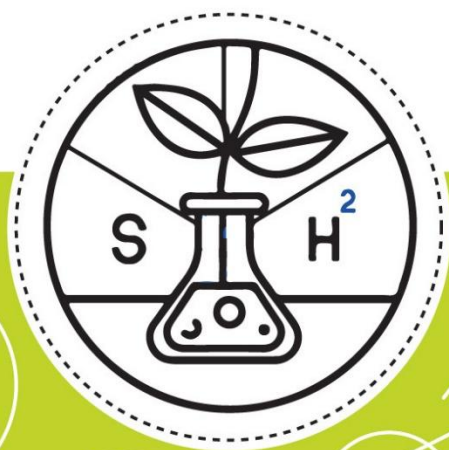


ІІТМО

МОДЕЛИРОВАНИЕ И БАЗОВЫЙ АНАЛИЗ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В САЕ-СИСТЕМАХ



**Санкт-Петербург
2026**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

МОДЕЛИРОВАНИЕ И БАЗОВЫЙ АНАЛИЗ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В САЕ-СИСТЕМАХ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлению подготовки 16.04.03 Холодильная, криогенная техника и
системы жизнеобеспечения в качестве учебного пособия для реализации
основных профессиональных образовательных программ высшего
образования магистратуры

ИТМО

Санкт-Петербург
2026

Моделирование и базовый анализ конвективного теплообмена В САЕ-системах / П.А. Колодийчук, Н.В. Пилипенко, В.А. Пронин [и др.]. – СПб: Университет ИТМО, 2026. – 59 с.

Рецензент(ы):

Сухарев Андрей Валериевич, кандидат технических наук, доцент, доцент факультета информационно-измерительных и биотехнических систем, СПбГЭТУ «ЛЭТИ»;

Изложены основы и практические методики численного моделирования в САЕ-системе для решения инженерных задач в области проектирования радиоэлектронной аппаратуры. Подробно рассмотрены ключевые этапы сквозного моделирования: от геометрической подготовки и построения конечно-элементных сеток до настройки решателя и интерпретации результатов. Приведены комплексные методические указания для выполнения расчётов в современной САЕ-среде. Показано разнообразие инженерных проблем — от бытовых расчетов до оценки тепловых режимов приборных корпусов. Описаны эффективные приёмы параметризации моделей, верификации результатов и наглядной визуализации полей температур и скоростей потока. Пособие формирует практический базис, достаточный для самостоятельного выполнения базовых инженерных расчётов.

The logo of ITMO University, consisting of the letters 'ITMO' in a bold, sans-serif font. The 'I' and 'T' are connected, and the 'O' is a solid circle.

ИТМО (Санкт-Петербург) — национальный исследовательский университет, научно-образовательная корпорация. Альма-матер победителей международных соревнований по программированию. Приоритетные направления: ИТ и искусственный интеллект, фотоника, робототехника, квантовые коммуникации, трансляционная медицина, Life Sciences, Art&Science, Science Communication.

Лидер федеральной программы «Приоритет-2030», в рамках которой реализовывается программа «Университет открытого кода». С 2022 ИТМО работает в рамках новой модели развития — научно-образовательной корпорации. В ее основе академическая свобода, поддержка начинаний студентов и сотрудников, распределенная система управления, приверженность открытому коду, бизнес-подходы к организации работы. Образование в университете основано на выборе индивидуальной траектории для каждого студента.

ИТМО пять лет подряд — в сотне лучших в области Automation & Control (кибернетика) Шанхайского рейтинга. По версии SuperJob занимает первое место в Петербурге и второе в России по уровню зарплат выпускников в сфере ИТ. Университет в топе международных рейтингов среди российских вузов. Входит в топ-5 российских университетов по качеству приема на бюджетные места. Рекордсмен по поступлению олимпиадников в Петербурге. С 2019 года ИТМО самостоятельно присуждает ученые степени кандидата и доктора наук.

© Университет ИТМО, 2026

© Колодийчук П.А., Пилипенко Н.В., Пронин В.А., Цветков В.А., 2026

Содержание

| | |
|---|----|
| 1. Введение в CAE-технологии..... | 4 |
| 1.1. Развитие CAE-систем..... | 4 |
| 1.2. Преимущества численного расчета по сравнению с аналитическим | 6 |
| 1.3. Основные этапы инженерного анализа | 7 |
| 2. Принципы построения твердотельной геометрии..... | 9 |
| 2.1. Особенности CAD/CAE-системы SOLIDWORKS Flow Simulation.. | 9 |
| 2.2. Интерфейс пользователя | 10 |
| 2.3. Создание и изменение 3D-геометрии | 13 |
| 2.4. Объединение деталей в сборку | 20 |
| 3. Принципы теплофизического расчета в CAE-системе | 24 |
| 3.1. Общие настройки..... | 24 |
| 3.2. Расчетные область и сетка | 27 |
| 3.3. Граничные условия и тепловые нагрузки | 32 |
| 3.4. Вывод результатов расчета | 33 |
| 4. Практические задания | 35 |
| 4.1. Практическое задание №1. Транзистор на радиаторе..... | 35 |
| 4.2. Практическое задание №2. Корпус с аппаратурой..... | 36 |
| 4.3. Практическое задание №3. Перегородка для кондиционера..... | 50 |
| Список литературы..... | 57 |

1. ВВЕДЕНИЕ В САЕ-ТЕХНОЛОГИИ

1.1. РАЗВИТИЕ САЕ-СИСТЕМ

Теоретические основы современных вычислительных методов, такие как метод конечных элементов, метод конечных объемов и метод конечных разностей, были разработаны учеными начала XX века. Расчеты инженерных задач (прочность конструкций мостов, зданий или элементов авиационной техники) выполнялись вручную или с использованием механических калькуляторов и основывались на существенно упрощенных аналитических моделях и графических методиках [1, 2]. Инженерно-расчетная практика характеризовалась преобладанием ручных вычислительных операций с использованием арифмометров, логарифмических линеек и таблиц, что неизбежно накладывало существенные ограничения на сложность рассматриваемых математических моделей и объем обрабатываемых данных. Трудоемкость и значительная временная протяженность расчетного цикла, обусловленная необходимостью выполнения многочисленных итераций и промежуточных записей вручную, существенно сужали спектр анализируемых проектных конфигураций и глубину параметрических исследований. Широкое применение упрощенных аналитических зависимостей и графических методов часто диктовалось практической реализуемостью ее решения в рамках доступного вычислительного аппарата, что ограничивало полноту учета всех значимых факторов и требовало от инженера высокой квалификации в интерпретации заведомо приближенных результатов для принятия проектных решений [3]. Ограниченность этих подходов ярко проявилась, например, при разрушении моста Такома-Нарроуз в 1940 году, вызванном аэроупругими колебаниями — явлением, которое позднее стало классической задачей для численного моделирования [4].

Период 1950–1970-х годов ознаменовался становлением цифрового САЕ-систем (computer-aided engineering), обусловленным появлением первых электронно-вычислительных машин (ЭВМ). Пионерские разработки метода конечных элементов проводились независимо: Рэй Клуф в компании Boeing создал один из первых кодов для анализа напряжений в авиационных конструкциях, а Джон Аргирис в Штутгартском университете разработал код для аэрокосмических приложений в Европе [5].

Параллельно, в рамках программ NASA Mercury, Gemini и Apollo, велось интенсивное развитие САЕ для решения критических задач

проектирования космической техники, включая термоструктурный анализ лунного модуля Apollo. Ключевым результатом этой эпохи стала разработка кода NASTRAN (NASA Structural Analysis) в конце 1960-х годов, который впоследствии стал фактическим отраслевым стандартом для структурного анализа, первоначально применявшегося для расчетов прочности и вибраций ракеты-носителя Saturn V и корабля Apollo [6].

Период распространения CAE-систем в 70-80-х годах был обусловлен распространением компьютеров и рабочих станций на базе Unix, что снизило стоимость вычислений. Это привело к появлению специализированных коммерческих разработчиков программного обеспечения для инженерного анализа. Были основаны компании Swanson Analysis Systems (ныне ANSYS), чей первый пакет применялся для теплового и структурного расчета компонентов ядерных реакторов Westinghouse, и MSC Software, осуществившая коммерциализацию кода NASTRAN. Параллельно в Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса (LLNL) был создан решатель LS-DYNA, специализированный на моделировании сложных нелинейных динамических процессов, таких как удар (краш-тесты автомобилей), взрыв и штамповка металлов [7].

Развитие методов конечных элементов в этот период также стимулировалось необходимостью решения практических инженерных проблем, выявленных, в частности, при расследовании катастроф самолетов de Havilland Comet в 50-х годах, вызванных усталостным разрушением у острых углов рам иллюминаторов. Это активизировало разработку и применение CAE-методик для анализа концентрации напряжений и прогнозирования усталостной долговечности конструкций, особенно в авиационной отрасли [3].

Период 1990-х – 2000-х годов характеризовался глубокой интеграцией CAE-систем с CAD-модулями (computer-aided design) и расширением их доступности. Ключевым фактором стало массовое распространение мощных ПК с развитой графикой, совпавшее с бурным развитием CAD-систем. Это привело к появлению встроенных модулей инженерного анализа, перенеся базовые расчеты напрямую на рабочие места конструкторов и обеспечив возможность анализа на ранних стадиях проектирования. Параллельно развивалось направление мультифизического моделирования, представленное пакетами COMSOL Multiphysics и ANSYS Multiphysics, позволяющими решать связанные задачи различных физических полей. Экспоненциальный рост вычислительной мощности

персональных рабочих станций сделал возможным решение задач с миллионами степеней свободы на персональных компьютерах [5].

Современное производство характеризуется обязательным применением CAE-анализа на всех ключевых этапах жизненного цикла изделия. Предварительное компьютерное моделирование и виртуальные испытания стали неотъемлемой частью инженерной практики, предшествующей изготовлению физических прототипов. Проведение комплексных расчетов (прочностных, тепловых, гидрогазодинамических и др.) на этапах концептуального и детального проектирования позволяет выявить и устранить конструктивные недостатки, оптимизировать параметры изделия и проверить его соответствие требованиям на виртуальной модели. Это существенно сокращает количество дорогостоящих итераций физического прототипирования и испытаний, ускоряя выход продукта на рынок и снижая затраты на разработку. Анализ цифровой модели является стандартной процедурой, предваряющей запуск в производство.

1.2. ПРЕИМУЩЕСТВА ЧИСЛЕННОГО РАСЧЕТА ПО СРАВНЕНИЮ С АНАЛИТИЧЕСКИМ

Численные методы расчета обладают рядом существенных преимуществ перед аналитическими решениями. Ключевым из них является возможность достоверного анализа объектов произвольной, технологически сложной геометрии. В отличие от аналитических методов, требующих значительных упрощений формы до канонических тел для получения замкнутого решения систем дифференциальных уравнений, численное моделирование позволяет работать непосредственно с точной геометрией САД-модели. Это устраняет необходимость в идеализации, обеспечивает корректный учет реальных конструктивных элементов (ребер жесткости, криволинейных поверхностей, отверстий сложной формы, местных концентраторов напряжений) и гарантирует адекватное приложение граничных условий и нагрузок к фактической конфигурации изделия [8].

Нелинейные задачи (пластичность, большие перемещения, контакт, нелинейные свойства материалов) принципиально не имеют точного аналитического решения и требуют последовательного приближения к результату через множество вычислительных шагов [9]. Человеческий расчет таких итераций на практике неосуществим из-за экспоненциального роста сложности и объема операций. ЭВМ, напротив, выполняет тысячи и

миллионы итераций автоматически, применяя устойчивые алгоритмы (метод Ньютона-Рафсона, дуговые методы) для достижения сходимости решения с заданной точностью. Это позволяет достоверно моделировать поведение конструкций в реальных условиях. Ручной расчет подобных задач является практически невозможным.

Визуализация результатов численного теплового анализа предоставляет возможность непосредственного анализа распределения температурных полей и тепловых потоков в сложных трехмерных объектах [10]. Графическое представление позволяет оперативно выявлять зоны локального перегрева, области с критическими температурными градиентами, пути основного теплопереноса и участки неэффективного теплоотвода. Это обеспечивает быстрое понимание термодинамического поведения системы, выявление аномалий и "узких мест" конструкции, недоступных для прямого наблюдения при экспериментальных исследованиях или аналитическом расчете. Наглядное отображение данных существенно облегчает интерпретацию результатов и принятие инженерных решений по оптимизации теплового режима, модификации конструкции или схемы охлаждения.

1.3. ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ИНЖЕНЕРНОГО АНАЛИЗА

Подготовка расчетной геометрии является первым и критически важным этапом инженерного анализа. Исходные данные могут варьироваться от вербального описания или эскиза на бумаге до чертежа и готовой 3D-CAD-модели. В связи с этим расчетчик обязан владеть навыками самостоятельного создания, импорта и модификации геометрических моделей в САД-средах. Способность расчетчика адекватно интерпретировать исходные данные, создавать или адаптировать геометрию под конкретную расчетную схему и корректно ее упростить напрямую определяет ценность и опытность инженера [7].

Этап формирования расчетного проекта заключается в четком определении физической сущности решаемой задачи и требуемых математических моделей. Первоочередно идентифицируется доминирующий тип анализа: статическая прочность, динамика (модальная, гармоническая, переходная), стационарный или нестационарный теплоперенос, магнитостатика, гидрогазодинамика, акустика и т. д. На основе этого выявляются ключевые физические явления, подлежащие моделированию: механические контакты, гравитационные или

инерционные нагрузки, теплопередача различных механизмов (конвекция, кондукция, радиация), электромагнитные поля, течение жидкостей или газов, фазовые превращения. Этот этап напрямую определяет выбор решателя, требования к вычислительным ресурсам и структуру последующих этапов моделирования [11, 12].

Далее следует этап конкретизации физической модели. Требуется точное определение свойств материалов (например, модуль упругости и коэффициент Пуассона для статического прочностного анализа, теплопроводность для теплового статического расчета) и их назначение соответствующим моделям. Параллельно задаются граничные условия, накладывающие физические ограничения на модель, а для нестационарных задач – начальные условия (распределение температуры, поля скоростей или перемещений в начальный момент времени) [8].

Дискретизация геометрии на конечные элементы (генерация расчетной сетки) является фундаментальным этапом численного анализа, преобразующим непрерывную область в совокупность узлов и расчетных элементов. Ключевыми аспектами являются выбор типа элементов (тетраэдры, гексаэдры, оболочки), управление размером и сгущением сетки в зонах ожидаемых высоких градиентов параметров (напряжений, температур, потоков), а также применение специализированных методов построения. Оптимальное соотношение детализации сетки и вычислительных ресурсов достигается через итеративное исследование сходимости, минимизирующее погрешность дискретизации. Корректно построенная сетка обеспечивает адекватность математической модели физическому объекту [13].

После задания всех необходимых параметров осуществляется запуск вычислительного решателя. Этот процесс выполняется программным комплексом автоматически, без вмешательства пользователя, и завершается получением файлов результатов. Интерпретация данных базируется на анализе визуализированных полей: картины распределения искомых величин на поверхности модели, в заданных сечениях, а также векторные представления потоков. Ключевой задачей является выявление критических зон, оценка равномерности распределения параметров, проверка соответствия поведения модели ожидаемой физической картине и установленным критериям работоспособности. Верификация включает контроль корректности приложения граничных условий и физическую осмысленность полученных полей.

2. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ

2.1. ОСОБЕННОСТИ CAD/CAE-СИСТЕМЫ SOLIDWORKS FLOW SIMULATION

Несмотря на специализацию в области инженерного анализа, квалифицированный расчетчик обязан владеть основами создания и редактирования твердотельной геометрии в CAD-системах. Это требование обусловлено разнообразием возможных исходных данных для расчета, которые могут поступить ему как в виде готовой 3D-модели, так и в форме чертежей, эскизов или даже словесного описания. Понимание логики построения и редактирования готовой геометрии критически важно для самостоятельного создания геометрии, а также для эффективной работы с конструкторами. Кроме того, такой подход обеспечивает инженера знаниями о принципах подготовки модели к расчету (исправление дефектов, упрощение, добавление физически значимых уточнений). Недостаточная квалификация расчетчика делает его зависимым от внешних поставщиков моделей и ограничивает его способность к решению сложных комплексных задач [2].

Принципы построения твердотельной геометрии будут продемонстрированы в программе Solidworks с включенным дополнением Flow Simulation. Данная среда выбрана по следующим причинам:

- Параметрический подход к генерации геометрии совмещен в одном окне с решателем CAE-системы, что исключает проблемы с импортом/экспортом моделей;
- Автоматическое распознавание объемов текучих сред и твердых тел;
- Упрощенный алгоритм генерации расчетной сетки (прямоугольная со сгущением);
- Функциональная достаточность для базовых задач конвективного теплообмена.

Несмотря на преимущества, сложный междисциплинарный анализ в Solidworks недоступен из-за малого количества возможных физических моделей – нет фазовых переходов, химии, разных моделей турбулентности и т. д. Тем не менее, основные задачи, возникающие при анализе термонапряженного состояния радиоэлектронной аппаратуры, программа решает успешно.

Далее рассматривается пошаговое решение задачи конвективного охлаждения транзистора, расположенного на поверхности радиатора. Чертежи и тепловые нагрузки приведены в главе «4.1. Практическое задание №1. Транзистор на радиаторе».

2.2. ИНТЕРФЕЙС ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

Первичной задачей является создание файла детали. Она представляет собой минимальную составную единицу любой твердотельной модели. Для вызова меню создания геометрии на начальном экране Solidworks кликните сверху на панели инструментов на изображение чистого листа «Создать» и в появившемся окне выберите «Деталь» (рис. 1).

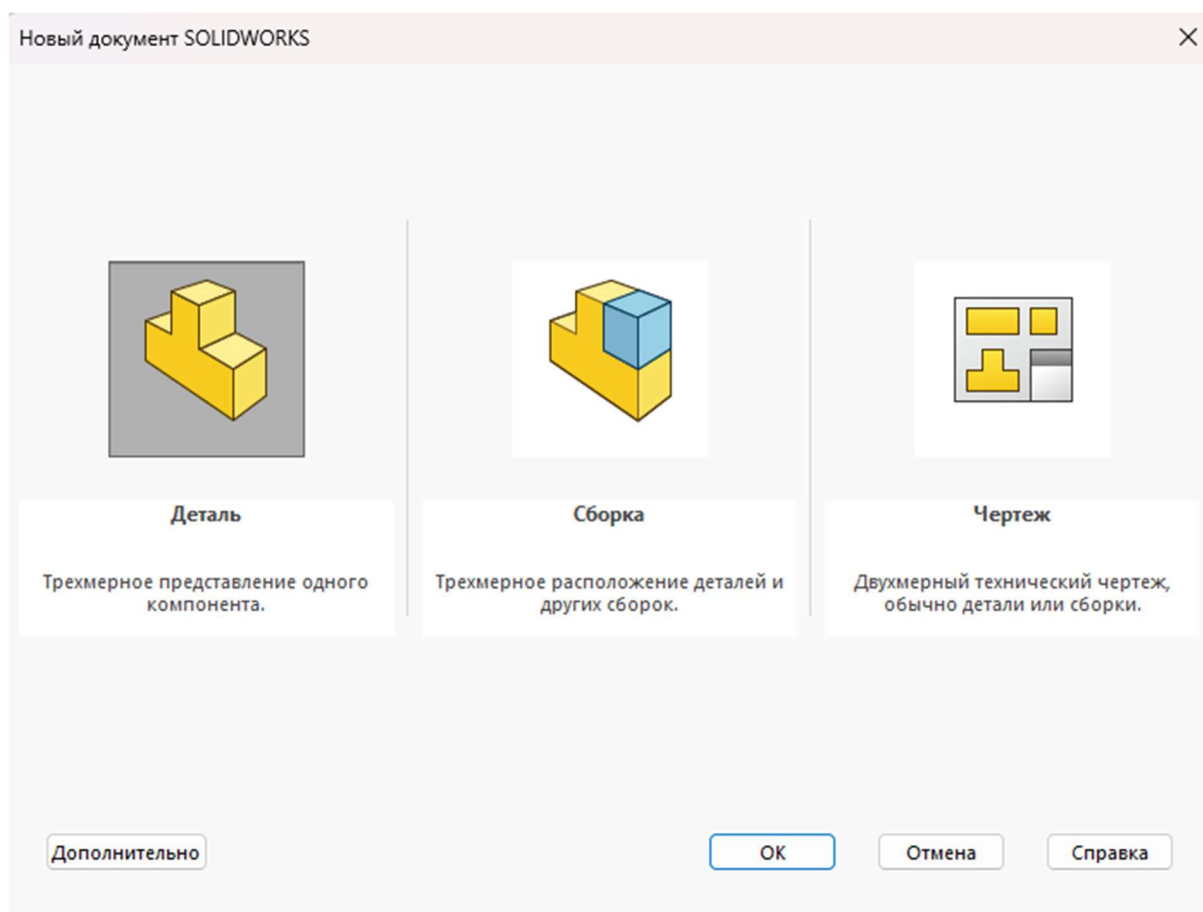


Рисунок 1 – Создание детали.

После загрузки интерфейс дополняется инструментами редактирования детали, деревом проекта и рабочим пространством. В большинстве своем принцип создания детали заключается в создании и

вытягивании эскизов в твердотельную геометрию, поэтому для начала необходимо создать эскиз. Удобно начинать создание геометрии от её какого-либо основополагающего элемента. Для радиатора это будет его основание – толстая пластина без ребер. На панели инструментов выберите вкладку «Эскиз», затем одноименную функцию. В начале работы никакой геометрии ещё нет, и программа для выбора плоскости рисования эскиза предлагает одну из трех базовых. Выберите плоскость «Сверху», нажав на неё прямо в окне программы. Если базовые плоскости заслоняют друг друга или их идентификация затруднительна, разверните камеру обзора, зажав среднюю кнопку мыши.

В целом, твердотельное моделирование примечательно тем, что зачастую одну и ту же деталь можно создать разными путями. В частности, основание радиатора можно создать вытягиванием как его нижней стороны, так и боковой. Более того, начать можно было и вовсе не с основания, а с одного из ребер.

Рисование эскиза происходит через создание двумерных примитивов в выбранной плоскости. Для этого на панели инструментов (рис. 2, а) необходимо выбирать, какую конкретно фигуру вы хотите нарисовать. В нашем случае это прямоугольник. Около его изображения есть стрелочка вниз, при нажатии на которую программа предлагает различные типы определения этой фигуры (рис. 2, б), например, по двум точкам, из центра и т.д.

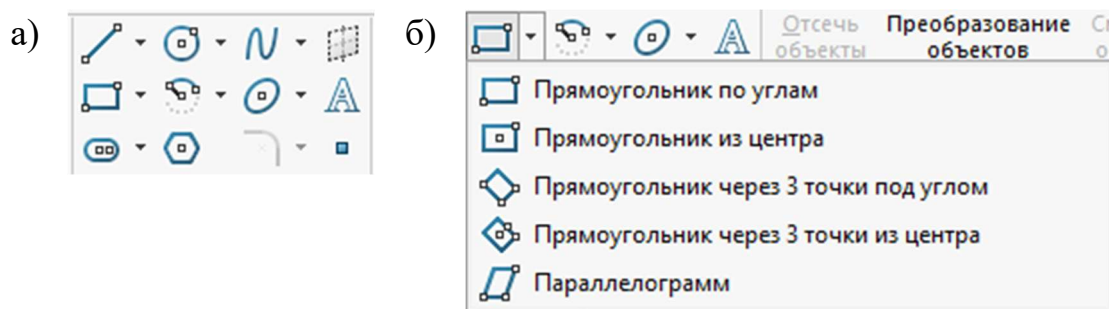


Рисунок 2 – Примитивы эскиза (а) и типы прямоугольников (б).

При САЕ-анализе из-за особенностей указания граничных условий и генерации сетки удобнее, когда модель начинается из центра и её ориентировочные плоскости ортогональны базовым. По этой причине при создании первого примитива следует выбрать прямоугольник из центра.

После этого программа отобразит параметры инструмента (рис. 3) и будет ожидать первого шага.

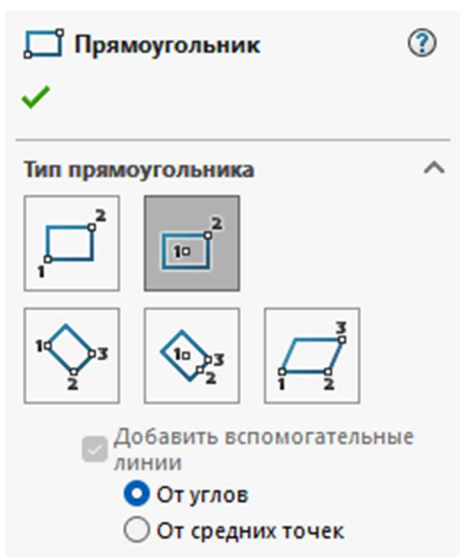


Рисунок 3 – Параметры прямоугольника.

Изображение прямоугольника (рис. 3) имеет пронумерованные точки 1 и 2, которые указывают порядок рисования примитива. Очевидно, что сначала необходимо указать центр прямоугольника, затем любой его угол. Щелкните левой кнопкой мыши сначала в центре координат в рабочей области, затем в произвольной точке. При этом будут отображаться размеры получающегося прямоугольника и координаты определяющих точек, однако не следует на них ориентироваться, так как они носят справочный характер. Получился прямоугольник из центра (рис. 4).

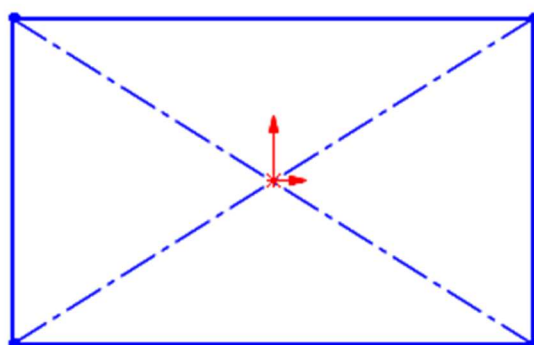


Рисунок 4 – Неопределенный прямоугольник.

Отметим, что в данный момент прямоугольник не закреплен в плоскости эскиза. Его углы и стороны можно свободно двигать, а сам он

окрашен в синий цвет. Это говорит об отсутствии его закрепления, о чем дополнительно сказано внизу на панели состояния – «Недоопределен». Само по себе такое состояние не мешает завершить создание эскиза и начать генерацию геометрии, однако для точного расчета необходимо доопределить все параметры прямоугольника. Это делается через привязки и/или размеры. Привязывать модель пока не к чему, поэтому используйте инструмент «Автоматическое нанесение размеров». После его активации нажмите на любой горизонтальный отрезок, отведите курсор от прямоугольника в свободное пространство и нажмите в пустом месте. Для созданного размера введите значение ширины основания радиатора и подтвердите ввод (Enter или галочка в окне размера). Повторите для вертикального отрезка. В результате эскиз должен быть окрашен в черный, а статус поменяется на «Определено» (рис. 5).

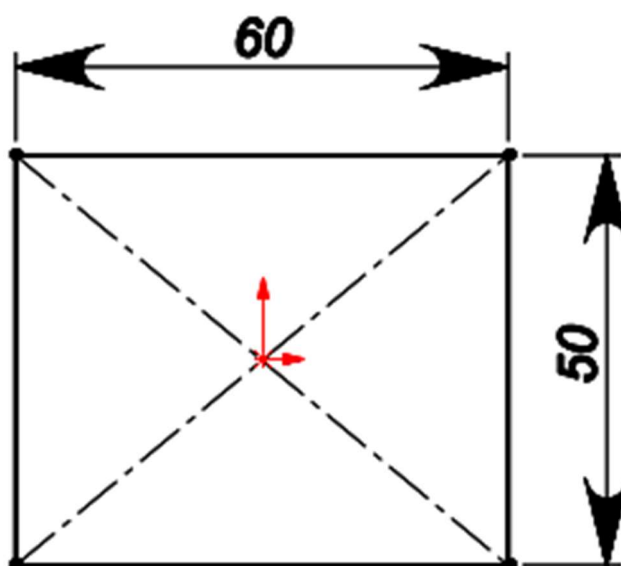


Рисунок 5 – Эскиз прямоугольника.

Эскиз готов, нажмите сверху кнопку «Выход из эскиза».

2.3. СОЗДАНИЕ И ИЗМЕНЕНИЕ 3D-ГЕОМЕТРИИ

Откройте вкладку «Элементы». Она заполнена инструментами создания, удаления и модификации геометрии на основе готовых эскизов. Имеющийся эскиз необходимо выдать вверх (чтобы итоговый радиатор лежал на плоскости «Сверху»). Нажмите на кнопку «Вытянутая бобышка/основание».

Примечание: после выхода из эскиза он выделяется автоматически. Операция «Вытянутая бобышка/основание», как и большинство других инструментов, подхватывает выделенный элемент и предлагает провести операцию на нем. Если вы сбросили выделение, то «Вытянутая бобышка/основание» попросит указать, что именно нужно вытянуть (рис. 6, а). В таком случае вам необходимо либо нажать на сам эскиз в рабочем пространстве (рис. 6, б), либо выбрать его в дереве проекта (рис. 6, в).

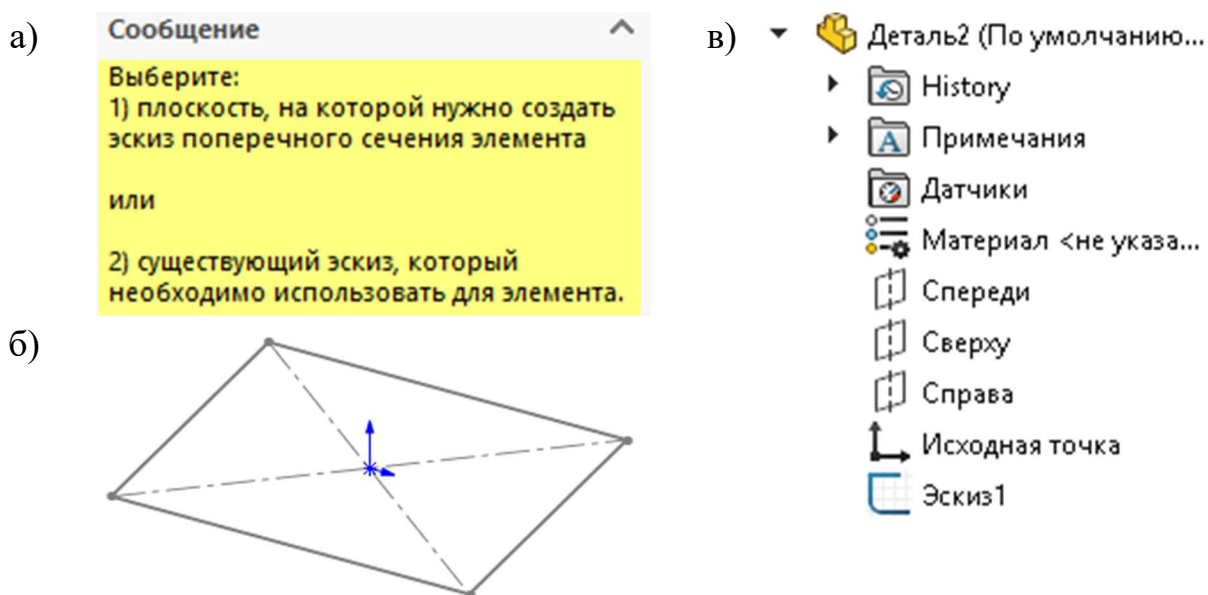


Рисунок 6 – Определение геометрии вытягивания.

На этом этапе программа спрашивает у вас параметры вытягивания. Укажите вашу толщину пластины – 5 мм, остальные параметры оставьте без изменения (рис. 7) и примените операцию вытягивания.

Далее необходимо создать ребра радиатора. В программах твердотельного моделирования множество повторяющихся элементов создается через операцию массива (наличие места под транзистор не отменяет того, что ребра изначально продублированы). Однако для начала такого копирования необходимо создать оригинал. Для этого нарисуйте эскиз на поверхности основания радиатора. На этот раз геометрия уже присутствует в модели. Поэтому программа будет ожидать выбора в качестве плоскости рисования какую-либо уже имеющуюся поверхность (базовые плоскости всё ещё есть в пространстве детали и доступны для выбора, просто они скрыты).

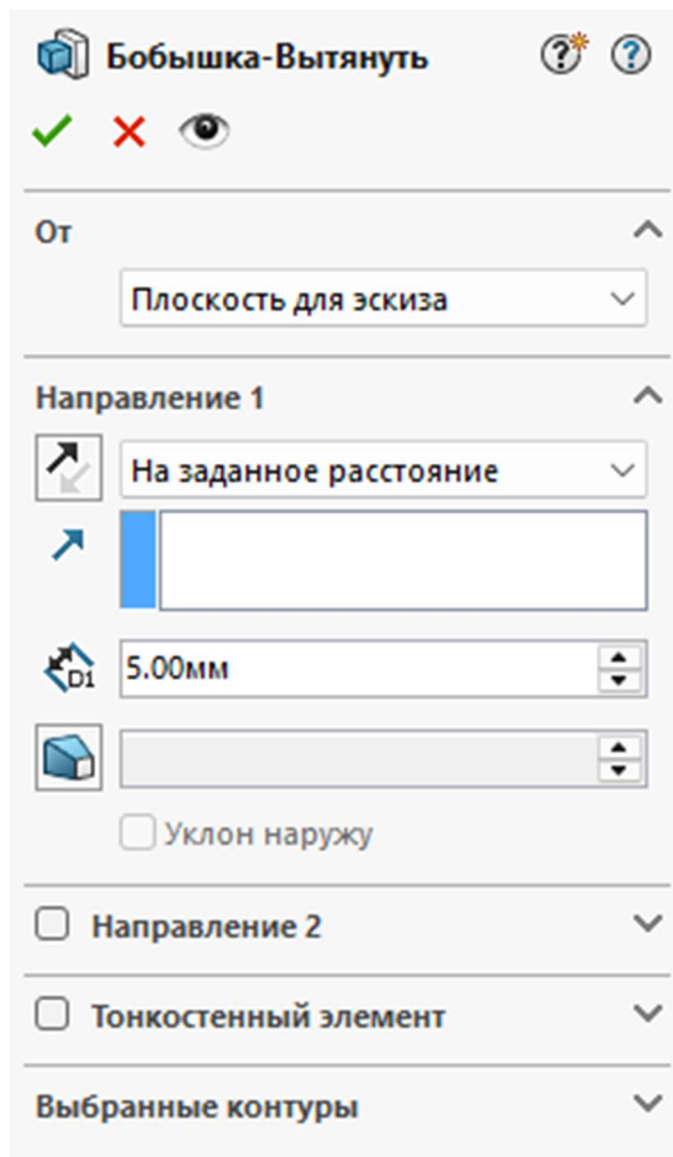


Рисунок 7 – Параметры вытягивания.

Создайте эскиз самостоятельно. Здесь будет удобно пользоваться прямоугольником из двух углов, так как один угол совпадает с таковым у основания радиатора, а другой совпадает с противоположной стороной. Тогда для доопределения эскиза будет достаточно указать только ширину прямоугольника (рис. 8, а) (длина определена и исходит из привязок – она совпадает с длиной основания).

После создания эскиза вытяните его (рис. 8, б). Обратите внимание, что на чертеже (стр. 37) его высота указана вместе с основанием, поэтому толщину этого основания нужно будет вычесть.

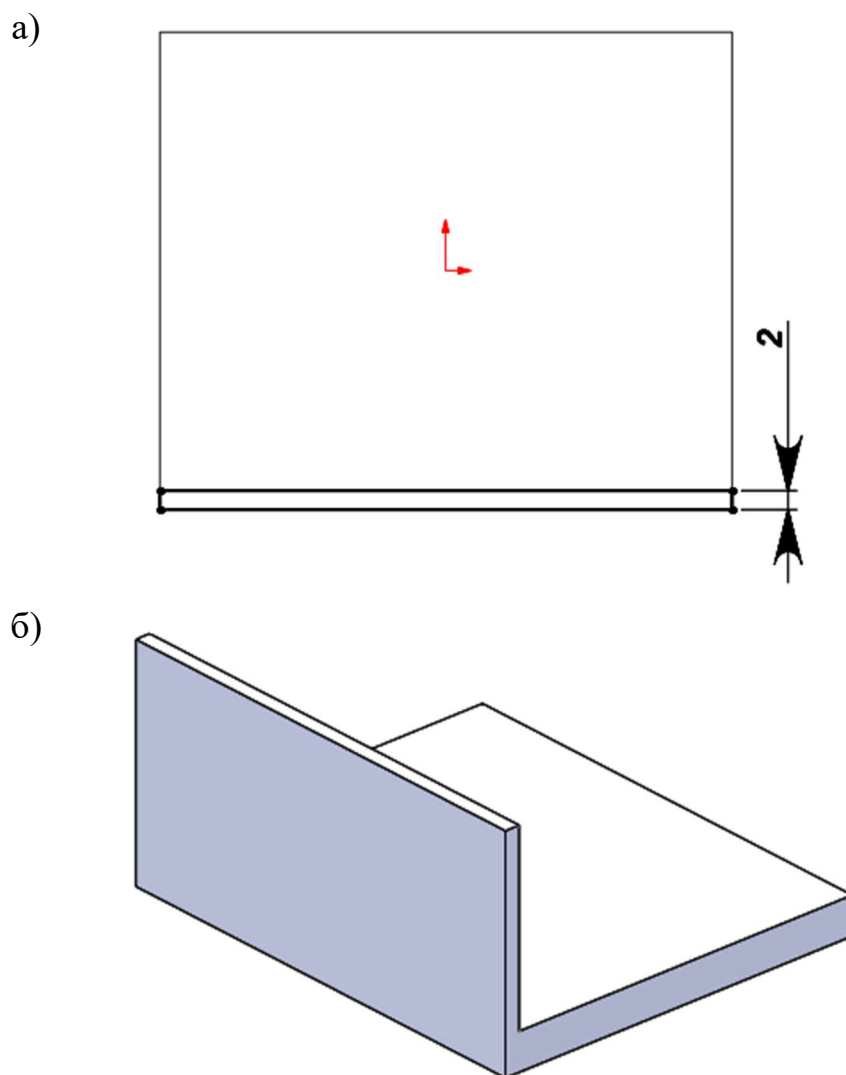


Рисунок 8 – Эскиз (а) и модель (б) радиатора с одним ребром.

Выберите элемент «Линейный массив». В окне его параметров (рис. 9, а) вам нужно выбрать направление массива, интервал и количество экземпляров, а также сам объект копирования. В качестве направления выступает любой отрезок или плоскость (тогда направлением будет нормаль к плоскости). Интервал и количество экземпляров выбирайте исходя из чертежа. Объект копирования – операция «Вытягивание» – выбирайте в дереве проекта, как это было для эскиза (рис. 6, в).

В рабочей области отображается предварительный просмотр результата. Если направление массива получилось в другую сторону, то нажмите кнопку из двух стрелочек у параметра направления для его обращения. Итоговый результат (рис. 9, б) должен топологически совпасть с чертежом.

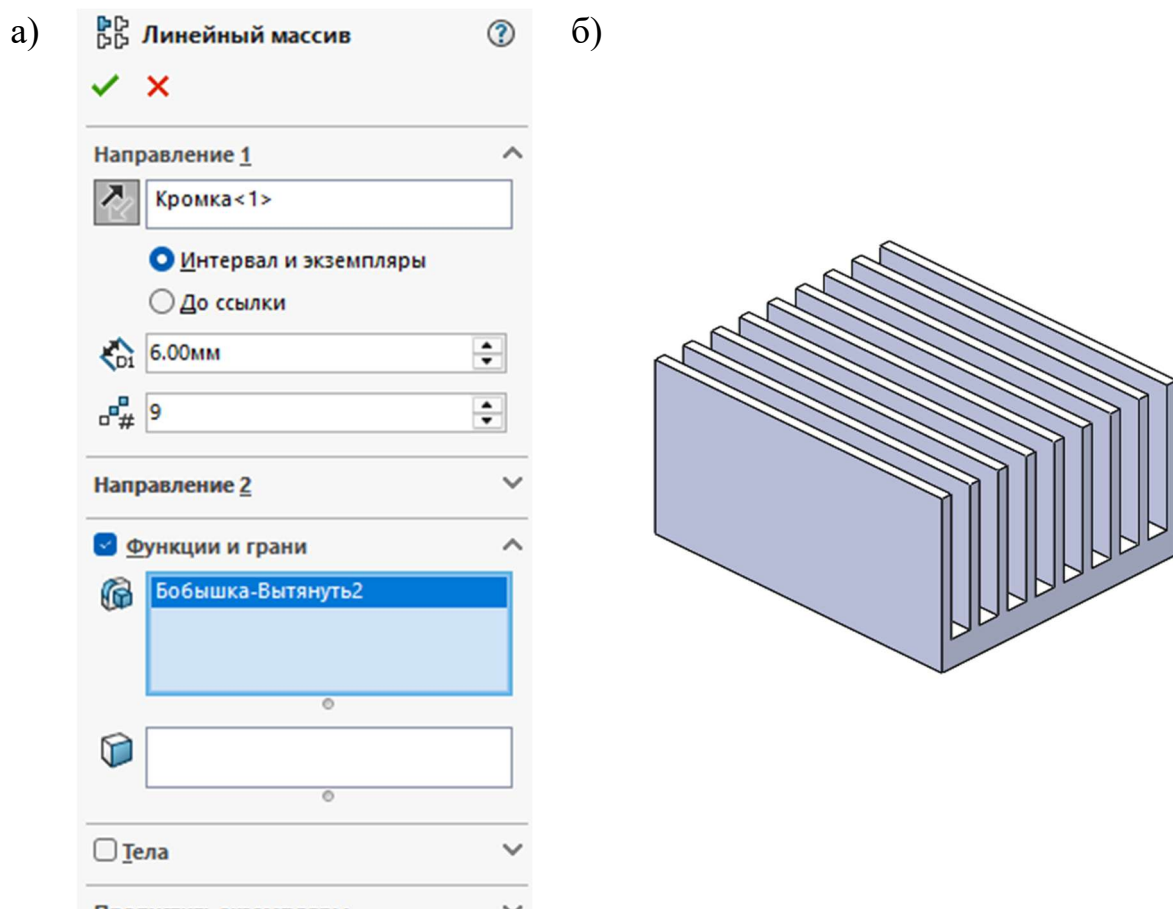


Рисунок 9 – Параметры массива (а) и итоговый радиатор с ребрами (б).

Следующим шагом будет создание выреза ребер для дальнейшей постановки транзистора. Для этого необходимо создать новый эскиз для вытягивания, при котором будет не создаваться, а удаляться геометрия. Для этого создайте эскиз прямоугольника для выреза на одной из поверхностей (рис. 10, а) (верхняя поверхность любого ребра или поверхность основания между ребрами).

Особенностью удаления геометрии с точки зрения топологии является то, что у этой операции несколько ниже требования к определенности эскизов. В частности, при рисовании прямоугольника нет необходимости в четкой его привязке к ребрам 3 и 7. Необходимо лишь убедиться, что он захватывает средние три ребра и доходит до их середины.

Закройте эскиз и примените операцию «Вытянутый вырез». Введите требуемое расстояние (оно может быть больше, чем фактически требуется вырезать) и обратите направление выреза, если нужно (рис. 10, б).

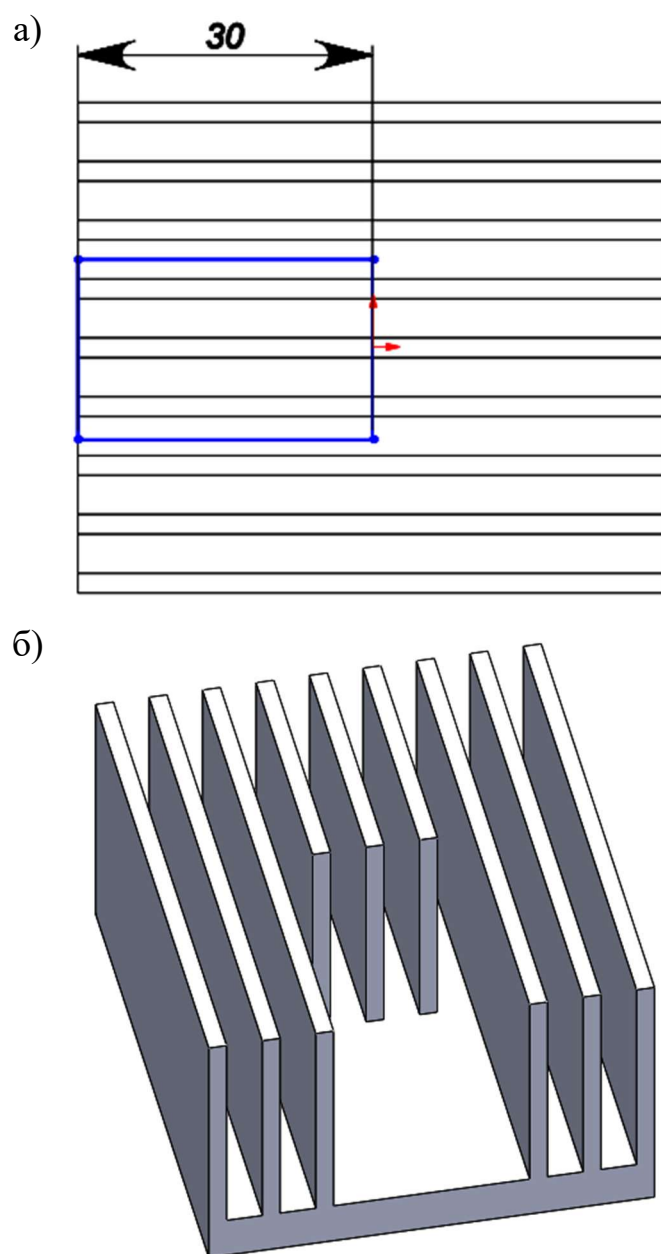


Рисунок 10 – эскиз (а) и результат (б) выреза.

Осталось только сделать вырез под винт, соединяющий транзистор и радиатор. Создавайте эскиз на необходимой поверхности. Возникнет проблема – нужно поместить круг ровно напротив центрального ребра, однако точки для привязки здесь нет. Можно указать отступ круга от края радиатора. Однако здесь будет рассмотрен алгоритм через создание справочной геометрии. Около примитива «Линия» нажмите стрелочку и выберите «Осевую линию». Этот примитив является частным случаем справочной геометрии (геометрия, которая помогает строить эскиз, но не

участвует в дальнейших операциях вытягивания, выреза и др.). Соедините этой линией начало координат и середину края радиатора с вырезом (рис. 11, а). Затем создайте «Окружность», определяя её через точку в центре. Центр расположите на осевой линии (рис. 11, б).

Необходимо указать геометрические параметры окружности. Радиус/диаметр задается аналогично размерам отрезков, однако определение расстояния от центра до края радиатора имеет другой подход. Функция размеров позволяет не только указывать размеры отдельных элементов, но и расстояния между элементами эскиза, создавая взаимосвязи. Для этого в любом порядке при использовании инструмента «Автоматическое нанесение размеров» нажмите на край радиатора и на центр окружности, отведите мышку и нажмите для подтверждения размера. Введите нужное значение из чертежа и примените его (рис. 11, в). Затем выйдите из режима редактирования эскиза и сделайте вырез (рис. 11, г).

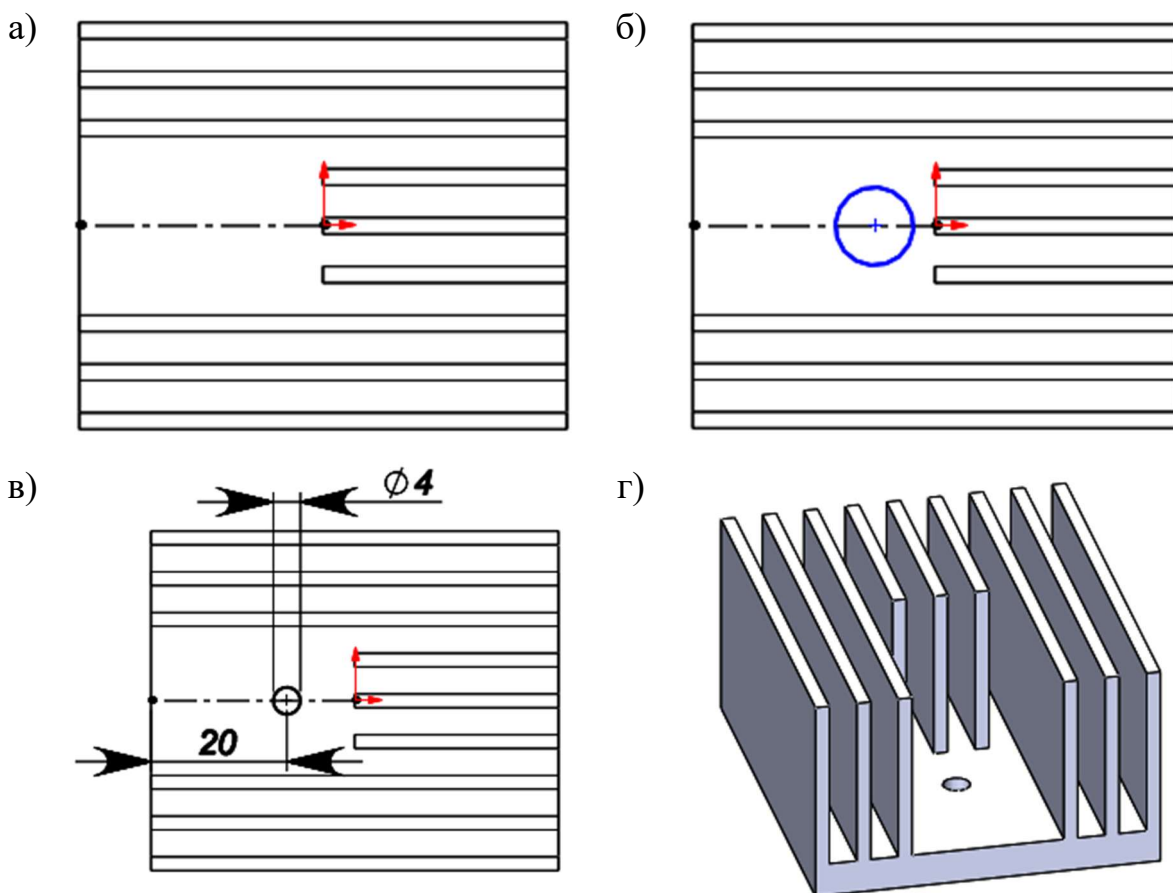


Рисунок 11 – Эскиз для выреза круглого отверстия (а, б, в) и результат выреза (г).

Модель радиатора готова.

Студентам предлагается самостоятельно смоделировать транзистор в новом файле (рис. 12, а). Учтите, что по условиям задачи подложка, ножки и корпус транзистора являются разными деталями. В этой задаче допускается создать транзистор как деталь, состоящую из нескольких твердых тел. Для этого при вытягивании примитивов уберите галочку с параметра «Объединить результаты» (рис. 12, б). В дереве проекта должно быть указано, что в модель включено 5 твёрдых тел (рис. 12, в). Здесь для наглядности тела были переименованы вручную.

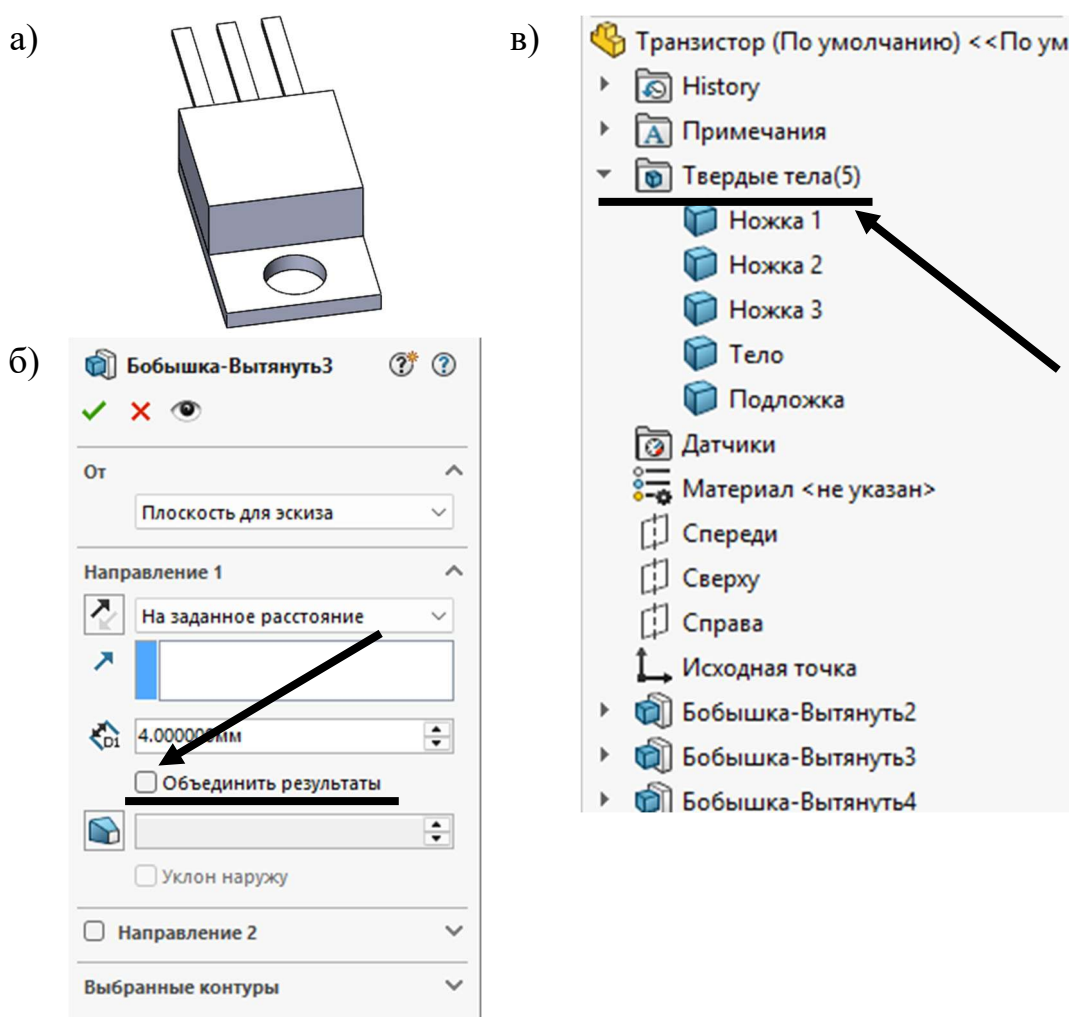


Рисунок 12 – Многотельное моделирование на уровне детали.

Не забывайте регулярно сохранять выполненную работу.

2.4. ОБЪЕДИНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ В СБОРКУ

Создайте новый файл, но при выборе его типа кликните по «Сборке». Если до этого в программе не была открыта ни одна деталь, то откроется

окно «Открыть», предлагающее добавить первую деталь в сборку. По ранее указанной логике (начинать с основ) выберите радиатор.

В окне рабочего пространства за курсором будет следовать модель радиатора. Если вы кликните в любой точке, то он добавься и зафиксируется. Однако оставлять его в произвольной точке неверно (сейчас просто некрасиво, а в следующих задачах будет вызывать неудобства), поэтому наведите курсор на начало координат сборки (если всё сделано правильно, то радиатор как намагниченный сдвинется так, что его начало координат совместится с началом координат сборки) и кликните мышкой.

Следующим шагом нужно добавить транзистор. Откройте вкладку «Сборка» и выберите инструмент «Вставить компоненты». Добавьте транзистор и вставьте в произвольную точку (рис. 13) (так нельзя делать только для первой детали в сборке, последующие не фиксируются автоматически).

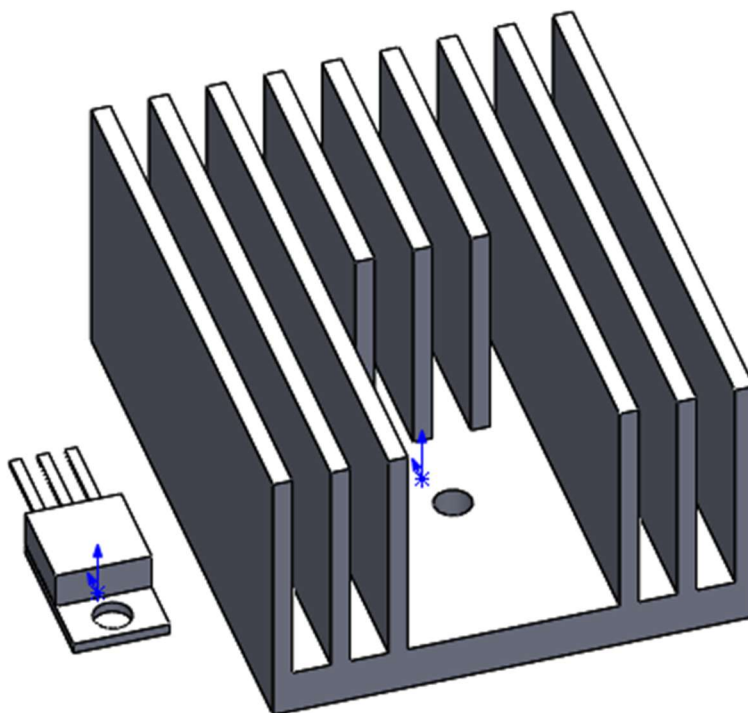


Рисунок 13 – Сборка радиатора и транзистора без привязок

Текущее состояние деталей отображается в дереве проекта. Префиксы перед деталями означают их геометрическую свободу (рис. 14):

(-) – деталь не закреплена,

(ф) – деталь закреплена по координатам (авто-фиксация).

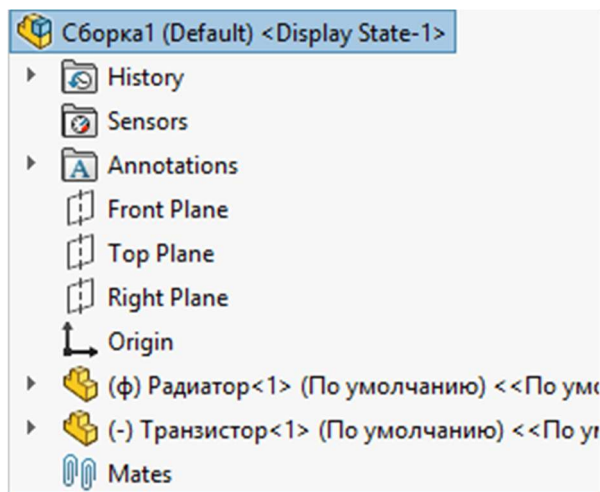


Рисунок 14 – Пример дерева проекта с двумя деталями.

Отсутствие префикса означает, что деталь закреплена по привязкам. Необходимо, чтобы около всех деталей не было префикса (наличие префикса (ф) около основной детали сборки допустимо, если она привязана к началу координат).

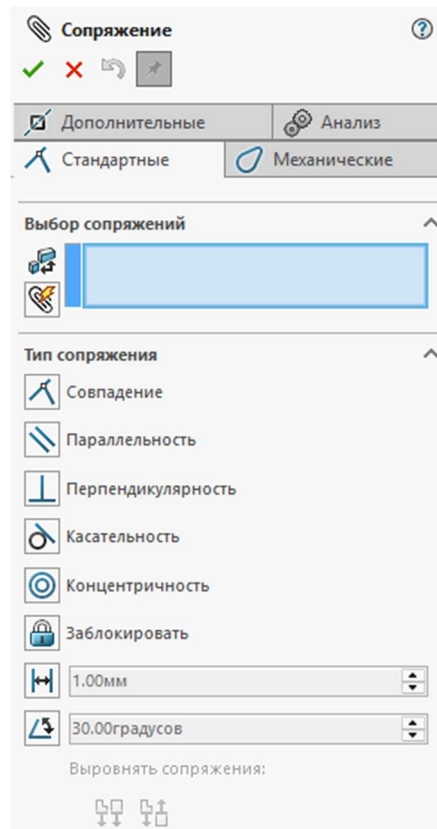
Для точного определения положения транзистора во вкладке «Сборка» выберите инструмент «Условия сопряжения». Здесь вам предстоит выбирать пары объектов и назначать им сопряжения до тех пор, пока все детали не будут закреплены (рис. 15, а).

Первым делом выберите (в любом порядке) грань основания радиатора и грань подложки транзистора, которые должны совпадать. Автоматически устанавливается сопряжение «Совпадение», а транзистор перетаскивается для соблюдения установленного условия. Примените предложенное сопряжение. Следующим шагом выберите и подтвердите отверстия транзистора и радиатора для условия «Концентричность».

Если вы сомневаетесь, является ли ваша сборка законченной, то можете выйти из режима сопряжений и попробовать сдвинуть транзистор. Видно, что он свободно вращается на поверхности радиатора (в том числе интерферирует с его ребрами).

Необходимо закрепить боковую поверхность транзистора с любым ребром радиатора. Так как в текущих условиях их нельзя совместить «Совпадением», то автоматически выбирается условие ниже по дереву - «Параллельность». Если транзистор развернулся в неправильную сторону, то обратите нормали, переключив кнопку ниже надписи «Выровнять сопряжение». Итоговый результат должен соответствовать рисунку выше (рис. 15, б).

а)



б)

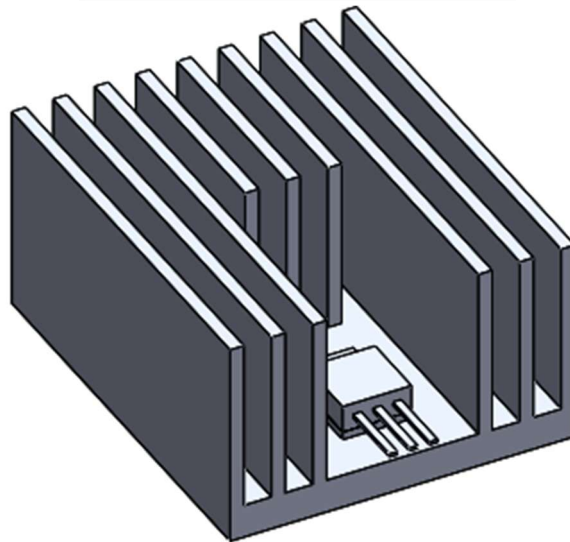


Рисунок 15 - Вид окна сопряжений и готовой сборки.

Сборка готова. Сохраните её для перехода к тепловому анализу (обязательное требование программы Flow Simulation).

3. ПРИНЦИПЫ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОГО РАСЧЕТА В САЕ-СИСТЕМЕ

3.1. ОБЩИЕ НАСТРОЙКИ

После полной сборки всех деталей переходите на вкладку Flow Simulation на панели инструментов и нажмите кнопку «Мастер проекта» (рис. 16).

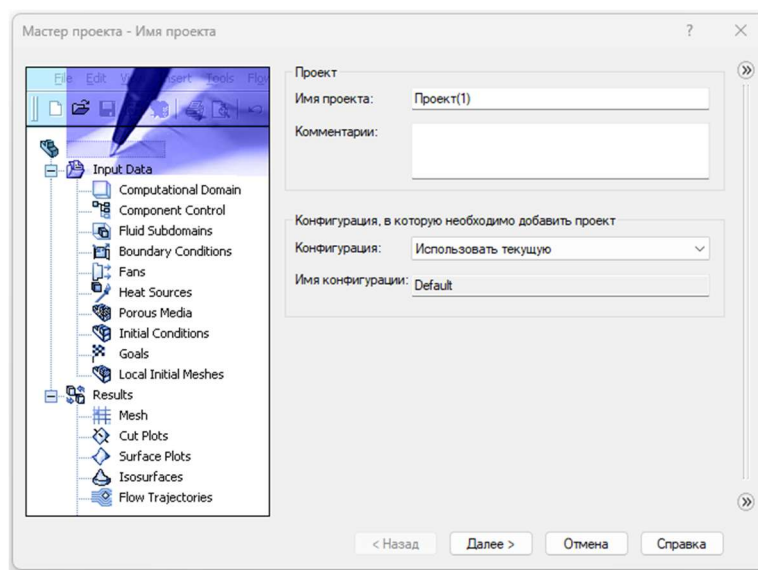


Рисунок 16 – меню «Мастера проекта».

Несмотря на то, что рядом с упомянутой кнопкой так-же есть «Новый проект», создавать его следует именно через Мастер, так как тот предлагает более удобный интерфейс. Первым делом программа предлагает вам ввести название нового расчета. На результаты это не влияет, поэтому для единственного расчета можете оставить значения по умолчанию и нажать «Далее».

На следующем этапе вам необходимо выбрать единицы измерений в расчете. Удобство SolidWorks Flow Simulation, помимо прочего, заключается в том, что при расчетах используется СИ, однако при выводе программой и вводе данных пользователем все единицы измерений конвертируются, что делает работу удобной и легко презентуемой в формате отчета. Здесь вам необходимо поменять систему единиц измерений на СИ (SI) и заменить вывод температуры с кельвинов на градусы Цельсия (рис. 17).

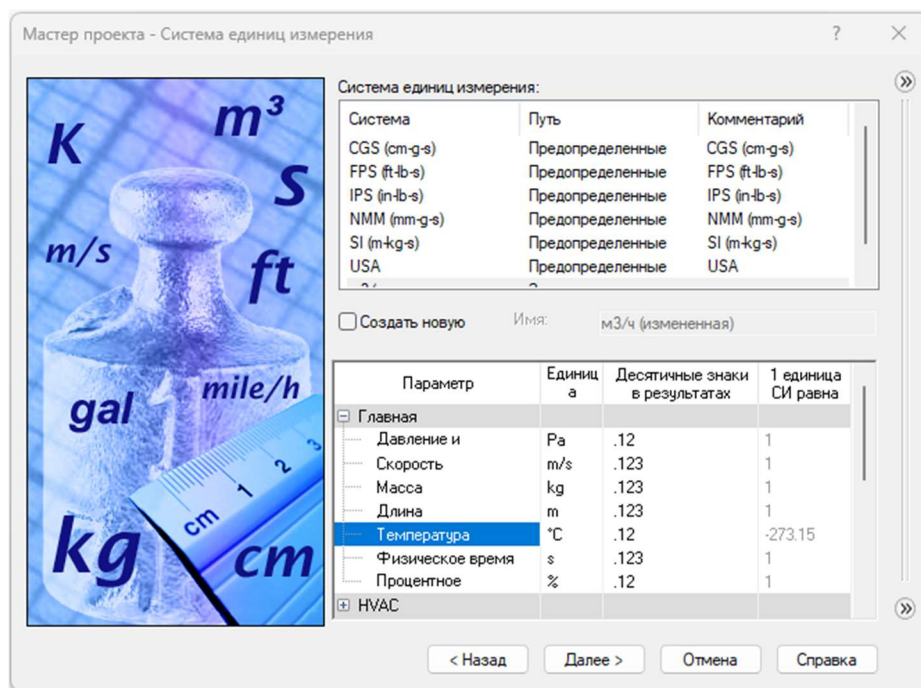


Рисунок 17 – Выбор системы единиц измерений.

Далее программа предлагает вам выбрать используемые физические модели. От вас, как от опытного инженера, требуется выбрать только те модели, которые оказывают влияние на итоговое решение, так как выбор лишних замедлит будущий расчет. В данной задаче выбор моделей аргументируется следующим образом:

- Течение жидкости/газа – **включено** – данный параметр включает отслеживание потоков, температур и теплообмена жидкостей и газа. Очевидно, в конвективном теплообмене эта опция необходима.
- Теплопроводность – **включено** – данный параметр включает отслеживание температур и теплопереноса внутри твердых тел. Наличие радиатора и необходимость расчета температуры транзистора требуют включить эту модель.
- Радиационный теплообмен – **выключено** – данный параметр включает учет лучистого теплообмена. В задаче не предполагаются высокие температуры, а большая часть поверхностей имеет очень низкий коэффициент абсолютно черного тела, поэтому в угоду скорости расчета этой моделью можно пренебречь.
- Нестационарность – **выключено** – расчет предполагается стационарным, динамика температурной картины по времени не рассматривается.
- Гравитация – **включено** – при включенной гравитации учитывается, что газ или жидкость будут двигаться из-за разниц температур и, соответственно, плотности. Без этой включенной опции естественный массообмен нагретого воздуха не будет симулироваться. Обратите

внимание, что вектор гравитации, отображающийся здесь, направлен неправильно. Для его исправления необходимо перенести значение $-9,81$ с компоненты Z на Y .

- Вращение – **выключено** – эта модель позволяет симулировать вращающиеся элементы, такие как ротор помпы, мешалки и т.д.
- Свободная поверхность – **выключено** – эта модель позволяет симулировать границы раздела двух несмешивающихся сред (газ/жидкость или пара нерастворимых друг в друге жидкостей).

Ниже так-же расположен блок, отвечающий за распознавание геометрии. Тип задачи оставляем по умолчанию «Внешний», это означает, что модель висит в воздухе и не ограничена каким-то корпусом. Далее идут два пункта исключения областей из расчета. Не забывайте их снимать. Пользы они почти никогда не приносят, но зато в некоторых задачах приводят к ошибкам расчета.

Итоговое состояние меню изображено ниже (рис. 18).

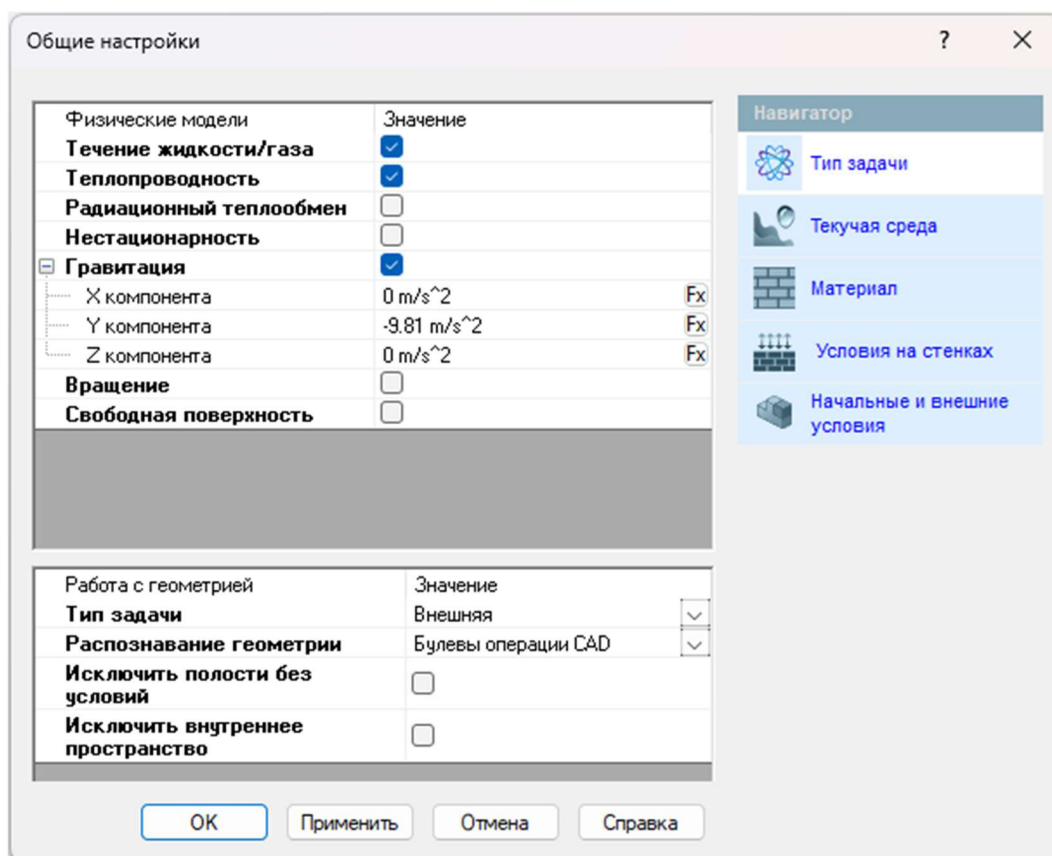


Рисунок 18 – Настройки физических моделей.

В следующем меню вам нужно выбрать текущую среду по умолчанию. Выбирайте «Газы» – «Air».

Далее выберите материал по умолчанию для твердых тел. «Предопределенные» – «Alloys» – «Aluminum 5052».

В приведенных задачах используются материалы по умолчанию, соответствующие некоторым справочным материалам разработчиков или американскому аналогу ГОСТа. Программа позволяет добавлять свои вещества с другими свойствами.

В меню «Условие на стенках по умолчанию» из-за особенностей выбранных моделей нет других параметров, кроме «Шероховатости». Шероховатость влияет на расчет в основном только при сверхзвуковых течениях в узких каналах, поэтому можете оставить значение по умолчанию.

На завершающем этапе настройки расчета от вас требуется ввести начальные и граничные условия. В данной задаче нужно лишь поменять температуру окружающей среды – замените значение по умолчанию на 30°C (рис. 19).

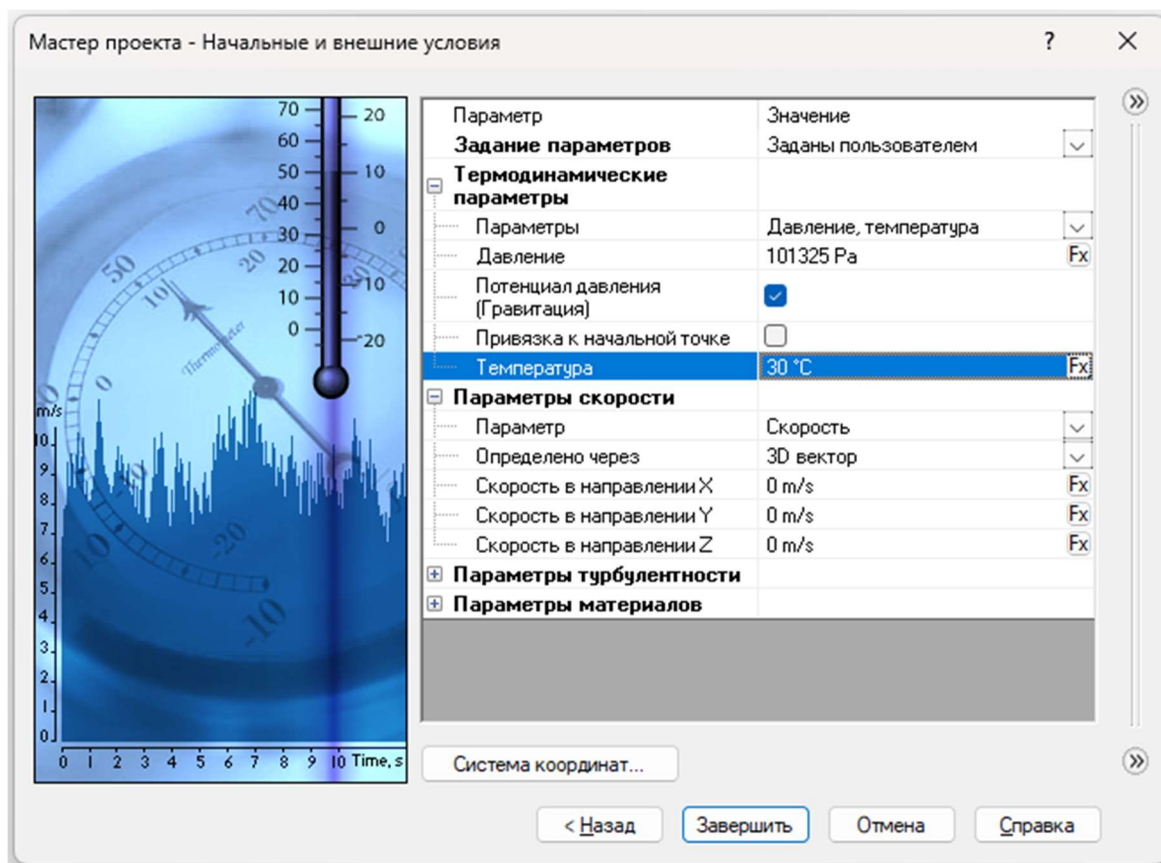


Рисунок 19 – Настройка начальных и граничных условий.

3.2. РАСЧЕТНЫЕ ОБЛАСТЬ И СЕТКА

Сразу после завершения начальной настройки проекта программа на геометрической модели отрисует расчетную область. Во внешних задачах она берется с большим запасом, который необходимо уменьшить. Слева выберите пункт «Расчетная область» для получения доступа к ползункам ограничителей расчетной области. Уменьшите границы так, чтобы с **каждой** стороны отступ был равен половине размера сборки (рис. 20). Исключение – верхняя граница, для которой расстояние должно быть несколько больше.

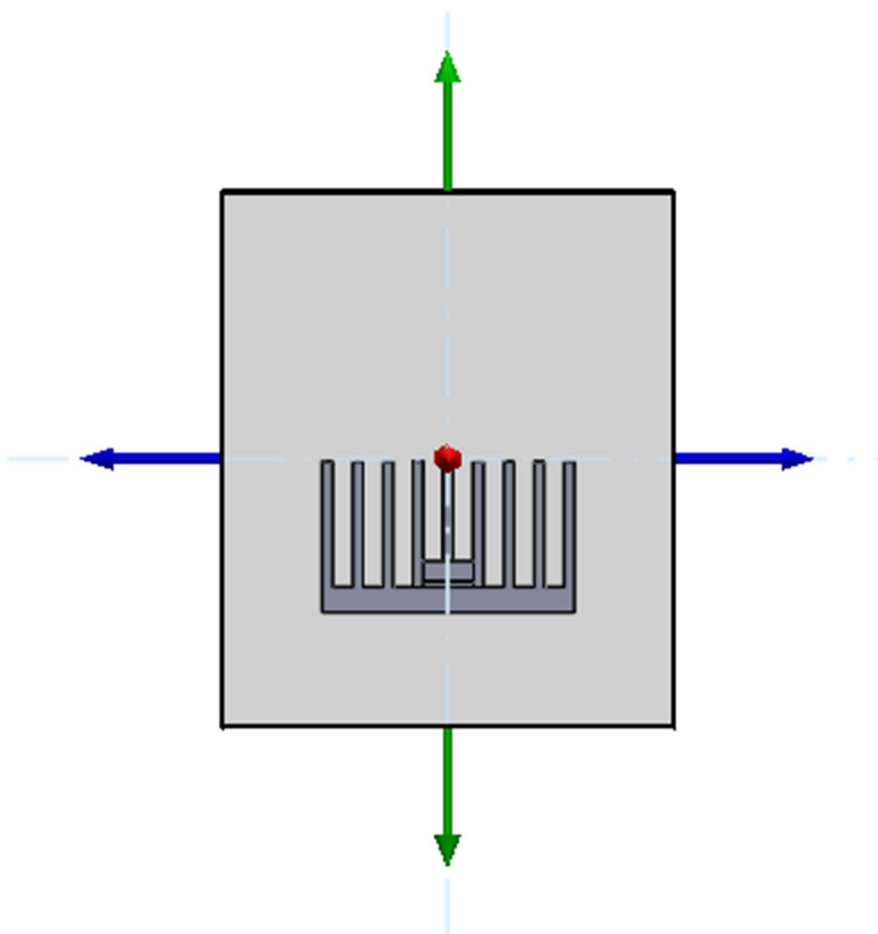


Рисунок 20 – Границы расчетной области, вид спереди.

Для удобства скройте отображение расчетной области: «Расчетная область» правой кнопкой мыши – «Скрыть».

Следующим шагом является создание расчетной сетки. Создайте её, нажав сверху на панели инструментов «Запустить», в появившемся меню уберите галочку с «Расчет» и нажмите кнопку «Запустить» в самом окне (рис. 21).

Затем нажмите галочку для подтверждения. Выбор поверхности для сечения здесь был выбран по следующему принципу: в сечение должно попадать как можно больше мелких элементов. Получен неудовлетворительный результат – если пространство между ребер радиатора ещё достаточно детализировано, то ножки транзистора вообще не удалось учесть на сетке (рис. 23, б).

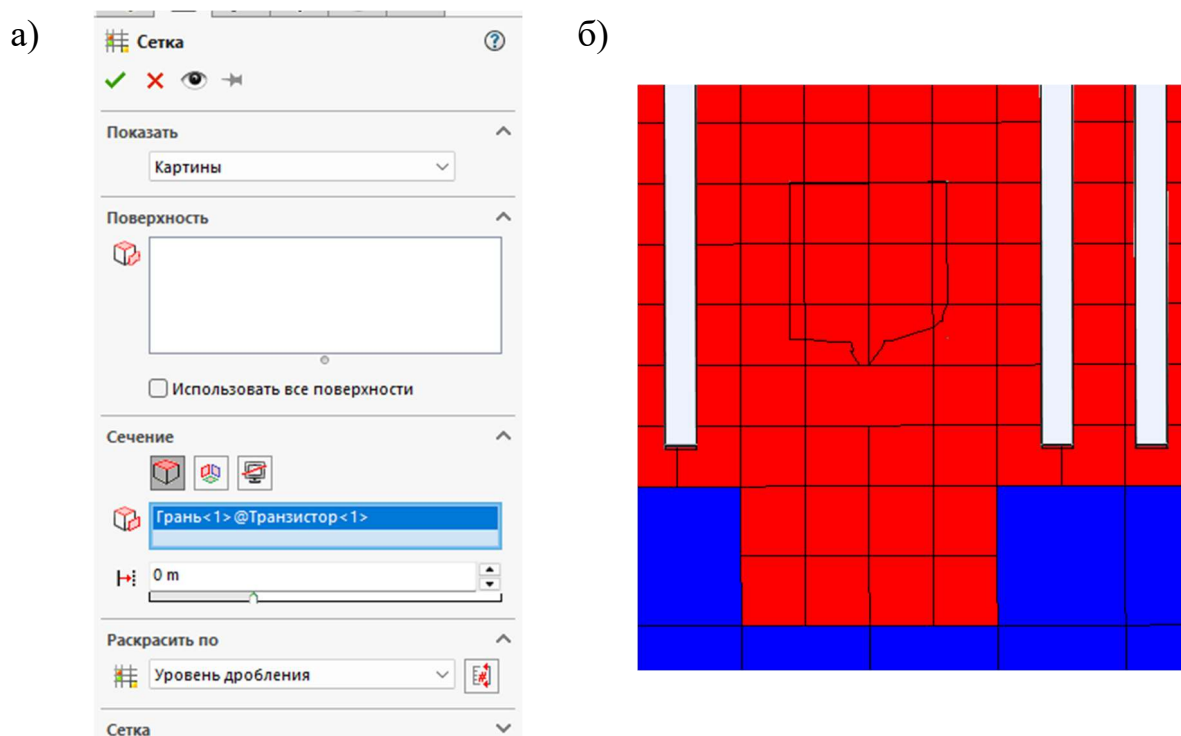


Рисунок 23 – Определение и результат сечения сетки.

Для исправления этого можно включить режим учета тонких каналов при автоматическом создании сетки. Для этого нажмите правой кнопкой мыши по пункту «Глобальная сетка» – «Изменить», в появившихся настройках сетки выберите «Ручной режим» и поменяйте настройки пункта «Каналы» на 1 для первого поля и 4 для ползунка (рис. 24). Теперь SolidWorks будет отслеживать, что в каждом канале есть хотя бы 1 целая ячейка, и для достижения этой цели он каждую ячейку может поделить вплоть до 2^4 раз.

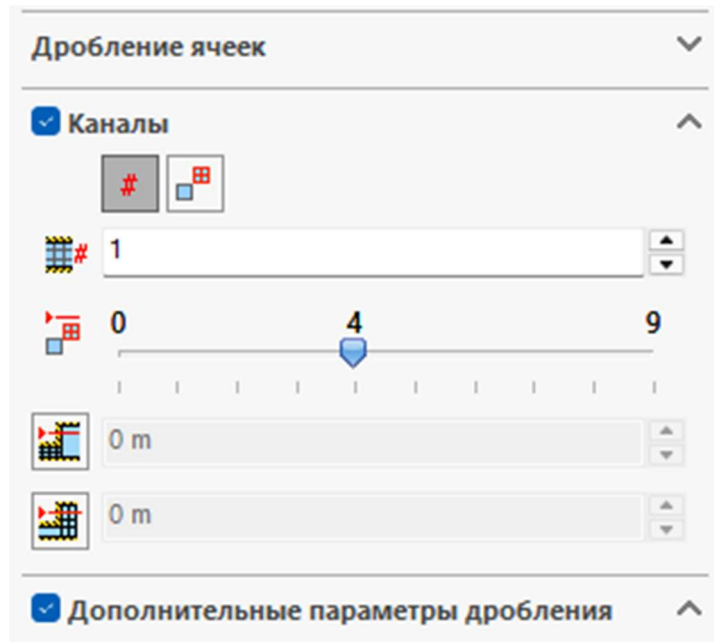


Рисунок 24 – Расширенная настройка сетки.

Заново создадим расчетную сетку, как на (рис. 21). Убедитесь, что галочка у «Сетки» стоит, а у «Расчета» нет. Заново отобразим сечение. Для этого кликайте правой кнопкой мыши **по ранее созданному** сечению и нажмите «Показать». Теперь сетка имеет удовлетворительное состояние (рис. 25), а количество ячеек возросло в несколько раз.

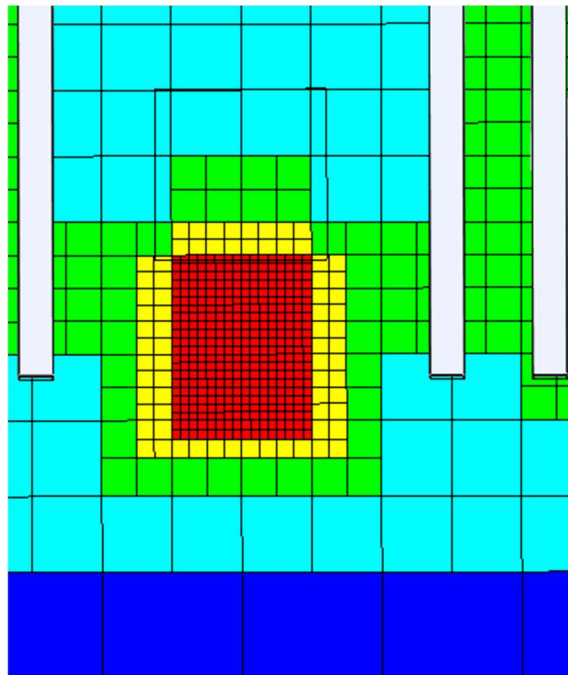


Рисунок 25 – Сечение итоговой расчетной сетки.

3.3. ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ И ТЕПЛОВЫЕ НАГРУЗКИ

Расчетная сетка является лишь необходимым основанием расчета, в то время как граничные условия и тепловые нагрузки определяют саму суть рассматриваемого процесса.

Первым делом определим используемые материалы. Добавьте новый элемент «Материал», в появившемся окне выберите материал медь (Copper). Далее вам нужно выбрать тело, к которому применяется этот материал. Выберите подложку транзистора и его ножки в графическом окне и проследите, что выбор был верный. Это произойдет, если они выполнены у вас отдельной деталью в составе сборки «Транзистор». Если нет, то их можно выбрать как отдельные тела в дереве модели, название которых соответствуют последней операции, которая его редактировала (рис. 2, б).

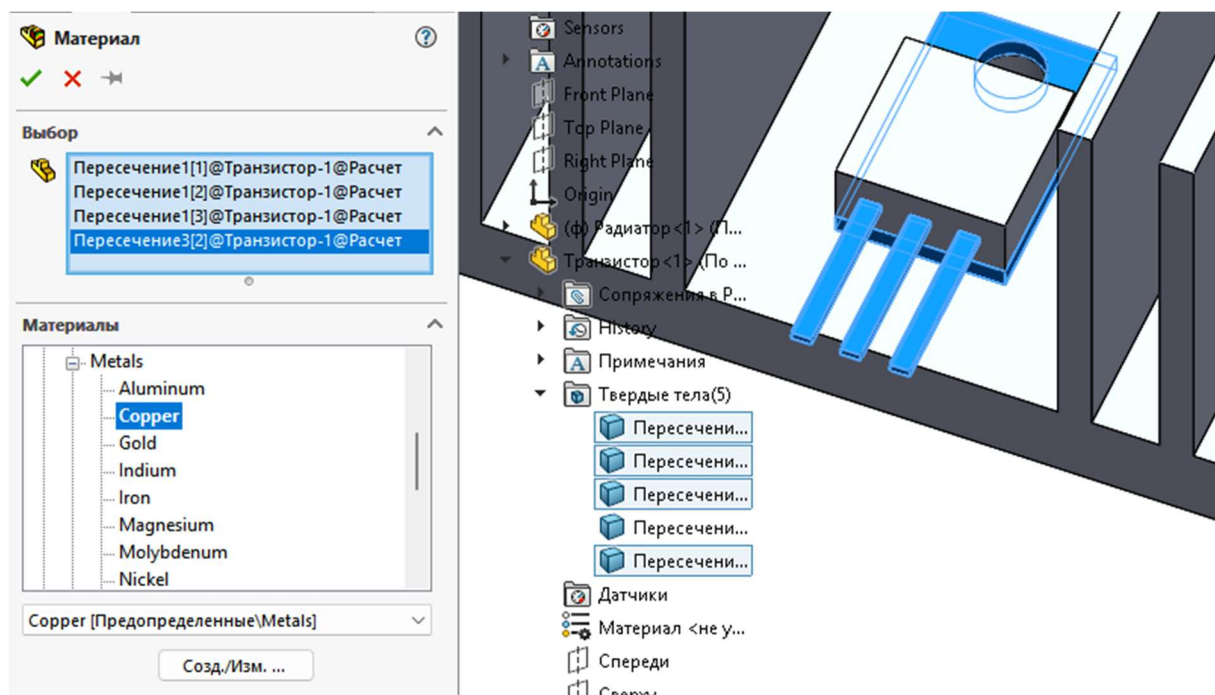


Рисунок 26 – Выбор материала для тела.

По такому же принципу определите материал тела транзистора. Зачастую он делается из эпоксидного компаунда, задайте FR4 (раздел Laminates).

Следующим шагом будет определение тепловых нагрузок. Их можно найти на панели инструментов «Условия» – «Объемный тепловой источник». В окне инструмента выберите подложку транзистора и задайте тепловую мощность 2 Вт (рис. 27). В условиях, когда транзистор

моделируется без детализации кристалла и ведущих к нему дорожек, такой путь будет наиболее оптимальным и точным с точки зрения физической адекватности.

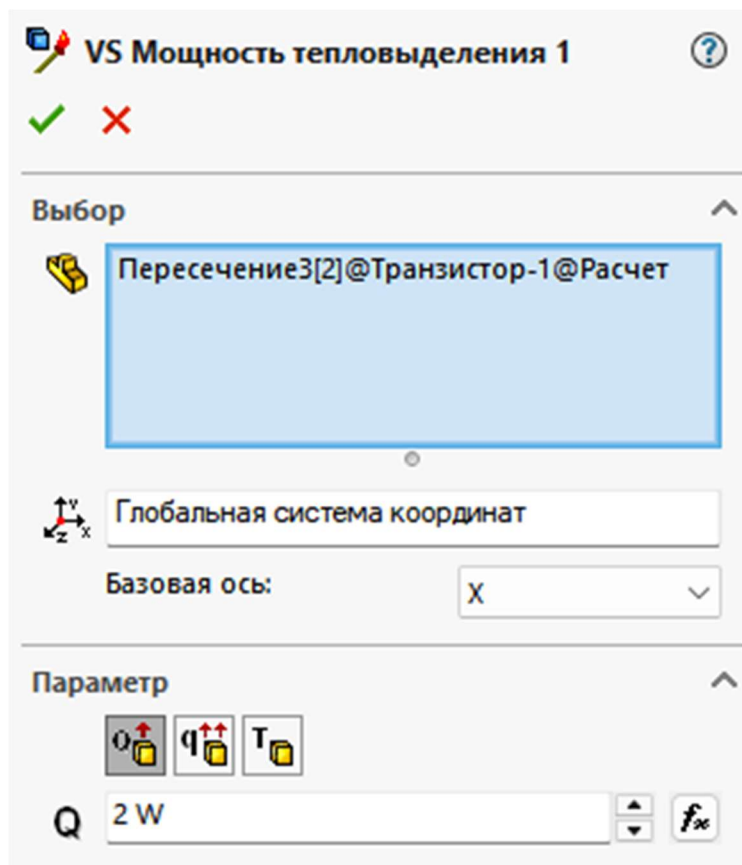


Рисунок 27 – Инструмент «Объемный тепловой источник».

Граничные условия и нагрузки заданы, можно запускать полноценное решение задачи.

3.4. ВЫВОД РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

Если расчет завершился успешно, то в дереве проекта около результатов будет подписано «(*.fld)». Это означает, что в данный момент все результаты хранятся в памяти и загружены для анализа.

Сам же постпроцессор пополнился большим списком возможных типов анализа. Для поставленной задачи наиболее информативным будет «Картина на поверхности».

В окне этого инструмента вместо выбора граней для раскраски отметьте галочку «Использовать все поверхности». Измените вывод результата на «Температура (твердое тело)». Увеличьте количество уровней

для раскраски до 30 для большей наглядности градиента температур. После применения инструмента все поверхности сборки будут окрашены в зависимости от их температуры, а рядом возникнет настраиваемая легенда. Для изображения численного ответа кликните по элементу «Картина на поверхности» и включите отображение максимума (рис. 28). Здесь и далее все цветные картины отображены в черно-белом исполнении.

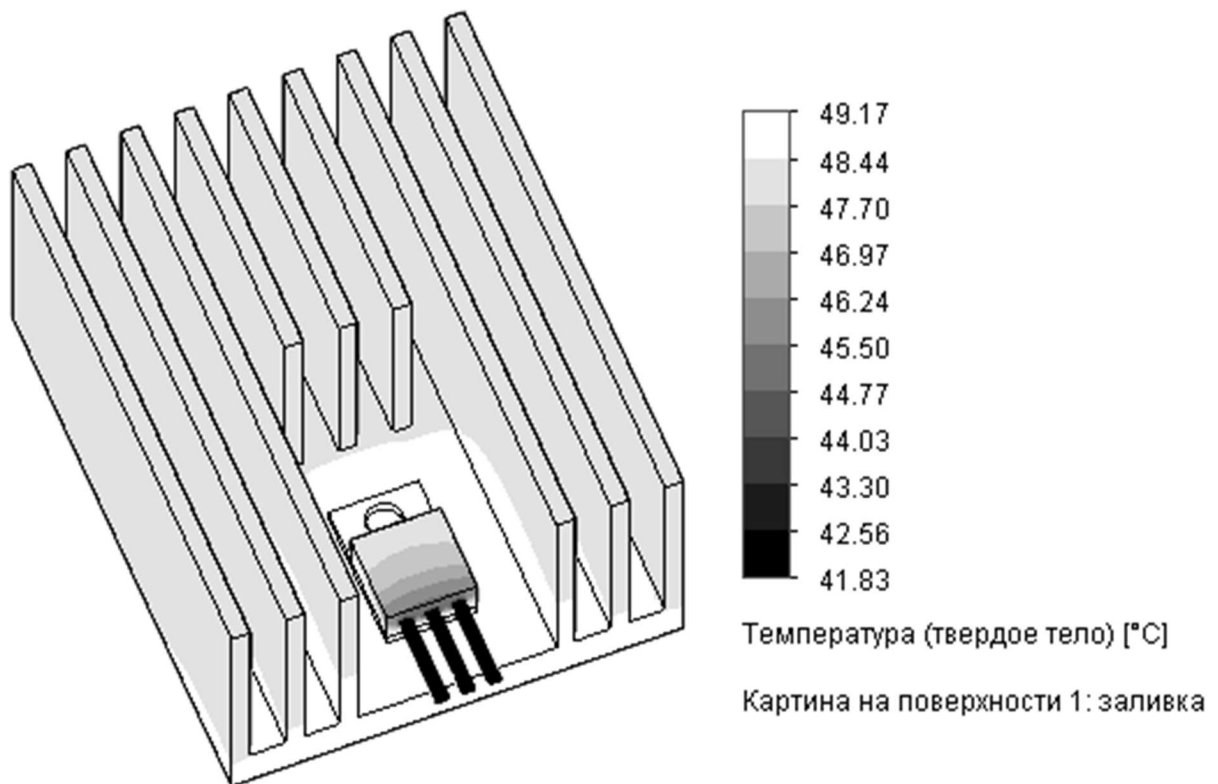


Рисунок 28 – Полученные результаты расчета

Такого изображения достаточно для различного рода отчетов. Результат, получающийся у студентов, может несколько отличаться в худшую сторону, так как здесь дополнительно проведены действия по обеспечению большей информативности и лучшего восприятия картинки. В частности, убраны тени, начало координат, метки систем координат деталей, включен сплошной белый фон, модель выровнена по полу сцены и так далее.

Кроме того, в SolidWorks есть возможность изменить настройки легенды, добавить измерения в точках, вывести анализ теплового баланса и множество других инструментов, позволяющих детальнее описать тепловую картину или верифицировать расчет.

4. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

Для заданий, включенных в курс, приведены примечания к расчету. Подразумевается, что студенты решают их по порядку и только после проверки преподавателем. Поэтому в примечаниях отмечены лишь отличия и новые шаги, которые до этого не встречались в предыдущих расчетах.

4.1. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ №1. ТРАНЗИСТОР НА РАДИАТОРЕ

Транзистор (корпус типа ТО-220) на радиаторе (рис. 29). Мощность тепловыделения транзистора – 2 Вт. Необходимо определить максимальную температуру транзистора и сделать вывод о достаточности пассивного охлаждения.

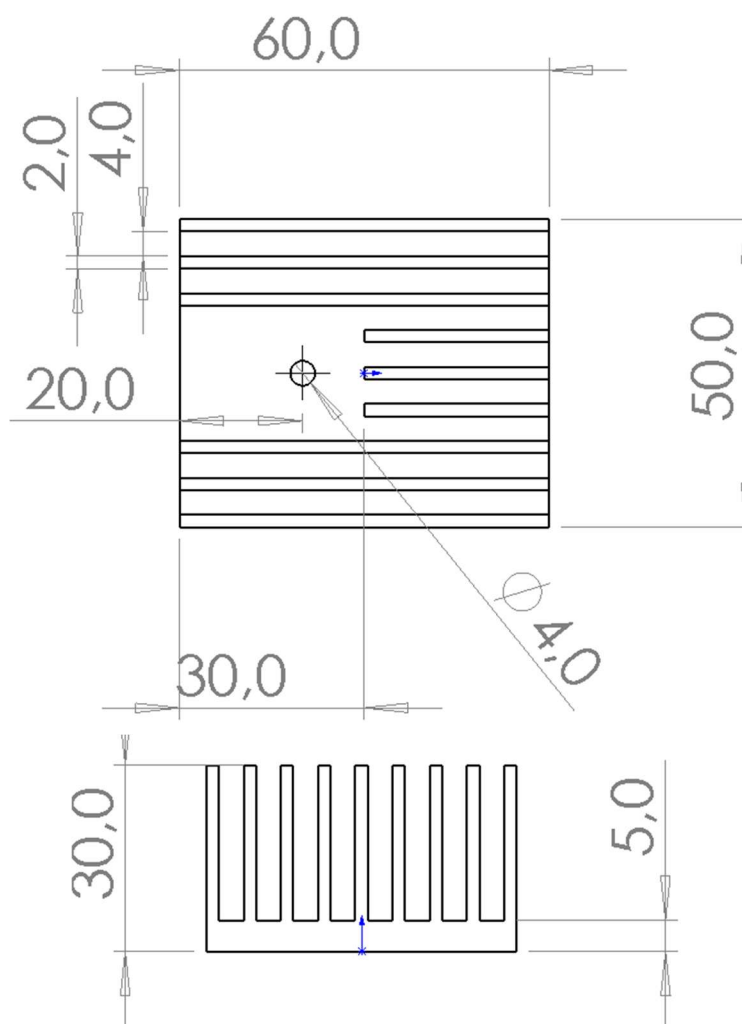


Рисунок 29 – чертеж радиатора.

Примечаниями для этого задания являются целиком разделы 2 и 3.

4.2. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ №2. КОРПУС С АППАРАТУРОЙ

Приборный ящик состоит из корпуса (рис. 30), платы (рис. 31) и двух вентиляторов. Толщина корпуса – 2 мм. Ножки имеют шестиугольное сечение, ширина – 4 мм. Тепловыделяющие элементы расположены на стеклотекстолите, суммарная мощность прямоугольных элементов — 40 Вт, цилиндрических — 40 Вт. Охлаждение осуществляется двумя вентиляторами 0,9ЭВ-0,7-1-4225. Необходимо определить максимальную температуру тепловыделяющих элементов отдельно для каждого их типа.

Материалы, используемые в расчете:

- корпус и вентиляторы – Нейлон;
- ножки платы, тепловыделяющие элементы – сталь 20, поверхности окрашены эмалью;
- текстолит платы – FR4.

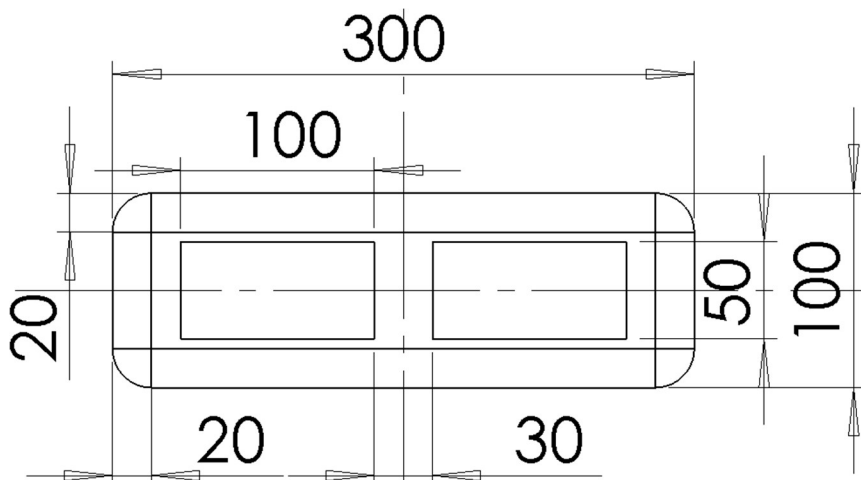
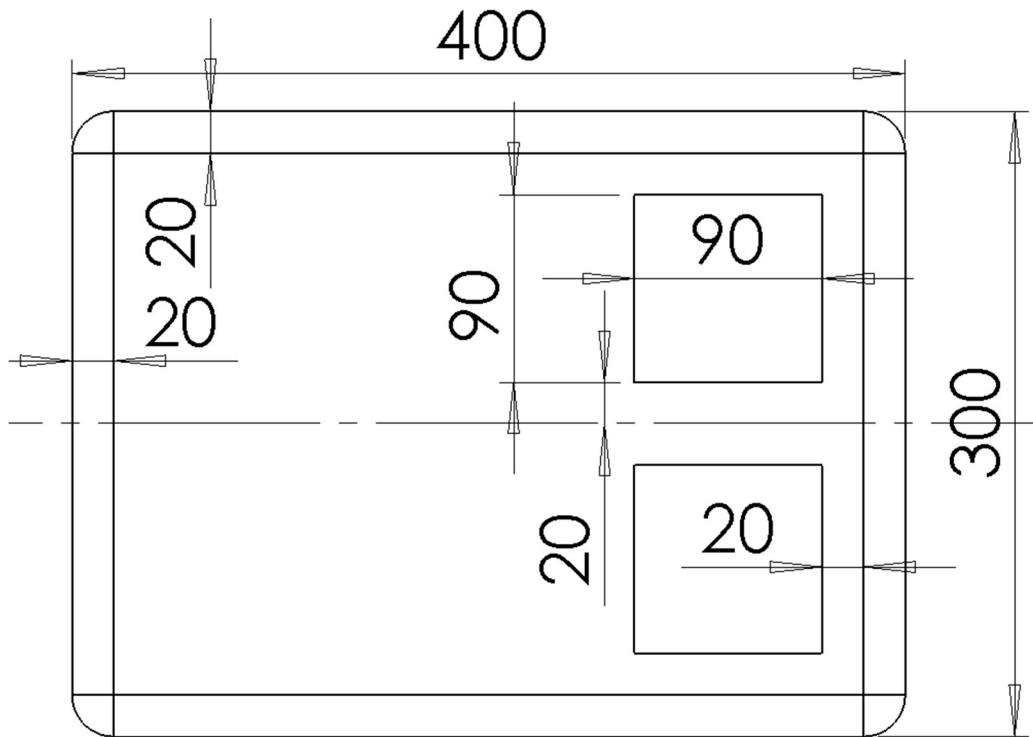
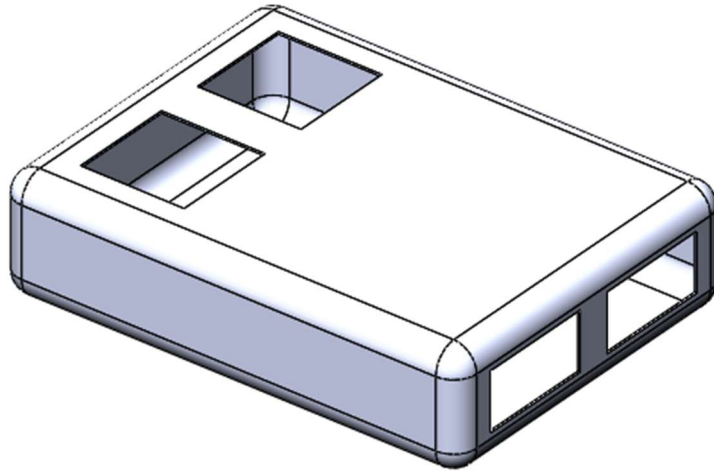


Рисунок 30 – Чертеж и общий вид корпуса.

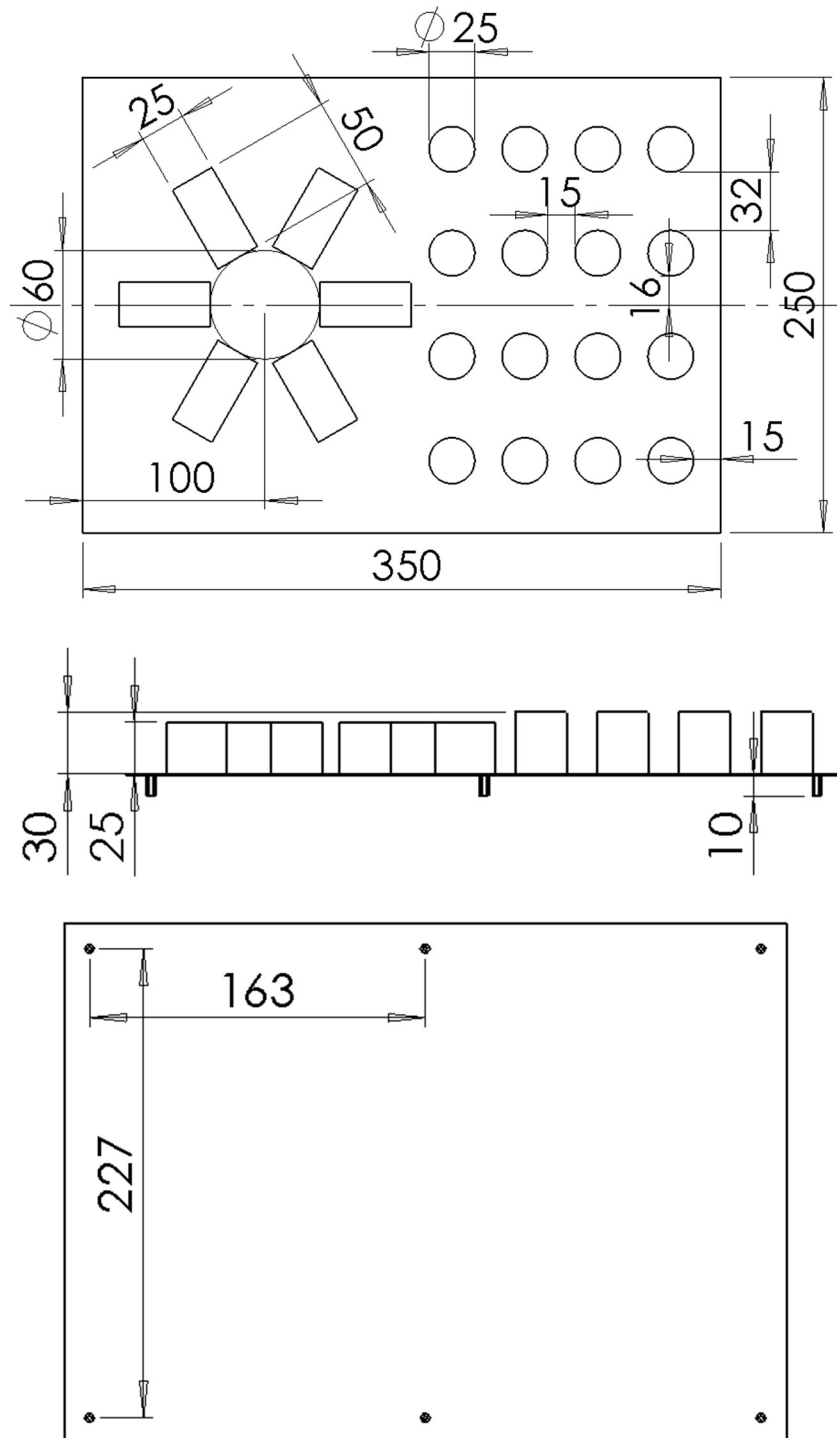
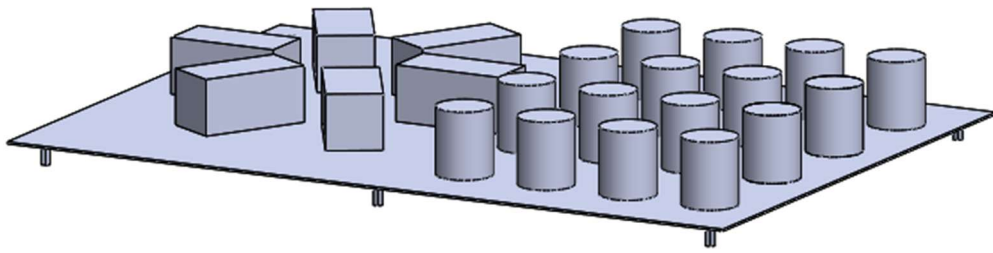


Рисунок 31 – Чертеж и общий вид платы, включая ножки, текстолит и тепловыделяющие элементы.

Примечания к заданию №2

4.2.1. Создание корпуса

Для создания корпуса целесообразно сначала создать его внешнюю оболочку, как если бы у него не было отверстий и он представлял собой монолит. Для этого создайте параллелепипед (здесь и далее размер подбирайте сами, исходя из чертежей), затем примените инструмент «Скругление» к каждому ребру (рис. 32).

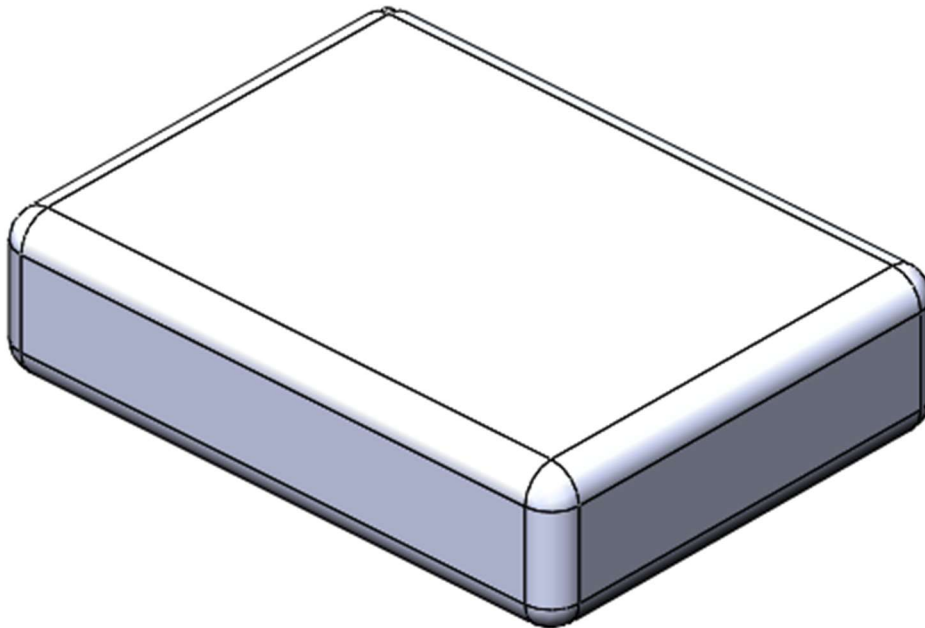


Рисунок 32 – Макет корпуса.

После этого используйте инструмент «Оболочка». В ней необходимо задать толщину корпуса (2 мм) и убедиться, что опция «Оболочка наружу» выключена, так как были построены внешние границы корпуса, а не внутренние.

Осталось сделать вырезы под вентиляцию, с чем у студентов не должно возникнуть проблем.

4.2.2. Сопряжение типа «Расстояние»

При компоновке деталей в сборку, в отличие от предыдущей задачи, зацепить ножки платы и тепловыделяющие элементы к другим геометрическим объектам напрямую не получится. В этом случае (для прямоугольных элементов) необходимо выбрать, например, грани

текстолита и элемента, затем исправить автоматическую привязку с «Сопряжения» на «Расстояние», указав в опциях значение по чертежу (рис. 33).

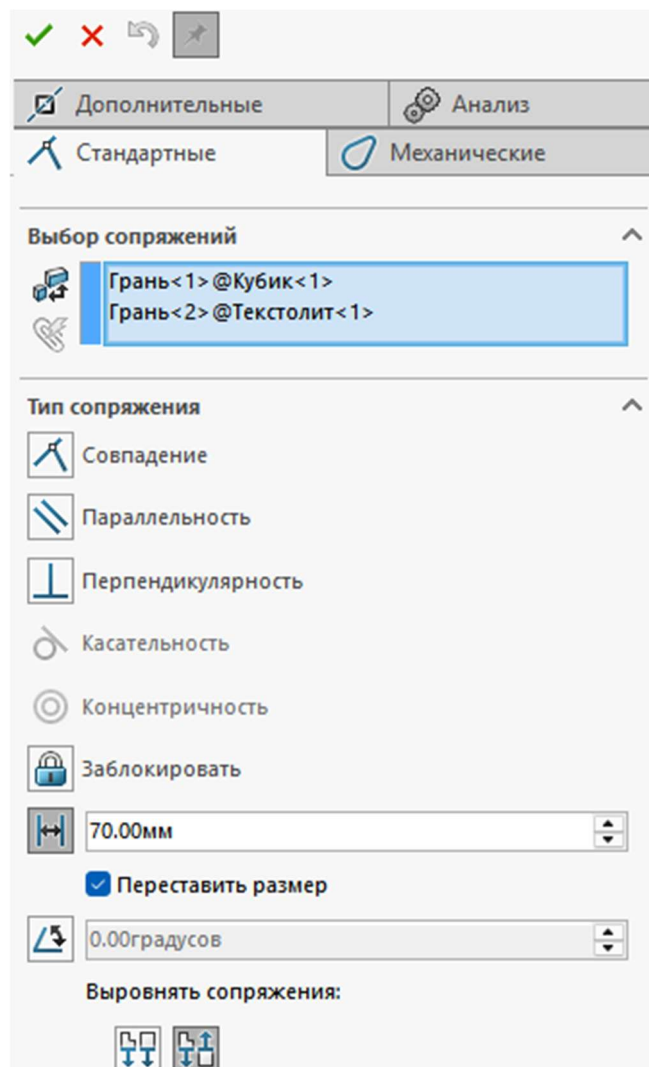


Рисунок 33 – Сопряжение типа «Расстояние» для прямоугольных элементов.

Такое закрепление касается лишь первого элемента. Остальные копируются через круговой массив.

Для создания кругового массива необходимо указать ось вращения, которой в модели ещё нет. Ось можно определить через две плоскости. Первая уже готова – одна из базисных. Вторую надо создать. В разделе «Сборка» нажмите «Справочная геометрия» – «Плоскость», выделите боковую поверхность текстолита. Автоматически отрисовывается плоскость с отступом 10 мм. Включите смещение перестановки и увеличьте размер до

100 мм. Создайте плоскость. Затем выберите новую справочную геометрию, на этот раз «Ось». Отметьте две плоскости. Должна получиться ось, являющаяся центром круга, на котором лежат прямоугольные элементы. Самостоятельно создайте корректный круговой массив.

Для цилиндрических элементов так же выбирается пара цилиндрическая грань – край текстолита, задается численное значение и дополнительно указывается ориентир для расстояния (по чертежу удобнее использовать «От центра к центру») (рис. 34). Для ножек принцип тот же, но в качестве цилиндрической грани используется внутренняя грань отверстия. Также имейте в виду, что привязку можно сделать к базисным плоскостям.

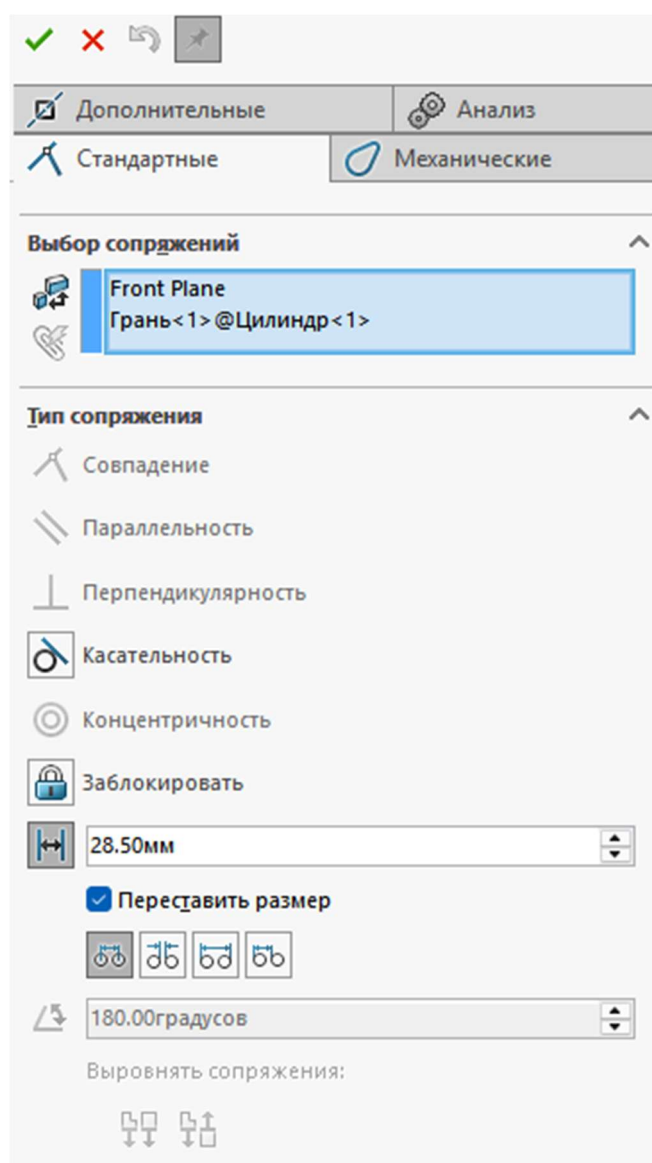


Рисунок 34 – Сопряжение типа «Расстояние» для цилиндрических элементов.

4.2.3. Сечение модели

При сборке модели, особенно при размещении компонентов внутри корпуса или другого замкнутого объема, видимость зон посадки для создания геометрических зависимостей может быть нарушена. Чтобы облегчить процесс позиционирования и выравнивания таких деталей, можно использовать инструмент «Сечение», находящийся в верхней части графического окна. При этом программа дает вращать плоскость сечения и перемещать её перед применением. Продвинутое настройки позволяют использовать несколько плоскостей сечения, а также создавать полупрозрачное и выборочное сечение.

4.2.4. Особенности физической модели

Приведенная задача концептуально отличается от предыдущей, из-за чего при создании расчетного проекта его настройки несколько меняются. Во-первых, тип задачи – внешняя. В процессе расчета инженера не интересует, что происходит снаружи корпуса, откуда берется воздух и куда он выбрасывается. В таком случае рационально будет отключить моделирование газодинамики снаружи. Во-вторых, детали сборки либо выполнены из неотражающего материала, либо окрашены. Из-за этого радиация начинает играть большую роль в теплообмене. Включите опцию «Радиационный теплообмен», измените модель излучения на «Дискретные ординаты» (больше подходит для больших не очень горячих объектов) и задайте корректную температуру окружающей среды.

Из-за таких изменений вкладка «Условия на стенках» дополнится новыми опциями. Включение внутренней задачи требует уточнения теплового условия на внешней стенке. По умолчанию стоит «Адиабатическая стенка», поменяйте на «Коэффициент теплоотдачи», задайте коэффициент равным $3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ и установите корректную температуру. Два следующих пункта касаются радиационных свойств поверхностей по умолчанию. Нажмите иконку «...», чтобы открыть Инженерную базу данных. Откройте в дереве пункт «Заданы пользователем» и создайте новую поверхность. Определите имя и в два коэффициента впишите число 0,9, что соответствует коэффициенту абсолютно черного тела для пластика и эмали. Остальные параметры оставьте по умолчанию. Нажмите «ОК» и убедитесь, что в «Условиях на стенках» параметры установились корректно.

После создания расчетного проекта программа может сказать, что не удалось определить объем проточной области. Эта ошибка, а также путь её исправления рассмотрены в дальнейшем (п. 4.2.7). Пока что закройте объявление об ошибке.

4.2.5. Симметрия

Так как модель идеально делится пополам плоскостью симметрии так, что ни тепловые, ни аэродинамические потоки не пересекают эту плоскость, то рационально будет использовать инструмент симметрии при решении задачи. Для этого при редактировании расчетной области откройте её (двойной клик по элементу «Расчетная область» в препроцессоре) и сдвиньте одну из плоскостей в начало координат (или в середину модели, если она не отцентрована). Затем объявите сдвигаемую плоскость как условие симметрии. По предпросмотру в графическом окне убедитесь, что симметрия выбрана правильно – область симметрии будет выделена пунктирными линиями.

В дальнейшем все граничные и тепловые условия будут задаваться только на расчетную половину. Учтите, что в таком случае все тепловые нагрузки делятся пополам, так как определяются только на половине модели.

4.2.6. Модель вентилятора

При моделировании вентилятора в рамках САЕ-анализа существует множество принципиальных подходов. Наиболее физически точным является создание детализированной модели, включающей полный комплект вращающихся лопастей и центральный вал. Данный подход отличается значительными вычислительными затратами, проблемами с сеточной сходимостью на границах локальных вращающихся сеток, однако позволяет анализировать ещё не разработанные, проектируемые вентиляторы.

В качестве альтернативы в Flow Simulation можно использовать готовые экспериментальные данные о характеристиках вентилятора – кривую вентилятора, характеризующую соотношение объемного расхода к перепаду давления. В таком случае вместо полноценной модели используется упрощенная версия – примитивный объем, повторяющий внешние габариты вентилятора, с двумя вырезами под входное и выходное

отверстия (рис. 35). Габариты предлагается определить самостоятельно исходя из чертежей вентилятора на сайте производителя.

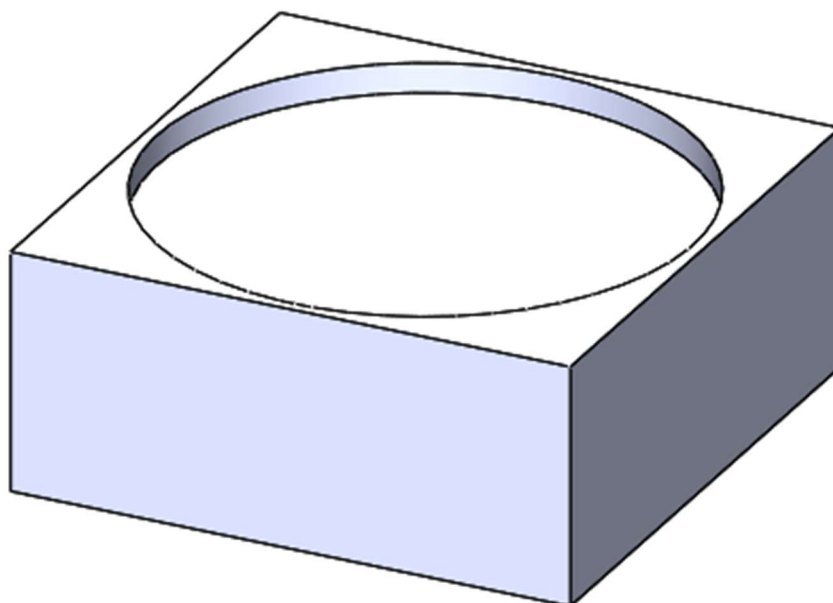


Рисунок 35 – Макет вентилятора для CAE-анализа.

В задаче необходимо добавить кривую вентилятора в Инженерную базу данных. Источником данных может являться каталог производителя. Чаще всего производителем приводятся две кривые – по статическому и полному давлению. Из-за особенностей моделирования воздушных потоков рекомендуется использовать кривую именно по полному давлению.

В Инженерной базе данных в дереве выберите «Вентиляторы» – «Заданные пользователем», в пустом поле создайте новый вентилятор. Введите имя, поменяйте тип вентилятора на «Кривую вентилятора», введите ваш «Способ определения давления...» и установите, что характеризуется объемный расход, а не массовый (рис. 36, а). Затем на следующей вкладке повторите кривую, полученную из каталога производителя (рис. 36, б), уделяя особое внимание перегибу на середине графика (если такой имеется). Обратите внимание, чтобы единицы измерения соответствовали тем, что оставил производитель (чаще всего это $\text{м}^3/\text{ч}$ и Па). Если это не так, то измените выбор системы измерений (для этого другая система измерений должна быть отдельно сохранена в Инженерной базе данных).

Добавьте условие вентилятора «Условия» – «Вентилятор». В данном случае, когда вентилятор берет поток снаружи во внутренней задаче и инженера не интересует, что происходит на входе вентилятора, необходимо выбрать тип «Входной внешний вентилятор». Определите выходную

поверхность вентилятора, затем его модель ниже. После принятия инструмент закрывается, а около вентилятора в графическом окне появятся стрелочки, указывающие направление потока.

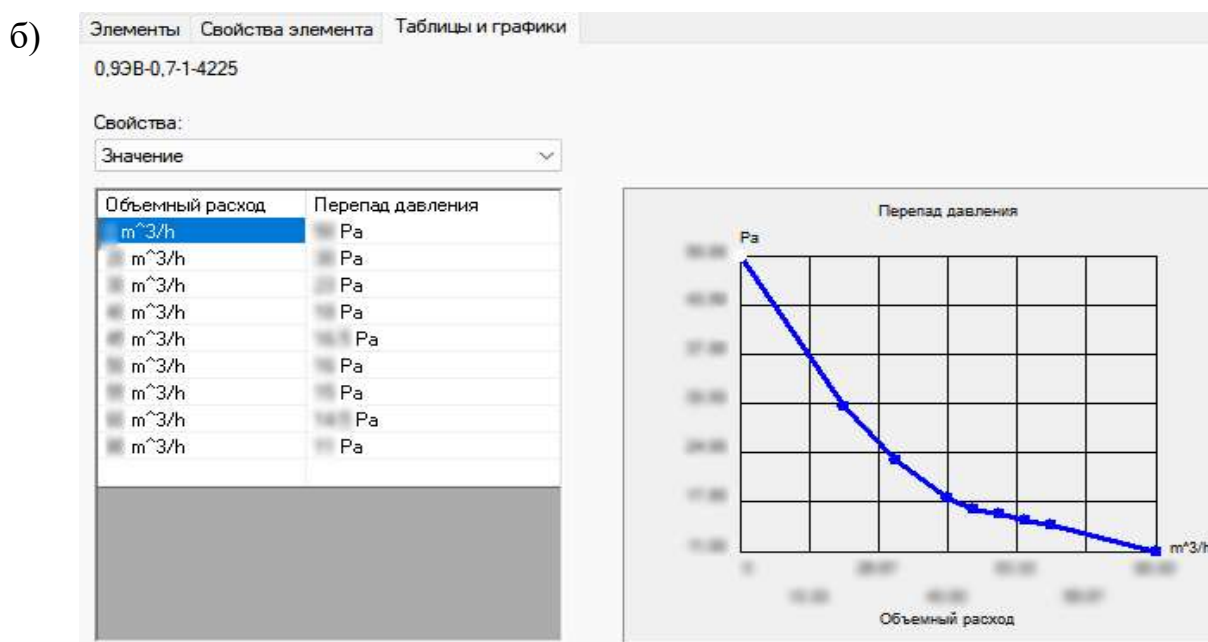
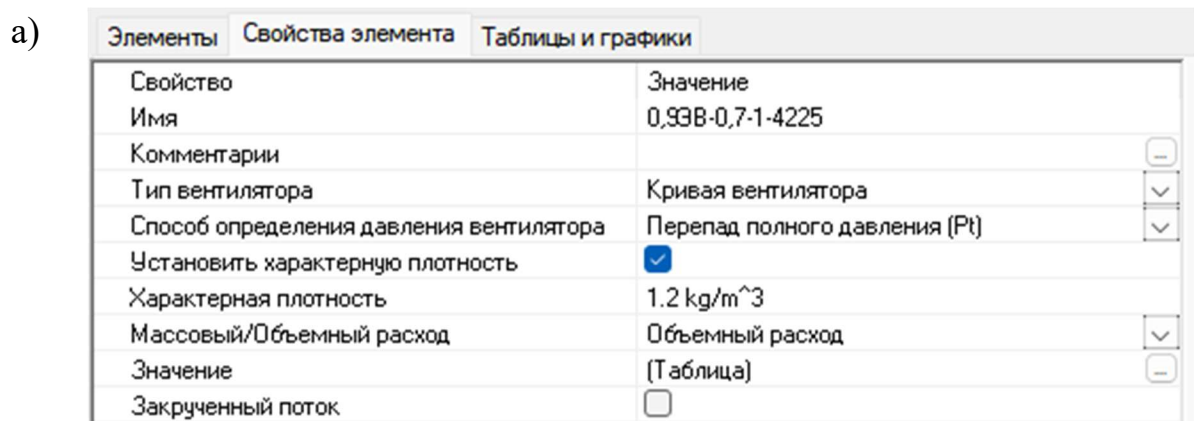


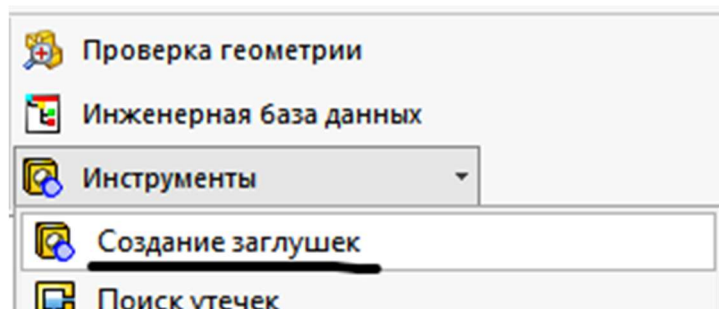
Рисунок 36 – Редактирование характеристик вентилятора.

4.2.7. Заглушки

После создания задачи Flow Simulation может сказать (а может и не сказать), что не удалось определить объем проточной области. Это связано с тем, что с боковой стороны корпус открыт. Необходимо указать программе, что в этих отверстиях есть сток воздуха. Для этого воспользуемся инструментом «Создание заглушек» в группе «Инструменты» (рис. 37а). Здесь необходимо выбрать поверхность, на которой расположены отверстия

(рис. 37, б). После принятия на модели будут созданы заглушки, которые закроют имеющиеся отверстия. Обратите внимание, что новые геометрические объекты не закреплены. Их смещение приведет к тому, что замкнутый объем может быть снова неопределен. Тогда придется удалять их и создавать заново. Для предотвращения этого вы можете в дереве геометрической модели зафиксировать их через контекстное меню. Или просто работайте аккуратно и не меняйте их положения.

а)



б)

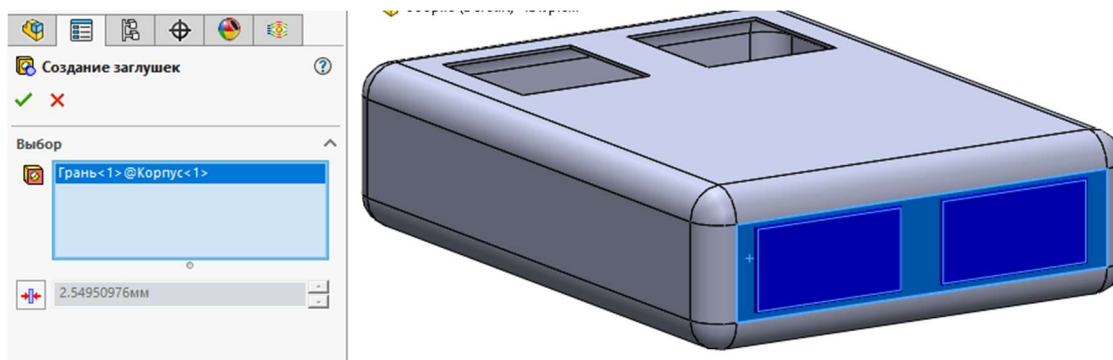


Рисунок 37 – Инструмент «Создание заглушек».

Далее необходимо задать граничное условие на эти заглушки. В дереве проекта создайте «Граничное условие», тип «Давление», подтип «Давление окружающей среды». Такое граничное условие означает, что воздух может как стекать в эту грань, так и выходить из неё, в зависимости от перепада давления. Температура и давление по умолчанию берутся из начальных условий, которые были заданы в мастере создания проекта.

4.2.8. Тепловая нагрузка на разных геометрических моделях

Учтите, что при определении тепловых нагрузок Flow Simulation вначале считает общий объем моделей, делит заданную нагрузку на него, и полученную удельную мощность тепловыделения равномерно распределяет по заданному объему.

В абстрактной задаче, в которой есть два объекта объема V и $3V$ соответственно, при определении нагрузки $4P$ она распределится не как $2P$ и $2P$, а как P и $3P$. Из-за этого объединять в одно граничное тепловое условие следует только одинаковые геометрические объекты.

В условиях поставленной задаче это означает, что необходимо добавить одну тепловую нагрузку для цилиндров и **ОТДЕЛЬНО** ещё одну для параллелепипедов.

4.2.9. Внесение материалов в базу данных

Тепловыделяющие элементы выполнены из стали 20 – материала, которого в базе данных Flow Simulation по умолчанию нет. Для добавления необходимо использовать Инженерную базу данных: «Вещества» – «Материал» – «Заданы пользователем». Создайте новый материал и задайте ему имя, плотность, удельную теплоемкость и теплопроводность.

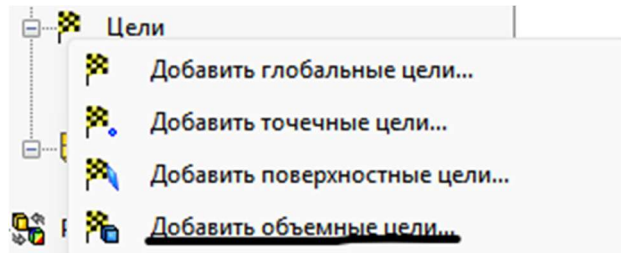
4.2.10. Создание целей

В Flow Simulation реализована система целей – показателей, численный вывод которых особенно важен для инженера. В отличие от предыдущей задачи, в которой максимальная температура всей сборки и так соответствовала температуре транзистора (так как тот – единственный источник тепла), здесь необходимо определить температуры объектов по отдельности.

Нажмите правой кнопкой мыши по «Цели» и добавьте объемную цель (рис. 38, а). Выберите **ТОЛЬКО** цилиндрические элементы и внизу списка отметьте «Температура (твердое тело)» в колонке «Мах» (рис. 38, б). Повторите то же самое для прямоугольных элементов. Для исключения путаницы переименуйте каждую цель.

В процессе решения для отслеживания прогресса сходимости решения есть опция мониторинга значений целей в мониторе решателя. Использование этого функционала позволяет приостановить решение, если результат становится неудовлетворительным, не сходится или говорит о явной ошибке при определении граничных условий. Однако такой подход требует опыта работы в программе, так как движение целей по итерациям может иметь обманчивый характер в некоторых сценариях неустойчивого конвективного или лучистого теплообмена.

а)



б)

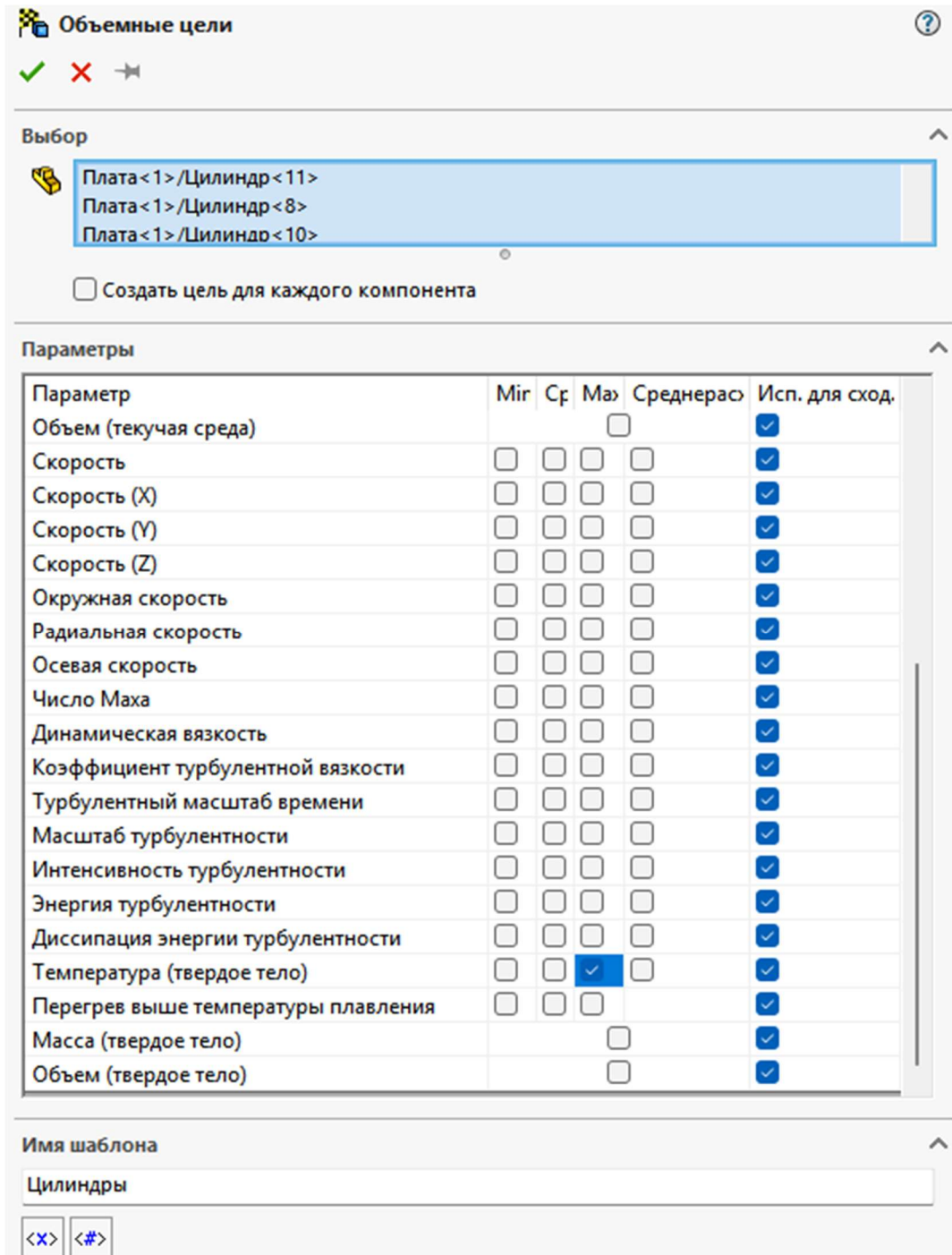


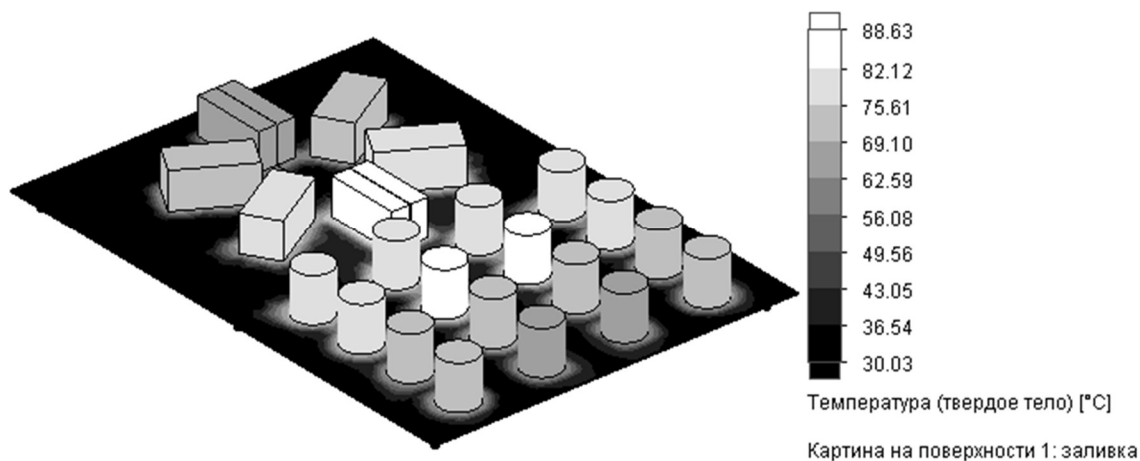
Рисунок 38 – Создание объемной цели максимальной температуры

В целом инструментарий целей будет всё больше раскрываться в последующих задачах.

4.2.11. Вывод результатов

Вывод результатов на основе полученного решения отличается от предыдущей задачи. Здесь использование картины температуры на всех поверхностях закрасит, помимо прочего, и корпус, закрыв тем самым интересующие области. Поэтому при определении объектов для закрашки вручную выберите в дереве геометрии все элементы, кроме заглушек, вентилятора и корпуса (рис. 39, а). Ваши результаты будут изображены только на половине модели из-за симметрии. Чтобы это исправить, вы можете при определении настроек закрашивания отметить пункт «Отразить результаты». Для получения численных данных из заранее определенных целей в постпроцессоре (ниже пункта «Результаты») выберите «Цели» – «Добавить», отметьте цели, затем нажмите кнопку «Показать». В полученной таблице искомые результаты находятся на столбце «Значение» (рис. 39, б). Ваши данные могут несколько отличаться.

а)



б)

| Имя цели | Единица измерения | Значение |
|----------|-------------------|----------|
| Кубики | [°C] | 88.70 |
| Цилиндры | [°C] | 83.17 |

Рисунок 39 – Извлечение результатов.

4.3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ №3. ПЕРЕГОРОДКА ДЛЯ КОНДИЦИОНЕРА

На балконе шириной 800 мм на высоте 300 мм от пола, на расстоянии 185 мм от стены сзади и 76 мм от стенки балкона слева расположен внешний блок кондиционера. Слева от него в балконе сделано прямоугольное отверстие (650x400 мм, отступ от пола 60 мм). Для комфорта и снижения температуры на балконе внешний блок кондиционера ограничен листами ДСП толщиной 16 со всех сторон, не перекрывая прямоугольное отверстие. Параметры получившегося короба ДхШхВ – 800x800x1000 мм. Габариты кондиционера — 664x275x544, толщина корпуса (сталь 20) – 1 мм, диаметр выреза под вентилятор – 400 мм. Вентилятор (макет, нейлон) – Ø390x70, его объемный расход – 1500 м³/ч. При работе внешним блоком выделяется 4 кВт тепла.

Для увеличения эффективности проветривания внешнего блока в короб добавлена перегородка вокруг кондиционера, разделяющая входной выходной поток, не давая ему циркулировать внутри короба.

Ориентировочные изображения расчетной модели приведены ниже (рис. 40).

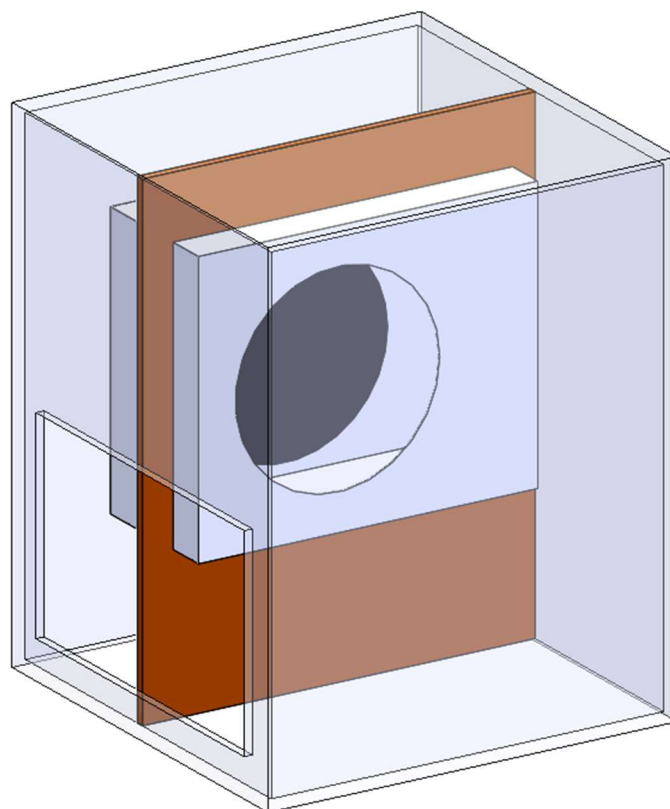


Рисунок 40 – Общий вид расчетной модели.

Требуется определить оптимальное положение перегородки вдоль оси вентилятора, в том числе рассмотреть варианты вылета перегородки за пределы корпуса кондиционера в обе стороны.

Примечания к заданию №3.

При выполнении задачи студенты будут идти по более вероятному сценарию работы инженеров – когда часть данных в техническом задании либо опущена, либо просто не дана. В частности, расположение выреза под вентилятор в корпусе внешнего блока не задано. Однако инженер может проанализировать типичные конструкции внешних блоков и понять, что чаще всего отверстие находится в левой части корпуса и отступает от левой, верхней и нижней стенок на одинаковое расстояние (рис 41).



Рисунок 41 – Примеры внешних блоков кондиционеров.

Таким образом, студентам предлагается самостоятельно додумывать, что подразумевалось в техническом задании на основании рисунков и инженерной практики.

Отдельно отметим, что полноценный анализ эффективности работы перегородки как отношения входного потока с улицы к объемному расходу

вентилятора может быть затруднителен из-за особенностей моделирования (является условием задания повышенной сложности). Поэтому для обоснования эффективности работы перегородки в базовом варианте достаточно определить среднюю температуру внутри короба, что и будет целью выполнения задачи (при максимальной эффективности средняя температура воздуха внутри минимальна).

4.3.1. Установка сопряжения «Расстояние» на перегородку

Так как в дальнейшем используется автоматизация расчета, в расчетной модели необходимо указать численное значение, которое будет варьироваться. В связи с этим не следует закреплять «Совпадением» перегородку с чем-либо для ограничения положения вдоль оси вентилятора. Используйте «Расстояние» от задней стенки.

4.3.2. Вентилятор с фиксированным объемным расходом

Зачастую, когда вентилятор является частью готового изделия, производитель не указывает его кривую, ограничиваясь постоянным расходом. В таком случае при его добавлении в Инженерную базу данных необходимо в качестве кривой указать две точки с одинаковым расходом, но разными давлениями. Первое – нулевое, второе – недостижимо высокое (рис. 42). В таком случае Flow Simulation будет обеспечивать постоянство расхода вне зависимости от внешних условий.

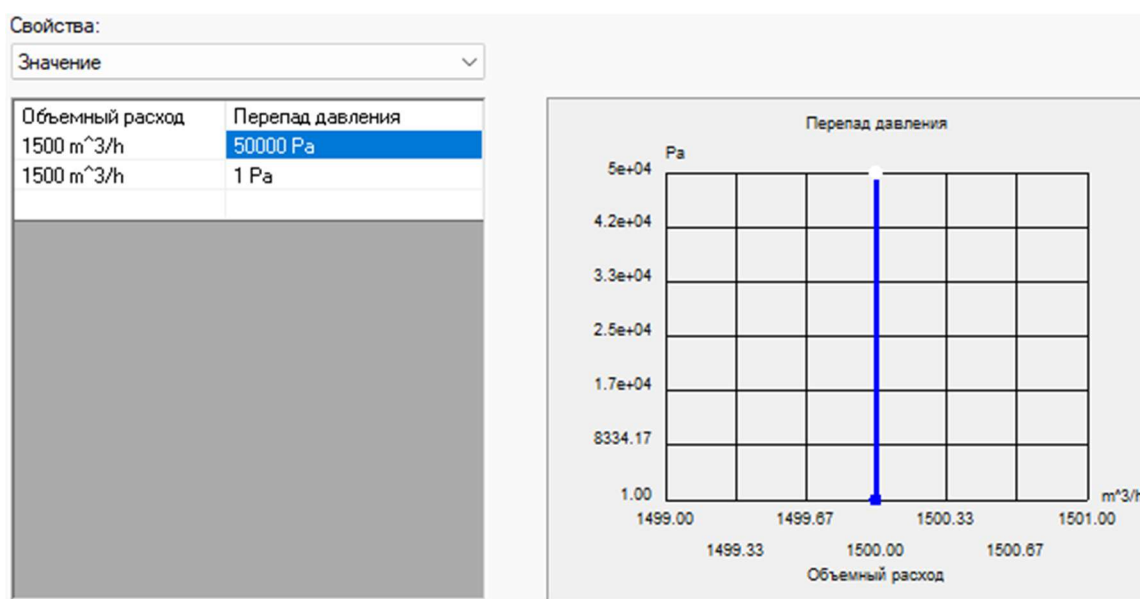


Рисунок 42 – Кривая вентилятора с фиксированным расходом.

Тем не менее, такое жесткое условие может приводить к сбоям, например, если входной или выходной каналы забиты и не продуваемы, из-за чего требуется дополнительно проверять физическую адекватность полученных результатов.

4.3.3. Тепловыделение внешнего блока

Моделирование реального тепловыделяющего элемента – змеевика с радиатором – нецелесообразно, так как приведет к чрезмерно мелкой сетке (более 1 млн ячеек), при этом во Flow Simulation нет встроенного инструмента подогрева воздушного потока после вентилятора.

Однако при этом можно пойти на хитрость. На самом деле, когда вы прикладываете условие тепловыделения на деталь, нагревается не четко она, а просто область, ограниченная выделенной деталью. При этом, если включить игнорирование детали при создании сетки (в сетке не будет информации о твердом теле на месте детали), то греться будет не деталь, а текучая среда.

Применительно к задаче можно «Линейным массивом» продублировать на небольшом расстоянии (с промежутком между макетами 10 мм) вентилятор, удалить его из анализа (в дереве проекта правой кнопкой мыши по «Входным данным» – «Управление компонентами» – снимите галочку с дубликата вентилятора) и задать на эту деталь указанную мощность 4 кВт.

На этапе проверки полученной сетки убедитесь, что только один вентилятор является твердым телом.

4.3.4. Создание цели

В данной задаче создание глобальной цели средней температуры текучей среды уже является критическим условием решения задачи. Причиной этого является то, что извлечение результатов из автоматизированной серии расчетов либо невозможно (по умолчанию полное решение удаляется), либо затруднительно (представьте себе процесс получения результатов вручную из 20 расчетов), поэтому выходными данными будут только заранее определенные цели.

4.3.5. Параметрическое исследование. Входные параметры

После завершения постановки задачи в программе запустите её и проверьте решение на предмет ошибок. Дело в том, что следующий этап занимает гораздо больше времени, и допущенные ошибки в моделировании или настройках задачи будут влиять на все расчеты. В таком случае расчет придется начать заново.

Кроме того, анализ ошибок здесь затруднителен, так как пользователь ограничен в объеме получаемой информации – выходными данными является не полное решение газодинамической задачи сложного конвективного теплообмена, а только выбранные в дальнейшем целевые показатели.

Нажмите правой кнопкой мыши по расчету над деревом проекта и выдерите «Новое параметрическое исследование...». Удостоверьтесь, что в нижнем окне выбран режим «Анализ возможных вариантов». Такой тип исследования отвечает на вопрос «Что, если?», позволяя автоматически рассчитывать изменение выходных параметров от варьирования входных.

Первым делом необходимо добавить входной параметр. Нажмите кнопку «Добавить геометрический размер» (третья слева) (рис. 43, а) и переключите отображение дерева проекта на дерево модели. Разверните деталь перегородки, откройте группу «Сопряжения...» и выберите сопряжение «Расстояние» (рис. 43, б). Снизу подтвердите выбор (рис. 43, в).

Для добавленного параметра необходимо определить вариацию. В окне исследования дважды нажмите по параметру. Справа откроется таблица для значений выбранного значения. Самостоятельно сделайте подборку трех групп возрастающих размеров по следующему принципу (обратите внимание на единицы измерения):

- Первая группа – 3-4 значения, когда перегородка находится между стенкой и внешним блоком и всё ещё делит поток от отверстия.
- Вторая группа – 6-8 значений, когда перегородка надета на внешний блок.
- Третья группа – 4-5 значений, когда перегородка находится перед внешним блоком и всё ещё делит поток от отверстия.

Для первой группы интервалы должны быть меньше, чем для остальных. Для второй и третьей группы интервалы примерно одинаковые. Подтвердите выбор.

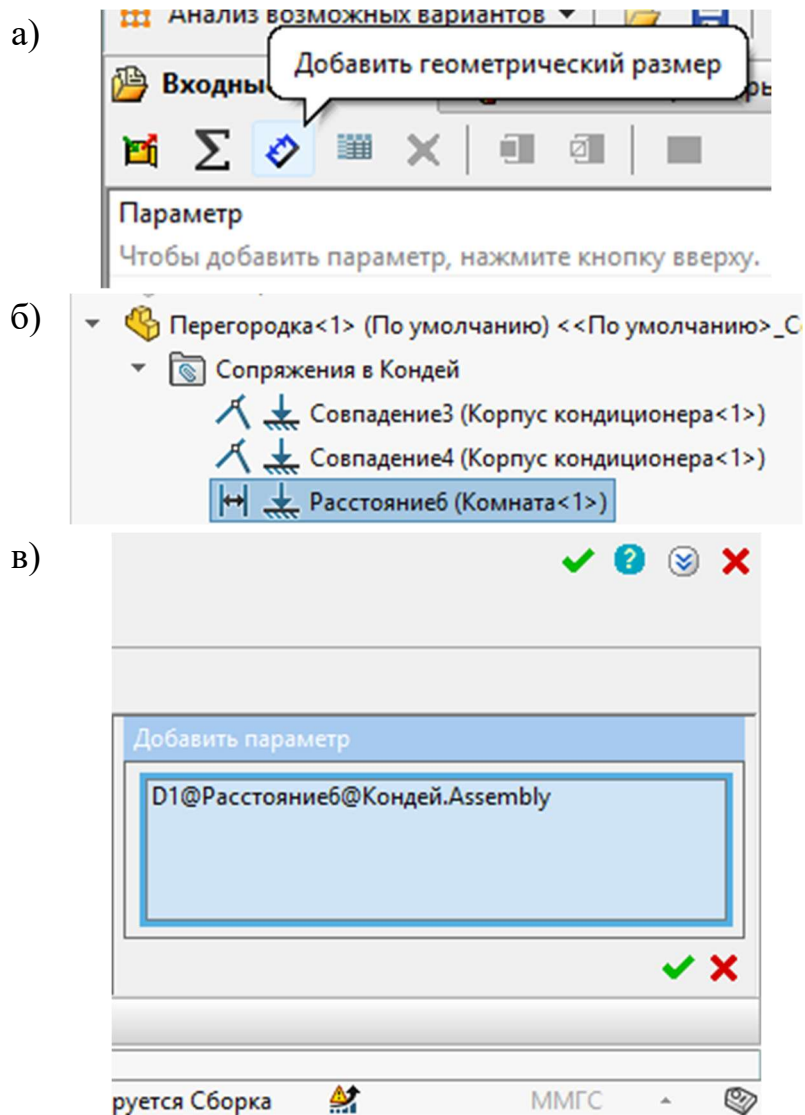


Рисунок 43 – Определение входного параметра.

4.3.6. Параметрическое исследование. Выходные параметры

Как было указано ранее, параметрическое исследование запускает множество экземпляров одной и той же задачи с указанными на вкладке «Входные параметры» изменениями. Для экономии места на диске по умолчанию полные результаты (поля скоростей, давлений, температур и т.д.) не сохраняются. Так как необходимым для решения задачи является только информация о динамике средней температуры в коробе, полные результаты и не нужны.

На следующей вкладке требуется указать выходные параметры. Нажмите кнопку «Добавить цель» и выберите единственную цель.

4.3.7. Параметрическое исследование. Сценарий

Здесь задаются вычислительные условия расчета – количество используемых ядер, одновременных расчетов, параметры сохранения результатов и так далее. Если всё правильно настроено, то нажимайте кнопку «Запустить». Не забудьте перед этим дополнительно сохраниться.

Во время исследования мониторы расчета будут постоянно открываться и закрываться. Учтите, что, в отличие от стандартного расчета, для преждевременной остановки исследования недостаточно просто закрыть монитор, так как Flow Simulation воспримет это как очередное успешное решение. Необходимо перейти в окно программы и нажать на кнопку «Остановить», которая окажется на месте кнопки запуска.

4.3.8. Параметрическое исследование. Результаты

В процессе расчета появится вкладка «Результаты», данные в которой будут постоянно обновляться в процессе исследования. Самостоятельно поменяйте параметры отображения так, чтобы результаты выводились в виде диаграммы. Если на этапе вариации (п. 4.3.5) размеры были заданы неупорядоченно, то и здесь они будут перепутаны. В таком случае вернитесь на вкладку «Сценарий», выделите в таблице неправильно расположенные расчетные точки и перемещайте их соответствующими кнопками со стрелочками в окне исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Suh N. P. *Axiomatic Design: Advanced and Applications*. New York: Oxford University Press, 2001. 503 p.
2. Алифанов О. М., Вабищевич П. Н., Михайлов В. В. и др. *Основы идентификации и проектирования тепловых процессов и систем: учеб. пособие*. — М.: Логос, 2001. — 400 с.
3. Anderson J. D. *Aircraft Performance and Design*. — New York: McGraw-Hill Education, 1999. — 640 p.
4. K. Y. Billah, R. H. Scanlan, “Resonance, Tacoma Narrows Bridge failure, and undergraduate physics textbooks,” *Am. J. Phys.* 59, 118 (1991).
5. Titu A. M. *Mathematical Modeling of the Global Engineering Process for Optimizing Product Quality in the Aerospace Industry // Aerospace*. — 2024. — Vol. 11. — p. 804.
6. Raymer D. *Aircraft Design: A Conceptual Approach 6th ed.* — Reston, VA: AIAA, 2018. — 902 p.
7. Кузьмичев Д. А., Радкевич И. А., Смирнов А. Д. *Автоматизация экспериментальных исследований*. — Москва: Наука, 1983. — 391 с.
8. Самарский А. А. *Введение в численные методы / А. А. Самарский ; Российская академия наук*. — 3-е изд., перераб. — М. : Наука, 1997. — 239 с.
9. Findeisen R., Allgöwer F. *Computational Delay in Nonlinear Model Predictive Control // IFAC Proceedings Volumes (англ.)*. — 2003. — Vol. 37, No. 1. — P. 427–432. — DOI: 10.1016/S1474-6670(17)38769-4.
10. Цыплаков А. *Введение в моделирование в пространстве состояний // Квантиль*. — 2011. — № 9. — С. 1–24.
11. Nie Q., Joshi Y. *Multi-scale thermal modeling methodology for electronics cabinets // Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems — Proceedings of the Intersociety Conference*. — 2006. — P. 684–690.
12. Ju Y., Sun W. *Plasma assisted combustion: Dynamics and chemistry // Progress in Energy and Combustion Science*. — 2015. — Vol. 48. — P. 22–83. — DOI: 10.1016/j.pecs.2014.12.002.

13. Захарова В.Ю., Файзуллин Р.О., Бараненко А.В., Кузнецов П.А.
Методика расчета аккумуляторов холода с веществами с фазовым переходом // Вестник Международной академии холода -2021. - № 2(79). - С. 13-20.

Колодийчук Павел Андреевич
Пилипенко Николай Васильевич
Пронин Владимир Александрович
Цветков Вадим Александрович

**Моделирование и базовый анализ конвективного
теплообмена в САЕ-системах**

Учебное пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, литер А