulation [11].

Все примеры результатов моделирования, приводимые в дальнейшем, получены в одной из перечисленных программ.

Особенности постановок задач инженерного анализа визуализируются на примерах от простых (тривиальных) к сложным (сочвешенным).

Практически любую тепловую задачу инженерного анализа упрощением и дискретизацией можно свести к двумерной постановке и графическому примитиву (прямоугольник, эллипс, трапеция и пр.).

На рис. 1 приведены дискретная (сеточная) модель и картина распределения температуры для прямоугольника, полученные в программе FreeFEM++.

Тепловые нагрузки на рис. 1 приложены в виде постоянной температуры 30 °C к боковым ребрам, постоянного конвективного теплообмена 10 Вт(м·K) к верхнему ребру и адиабатической стенки на нижнем ребре.

Перечисленные условия физической постановки задачи (температура, конвективный теплообмен и адиабатическая стенка) являются наиболее распространенными (типовыми) для моделирования теплового режима электронных элементов инженерных боеприпасов как в 2D, так и в 3D постановках.

Кроме программы FreeFEM++ решение подобных 2D задач обеспечивается во множестве

других программ, например, FEM-M, ELCUT, OpenFOAM или Z88, приведенные на рис. 2, 3.

В данных примерах тепловые нагрузки в виде постоянной температуры приложены к левому (300 °K) и верхнему (400 °K) ребру квадрата, а остальные ребра представлены адиабатическими стенками. Расчеты на рис. 1–3 выполнены применительно к алюминиевому сплаву, массовой плотностью 2700 кг/м³ с теплопроводностью 200 Вт(м·K) и удельной теплоемкостью 900 Дж(кг·K).

Качественное сравнение рис. 2, 3 показывает схожесть картин распределения температуры, а количественное отклонение значений в любой из произвольно выбранных точек не превышает ±2 %.

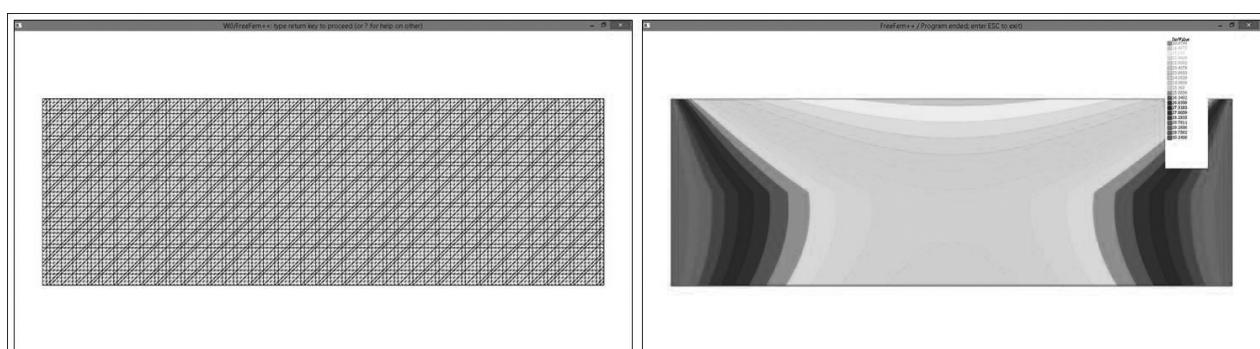
У некоторых бесплатных программ имеются неблагоприятные особенности эксплуатации.

Например, в студенческой версии ELCUT (рис. 2 вверху справа) ограничено максимальное количество узлов дискретной модели, отсутствующее в платной реализации программы.

Среда OpenFOAM не имеет оконного интерфейса, а для препостпроцессинга используется сторонняя, но также бесплатная программа ParaView.

Примеры незначительно усложненных за счет комбинации геометрической модели из нескольких графических примитивов тепловых задач в 2D постановке, реализованные в программах FreeFEM++ и Agros2D, приведены на рис. 4, 5.

Рис. 4 соответствует поперечному сечению электронного компонента вблизи выводных контактов (нагреваемый контакт исключен из анализа заменой на постоянную температуру касающихсяся ребер), а рис. 5 — сечению компаундной заливки герметизированного блока (плата исключена из анализа заменой на осред-



Rис. 1. Дискретная модель и поле температуры прямоугольника в программе FreeFEM++

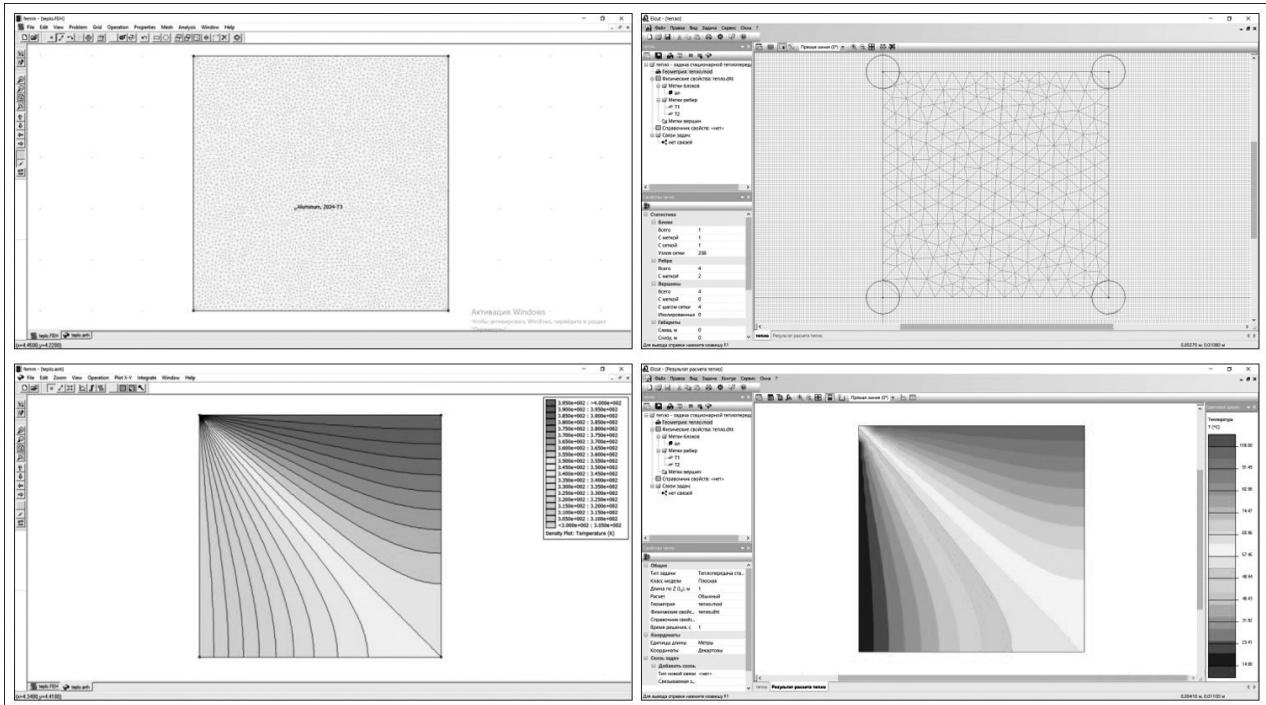


Рис. 2. Дискретная модель и поле температуры квадрата в программах FEM-M и ELCUT

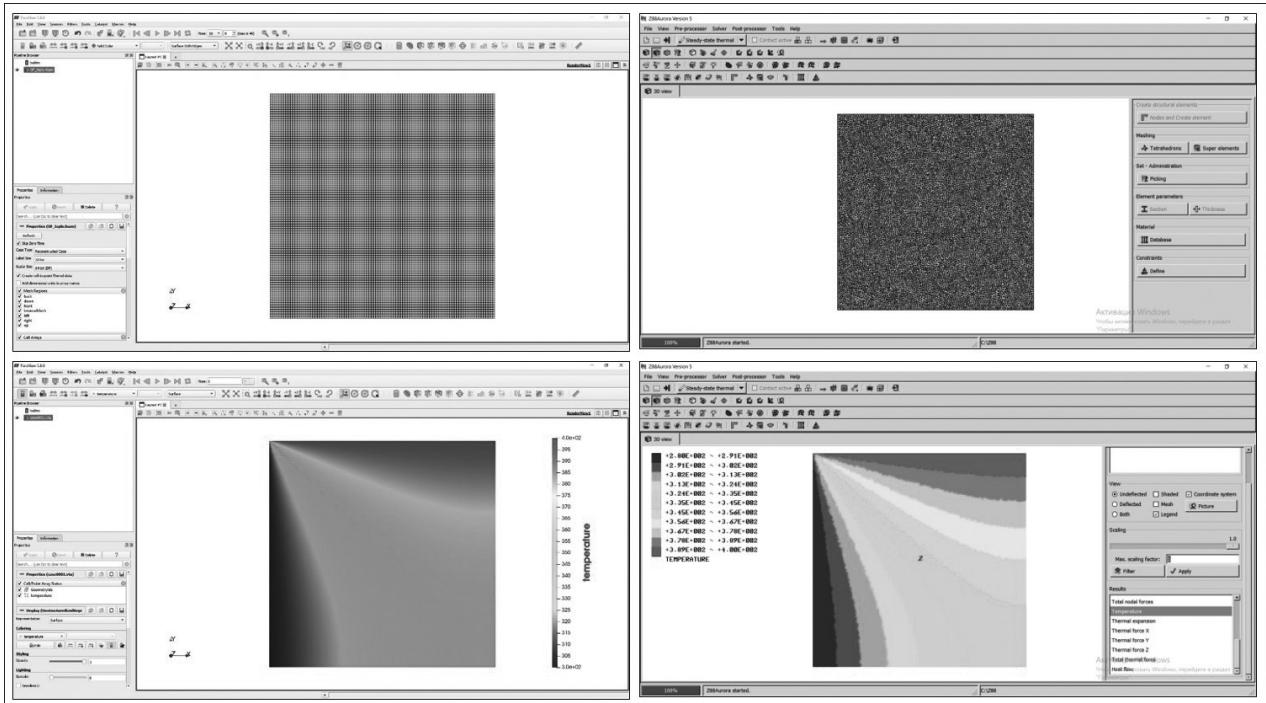


Рис. 3. Дискретная модель и поле температуры квадрата в программах OpenFOAM и Z88

ненные температуры по ребрам, прилегающим к радиоэлементам).

Тепловые нагрузки на рис. 4 заданы в виде постоянной температуры на ребрах, образующих контур платы снизу, а также постоянного

конвективного теплообмена или адиабатической стенки для ребер, соответствующих корпусу электронного блока (слева, сверху и справа).

Анализ рис. 4, 5 показывает достаточные возможности приведения к двумерной поста-

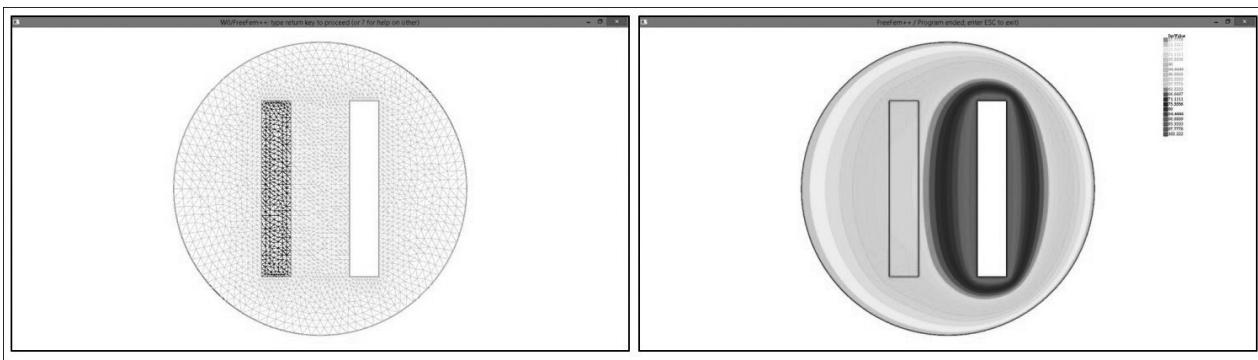


Рис. 4. Дискретная модель и поле температуры сечения радиоэлемента в программе FreeFEM++

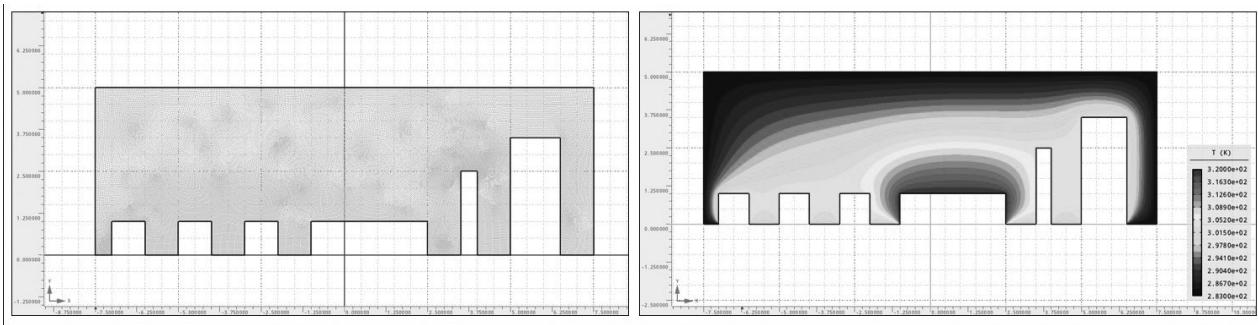


Рис. 5. Дискретная модель и поле температуры сечения заливки блока в программе Agros2D

новке сложных геометрических моделей, обеспечиваемые свободно распространяемым программным обеспечением (FreeFEM++, Agros2D, FeM-M, ELMER, CalculiX).

Для повышения адекватности решения тепловой твердотельной задачи протекающим в электронных блоках инженерных боеприпасов физическим процессам необходим учет их геометрии, конструкции и усложнение до 3D постановки.

Данные по особенностям конструкции отдельных радиоэлементов, а также граничным и номинальным режимам их работы, как правило, доступны в технических описаниях (технических условиях) из комплекта сопроводительной документации производителя.

В качестве доказательств вышеизложенного утверждения на рис. 6 показаны визуализация дискретной модели и картина распределения температуры на поверхности резистора в плоскостно-симметричной 3D постановке (сверху), а также сеточная модель и поле температуры в тонкой пластине заливки электронного блока (снизу), полученные в программе Elmer.

Неравномерность и сложность распределения полей температур на рис. 6 в достаточной

степени подтверждают обоснованность 3D постановки.

Кроме того, причиной вынужденного перехода к 3D постановке тепловой задачи может служить ограничение программы, в которой выполняется моделирование (рис. 7).

Например, в ПК «Логос» для решателей HEAT, SIMPLE и TVD? а также в OpenFOAM для всех решателей поддерживается тепловое моделирование только в тонких пластинах, а не в гранях, являющихся 2D постановкой в чистом виде.

Геометрия и тепловые нагрузки тонкой пластины на рис. 7 соответствуют аналогичным параметрам заливки блока на рис. 6.

Сравнение результатов рис. 6 (снизу справа) и 7 (справа) по номиналу значений для 7-ми контрольных точек, соответствующих центросимметричному удалению на 1 мм по нормали к верхним границам радиоэлементов на плате, показывают отклонения, не превышающие $\pm 3,4\%$.

Дальнейшее повышение адекватности моделирования реальным тепловым процессам в радиоэлектронном блоке возможно постановкой задачи на нескольких телах, каждому из которых задается свой материал (могут от-

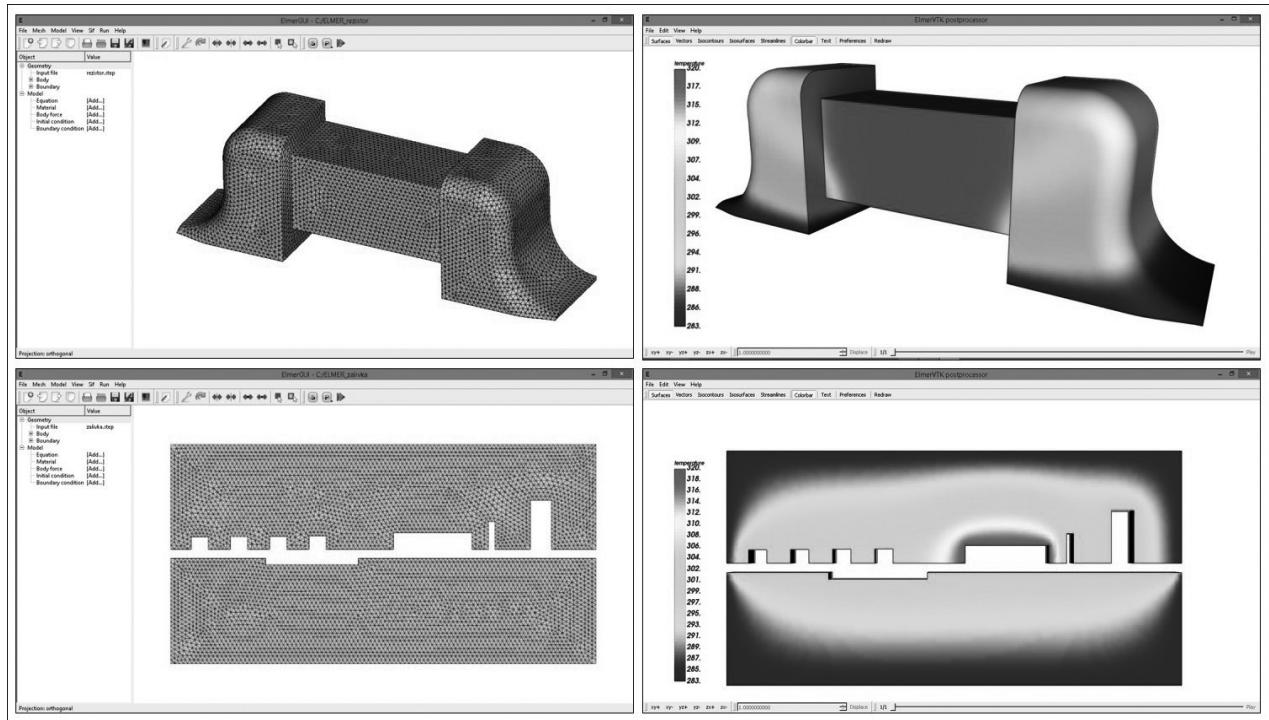


Рис. 6. Дискретные модели и поля температур в программе Elmer

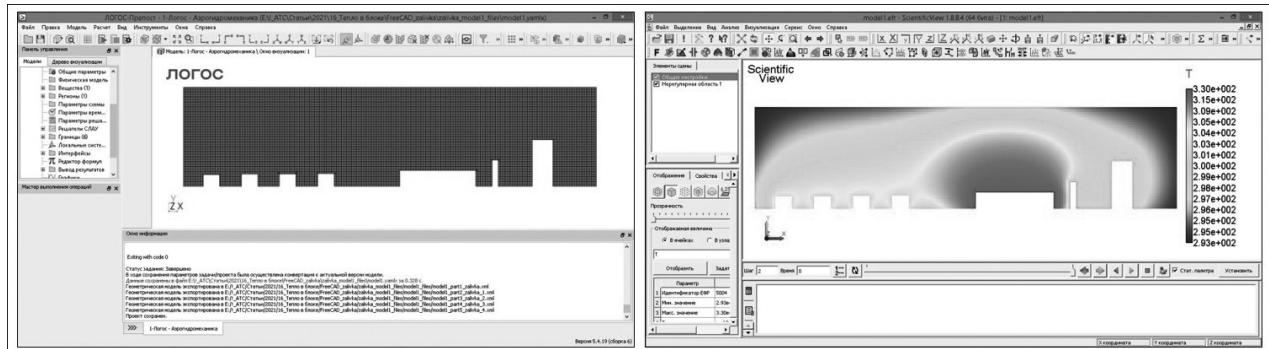


Рис. 7. Дискретная модель и поле температуры сечения заливки блока, полученные в ПМК «Двойник-ПС»

личаться плотность, прочность, теплоемкость, теплопроводность, теплорасширяемость и др. параметры).

Иллюстрацией такого случая являются дискретная модель и картина распределения температуры в сборке из 3-х тел, полученные в модуле конечно-элементного моделирования Simulation программы SolidWorks и представленные на рис. 8.

В правой части рис. 8 для повышения наглядности тело, соответствующее плате с радиоэлементами, скрыто от визуализации.

Ранее описанные расчеты (рис. 1–8) проводились в стационарной постановке, которая не обеспечивает потребную адекватность реаль-

ным переходным процессам. Динамическая тепловая задача в 2D и 3D постановке сохраняет ранее описанные особенности, но решается итерационно с постоянным или переменным шагом на фиксированном интервале времени.

Кинограмма результатов такого расчета приведена на рис. 9.

Характер изменения поля температур на рис. 9 показывает необходимость расчетов в течение такого фиксированного интервала времени, который обеспечивает переход в устойчивое состояние. Решение динамической задачи по сравнению со стационарной требует значительно больше времени для получения результатов.

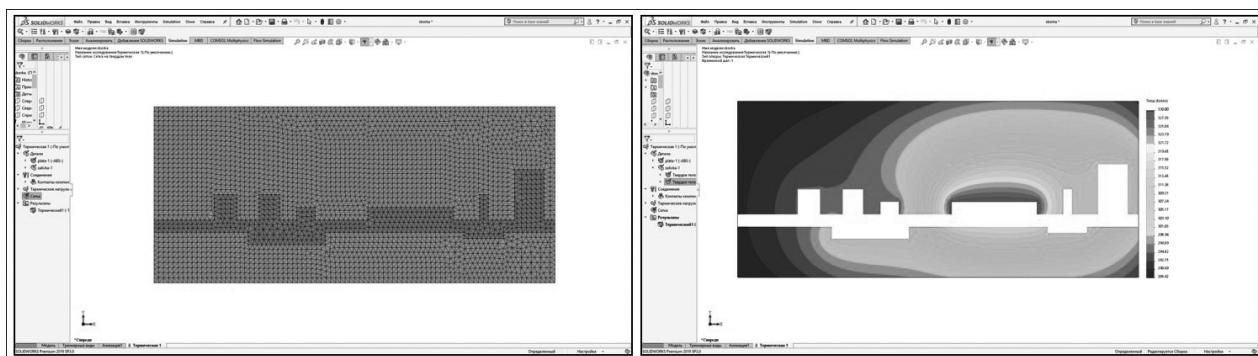


Рис. 8. Дискретная модель и поле температуры сечения заливки блока в модуле *Simulation* программы *SolidWorks*

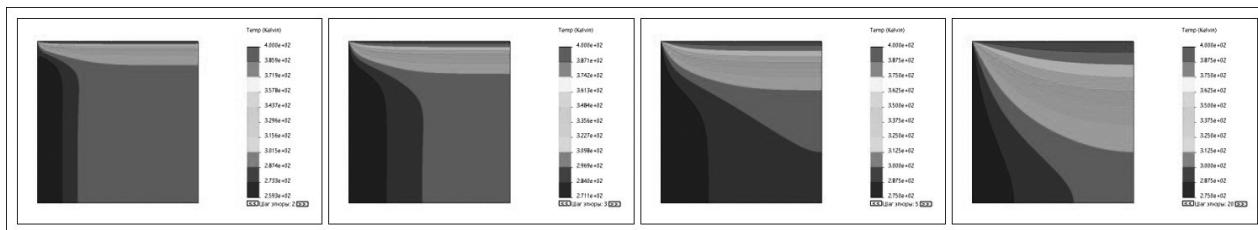


Рис. 9. Кинограмма динамической тепловой задачи

Тепловые расчеты радиоэлементов навесного монтажа (рис. 10), несмотря на совершенно другую геометрию и процессы теплообмена, ничем принципиально не отличаются от поверхностного элемента, пример которого приведен на рис. 6.

В сборке из 3-х тел на рис. 10 используются два материала: алюминий для корпуса и латунь для ножек. Тепловая нагрузка задана постоянной температурой на внутренней поверхности резистора, а всем внешним поверхностям присвоено условие конвективного теплообмена.

Сложность геометрической модели для теплового расчета является непринципиальным ограничением. В доказательство этого утверждения на рис. 11 приведены дискретная модель и поле температур 32-ножечного контроллера.

Геометрическая модель представлена сборкой из 37-ми тел с использованием 5-ти различных материалов (меди, алюминий, пластик, керамика, каучук). Термовые нагрузки, контакты и ограничения принципиально не отличаются от более простых примеров. Стационарная за-

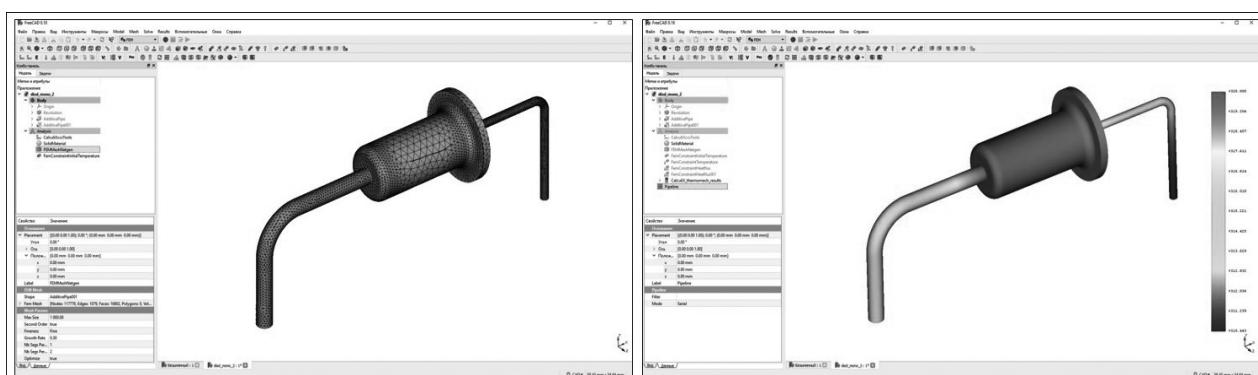


Рис. 10. Дискретная модель и поле температуры на поверхности резистора в программе *FreeCAD* (решатель *CalculiX*)

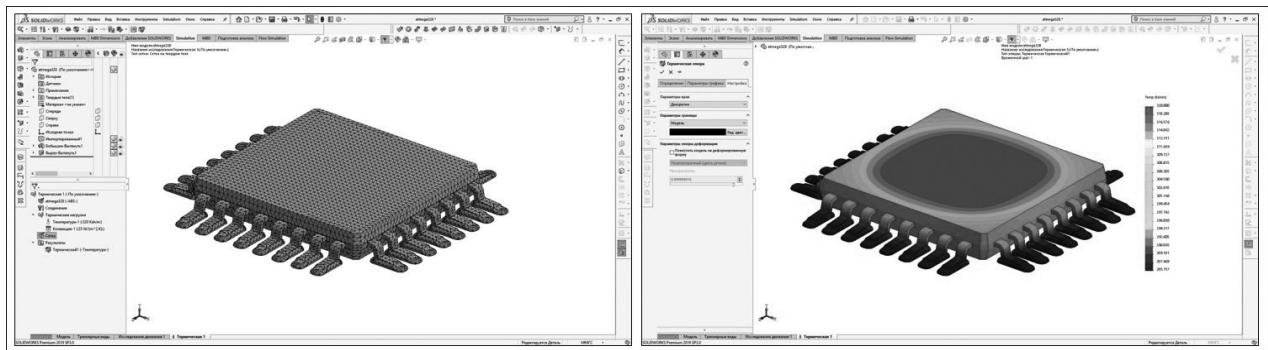


Рис. 11. Дискретная модель и поле температуры на поверхности резистора в модуле Simulation программы SolidWorks

дача для подобной сборки приемлемо решается на вычислительных мощностях от 0,5 ТФлоп/с, а динамическая требует их увеличения пропорционально выбранному временному периоду и шагу моделирования. Расчеты на рабочей станции офисной конфигурации могут занимать несколько суток.

Для электронных блоков без компаундной заливки целесообразно проведение газодинамического расчета теплового режима при естественной или искусственной циркуляции.

Газодинамическая задача может решаться как применительно к отдельным элементам (рис. 12), так и блоку в целом (рис. 13).

Газодинамические задачи, иллюстрированные на рис. 12, 13, реализуют режим естественной циркуляции воздуха, а блок на рис. 14 продувается искусственно.

Постановкой газодинамической задачи предусматриваются назначение «входу-выходу» сочетаний «давление-давление» или «скорость-давление» с начальной температурой воздуха.

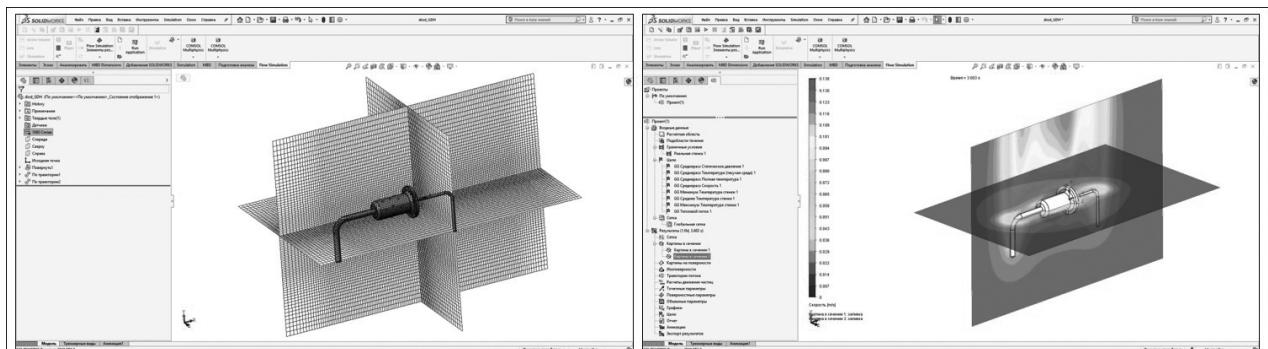


Рис. 12. Дискретная модель и поле температуры вокруг резистора в модуле FlowSimulation программы SolidWorks

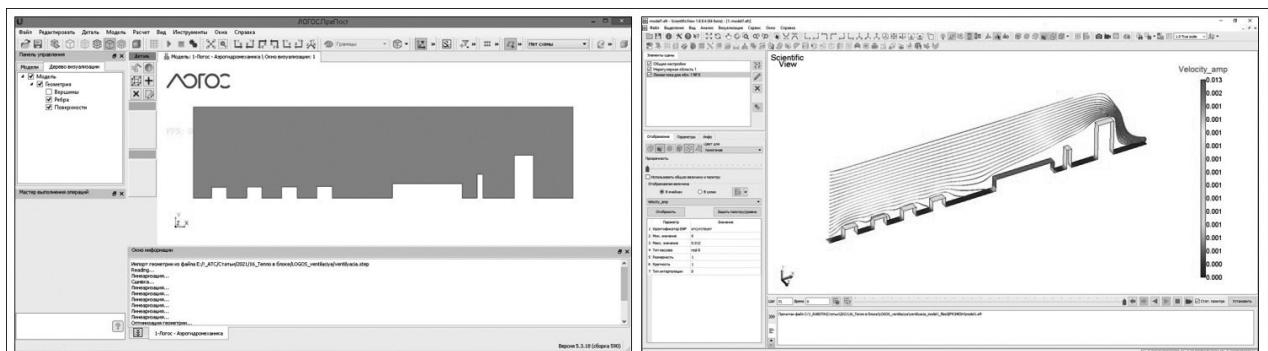


Рис. 13. Дискретная модель и линии тока воздуха внутри блока, полученные в ПМК «Двойник-ПС»

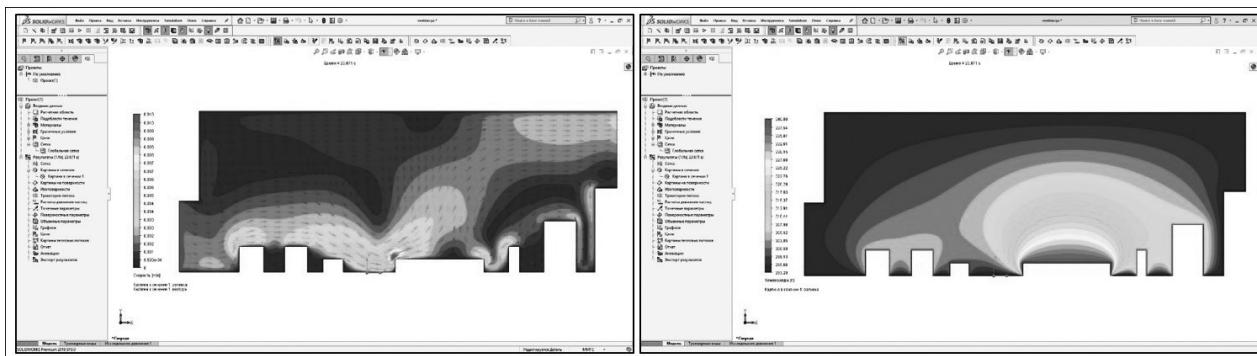


Рис. 14. Поля скорости и температуры воздуха внутри электронного блока, полученные в модуле FlowSimulation программы SolidWorks

Сосредоточение основного внимания на границах температурного эксплуатационного диапазона делает целесообразным расчеты для экстремально высоких и экстремально низких температур.

Остальные поверхности региона продувки представляются в виде различных «стенок» (с проскальзыванием, без проскальзывания, адиабатических, с постоянной или переменной температурой, с постоянным или переменным тепловым потоком, с постоянным или переменным коэффициентом конвективного теплообмена и пр.) или «плоскостей симметрии».

Постановка и решение газодинамической задачи требует значительно больших времени и вычислительных ресурсов по сравнению, как со стационарным, так и динамическим тепловым твердотельным расчетом. Рациональные располагаемые вычислительные мощности для решения подобных задач оцениваются авторским коллективом от 10 до 50 ТФlop/c.

Дальнейшее повышение адекватности моделирования возможно возвратом к твердотельной тепловой задаче, но с использованием уточненных по газодинамическим результатам значений коэффициентов конвективного теплообмена для каждой поверхности электрорадиоэлемента (рис. 15).

Ограниченнная для данной статьи выборка программного обеспечения не поддерживает численного моделирования совмещенных задач типа «газодинамика-теплообмен в твердом теле», поэтому они исключены из рассмотрения.

Авторы убеждены, что даже не приблизились к граничным по адекватности и сложности вариантам численного моделирования тепловых режимов, достижимых в других областях или коммерческом программном обеспечении, но считают, что для взрывательных устройств инженерных боеприпасов наглядно доказана возможность практической реализации многоступенчатой расчетной методики с использованием перечисленных бесплатных программ.

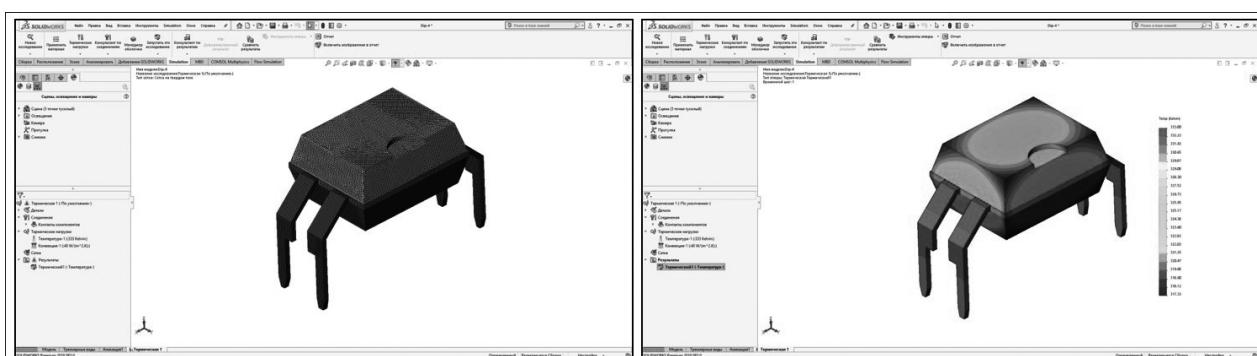


Рис. 15. Дискретная модель и поле температуры на поверхности контроллера в модуле Simulation программы SolidWorks

Обобщение приведенных примеров позволяет описать сущность методики следующим образом: последовательное усложнение постановок задач численного моделирования в пределах от 2D графических мономатериальных твердотельных примитивов до многоинтерационных последовательных взаимосвязанных вычислительных экспериментов в области газодинамики и многотельной многоматериальной теплопроводности, с прекращением усложнения при достижении приемлемой адекватности.

Именно в возможности использования этой методики в ходе разработки инженерных боеприпасов и заключается практическая значимость статьи.

В заключении авторы отмечают, что в ходе подготовки и проведения вычислительных экспериментов не было выявлено непреодолимых путем упрощения последовательным разбиением на подэтапы вариантов моделирования составных элементов взрывательных устройств боеприпасов, а используемый комплект программного обеспечения не является определяющим фактором. Однако применение специализированных коммерческих программ, являющихся лидерами по распространенности, возможностям и степени верифицированности (ANSYS, COMSOL Multiphysics, Nastran, Algor Simulation, PTC Creo Simulation и т.п.), может существенно упростить процесс моделирования и сократить временные рамки получения результата.

Литература

1. Официальный сайт FreeFEM++ :[Электронный ресурс]. URL: <https://freefem.org>. (Дата обращения 24.02.2021).
2. Официальный сайт Agros2D: [Электронный ресурс]. URL: <http://www.agros2d.org>. (Дата обращения 26.02.2021).
3. Официальный сайт FEM-M: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.range-software.com>. (Дата обращения 24.02.2021).
4. Официальный сайт CSC-IT CENTER FOR SCINCE LTD: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.csc.fi/web/elmer>. (Дата обращения 24.09.2020).
5. Официальный сайт Z88. URL: <https://en.z88.de>. (Дата обращения 24.09.2020).
6. Официальный сайт CalculiX: [Электронный ресурс]. URL: <http://calculix.de>. (Дата обращения 24.02.2021).
7. Официальный сайт OpenFOAM: [Электронный ресурс]. URL: <https://openfoam.com>. (Дата обращения 24.02.2021).
8. ParaView.
9. Официальный сайт Elcut. URL: <http://elcut.ru>. (Дата обращения 26.02.2021).
10. Официальный сайт ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»: [Электронный ресурс]. URL: <http://logos.vniief.ru/products/logos/>. (Дата обращения 26.02.2021).
11. Официальный сайт SolidWorks: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.solidworks.com/ru>. (Дата обращения 24.02.2021).