

Алгоритмическое BIM-моделирование поверхностей нагрева паровых котлов тепловых электростанций

Лебедев Константин Викторович¹, Бойко Евгений Анатольевич¹, Куличкин Алексей Павлович¹, Лойко Владимир Павлович¹, Бобров Алексей Васильевич¹, Новицкий Дмитрий Александрович², Посохов Юрий Михайлович²

¹Сибирский федеральный университет, Россия, Красноярск, klebedev@sfu-kras.ru

²ООО Сибирская генерирующая компания, Россия, Москва

Аннотация. В статье представлен опыт создания BIM-моделей котлов тепловых электростанций, а также особенности моделирования отдельных элементов котельного агрегата. Рассмотрена статистика отказов теплоэнергетического оборудования и приведен сравнительный анализ по различным элементам котельного оборудования и поверхностям нагрева. На основе этих данных была проведена сравнительная оценка надежности различных элементов котельного агрегата, что обосновывает актуальность детального моделирования поверхностей нагрева. Показано, что BIM-модель выступает не как конечный продукт, а как интегральный компонент комплексной информационной системы. В связи с этим предложена концепция интеграции разработанных моделей в структуру «цифрового двойника» для использования в системах управления жизненным циклом и техническим обслуживанием энергетических активов. Описаны технологические и алгоритмические аспекты создания моделей для каждой поверхности нагрева и узла. Предложен алгоритмический подход к построению геометрии элементов котельного оборудования, основанный на формализации операций моделирования в виде специализированного языка последовательных трансформаций («turtle language»). Данный язык описывает последовательность операций вытягивания, поворотов и пространственных преобразований трубных элементов, что позволяет воспроизводить сложную пространственную конфигурацию поверхностей нагрева на основе параметрических данных проектной документации. Практическая реализация подхода выполнена в виде программной библиотеки на языке Python с использованием открытых инструментов формирования IFC-моделей, обеспечивающих совместимость с BIM-средами и инженерными системами анализа. В работе представлен математический аппарат преобразования координат и алгоритмы перехода от локальных систем координат к глобальной системе модели, обеспечивающие корректное позиционирование элементов при последовательных трансформациях. Разработанный инструментарий позволяет автоматически генерировать детализированные трёхмерные модели котельных агрегатов, пригодные для последующего использования в САЕ-расчётах, системах мониторинга состояния оборудования, планировании ремонтов и обучении персонала. Полученные результаты демонстрируют эффективность предложенного подхода и его перспективность для применения при создании цифровых двойников объектов теплоэнергетики и развитии систем управления техническим состоянием оборудования.

Ключевые слова: BIM-моделирование, поверхности нагрева, котельный агрегат, цифровой двойник, твердотельное моделирование, управление активами, электронный ремонтный формуляр

Цитирование: Лебедев К.В. Алгоритмическое BIM-моделирование поверхностей нагрева паровых котлов тепловых электростанций / К.В. Лебедев, Е.А. Бойко, А.П. Куличкин, В.П. Лойко, А.В. Бобров, Д.А. Новицкий, Ю.М. Посохов // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2026. – № 1(41). – С. 104-122 – DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.008.

Введение. Создание BIM-моделей энергетического оборудования служит основой для разработки цифровых двойников. Цифровые двойники и киберфизические системы все чаще привлекают к себе внимание из-за активного исследования и внедрения во многих отраслях производства. Вследствие стремительного развития информационных технологий появилась возможность сбора, хранения, передачи и анализа больших массивов данных, собираемых с реальных объектов. Благодаря этому обнаружилась необходимость пересмотра стандартных подходов к управлению производственными процессами на предприятиях [1].

Основой для разработки цифрового двойника сложного технологического оборудования, такого, как, например, котельный агрегат тепловой электростанции (ТЭС), является его детальная информационная модель (BIM) [2]. Настоящая статья посвящена разработке

методологии автоматизированного создания таких моделей. В работе последовательно рассматриваются: специфика моделирования отдельных элементов котельного агрегата, лежащий в основе математический аппарат и концептуальные основы применения созданных моделей. Разработка BIM-модели выполнялась посредством написания специализированных программ-скриптов на языке программирования Python. При описании графического построения геометрических объектов BIM-модели в специализированных программах-скриптах разработана и применена Python-библиотека. Эта библиотека интерпретирует команды предметно-ориентированного языка последовательных трансформаций и преобразует их в вызовы библиотеки IfcOpenShell для построения трехмерного представления элементов котельного агрегата [3].

Котельное оборудование как объект для BIM-моделирования. Котельный агрегат тепловой электрической станции – это сложный объект, состоящий из множества элементов: непосредственно каркаса, поверхностей нагрева, элементов крепления, оборудования собственных нужд котельного агрегата и др. С точки зрения риск-ориентированного управления наибольший интерес представляет моделирование поверхностей нагрева котельного агрегата. Опыт эксплуатации показывает, что 50-70% отказов энергоблоков приходится именно на поверхности нагрева котлов [4].

Поверхности нагрева являются наименее надежным элементом котельного оборудования (рисунок 1), что связано с многообразием факторов, влияющих на условия работы металла, когда их сочетание создает такое напряженно-деформированное состояние, которое приводит к аварийным отказам оборудования, следствием чего становятся длительные простои (до нескольких суток) и ускоренная деградация всего энергоблока.



Рис. 1. Распределение отказов котельного оборудования и поверхностей нагрева

В связи с этим разработка и внедрение методов, позволяющих детально анализировать конструкцию, контролировать состояние и оптимизировать ремонтные работы поверхностей нагрева, представляет собой актуальную научно-техническую задачу.

В статье сформированы основные принципы BIM-моделирования поверхностей нагрева котлов, т.к. такие модели позволяют решить сразу комплекс задач энергетики:

1. BIM-модели представляют собой развернутую подробную визуализацию поверхностей нагрева с полной информацией об их элементах, содержащих сведения о материале, массе, геометрических размерах, что может служить для решения таких задач, как: обучение персонала по конструкции котла, создание формуляров для ремонтного персонала, получение чертежей отдельных узлов котла и т.п [5].
2. BIM-модели представляют собой базу данных элементов, которая может быть расширена и дополнена любой технической информацией. Например, за каждым из элементов может вестись мониторинг температур и нагрузок, что позволит осуществлять прогнозирование отказов на основе математических алгоритмов, моделирующих усталостные явления в металле. Также в такую базу возможно вносить данные разрушающего и неразрушающего контроля лаборатории металлов, а потом, в свою

очередь, прогнозировать отказ на основе алгоритмов экстраполяции или машинного обучения.

3. Визуальный анализ интенсивности отказов поверхностей нагрева может указывать на некоторые неявные дефекты котла. Например, постоянные отказы в какой-то определенной зоне могут говорить о наличии внутритрубных отложений, что может приводить к локальным перегревам отдельных элементов.
4. Возможность использования BIM-моделей для компьютерного математического моделирования. С помощью BIM-модели можно выполнять механические, гидродинамические (CFD) и другие расчеты. CFD-моделирование основано на численном решении систем дифференциальных уравнений, описывающих движение жидкости или газообразной среды. Это направление дает возможность каждому элементу BIM-модели присвоить индивидуальные свойства (например, марку стали) и задать рабочую среду (например, рабочее тело с определенными параметрами). Современные системы CFD-моделирования в синтезе с механическими расчетами позволят численно изучать целый спектр процессов, происходящих в установке (определить точки максимального напряжения, определить процессы развития эрозии, коррозии, усталостных явлений в металлах и др.) [6, 7]. В частном случае, CFD-моделирование может ответить на вопрос, какие изменения произойдут в системе котла, если заменить один или несколько элементов котла на элементы из другой марки стали. Из представленного выше видно, что наибольший интерес к BIM-моделированию представляет именно моделирование поверхностей нагрева.

Постановка задачи BIM-моделирования котельных агрегатов тепловых электрических станций и представление концепции аналитической системы. Для моделирования используется IFC формат. IFC (Industry Foundation Classes) – это формат файлов, который используется для обмена информацией между участниками строительного процесса. IFC используется для передачи информационных моделей, включая геометрию, материалы, атрибуты и другие данные. Формат поддерживается многими программными продуктами для проектирования и строительства, что делает его универсальным инструментом для обмена данными.

На рисунке 2 представлена концепт-модель цифрового двойника тепловой электростанции.



Рис. 2. Ключевые задачи реализации интеллектуальных систем управления теплоэнергетического оборудования (на примере котельной установки ТЭС)

Для обеспечения бесшовной интеграции разнородной информации в рамках такой интеллектуальной системы необходим единый, не привязанный к конкретному производителю ПО, стандарт обмена данными. Формат IFC полностью отвечает этим требованиям, что делает его ключевым инструментом для создания информационных моделей энергетических объектов.

Для реализации поставленной задачи используются технологии BIM-моделирования. Однако создание BIM-моделей отдельных котельных агрегатов само по себе не решает задачи эффективного управления активами станции. Для этого необходима интеграция разрозненных моделей и данных в единую информационно-аналитическую платформу, которая позволит комплексно использовать результаты моделирования на уровне всей ТЭС (рис. 3) [8].

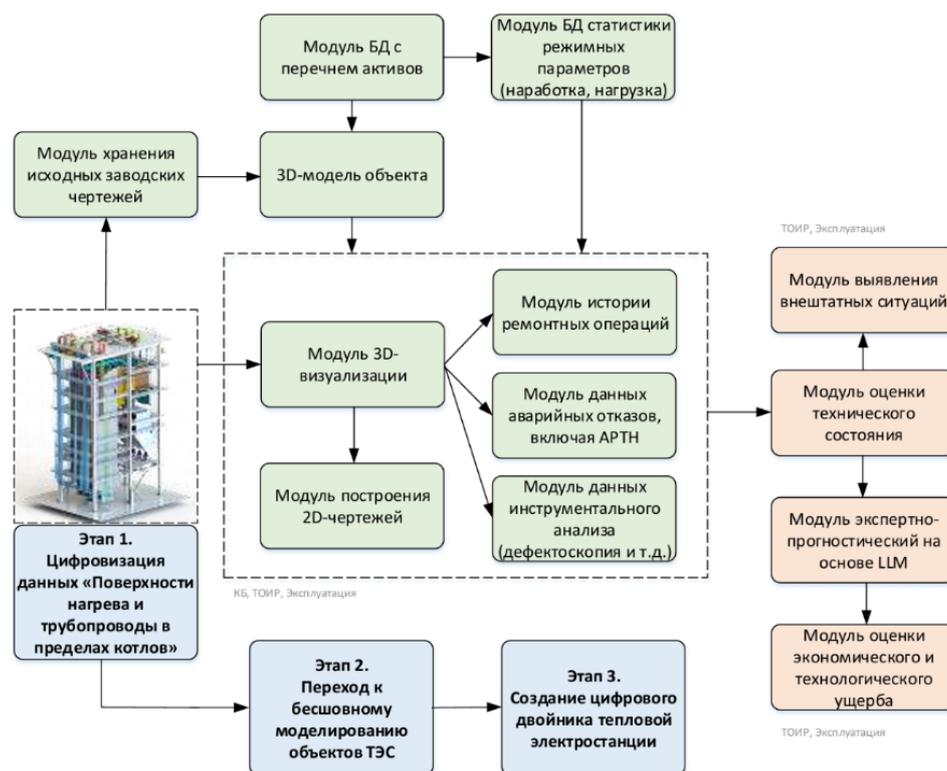


Рис. 3. Концептуальная модель построения информационно-аналитической системы «Цифровой двойник ТЭС»

Условные обозначения: IFC – формат хранения данных; БД – база данных; ИАС – информационно-аналитическая система; ТЭС – тепловая электростанция; АРТН – акт расследования технологических нарушений; ML – machine learning – машинное обучение; КБ – конструкторское бюро; ТОИР – техническое обслуживание и ремонты

Рассматривается разработка программного комплекса, представляющего собой единую модульную расширяемую платформу, выполняющая функции сбора, хранения, обработки, анализа и визуализации данных для обеспечения эффективного управления, мониторинга и оптимизации технических активов ТЭС. Функциональность разрабатываемой платформы направлена на решение комплекса задач. Система обеспечивает централизованное хранение данных об активах ТЭС и предоставляет инструменты для управления ими (загрузка, обновление, поиск, фильтрация). Пользовательский интерфейс включает функции для отображения и работы с 3D-моделями, а аналитический блок позволяет проводить расчеты надежности и оптимизации. Особое внимание уделено обеспечению безопасности, контролю доступа, а также масштабируемости и расширяемости всей системы. Ключевой задачей становится выбор или разработка инструментария для создания BIM-моделей. На первый

взгляд, для этого можно было бы использовать существующие коммерческие IFC-редакторы и системы автоматизированного проектирования (САПР). Однако анализ специфики котельного оборудования выявил ряд существенных ограничений такого подхода.

Обоснование выбора инструментария для BIM-моделирования. Принятие решения о разработке собственной программной библиотеки вместо использования готовых IFC-редакторов было обусловлено следующими факторами:

1. Экономическая доступность и лицензионные ограничения. Большинство профессиональных BIM-платформ являются проприетарными продуктами и требуют значительных затрат на приобретение лицензий. Разработка собственного инструмента на базе открытого ПО позволяет избежать этих расходов и обеспечивает неограниченную масштабируемость решения [9].
2. Специфика геометрии теплоэнергетического оборудования – это ключевой технический аргумент. Поверхности нагрева котлов состоят из тысяч труб со сложной пространственной геометрией. В проектной документации их форма часто задается не визуально, а последовательностью параметрических трансформаций (сдвиги, повороты, гибы). Стандартные САПР, ориентированные на прямое ручное моделирование, не имеют встроенных средств для интерпретации таких алгоритмических описаний. Попытка воссоздать подобную геометрию вручную была бы чрезвычайно трудоемкой и привела бы к накоплению ошибок.
3. Трудоемкость и автоматизация. Алгоритмический подход к моделированию, где геометрия генерируется кодом на основе исходных данных (“turtle language”), оказывается значительно эффективнее ручного моделирования в 3D-редакторе. Разработка собственной библиотеки позволяет автоматизировать создание сложных и однотипных элементов, что кардинально снижает трудозатраты и повышает точность моделей.

Учитывая перечисленные ограничения, было принято решение о разработке специализированной python-библиотеки «IFC_for_TPP» (IFC for Thermal Power Plants), которая позволяет генерировать IFC-модели поверхностей нагрева на основе параметрического описания их геометрии. Такой подход обеспечивает необходимую гибкость, точность и эффективность.

Описание python-библиотеки и ее программная реализация. Создание библиотеки элементов – одна из ключевых задач выполненной работы. Использование библиотеки позволяет оптимизировать работу программного обеспечения, тиражировать элементы, делать привязки построенных 3D моделей к исходным чертежам. Такой широкий спектр задач обеспечивается за счет использования сразу нескольких программных продуктов. Создание библиотек позволяет существенно ускорить процесс создания подобных систем (котлов), за счет копирования схожих элементов и доработки отличий.

В рамках моделирования используется следующее ПО:

- IfcOpenShell 0.8.3 – библиотека для разработки IFC с открытым исходным кодом, позволяющая создавать и редактировать IFC файлы в соответствии со стандартом IFC;
- язык программирования Python не ниже версии 3.11.7 для написания модулей, обеспечивающих построение BIM-модели котла

Как видно из таблицы 1, с каждой новой версией IFC формат пополняется новыми геометрическими представлениями и совершенствуются существующие, но один ключевой фактор остается неизменным – это взятый за основу формат STEP для представления твердотельной модели. В соответствии с документацией buildingSMART, IFC формат поддерживает следующие геометрические представления: CSG primitive, Extruded solid, BRep

model, Surface model и Tessellated item [10]. В моделировании, проведенном авторами, использовался Triangulated BRep.

Таблица 1. Развитие геометрических представлений в формате IFC

Версия	Основные геометрические представления	Нововведения
	CSG, BRep	Только базовая геометрия
2.x	Swept Solids, IfcShapeRepresentation	Добавление профилей и 2D-геометрии
2x3	Triangulated BRep, NURBS	Поддержка сложных поверхностей
4.0	Advanced BRep, Tessellation, Swept Disk	Поддержка органических форм и сложной тесселяции
4.3	Инфраструктурные улучшения	Линейные объекты для дорог и мостов

В рамках демонстрации возможностей библиотеки рассмотрены:

1. Особенности моделирования трубных элементов и поверхностей нагрева котельных агрегатов.
2. Вопросы согласования локальных и глобальных координат при технологических операцияхгиба трубы.
3. Примеры 3D-моделей котлов, полученных на основе использования разработанной библиотеки.

Построение 3D-моделей выполняется с помощью языка последовательных трансформаций, названным «turtle language». Данный язык регламентирует последовательность операций моделирования, т.е. построение объекта начинается с какого-либо плоского эскиза и данный эскиз в процессе построения проходит через различные трансформации, например, вытягивание, гиб, изменение размера сечения и т.д. Этот принцип продемонстрирован на рисунке 4.

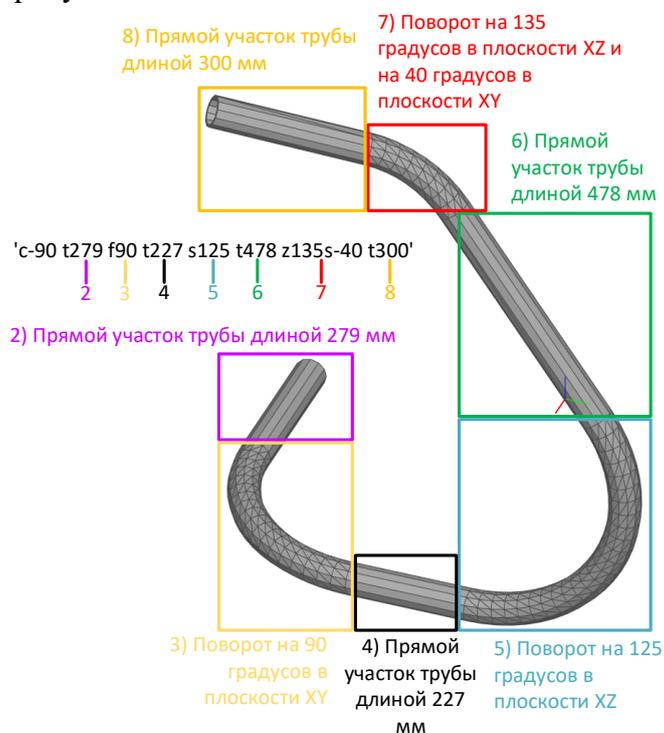


Рис. 4. Построение сложного элемента – трубы с изгибами

Авторская библиотека [11] включает пять модулей (рисунок 5), обеспечивающих построение IFC-моделей котлов: move.py, boiler_parts_generator.py, ifc_creating.py, clear_function.py, ports_for_every_part.py.

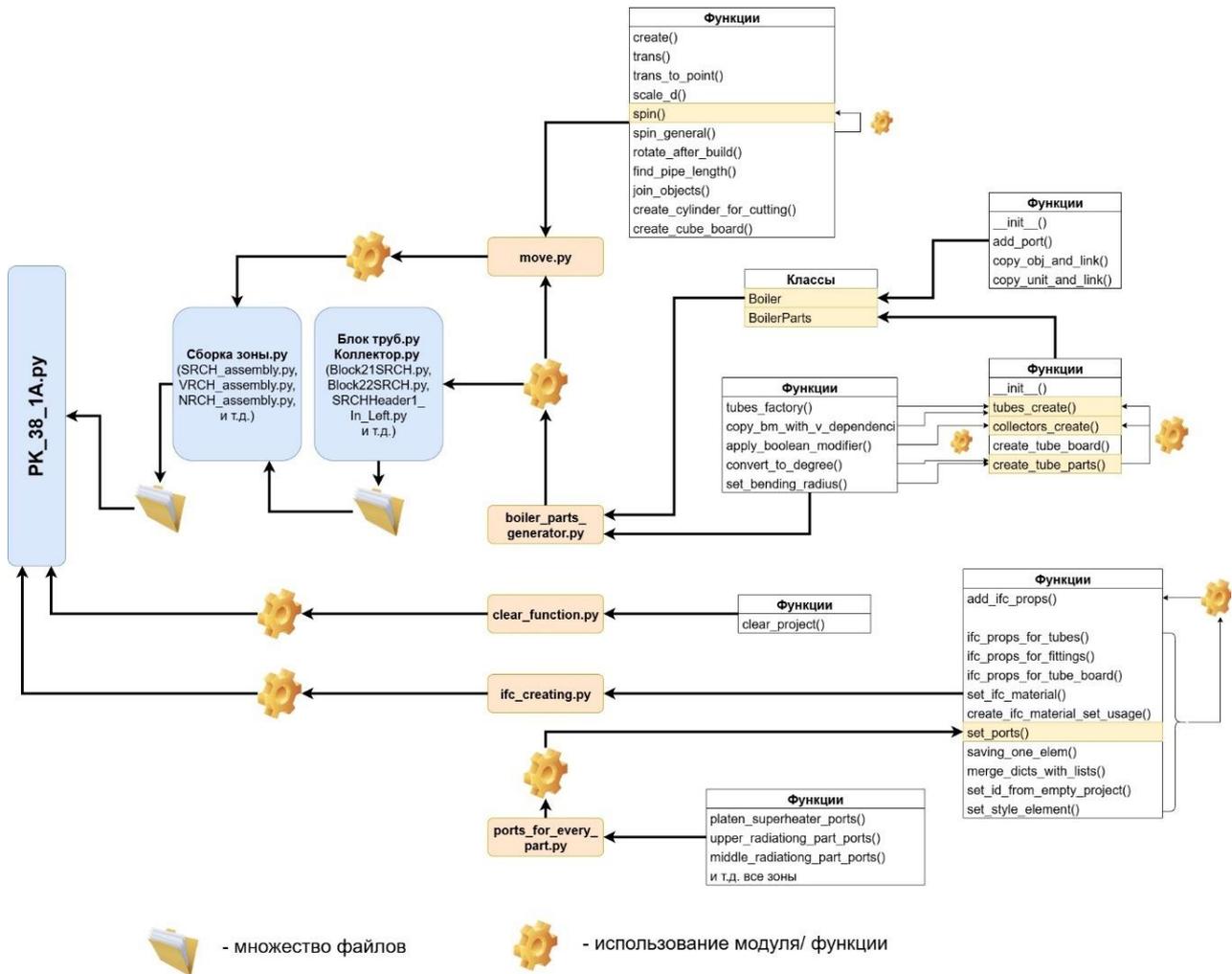


Рис. 5. Структура взаимодействия модулей библиотеки IFC for TPP

Move.py содержит в себе процедуры с элементарными геометрическими операциями для построения (вытягивание, гиб в одной плоскости, гиб в двух плоскостях, увеличение диаметра и т.д.) и функцию по повороту и перемещению локальной сборки (`rotate_after_build`).

Boiler_parts_generator.py содержит функции, реализующие все операции, находящиеся в move.py, а именно:

- описание классов `Boiler` и `BoilerParts`;
- функции по созданию труб (`tubes_create`), коллекторов (`collectors_create`), трубных досок (`create_tube_board`);
- вспомогательные функции для построения (конвертация минут в градусы, получение радиусагиба, применение булевой операции и т.д.).

Ifc_creating.py предоставляет функции для создания IFC-моделей и назначения им геометрических и физических свойств. Этот модуль использует библиотеку `IfcOpenShell`.

Clear_function.py реализует единственную процедуру по очистке проекта (`clear_project`), которая удаляет все объекты со сцены, все мэши и материалы.

В `Ports_for_every_part.py` реализованы функции, предназначенные для установки портов (`IfcPort`) для каждой зоны котла. Каждому элементу можно присвоить определенное количество портов. Порты, в свою очередь, позволяют задавать направление движения среды для каждого элемента.

Особенности создания отдельных элементов котла. Паровой котел тепловой электростанции можно разделить на несколько крупных элементов или узлов, требующих существенно различных способов реализации.

Первый крупный узел – это блоки труб, т.е. трубы, расположенные в ряд или несколько рядов относительно друг друга, составляют большинство поверхностей нагрева: зоны топки (НРЧ, СРЧ, ВРЧ), трубы пароперегревателей, водяного экономайзера, трубы воздухоподогревателя и т.д.

Построение любого элемента начинается с задания свойств модели и ее наименования. Далее проводится задание геометрических свойств труб, из которых состоит блок:

- параметр `step` указывает (в м), на каком расстоянии на оси у друг от друга на чертеже блока располагаются трубы;
- параметр `R_global` обозначает радиус для всех поворотов труб в блоке, указывается в м на чертеже труб;
- параметр `r` обозначает внешний радиус труб в блоке, указывается в м в основной надписи чертежей труб;
- параметр `w` обозначает толщину стенки труб в блоке, указывается в м в основной надписи чертежей труб.

Здесь представлена лишь часть свойств, модель может содержать свойства, как относящиеся к блоку в целом, так и к конкретной трубе.

Моделирование блока труб происходит путем заполнения словаря `geom` (уникальные трубы) кодом, регламентирующим последовательные трансформации; список `seq` заполняется названиями уникальных труб. Этот список определяет последовательность появления труб. Пример кода представлен на листинге 1.

Листинг 1. Список появления труб и «turtle language» каждой трубы

```
seq = [['6'], ['7']] * 30 + ['6'] + ['5'] + ['4'] + ['3'] + ['2'] + ['1']
geom = {
'1': 'c18 t327 s18 t3681 s90r0.075 t451 f-90r0.075 t138 z-60f90r0.075 t127',
'2': 'c18 t297 s18 t3645 s90r0.075 t430 f-90r0.075 t174 z-60f90r0.075 t169',
'3': 'c18 t327 s18 t3609 s90r0.075 t409 f-90r0.075 t210 z-60f90r0.075 t210',
'4': 'c18 t297 s18 t3573 s90r0.075 t389 f-90r0.075 t246 z-60f90r0.075 t252',
'5': 'c18 t327 s18 t3537 s90r0.075 t368 f-90r0.075 t282 z-60f90r0.075 t293',
'6': 'c18 t297 s18 t3541 s60 t670',
'7': 'c18 t327 s18 t3936 s90 t494'}
```

Построение трубы всегда начинается с создания стартового кольца в плоскости XY параметром «с», после которого указывается угол наклона стартового кольца в плоскости XY.

Далее, после размещения стартового кольца трубы, начинается построение геометрии. Основные команды построения геометрии:

- `t(число)`, строит прямой участок трубы длиной, указанной числом в мм; например, команда `t100` строит прямой участок длиной 100 мм;
- `s(число)`, строит поворот в плоскости XZ на угол, указанный числом; например, использование команды `s30` строит поворот в плоскости XZ углом 30 градусов;
- `f(число)`, строит поворот в плоскости YZ на угол, указанный числом;
- `z` – применяется, когда необходимо делать поворот сразу в двух плоскостях – двойной поворот; например, поворот в плоскости XZ 90 градусов и в плоскости YZ 45 градусов будет выглядеть так: `z45s90`.

На рис. 6 представлен пример сборки блока труб и составного экрана из нескольких блоков.

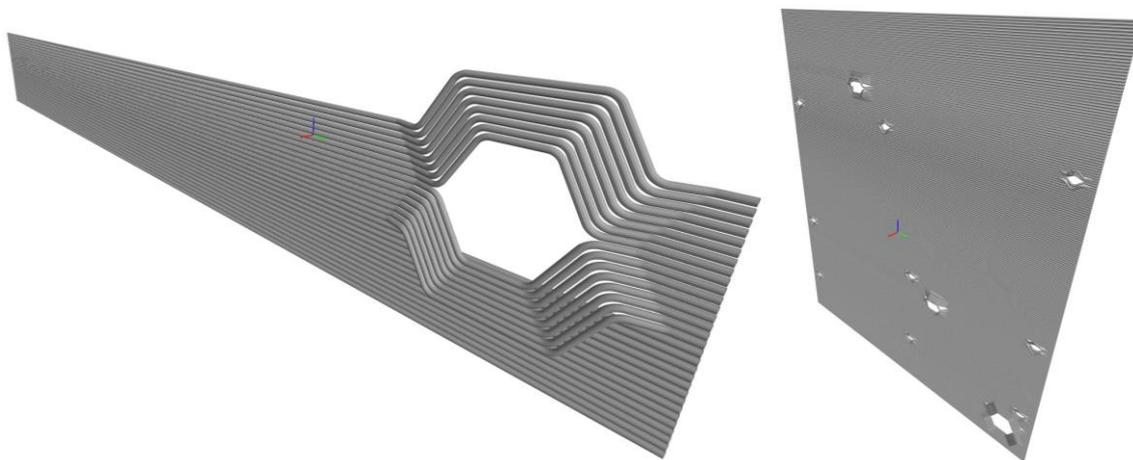


Рис. 6. Сборка зоны нагрева и топочного экрана из различных зон

При создании газоплотной поверхности мембранного типа (рис. 7) в библиотеке предусмотрено расширение стандартного синтаксиса построения труб, когда ставится флаг для старта построения мембраны Ms и для ее окончания Mf. Для свойств мембран заполняется соответствующий словарь. Разработан код для построения поверхности мембранного типа.

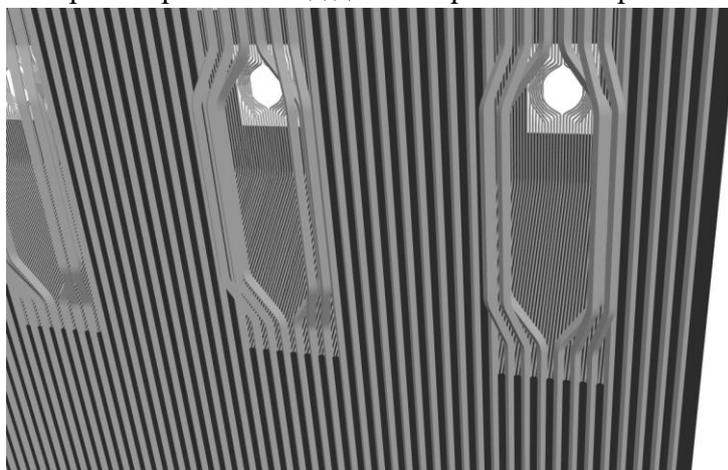


Рис. 7. Пример реализации экранов с мембранами

Отдельным элементом, заслуживающим рассмотрения, является коллектор – часть элемента котельного агрегата, где собираются все трубы. Данный элемент строится аналогично трубам блока через словари geom и seq, но имеет ряд особенностей. Поскольку коллектор строится в одном экземпляре, для его построения нет необходимости размещать трубы, сдвигая их по оси Y. В этом элементе необходимо иметь составную трубу из нескольких разных частей (рис. 8). Для этого предусмотрен особый синтаксис для списка seq, позволяющий применять для каждой части трубы разный диаметр и толщину стенки, а также команду sr, означающую продолжение построения трубы с финальной координаты и матрицы поворота предыдущей операции, но при этом имея новый элемент. Разработан соответствующий код для построения коллектора.

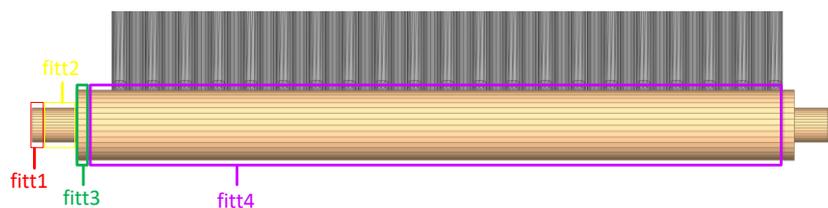


Рис. 8. Пример реализации коллектора

Сборка зоны нагрева осуществляется путем расстановки компонентов. Прописывается название компонента и задается функция создания и расположения компонента `model_create_and_place`. В эту функцию передается ряд аргументов:

- координаты x, y, z – размещение объекта в координате;
- углы в плоскостях x, y, z – поворот компонента в координатных плоскостях;
- m – параметр, в котором задаётся матрица поворота компонента;
- `start_rings` – параметр, в котором задаётся размещение стартовых колец компонента.

Первый размещаемый компонент базово располагается в координате $x = 0, y = 0, z = 0$. После этого задаются углы поворота компонента. Матрицы поворота и стартовые кольца в первом компоненте не задаются. Разработан код для сборки поверхности блоков.

На рисунке 9 представлена полная сборка зоны НРЧ и всей топки котла ПК-38.

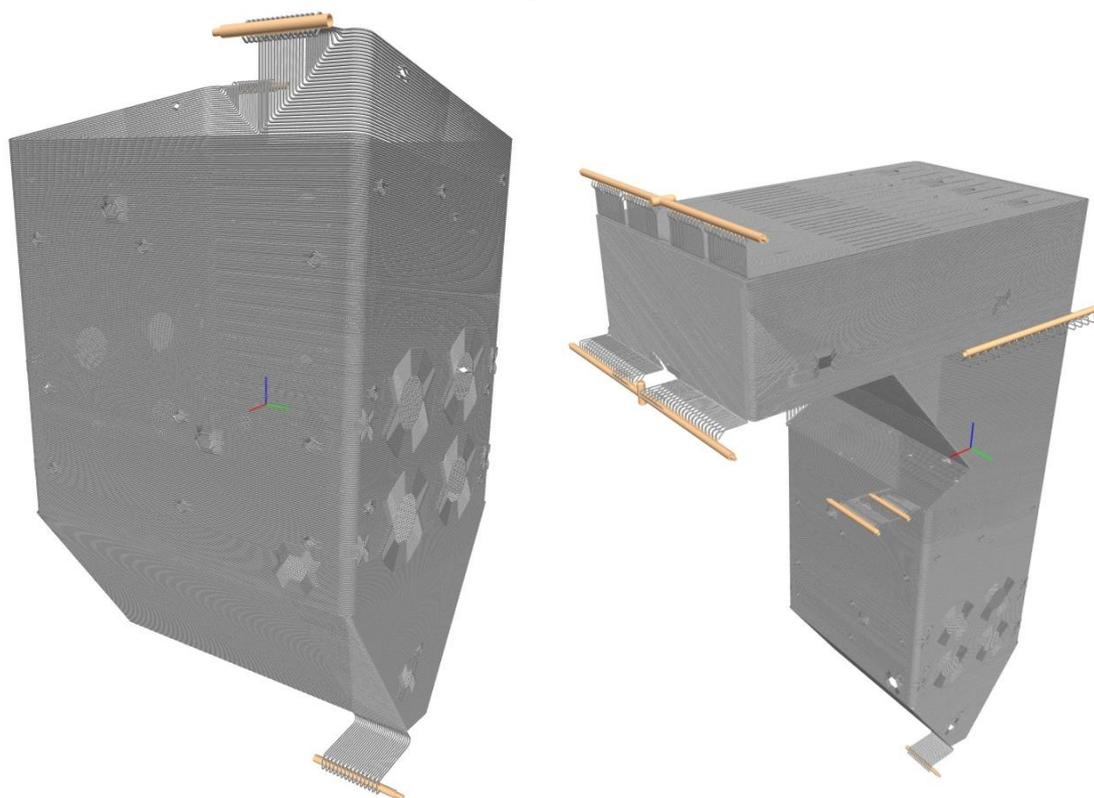


Рис. 9. Сборка зоны НРЧ и полной топки

Принцип трубогиба относительно глобальных координат. Ключевой методологической проблемой при разработке программного обеспечения, основанного на языке последовательных трансформаций «turtle language», является корректное определение операции вращения (гиба) в заданной системе координат. В предложенном подходе каждая последующая трансформация применяется к результату предыдущей, используя накопленную матрицу аффинных преобразований. Это приводит к тому, что операция поворота выполняется в локальной системе координат крайнего преобразования в «turtle language», в то время как исходные данные (например, из проектной документации) заданы, как правило, в глобальной системе.

Для разрешения этого несоответствия возникает математическая задача вывода таких преобразований, которые позволили бы вычислять параметры локального поворота на основе требуемых углов в глобальной системе координат. Итоговая матрица трансформации, полученная произведением вычисленной локальной матрицы на накопленную, должна обеспечивать корректную ориентацию элемента в глобальной системе координат.

Решаемая задача: нахождение локальных углов θ и ϕ , на основе заданных глобально α и β .

Представим результирующую матрицу поворота перед некоторым гибом в виде:

$$MR = \begin{pmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{pmatrix} \quad (1)$$

а матрицу с локальными углами, на которую необходимо умножить MR , в виде:

$$M(\hat{\nu}, \theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta + (1 - \cos \theta)x^2 & (1 - \cos \theta)xy - (\sin \theta)z & (1 - \cos \theta)xz + (\sin \theta)y \\ (1 - \cos \theta)yx + (\sin \theta)z & \cos \theta + (1 - \cos \theta)y^2 & (1 - \cos \theta)yz - (\sin \theta)x \\ (1 - \cos \theta)zx - (\sin \theta)y & (1 - \cos \theta)zy + (\sin \theta)x & \cos \theta + (1 - \cos \theta)z^2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Здесь в основу положены уравнения матрицы поворота вокруг произвольной оси, когда ось вращения задана единичным вектором $\hat{\nu} = (x, y, z)$, а угол поворота θ [12].

Для решения поставленной задачи было введено допущение, упрощающее общий случай. Произвольный гиб в трехмерном пространстве был сведен к вращению в плоскости XY , что позволило определить ось вращения как вектор, ортогональный этой плоскости.

Таким образом, компоненты единичного вектора $\hat{\nu} = (x, y, z)$ принимают вид:

$$x = \cos(\phi), y = \sin(\phi), z = 0.$$

Это упрощение позволяет описать направление гiba одним углом ϕ и устраняет необходимость в анализе компонента z , значительно сокращая вычислительную сложность.

Тогда матрица $M(\hat{\nu}, \theta)$ приобретает вид:

$$M(\hat{\nu}, \theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta + (1 - \cos \theta)x^2 & (1 - \cos \theta)xy & (\sin \theta)y \\ (1 - \cos \theta)yx & \cos \theta + (1 - \cos \theta)y^2 & -(\sin \theta)x \\ -(\sin \theta)y & (\sin \theta)x & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (3)$$

Результирующая матрица после гiba представлена в формуле 4:

$$M_{res} = MR \cdot M(\hat{\nu}, \theta) \quad (4)$$

Заметим, что в матрице $M(\hat{\nu}, \theta)$ ее третий столбец обладает значительно более простой алгебраической формой по сравнению с первыми двумя. В частности, его элементы не содержат тригонометрических функций в высоких степенях. Следовательно, при матричном умножении $MR \cdot M(\hat{\nu}, \theta)$ элементы результирующего третьего столбца также будут иметь выражения меньшей сложности. Выражения для третьего столбца итоговой матрицы имеют вид:

$$M_{[:,2]}^{res} = \begin{pmatrix} (a \cdot y - b \cdot x) \cdot \sin(\theta) + c \cdot \cos(\theta) \\ (-x \cdot e + d \cdot y) \cdot \sin(\theta) + f \cdot \cos(\theta) \\ (g \cdot y - h \cdot x) \cdot \sin(\theta) + i \cdot \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (5)$$

Представление результирующей матрицы после гiba, но уже в углах Эйлера:

$$M_{res}(\alpha, \beta, \gamma) = \begin{pmatrix} \cos \alpha \cos \gamma - \sin \alpha \cos \beta \sin \gamma & -\cos \alpha \sin \gamma - \sin \alpha \cos \beta \cos \gamma & \sin \alpha \sin \beta \\ \sin \alpha \cos \gamma & -\sin \alpha \sin \gamma + \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma & -\cos \alpha \sin \beta \\ \sin \beta \sin \gamma & \sin \beta \cos \gamma & \cos \beta \end{pmatrix} \quad (6)$$

где α, β – углы, заданные глобально.

Поскольку ранее мы условились, что задать положение оси гiba в трехмерном пространстве можно с помощью двух углов, используем для решения уравнения только ячейки с углами прецессии (α) и нутации (β), т.е. ячейки [0,2], [1,2], [0,3].

В результате матричного перемножения получаем компоненты матрицы $M_{[0,2]}^{res}$, $M_{[1,2]}^{res}$, $M_{[2,2]}^{res}$ и приравниваем их к соответствующим компонентам из матрицы $M_{res}(\alpha, \beta, \gamma)$:

$$\begin{cases} \sin \alpha \sin \beta = (a \cdot y - b \cdot x) \cdot \sin(\theta) + c \cdot \cos(\theta) \\ -\cos \alpha \sin \beta = (-x \cdot e + d \cdot y) \cdot \sin(\theta) + f \cdot \cos(\theta) \\ \cos \beta = (g \cdot y - h \cdot x) \cdot \sin(\theta) + i \cdot \cos(\theta) \end{cases} \quad (7)$$

Прямое аналитическое решение для угла φ путем немедленной подстановки $x = \cos(\varphi)$ и $y = \sin(\varphi)$ в уравнения системы приводит к тригонометрическим выражениям высокой сложности, что делает этот подход нерациональным.

Для обхода этой сложности был предложен альтернативный, поэтапный подход к решению системы. На первом этапе компоненты единичного вектора x и y рассматриваются, как независимые неизвестные, наряду с углом θ .

Окончательный вывод формулы для локальных углов содержит компоненты результирующей матрицы поворота предыдущего гiba, для этого присвоим каждому компоненту свой индекс.

Таблица 2. Разложение финальной матрицы поворота предыдущего гiba на ее компоненты

Индекс	Строка матрицы	Столбец матрицы
A	0	0
B	0	1
C	0	2
D	1	0
E	1	1
F	1	2
G	2	0
H	2	1
I	2	2

В результате выводим из этого уравнения углы θ и ϕ :

Угол θ :

$$\theta = -\arccos \left(\frac{((G \cdot E - D \cdot H) \cdot \sin(\alpha) + (B \cdot G - A \cdot H) \cdot \cos(\alpha)) \cdot \sin(\beta)}{(A \cdot I - C \cdot G) \cdot E + (C \cdot D - A \cdot F) \cdot H + B \cdot F \cdot G - B \cdot D \cdot I} + \frac{(B \cdot D - A \cdot E) \cdot \cos(\beta)}{(A \cdot I - C \cdot G) \cdot E + (C \cdot D - A \cdot F) \cdot H + B \cdot F \cdot G - B \cdot D \cdot I} \right) + \pi \quad (8)$$

Угол ϕ :

$$\phi = \arcsin \left(\frac{B \cdot \frac{(\cos(\alpha) \cdot \sin(\beta) + F \cdot \cos(\theta))}{\sin(\theta)} + E \cdot \frac{\sin(\alpha) \cdot \sin(\beta) - C \cdot \cos(\theta)}{\sin(\theta)}}{E \cdot A - B \cdot D} \right) \quad (9)$$

Таким образом, используя операции гiba трубы в двух плоскостях, мы можем перейти из локальной системы координат (полученную в результате накопления матрицы аффинных преобразований) в глобальную, которой необходимо пользоваться инженеру, работающему с чертежами.

Обсуждение результатов. Основными результатами работы являются разработанный программный инструментарий и методология, обеспечивающие автоматизированную генерацию детализированных BIM-моделей котельных агрегатов ТЭС. Ключевое преимущество предложенного подхода заключается в создании не просто визуальных копий, а топологически корректных моделей, готовых для последующего инженерного анализа (CAE) и использования в BIM-цикле [13], а также открывает перспективы использования описательного языка моделей для автоматизированной генерации управляющих программ для CNC bending machine. Принцип работы ЧПУ трубогiba заключается в автоматической

обработке трубы с высокой точностью с помощью числового программного управления (ЧПУ). Сначала труба фиксируется, а затем гидравлическая или электромеханическая система перемещает формовочные ролики и инструменты, изгибая её по заранее заданной программе на языке G-code, в которой указаны все параметры: уголгиба, радиус, расстояние. G-code – условное именование языка программирования устройств с числовым программным управлением (ЧПУ). Учитывая структурное и семантическое сходство между языком трансформаций, используемым в нашей программе (“turtle language”), и языком G-code, разработка конвертера для перевода инструкций моделирования в команды ЧПУ является технически реализуемой задачей без существенных сложностей. Таким образом, предлагаемый подход позволяет эффективно интегрировать управление жизненным циклом продукта с непосредственным производством компонента.

Центральным элементом разработанной методологии является использование последовательных трансформаций и булевых операций над стандартизованными графическими примитивами. Такой подход позволяет с высокой точностью и гибкостью воссоздавать сложные элементы котлоагрегата.

Ярким примером служит моделирование рекуперативного воздухоподогревателя (РВП). В отличие от стандартных трубных блоков, для “куба” РВП вводится дополнительная координатная ось, что позволяет размещать трубы с независимым шагом по осям X и Y, точно отражая их реальное пространственное расположение. Важнейший конструктивный элемент – трубная доска – моделируется путем трансформации примитива “Куб” до требуемых габаритов. Последующее применение булевой операции вычитания позволяет автоматически сгенерировать точную сетку отверстий для развальцовки труб (рисунок 10).

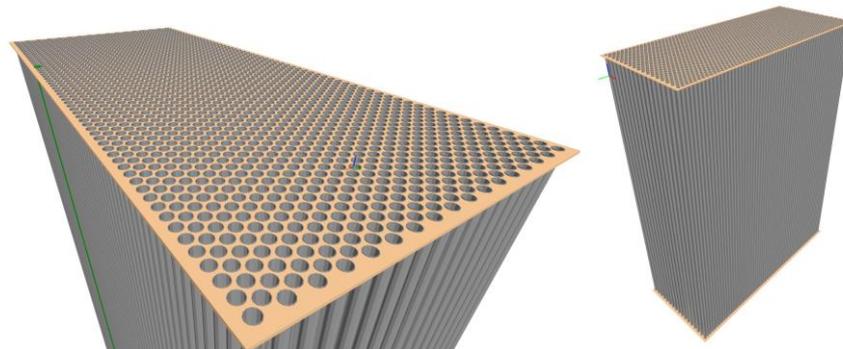


Рис. 10. 3D модель РВП с демонстрацией трубной доски и отверстий

Этот же универсальный принцип – применение булевых операций для создания отверстий – используется при моделировании коллекторов поверхностей нагрева (рисунок 11), что подтверждает гибкость и масштабируемость предложенного метода.

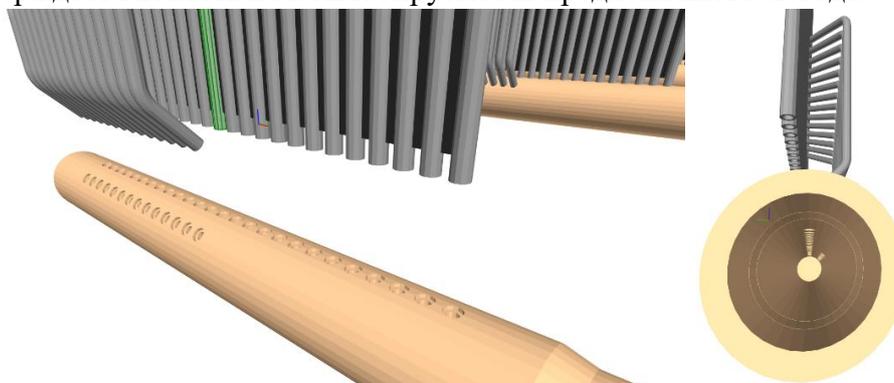


Рис. 11. Демонстрация отверстий в коллекторе в результате применения булевой операции

Помимо этого, инструментарий позволяет формировать блоки поверхностей нагрева из набора отдельных труб, что предусмотрено специальным синтаксисом библиотеки. Это

необходимо для корректного моделирования сложных разводов, которые в реальности выполняются не из цельной трубы, а собираются из отдельных сегментов. Благодаря этому модель точно отражает реальную конструкцию узла (рис. 12).



Рис. 12. Создание блоков поверхностей нагрева из составных труб

Высокая степень детализации и корректность сопряжений элементов (стыков, соединений) (рис. 13) позволяют использовать сгенерированные модели в качестве полноценной основы для моделирования технологических процессов. Модели готовы для импорта в САЕ-системы, такие, как ANSYS, без необходимости дополнительной доработки геометрии. Это открывает возможности для решения широкого круга инженерных задач:

1. Анализ напряженно-деформированного состояния элементов под воздействием температурных и механических нагрузок.
2. Оценка и прогнозирование статистики отказов поверхностей нагрева.
3. Повышение надежности и устойчивости работы котлоагрегата за счет выявления “узких мест” на этапе проектирования или модернизации.

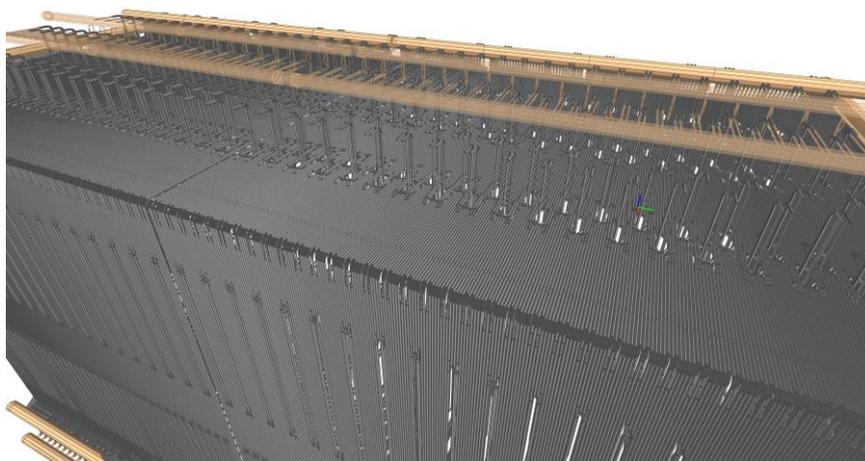


Рис. 13. Обширная сеть разводов труб в потолочном пароперегревателе

Также концепция «массива труб», как специфической геометрии, помимо котельной техники может найти применение во многих отраслях производства. Так, например, эта библиотека может быть применена для создания трубных поверхностей

использующихся в химической, пищевой промышленности, в системах отопления и др.

Помимо инженерных расчетов, созданные BIM-модели являются ценным ресурсом для визуализации. Они могут быть использованы в IFC-совместимых программах просмотра для создания интерактивных ремонтных карт, разработки учебных материалов и тренажеров для обслуживающего персонала, а также для планирования монтажных и демонтажных работ. На

рисунке 14 представлены полномасштабные модели котлов ПК-38 с различными системами шлакоудаления, полностью сгенерированные с помощью разработанного инструментария.

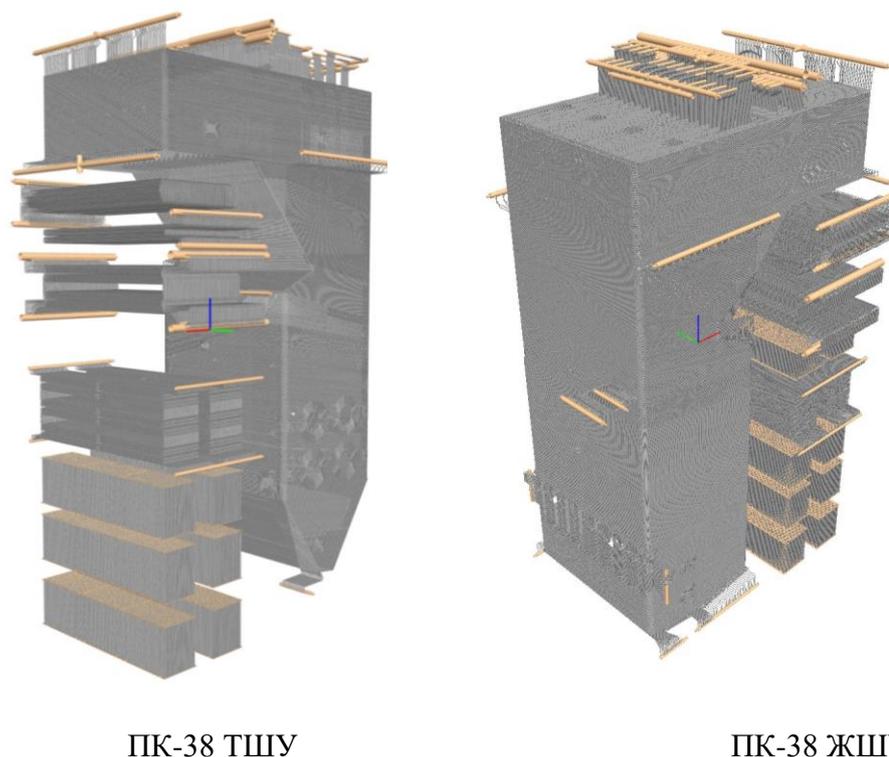


Рис. 14. 3D модели котла, полученная в результате описания геометрии на языке последовательных трансформаций

Заключение. В выполненной работе была успешно решена актуальная научно-практическая задача по автоматизации процесса создания детализированных BIM-моделей поверхностей нагрева котельных агрегатов ТЭС – элемента, на который, согласно статистике, приходится до 70% всех отказов энергоблоков.

В отличие от традиционных подходов, основанных на «ручном» моделировании в коммерческих САПР, была предложена и реализована оригинальная концепция алгоритмической генерации геометрии. Для этого разработан специализированный язык последовательных трансформаций («turtle language»), который формализует описание сложной пространственной геометрии труб на основе данных проектной документации. Практическая реализация концепции выполнена в виде программной библиотеки «IFC_for_TPP» на языке Python, с использованием open-source библиотеки IfcOpenShell.

Ключевые научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработана и обоснована методология алгоритмического BIM-моделирования, которая преодолевает ограничения стандартных программных продуктов при работе со специфической геометрией теплоэнергетического оборудования. Показано, что данный подход кардинально снижает трудоемкость по сравнению с ручным моделированием.
2. Предложен практический программный инструментарий, позволяющий на основе параметрического описания автоматически генерировать сложные узлы котла: от отдельных трубных блоков и коллекторов до комплексных сборок, таких, как топочные экраны, пароперегреватели, РВП и т.д.
3. Полученные BIM-модели в стандартном формате IFC обладают высокой степенью детализации и топологической корректностью. Они являются не конечным продуктом, а готовой основой для решения прикладных инженерных задач: проведения прочностных

и тепловых расчетов в САЕ-системах (ANSYS), планирования ремонтов, а также создания интерактивных обучающих материалов.

4. Сформулирована и обоснована концепция интеграции разработанных моделей в архитектуру «цифрового двойника». Показано, что создаваемая BIM-модель выступает в роли фундаментального компонента комплексной информационной системы, предназначенной для управления жизненным циклом актива, анализа рисков и предиктивного технического обслуживания.

Таким образом, представленная работа вносит существенный вклад в развитие методов цифровизации теплоэнергетической отрасли. Предложенный инструментарий является масштабируемым и эффективным решением для создания ключевого элемента цифровых двойников – высокоточной информационной модели оборудования, что открывает новые возможности для повышения надежности и эффективности эксплуатации котельных агрегатов ТЭС.

Список источников

1. Салов И.В. Применение цифровых двойников и киберфизических систем на объектах генерации тепловой и электрической энергии / И.В. Салов, И.А. Щербатов, Ю.А. Салова // INTERNATIONAL JOURNAL OF OPEN INFORMATION TECHNOLOGIES, 2022. – №3. – С. 57-62.
2. Куприяновский В.П. Цифровые двойники на базе развития технологий BIM, связанные онтологиями, 5G, IoT и смешанной реальностью для использования в инфраструктурных проектах и IFRABIM / В.П. Куприяновский, А.А. Климов, Ю.Н. Воропаев и др. // INTERNATIONAL JOURNAL OF OPEN INFORMATION TECHNOLOGIES, 2020. – №3. – С. 55-72.
3. Еремин А.В. Общие сведения о применении визуального проектирования при BIM проектировании / А.В. Еремин, А.В. Седова, Ф.М. Абрамов и др. // Высокие технологии в строительном комплексе, 2024. – №1. – С. 12-14.
4. Бойко Е.А. Риск-ориентированное управление техническим состоянием технологического оборудования тепловых электростанций / Е.А. Бойко, А.В. Бобров, П.В. Шишмарев и др. // Сибирский федеральный университет. – Красноярск: ИПЦ СФУ, 2021. – 352 с.
5. Молчанова С.М. BIM как инструмент информационного моделирования при реализации проектов в строительной отрасли / С.М. Молчанова // Международный научно-исследовательский журнал, 2024. – №7 (145). – С. 1-4. – DOI: 10.60797/IRJ.2024.145.180.
6. Merz, K., Chabaud V., Garcia-Rosa P.B., Kolle K. A hierarchical supervisory wind power plant controller, Journal of Physics: Conference Serie, 2018, DOI:10.1088/1742-6596/2018/1/012026.
7. Кусмарцева С.Е. Применение BIM-и CFD-моделей для разработки инженерных решений / С.Е. Кусмарцева, А.С. Мальчугов, Р.И. Хазиев и др. // Энергетик, 2024. – №10. – С. 45-47.
8. Бойко Е.А. Система диагностики и управления техническим состоянием объектов теплоэнергетики на основе цифровых двойников / Е.А. Бойко, К.В. Лебедев // Энергобезопасность и энергосбережение, 2024. – №3. – С. 74-85.
9. Воропай Н.И. ИТ-инфраструктура для построения интеллектуальных систем управления развитием и функционированием систем энергетики на основе цифровых двойников и цифровых образов / Н.И. Воропай, Л.В. Массель, И.Н. Колосок и др. // Известия РАН. Энергетика, 2021. – №1. – С. 3-13.
10. Конопацкий Е.В. Геометрическое представление элементов строительных конструкций в формате IFC / Е.В. Конопацкий, М.В. Безсольников, Н.Д. Чучмар // Материалы VIII Международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2025. – Информационное моделирование в задачах строительства и архитектуры. – С. 122-128.
11. Свидетельство № 2025663784 Российская Федерация, Роспатент. Программа автоматизированного проектирования BIM-моделей котельных агрегатов ТЭС: № 2025661600: заявл. 13.05.2025: опубл. 30.05.2025 / Бойко Е. А., Лебедев К. В., Бобров А.В., Куличкин А.П., Лойко В.П.; заявитель СФУ. – 10 с.
12. Balakrishnan, V. How is a Vector Rotated, Resonance Journal of Science Education, 1999, v.4, pp. 61-68.
13. Горшков А.М. Внедрение BIM технологий в строительство / А.М. Горшков, С.А. Железнов, Р.А. Лемешко и др. // Alfabuild, 2019. – №4 (11). – С 70-81.

Лебедев Константин Викторович. Аспирант кафедры тепловых электрических станций политехнического института Сибирского федерального университета. AuthorID: 1227626, SPIN: 5984-7783, ORCID 0009-0006-3653-8330. klebedev@sfu-kras.ru. Россия, Красноярский край, г. Красноярск, ул. Киренского, д. 26.

Бойко Евгений Анатольевич. Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой тепловых электрических станций политехнического института Сибирского федерального университета. Термический анализ углей, способы подготовки и сжигания твердых органических топлив, математическое моделирование теплоэнергетических процессов и устройств. AuthorID: 41902, SPIN: 6048-9742, ORCID: 0009-0007 8278-0854. eboiko@sfu-kras.ru. Россия, Красноярский край, г. Красноярск, ул. Киренского, д. 26.

Куличкин Алексей Павлович. Аспирант кафедры тепловых электрических станций политехнического института Сибирского федерального университета. AuthorID: 1320519, SPIN: 9061-9799, ORCID: 0009-0004-7767-123X. akulichkin@sfu-kras.ru. Россия, Красноярский край, г. Красноярск, ул. Киренского, д. 26.

Лойко Владимир Павлович. Инженер кафедры тепловых электрических станций политехнического института Сибирского федерального университета. AuthorID: 1311748, SPIN: 3832-9954, ORCID 0009-0005-1740-8277. VLoiko@sfu-kras.ru. Россия, Красноярский край, г. Красноярск, ул. Киренского, д. 26.

Бобров Алексей Васильевич. Кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций политехнического института Сибирского федерального университета. Теплоэнергетика, электроэнергетика, возобновляемые источники энергии. AuthorID: 74282, SPIN: 9291-0753, ORCID: 0009-0009-5200-6301. avbobrov@sfu-kras.ru. Россия, Красноярский край, г. Красноярск, ул. Киренского, д. 26.

Новицкий Дмитрий Александрович. Кандидат физико-математических наук, ООО «Сибирская генерирующая компания», Руководитель направления оптимизационного моделирования и стандартов. AuthorID: 25909, SPIN: 7365-7630, ORCID: 0000-0002-2830-0406. NovitskiiDA@sibgenco.ru. Россия, 115054, г. Москва, Дубининская, 53с5.

Посохов Юрий Михайлович. Кандидат технических наук, ООО «Сибирская генерирующая компания», руководитель направления моделирования систем и ИИ. Искусственный интеллект, кибер-физические системы. AuthorID: 413774, SPIN: 5717-8951, ORCID: 0000-0002-3570-4337. PosokhovIuM@sibgenco.ru. Россия, 115054, г. Москва, Дубининская, 53с5.

UDC 004.41:620.4:620.9

DOI:10.25729/ESI.2026.41.1.008

Algorithmic BIM modeling of steam boiler heating surfaces of power plants

Konstantin V. Lebedev¹, Evgeny A. Boiko¹, Aleksey P. Kulichkin¹, Vladimir P. Loiko¹, Aleksey V. Bobrov¹, Dmitry A. Novitsky², Yuri M. Posokhov²

¹Siberian Federal University, Russia, Krasnoyarsk, klebedev@sfu-kras.ru

²Siberian Generating Company LLC, Russia, Moscow

Abstract. The article presents the experience of creating BIM models of thermal power plant boilers, as well as the features of modeling individual elements of a boiler unit. It examines the failure statistics of thermal power equipment and provides a comparative analysis of various boiler equipment elements and heating surfaces. Based on these data, a comparative assessment of the reliability of various boiler unit elements was carried out, which justifies the relevance of detailed modeling of heating surfaces. It is shown that the BIM model is not an end product, but an integral component of a comprehensive information system. In this regard, a concept for integrating the developed models into the structure of a “digital twin” for use in life cycle management and maintenance systems for energy assets is proposed. The technological and algorithmic aspects of creating models for each heating surface and node are described. An algorithmic approach to constructing the geometry of boiler equipment elements is proposed, based on the formalization of modeling operations in the form of a specialized language of sequential transformations (“turtle language”). This language describes a sequence of operations for stretching, rotating, and spatially transforming pipe elements, which allows the complex spatial configuration of heating surfaces to be reproduced based on parametric data from the design documentation. The practical implementation of the approach is carried out in the form of a software library in Python using open tools for forming IFC models, ensuring compatibility with BIM environments and engineering analysis systems. The paper presents a mathematical apparatus for coordinate transformation and algorithms for transitioning from local coordinate systems to a global model system, ensuring correct positioning of elements during sequential transformations. The

developed toolkit allows automatic generation of detailed three-dimensional models of boiler units, suitable for subsequent use in CAE calculations, equipment condition monitoring systems, repair planning, and personnel training. The results obtained demonstrate the effectiveness of the proposed approach and its potential for use in the creation of digital twins of thermal power facilities and the development of equipment condition monitoring systems.

Keywords: BIM modeling, heating surfaces, boiler unit, digital twin, solid modeling, asset management, electronic repair form

References

1. Salov I.V., Shcherbatov I.A., Salova J.A. Primenenie cifrovyyh dvoynikov i kiberfizicheskikh sistem na ob'ektakh generacii teplovoj i elektricheskoy energii [Application of digital twins and cyber-physical systems at thermal and electric power generation facilities]. INTERNATIONAL JOURNAL OF OPEN INFORMATION TECHNOLOGIES, 2022, no. 3, pp. 57-62.
2. Kupriyanovskij V.P., Klimov A.A., Voropaev J.N. et al. Cifrovye dvoyniki na baze razvitiya tekhnologij BIM, svyazannye ontologiyami, 5G, IoT i smeshannoj real'nost'yu dlya ispol'zovaniya v infrastrukturyh proektah i IFRABIM [Digital twins based on the development of BIM technologies, linked by ontologies, 5G, IoT and mixed reality for use in infrastructure projects and IFRABIM]. INTERNATIONAL JOURNAL OF OPEN INFORMATION TECHNOLOGIES, 2020, no. 3, pp. 55-72.
3. Eremin A.V., Sedova A.V., Abramov F.M. et al. Obshchie svedeniya o primenenii vizual'nogo proektirovaniya pri BIM proektirovanii [General information about the application of visual design in BIM design]. High technologies in the construction complex, 2024, no. 1, pp. 12-14.
4. Boiko E.A., Bobrov A.V., Shishmarev P.V. et al. Risk-orientirovannoe upravlenie tekhnicheskim sostoyaniem tekhnologicheskogo oborudovaniya teplovyh elektrostancij [Risk-based management of the technical condition of process equipment at thermal power plants]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University, 2021, 352 p.
5. Molchanova S.M. BIM kak instrument informacionnogo modelirovaniya pri realizacii proektov v stroitel'noj otrasli [BIM as a tool for information modeling in the implementation of projects in the construction industry]. International research journal, 2024, no. 7 (145), pp. 1-4, DOI: 10.60797/IRJ.2024.145.180.
6. Merz, K., Chabaud V., Garcia-Rosa P.B., Kolle K. A hierarchical supervisory wind power plant controller, Journal of Physics: Conference Serie, 2018. – DOI: 10.1088/1742-6596/2018/1/012026.
7. Kusmarceva S.E., Mal'chugov A.S., Haziev R.I. et al. Primenenie BIM-i CFD-modelej dlya razrabotki inzhenernyh reshenij [Using BIM and CFD models to develop engineering solutions]. Energetik, 2024, no. 10, pp. 45-47.
8. Boiko E.A., Lebedev K.V. Sistema diagnostiki i upravleniya tekhnicheskim sostoyaniem ob'ektov teploenergetiki na osnove cifrovyyh dvoynikov [Digital twin-based system for diagnostics and control of thermal power equipment]. Energy security and energy saving, 2024, no. 3, pp. 74-85.
9. Voropaj N.I., Massel' L.V., Kolosok I.N., Massel' A.G. IT-infrastruktura dlya postroeniya intellektual'nyh sistem upravleniya razvitiem i funkcionirovaniem sistem energetiki na osnove cifrovyyh dvoynikov i cifrovyyh obrazov [IT infrastructure for building intelligent systems for managing the development and operation of energy systems based on digital twins and digital images]. Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Energy, 2021, no. 1, pp. 3-13.
10. Konopackij E.V., Bezol'nov M.V., Chuchmar N.D. Geometricheskoe predstavlenie elementov stroitel'nyh konstrukcij v formate IFC [Geometric representation of building structure elements in IFC format], Materialy VIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii (Sankt-Peterburg, 2025) [Materialy VIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii (Saint Petersburg, 2025)]. Saint Petersburg, 2025, pp. 122-128.
11. Boiko E.A., Lebedev K.V., Bobrov A.V. et al. Programma avtomatizirovannogo proektirovaniya BIM-modelej kotel'nyh agregatov TES [BIM-modeling software for thermal power plant boiler units]. Certificate Rossiiskaia Federatsiia no. 2025663784 (2025).
12. Balakrishnan, V. How is a Vector Rotated, Resonance Journal of Science Education, 1999, v.4, pp. 61-68.
13. Gorshkov A.M., Zhelezov S.A., Lemeshko R.A. et al. Vnedrenie BIM tekhnologij v stroitel'stvo [Implementation of BIM technologies in construction]. Alfabuild, 2019, no. 4 (11), pp. 70-81.

Lebedev Konstantin Viktorovich. Postgraduate student at the Department of Thermal Power Plants at the Polytechnic Institute of the Siberian Federal University. AuthorID: 1227626, SPIN: 5984-7783, ORCID 0009-0006-3653-8330. klebedev@sfu-kras.ru. Russia, Krasnoyarsk, st. Kirensky, 26.

Boiko Evgeny Anatolyevich. Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Thermal Power Plants Department at the Polytechnic Institute of Siberian Federal University. Thermal analysis of coals, methods of preparation and combustion of solid organic fuels, mathematical modeling of thermal energy processes and devices. AuthorID: 41902, SPIN: 6048-9742, ORCID: 0009-0007 8278-0854. eboiko@sfu-kras.ru. Russia, Krasnoyarsk, st. Kirensky, 26.

Kulichkin Aleksey Pavlovich. Postgraduate student in the Department of Thermal Power Plants at the Polytechnic Institute of Siberian Federal University. AuthorID: 1320519, SPIN: 9061-9799, ORCID: 0009-0004-7767-123X. akulichkin@sfu-kras.ru. Russia, Krasnoyarsk, st. Kirensky, 26.

Loiko Vladimir Pavlovich. Engineer in the Department of Thermal Power Plants at the Polytechnic Institute of Siberian Federal University. AuthorID: 1311748, SPIN: 3832-9954, ORCID: 0009-0005-1740-8277. VLoyko@sfu-kras.ru. Russia, Krasnoyarsk, st. Kirensky, 26.

Bobrov Aleksey Vasilyevich. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Thermal Power Plants at the Polytechnic Institute of Siberian Federal University. Thermal power engineering, electric power engineering, renewable energy sources. AuthorID: 74282, SPIN: 9291-0753, ORCID: 0009-0009-5200-6301. avbobrov@sfu-kras.ru. Russia, Krasnoyarsk, st. Kirensky, 26.

Novitsky Dmitry Aleksandrovich. Siberian Generating Company LLC, PhD in Physics. Head of optimization modelling and standards. AuthorID: 25909, SPIN: 7365-7630, ORCID: 0000-0002-2830-0406. NovitskiiDA@sibgenco.ru. Russia, Moscow, Dubininskaya str., 53c5.

Posokhov Yuri Mikhailovich. Siberian Generating Company LLC, PhD in Engineering. Head of System Modelling and AI. Artificial Intelligence, cyber-physical systems, quantitative structure-property relationships. AuthorID: 413774, SPIN: 5717-8951, ORCID: 0000-0002-3570-4337. PosokhovIuM@sibgenco.ru. Russia, Moscow, Dubininskaya str., 53c5.

Статья поступила в редакцию 10.10.2025; одобрена после рецензирования 20.10.2025; принята к публикации 06.02.2026.

The article was submitted 10/10/2025; approved after reviewing 10/20/2025; accepted for publication 02/06/2026.