

УДК 681.5

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВОК НА МОДУЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЕ С АДАПТИВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ И КОНСТРУИРОВАНИИ

Коломыченко А. А.¹, студент гр. 12002496, IV курс

Научный руководитель: Коськин А. В.², д.т.н., профессор

¹Белгородский государственный национальный исследовательский
университет

г. Белгород

²Орловский государственный технический университет
имени И.С. Тургенева, г. Орел

Проектирование теплогенерирующих установок (ТГУ) представляет собой многокритериальную задачу, требующую учёта теплотехнических характеристик помещения, совместимости компонентов, нормативных требований и экономических факторов. Традиционный подход, основанный на ручном подборе оборудования по каталогам и расчётам в табличных процессорах, характеризуется высокой трудоёмкостью (2-4 часа на один проект) и риском возникновения ошибок из-за человеческого фактора [1].

Целью данной работы является разработка и описание программного комплекса, автоматизирующего процесс проектирования ТГУ за счёт интеграции базы данных компонентов, алгоритмов конфигурирования и модуля теплотехнического расчёта. Научная новизна заключается в формализации правил совместимости компонентов ТГУ в виде программной архитектуры и реализации алгоритма поиска оптимальной конфигурации по заданным критериям.

Практическая значимость работы состоит в возможности применения разработанного решения как в образовательной среде (лабораторные работы по дисциплинам «Теплотехника», «Автоматизация проектирования»), так и в производственной практике конструкторских бюро и инженерных служб предприятий.

Вопросам автоматизации проектирования инженерных систем посвящено значительное количество исследований [4, 5]. Концепции САПР, такие как ANSYS Fluent, SolidWorks Flow Simulation [2] и COMSOL Multiphysics [3], предоставляют мощные средства численного моделирования, однако требуют высокой квалификации пользователя, значительных вычислительных ресурсов и не ориентированы на быстрый подбор комплектующих из каталога.

Отечественные разработки, включая программные комплексы «Поток» и «Эксперт-Тепло» [6], фокусируются на гидравлических и тепловых расчётах, но

не реализуют механизм автоматической конфигурации системы из дискретных компонентов.

В работах [8, 9] рассматриваются подходы к применению экспертных систем в инженерии, однако их практическая реализация часто ограничивается узкими предметными областями. Современные исследования подчёркивают перспективность использования онтологий и графовых моделей для представления знаний о совместимости технических компонентов.

Таким образом, существует потребность в легковесном, адаптируемом программном решении, сочетающем удобство интерфейса, гибкость базы компонентов и точность инженерных расчётов - именно эту нишу занимает разрабатываемый комплекс.

Функциональные требования системы

- Ввод данных: пользователь задаёт параметры помещения и характеристики ТГУ.

- Автоматическая конфигурация: система формирует рабочую конфигурацию из базы данных с учётом совместимости.

- Ручное редактирование: пользователь заменяет компоненты, система валидирует изменения.

- Создание с нуля: последовательное добавление компонентов с визуализацией.

- Администрирование: управление компонентами базы данных.

- Экспорт: спецификация, схема сборки, расчётная записка, смета в PDF, DOCX, XLSX.

Нефункциональные требования системы

- **Время отклика интерфейса ≤ 2 с при локальной базе, ≤ 5 с при облачном доступе;**

- Масштабируемость базы данных до 10 000+ компонентов;

- Поддержка многопользовательского режима с разграничением прав доступа;

Общая схема программного комплекса

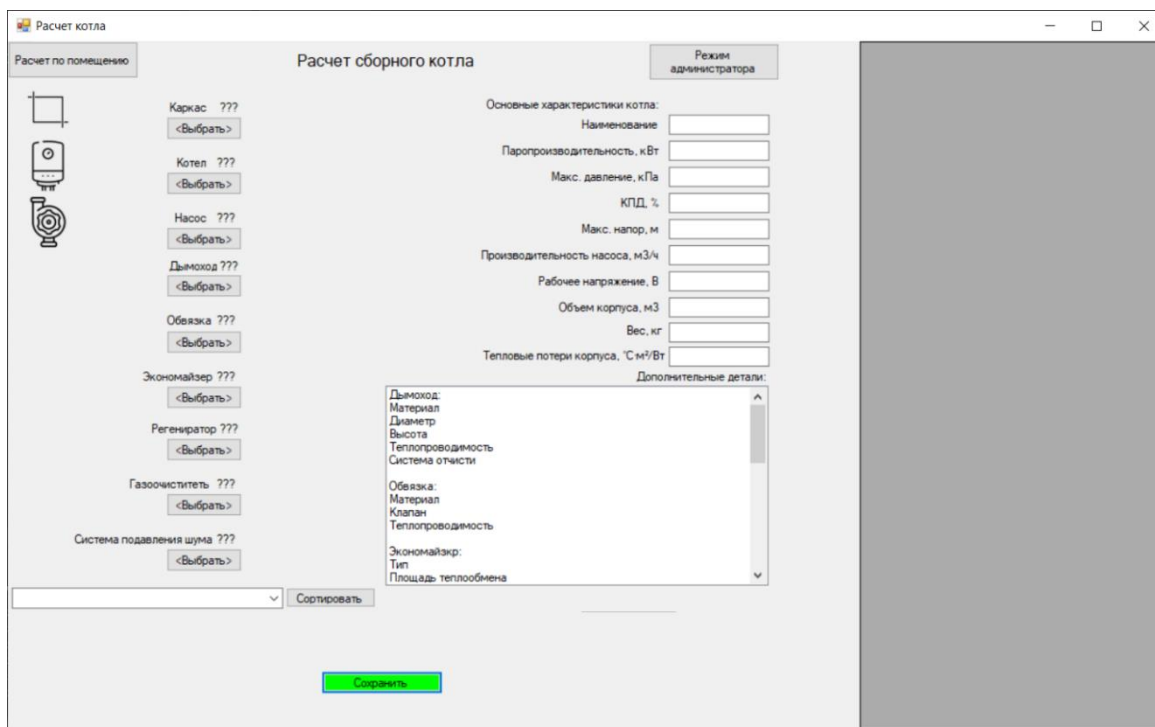


Рисунок 1 - Главное окно программы

Основное окно программы «Расчет котла» позволяет пользователю самостоятельно спроектировать котел, выбирая необходимые компоненты из предложенного списка. После этого нужно указать название новой теплогенерирующей установки и сохранить ее параметры и перечень используемых деталей. При наличии соответствующих прав пользователь также может войти в режим администратора.

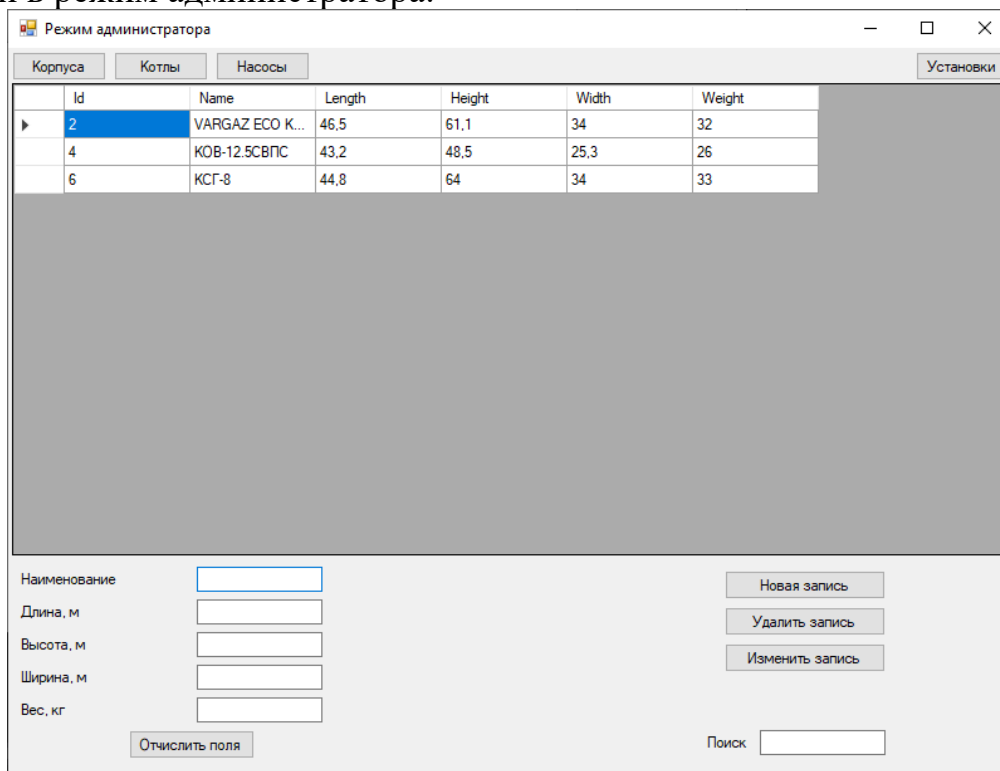


Рисунок 2 - Окно режима администратора

Окно режима администратора позволяет пользователю с соответствующими правами добавлять, удалять и модифицировать данные в таблицах базы, где хранятся параметры всех элементов и комплектных теплогенерирующих систем.

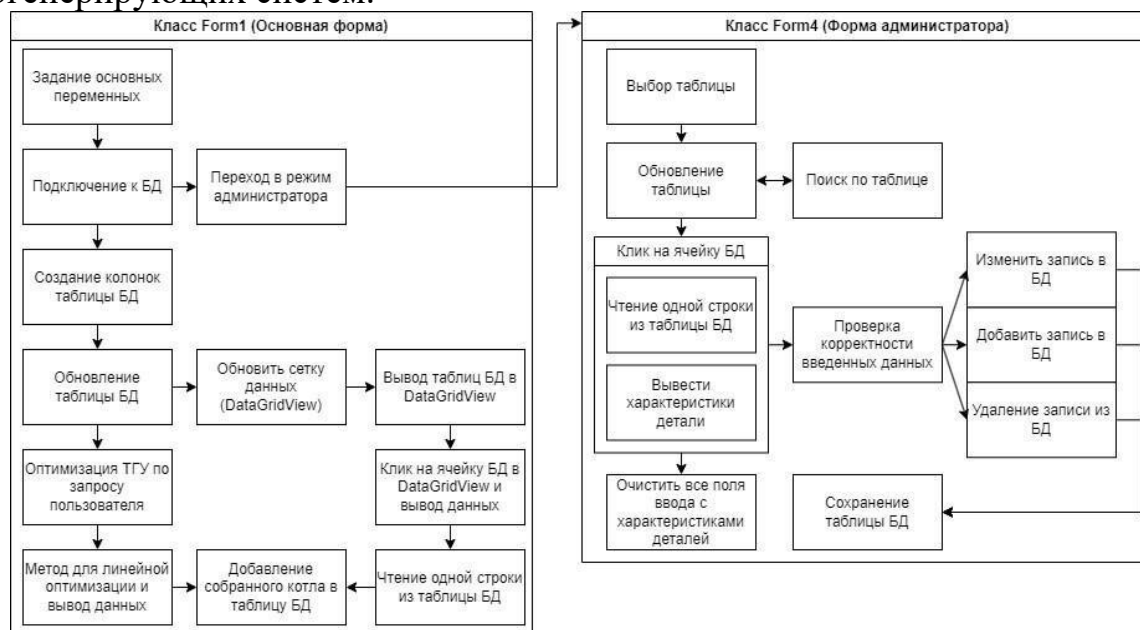


Рисунок 3. - Архитектура программного комплекса

Для подключения к приложению была использована база данных MySQL, а также phpMyAdmin для их удобного редактирования.

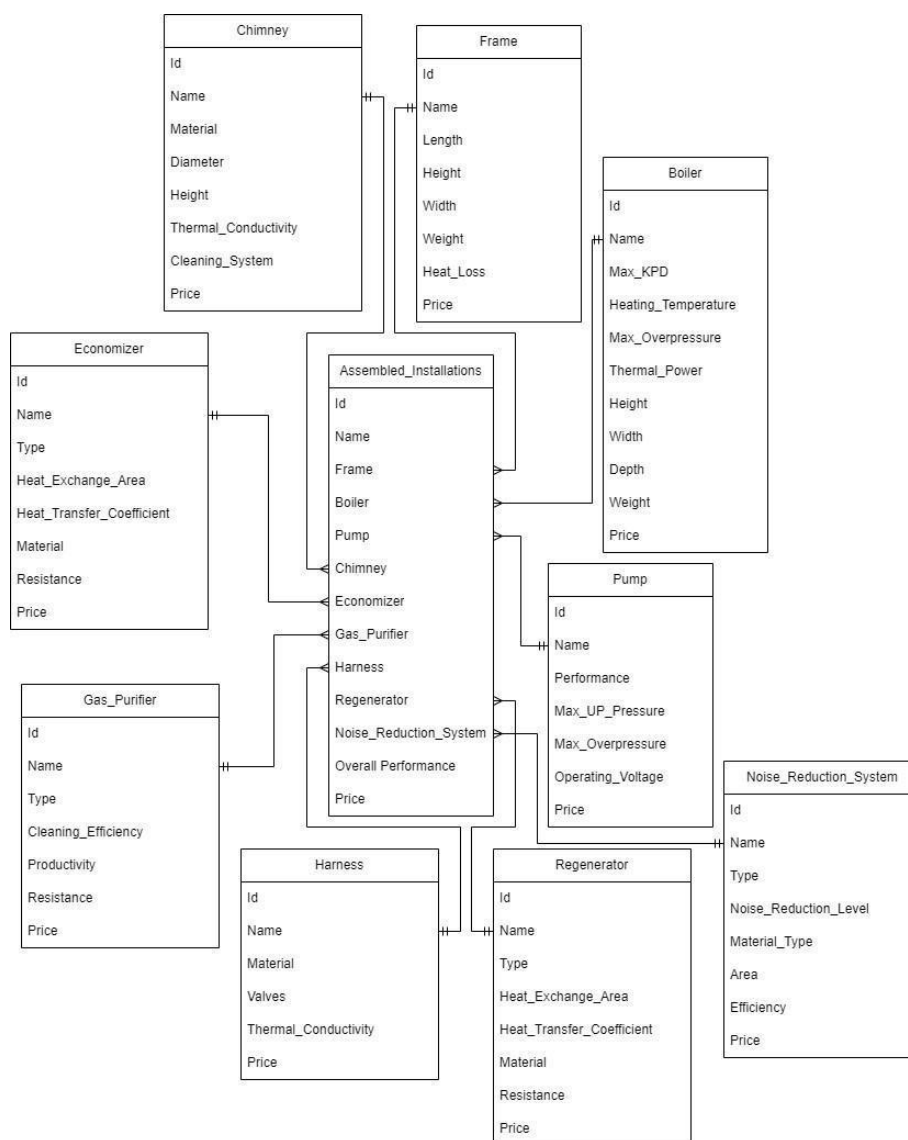


Рисунок 4 - структура базы данных

Процесс автоматической сборки ТГУ реализован в виде многоэтапного алгоритма (рис. 2):

1. Расчёт тепловой нагрузки по методике СП 60.13330.2020 [7]:

$$Q = \frac{V \times \Delta T \times k}{3600}$$

где:

V - объём помещения (м³),

ΔT - расчётная разность температур (°C),

k - коэффициент теплопередачи ограждающих конструкций (Вт/м²·°C)

- Фильтрация компонентов: выбор подмножества компонентов, удовлетворяющих базовым критериям (тип топлива, диапазон мощности, габаритные ограничения).

- Эвристический поиск конфигурации: применяется алгоритм с функцией оценки:

$$f(n) = \alpha \cdot C(n) + \beta \cdot E(n) + \gamma \cdot S(n),$$

где

C - стоимость конфигурации,

E - энергоэффективность (КПД),

S - компактность (суммарный объём),

α, β, γ - весовые коэффициенты, настраиваемые пользователем

Расчётный модуль реализует:

- Определение теплотерь через ограждающие конструкции с учётом коэффициентов теплопередачи материалов;
- Учёт инфильтрации и вентиляции по СП 60.13330;
- Корректировку мощности ТГУ с учётом коэффициента запаса (1.1-1.3) и режима эксплуатации (непрерывный/периодический);
- Верификацию результатов путём сравнения с эталонными расчётами в Excel-шаблонах, используемых в проектной практике.

Проект разработан с использованием современных технологий для обеспечения надёжности, производительности и удобства использования. Бэкенд написан на C# с использованием ASP.NET Core, а фронтенд - на Web Forms. СУБД - MySQL для хранения данных. Контейнеризация осуществляется с помощью Docker. Тестирование проводится с помощью xUnit.

Сценарий работы пользователя

Шаг 1. Ввод параметров помещения

Пользователь заполняет форму: объём 150 м³, стены - кирпич ($k=1.2$ Вт/м²·°С), потолок - ж/б плита с утеплением ($k=0.8$), остекление - двойное, климатическая зона - Иркутск ($\Delta T=45^\circ\text{C}$).

Шаг 2. Расчёт и генерация конфигурации

Система рассчитывает теплотери: $Q \approx 43.2$ кВт, с запасом – 47.5 кВт. Алгоритм конфигурирования предлагает оптимальную сборку:

- Горелка газовая «ГГ-50» (мощность 50 кВт, КПД 92%);
- Теплообменник пластинчатый «ТП-45» (рабочее давление 6 бар);
- Циркуляционный насос «Grundfos UPS 32-60»;
- Автоматика управления «Овен-ТГУ-М».

Шаг 3. Ручная корректировка

Пользователь заменяет горелку на аналог другого производителя. Система проверяет совместимость по правилам:

```
{  
  "requires": ["gas_pressure_3kPa", "flue_diameter_120mm"],  
  "conflicts": ["heat_exchanger_TP-30"]  
}
```

При нарушении правил выводится предупреждение с рекомендациями.

Административная панель позволяет:

- Добавлять новые компоненты через форму с валидацией обязательных полей;

- Редактировать правила совместимости с визуальным редактором графов;
- Импортировать данные из CSV/Excel-каталогов производителей;
- Просматривать логи изменений и откатывать правки при необходимости.

Сценарии использования программного обеспечения на кафедрах теплоэнергетики включают в себя лабораторные работы, практикумы и курсовое проектирование. Например, в лабораторной работе «Расчёт тепловой нагрузки помещения» студенты вводят параметры учебной аудитории, а программа рассчитывает теплопотери и сравнивает результат с ручным расчётом, что помогает закрепить методику СП 60.13330 и развить навыки работы с нормативной базой. В практикуме «Конфигурирование инженерных систем» студенты собирают ТГУ для заданных условий с ограничением по бюджету, программа проверяет совместимость компонентов и корректность выбора, а также формирует автоматизированный отчёт для оценки преподавателем. В курсовом проектировании студенты создают полноценный проект ТГУ, включая расчёт нагрузки и экспорт спецификации, что позволяет сравнивать несколько вариантов конфигурации по критериям эффективности и стоимости. Преподаватели могут создавать типовые задания и эталонные решения, вести журнал успеваемости, фиксируя время выполнения, количество ошибок и выбранные конфигурации, а также экспортировать результаты в LMS (Moodle, Canvas), что снижает нагрузку на преподавателя за счёт автоматической проверки, визуализирует связи между параметрами и даёт возможность моделировать «что, если» без риска ошибки в реальном проекте, подготавливая студентов к работе с современными CAE/CAD-инструментами.

Преимущества для учебного процесса:

- Снижение нагрузки на преподавателя за счёт автоматической проверки совместимости компонентов;
- Визуализация связей между параметрами помещения и составом оборудования;
- Возможность моделирования «что, если» без риска ошибки в реальном проекте;
- Подготовка студентов к работе с современными CAE/CAD-инструментами.

Перспективы развития

- Интеграция с BIM-платформами: экспорт конфигурации ТГУ в форматы IFC/RVT для использования в комплексных проектах зданий.
- Облачная синхронизация баз: возможность обмена актуальными каталогами компонентов между организациями через защищённый API.
- Расширение предметной области: адаптация алгоритмов конфигурирования для систем вентиляции, горячего водоснабжения, котельных модульной конструкции.
- Образовательный модуль: добавление режима «обучение» с пошаговыми подсказками, тестами и эталонными решениями для использования в лабораторном практикуме.

- Машинное обучение: применение рекомендательных алгоритмов для предсказания оптимальных конфигураций на основе исторических данных проектов.

Заключение

В ходе работы разработан и протестирован программный комплекс автоматизированного проектирования теплогенерирующих установок, решающий задачу ускорения и повышения точности подбора оборудования. Ключевыми преимуществами решения являются:

- Модульная архитектура, обеспечивающая гибкость и масштабируемость;
- Алгоритм конфигурирования на основе правил совместимости, формализованных в виде графовой модели;
- Интеграция теплотехнического расчёта по нормативным методикам с базой компонентов;
- Удобный интерфейс, адаптированный как для образовательных, так и для производственных задач.

Результаты тестирования подтверждают сокращение времени проектирования при сохранении высокой точности расчётов. Разработанный комплекс может быть рекомендован к внедрению в учебный процесс технических вузов и в практику конструкторских подразделений предприятий теплоэнергетического профиля.

Список литературы:

1. Соколов, Е. Я. Теплоснабжение и тепловые сети / Е. Я. Соколов // М. : Издательство МЭИ. - 2021. - 472 с. - Режим доступа: <https://djvu.online/file/yBSJ1UTegZkMa>.
2. Matsson, O. J. E. An Introduction to SOLIDWORKS Flow Simulation / O. J. E. Matsson. // SDC Publications. - 2024. - 402 p. - Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/383087319_An_Introduction_to_SOLIDWORKS_Flow_Simulation_2024.
3. Алексеев, В. Ф. Моделирование Джоулева нагрева в среде COMSOL Multiphysics / В. Ф. Алексеев, Г. А. Пискун, Д. В. Калиновский, И. А. Ивлиев // Доклады БГУИР. - 2018. - № 7. - С. 90-95. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-dzhouleva-nagreva-v-srede-comsol-multiphysics> (дата обращения: 16.03.2026).
4. Гаврилова, Т. А. Базы знаний интеллектуальных систем / Т. А. Гаврилова, В. Ф. Хорошевский // СПб. : Питер. - 2001. - 384 с. - Режим доступа: <https://studfile.net/preview/9750104/>.
5. Jackson, P. Introduction to Expert Systems / P. Jackson // Addison-Wesley. - 1999. - 542 p. - Режим доступа: https://books.google.ru/books?id=9rJQAAAAMAAJ&source=gbs_ViewAPI&redir_esc=y.
6. Ernadote, D. Ontology-Based Pattern for System Engineering / D. Ernadote // 2017 ACM/IEEE 20th International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems (MODELS). - 2017. - P. 248-258. - Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/320971358_Ontology-Based_Pattern_for_System_Engineering.
7. СП 60.13330.2020. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха : актуализированная редакция СНиП 41-01-2003 / Минстрой России. - М. : Минстрой России, 2020. - 157 с. - Режим доступа: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/120025/>.
8. Brooke, J. SUS: A retrospective / J. Brooke // Journal of Usability Studies. - 2013. - Vol. 8. - № 2. - P. 29-40. - Режим доступа: https://uxpajournal.org/wp-content/uploads/sites/7/pdf/JUS_Brooke_February_2013.pdf.
9. Виноградова, М. В. Обзор системы полнотекстового поиска в постреляционной базе данных PostgreSQL / М. В. Виноградова, Е. С. Барашкова, И. С. Березин, М. Г. Ореликов, Д. С. Лузин // E-Scio. - 2020. - № 5. - С. 754-778. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-sistemy-polnotekstovogo-poiska-v-postrelyatsionnoy-baze-dannyh-postgresql>.