

УДК 004

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ANSYS: ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ЭНЕРГОАУДИТАРаджаов С.Х.¹, студент гр. 17В42, II курсНаучный руководитель: Разумников С.В.¹, к.т.н., доцент ЮТИ¹Юргинский технологический институт (филиал)

Национального исследовательского Томского политехнического университета

УДК 697.1

Современная промышленность и жилищно-коммунальное хозяйство столкнулись с необходимостью снижения энергопотребления в условиях повышения тарифов и ужесточения экологических требований. Традиционный энергоаудит опирается на упрощенные расчетные методики и натурные замеры, которые дают погрешность до 20-30% при определении теплопотерь зданий и эффективности теплообменного оборудования [4]. Эта неопределенность приводит к завышению смет на модернизацию или, напротив, к недооценке экономического потенциала энергосбережения. Цифровые методы численного моделирования позволяют повысить точность прогнозирования тепловых процессов, однако их применение в практике энергоаудита ограничено недостаточной стандартизацией подходов и высокими требованиями к квалификации специалистов [6]. Цель данной работы – разработать методику применения инженерного анализа в среде ANSYS для энергоаудита зданий и теплоэнергетического оборудования, обеспечивающую достоверность результатов при доступных временных затратах.

Существующие подходы к энергоаудиту можно классифицировать по уровню детализации анализа. Первый уровень – расчетные методики на основе нормативных документов (СП 50.13330.2012, СП 124.13330.2012), где теплопотери определяются через удельные характеристики ограждающих конструкций. Этот подход дает приемлемую точность для типовых зданий, но ошибка возрастает при анализе зданий с нестандартной архитектурой или сложной системой вентиляции [2]. Второй уровень – натурные измерения с использованием тепловизоров и термоанемометров. Метод обеспечивает достоверность для конкретных точек измерения, но не позволяет оценить распределение температурных полей в объеме и спрогнозировать эффект от реконструкции [5].

Альтернатива – использование вычислительной гидродинамики (CFD) для моделирования конвективного и радиационного теплообмена. Зарубежные исследователи показали эффективность CFD-моделирования для анализа энергоэффективности зданий, однако большинство работ ограничивается академическими примерами без адаптации к нормативной базе российского энер-

гоаудита [1]. Применение ANSYS Fluent для моделирования тепловых процессов в зданиях требует верификации результатов на реальных объектах и разработки упрощенных методик подготовки моделей, доступных инженерам-практикам без глубокой специализации в CFD [3].

Предложенная методика сочетает стандартизированный подход к подготовке геометрических моделей с физически корректными настройками расчета. Основой послужил комплекс зданий учебного корпуса площадью 8500 м², построенный в 1985 году и требующий модернизации системы отопления. Модель создавалась в модуле ANSYS SpaceClaim на основе архитектурных чертежей с упрощением второстепенных конструктивных элементов, не влияющих на тепловые потоки (декоративные карнизы, внутренние перегородки толщиной менее 100 мм). Импорт геометрии из AutoCAD выполнялся через формат STEP с последующей проверкой на замкнутость объемов и отсутствие дефектов поверхностей, что критично для построения качественной расчетной сетки. Для зданий без исходной документации предлагается методика обмеров лазерным дальномером с построением упрощенной модели по характерным размерам помещений с погрешностью не более 5% площади ограждающих конструкций.

Для дискретизации использована неструктурированная сетка с призматическими слоями у стен: размер ячейки в объеме помещений – 0,3 м, у ограждающих конструкций – 0,05 м с 5 призматическими слоями для разрешения пограничного слоя. Общее количество ячеек – 4,2 млн, что обеспечило сходимость решения по критерию невязки энергии 10^{-4} . Выбор турбулентной модели обоснован сравнением k - ϵ Realizable и SST k - ω : последняя показала лучшее совпадение с экспериментальными данными по конвективному теплообмену в условиях естественной конвекции в помещениях с высотой потолков 3,6 м [7]. Проверка чувствительности сетки (grid independence study) проводилась на трех уровнях детализации (2,1 млн, 4,2 млн и 8,5 млн ячеек), подтвердившая достаточность среднего уровня с отклонением результатов менее 2% по сравнению с мелкой сеткой.

Граничные условия заданы согласно климатическим данным Кемерово (температура наружного воздуха -39 °С – расчетная зимняя, +21 °С – внутренняя). Теплопроводность стен принята по данным паспорта здания с корректировкой на износ утеплителя (снижение эффективности на 15% за 40 лет эксплуатации). Модель учитывает инфильтрацию через неплотности оконных и дверных проемов – расход воздуха определен по методике дефектоскопии с применением дымогенератора и введен как объемный источник/сток в зонах примыкания оконных блоков. Коэффициенты конвективного теплообмена на внутренних поверхностях рассчитывались автоматически по стандартным стеновым функциям (standard wall functions), что исключает субъективность при задании граничных условий первого рода.

Расчет проводился в стационарной постановке с включением моделирования радиационного теплообмена по методу дискретных ординат (DO-мо-

дель, 8 угловых направлений). Время расчета одного варианта на рабочей станции с процессором Intel Xeon E5-2680 v4 (28 ядер) составило 4,5 часа, что приемлемо для практики энергоаудита с возможностью ночного счета. Для типовых проектов предлагается использование распределенных вычислений на кластере, сокращающее время анализа до 45 минут при параллельном запуске 4-5 вариантов.

Верификация модели выполнялась путем сравнения расчетных температур поверхностей с данными натурных замеров инфракрасным тепловизором FLIR T640 в трех характерных помещениях (угловое, центральное, северное) при наружной температуре -28°C . Тепловизионная съемка проводилась в период установившегося теплового режима (после 72 часов непрерывной работы отопления) с учетом поправок на коэффициент излучения поверхностей (0,85 для окрашенных стен, 0,95 для стекла). Отклонение расчетных значений температуры внутренней поверхности стен от измеренных не превысило $1,8^{\circ}\text{C}$ (относительная погрешность 6%), что соответствует требованиям ГОСТ 30494-2011 к точности определения микроклимата [8]. Максимальное расхождение зафиксировано в угловом помещении ($2,1^{\circ}\text{C}$), что объясняется сложностью учета тепловых мостов в зоне примыкания стен.

Расчетные теплопотери здания составили 412 кВт, что на 23% ниже значения, полученного по упрощенной нормативной методике (536 кВт). Разница объясняется учетом теплопритоков от солнечной радиации через остекление и тепловой инерции ограждающих конструкций, которые нормативный метод не учитывает полностью. Экономическое моделирование показало, что применение точных данных позволяет сократить мощность проектируемой котельной на 124 кВт и соответственно капитальные затраты на оборудование на 2,8 млн руб. при сроке окупаемости дополнительных затрат на CFD-моделирование (45 тыс. руб.) менее одного месяца.

Дополнительно проведено моделирование альтернативных сценариев энергомодернизации: замена остекления на двухкамерные стеклопакеты с низкоэмиссионным покрытием и наружное утепление стен пеноплексом 100 мм. Расчет показал снижение теплопотерь на 31% и 24% соответственно, при этом комбинированный вариант обеспечивает снижение на 48% с годовой экономией 890 тыс. руб. при текущих тарифах на тепловую энергию. Анализ чувствительности показал, что наибольший вклад в теплопотери вносят оконные проемы (38% от общих потерь), что обусловлено высоким удельным сопротивлением теплопередаче старой деревянной рамы ($0,45 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ против нормативных $0,8 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ для современных конструкций).

Методика апробирована также на объекте промышленного назначения – цехе механической обработки площадью 3200 м^2 с высотой 12 м и значительными тепловыми выделениями от оборудования (45 кВт на единицу станка, 8 единиц). Моделирование позволило оптимизировать схему воздухораспределения приточно-вытяжной вентиляции, снизив перерасход тепла на отопление в межсезонье на 18% за счет учета внутренних теплогенераций, которые традиционная методика учитывает с грубым коэффициентом 0,5 без привязки к

режиму работы оборудования. Внедрение предложенной схемы управления вентиляцией на основе температурных датчиков и частотных преобразователей вентиляторов обеспечит дополнительную экономию 340 тыс. руб. в год.

Сравнение с альтернативными программными комплексами (COMSOL Multiphysics, SolidWorks Flow Simulation) показало, что ANSYS Fluent обеспечивает оптимальное соотношение точности и времени расчета при моделировании зданий сложной конфигурации. COMSOL демонстрирует преимущества при многофизичном анализе (совместное решение теплопроводности, гидродинамики и механики), но требует в 2-3 раза больших временных затрат на подготовку модели. SolidWorks удобен для инженеров-механиков, но ограничен возможностями работы с большими объемами воздуха и сложными системами отопления.

Таким образом, применение ANSYS для энергоаудита позволяет снизить погрешность определения теплопотерь с 20-30% до 5-7% по сравнению с нормативными методиками. Методика доступна инженерам с базовой подготовкой в CFD после прохождения специализированного курса (40 академических часов). Ограничением остается необходимость наличия исходной документации на здание или ее обмер для создания геометрической модели. В дальнейшем планируется разработка типовых параметрических моделей для зданий серийной застройки, что сократит время подготовки расчетной схемы до 2—3 часов, а также интеграция с BIM-платформами для автоматического импорта геометрии и свойств материалов.

Список литературы:

Chen Q., Janbakhsh S., Larsson U. CFD modelling of indoor air performance in buildings // *Energy and Buildings*. – 2021. – Vol. 252. – P. 111456.

ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. – Введ. 2013-01-01. – М.: Стандартинформ, 2012. – 16 с.

Зайцев А.В., Кузнецов П.А. Применение CFD-моделирования в энергоаудите промышленных зданий // *Энергосбережение и водоподготовка*. 2023. – № 4. – С. 42-48.

Иванов С.П., Сидоров М.Л. Анализ погрешностей методик расчета теплопотерь зданий // *Известия вузов. Строительство*. – 2022. – № 6. – С. 78-85.

Ковалев А.М. Натурные методы исследования теплозащиты зданий. – М.: АВОК-Пресс, 2021. – 224 с.

Михайлов В.В., Петрова Е.С. Цифровизация энергоаудита: проблемы и перспективы // *Энергоэффективность*. – 2024. – № 2. – С. 12-19.

Versteeg H.K., Malalasekera W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. – 2nd ed. – Pearson, 2007. – 503 p.

СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. – М.: Минрегион России, 2012. – 94 с.

