

# Применение высокопроизводительных вычислений для анализа теплоэнергетических моделей сложных инженерных объектов\*

С.Д. Ваулин, А.Л. Карташев, М.А. Карташева, Е.В. Сафонов, А.Л. Шестаков

Рассмотрена интегрированная система индивидуального учета, распределения и потребления энергетических ресурсов. Ядром системы является математическая модель теплоэнергетических процессов (теплоэнергетическая модель) в сложных инженерных объектах. Предложены принципы построения теплоэнергетических моделей на основе системного подхода к анализу теплового состояния инженерных объектов. Разработана функциональная структура математической модели теплоэнергетических процессов в сложных инженерных объектах. Для математического моделирования теплового состояния сложных инженерных объектов использованы высокопроизводительные, в том числе параллельные, вычисления.

## 1. Введение

Эффективное потребление энергетических ресурсов в эпоху нарастания энергодефицита довольно проблематично осуществлять без индивидуального учета, оптимального распределения и рационального потребления энергетических и водных ресурсов (их производство также требует больших энергетических затрат). Одним из путей решения данной проблемы является разработка интегрированной Системы индивидуального учета, распределения и потребления энергоресурсов (далее по тексту – Система) в сложных инженерных объектах.

В качестве сложных инженерных объектов могут быть рассмотрены различные технические устройства, промышленное производство, а также здания и сооружения, в которых производится распределение и потребление энергетических ресурсов.

Такая Система должна, во-первых, служить инструментом, обеспечивающим реальный учет и оплату потребленных ресурсов, во-вторых, играть роль фактора, побуждающего потребителя к рациональному использованию потребляемых ресурсов, и, наконец, позволять оперативно управлять распределением и потреблением энергоресурсов, как в пределах отдельно взятого объекта (здания), так и в масштабах нескольких объектов (например, микрорайонов).

Рассматривая Систему как единый комплекс, необходимо определить состав ее компонентов и установить параметры взаимодействия между ними.

В качестве компонентов Системы можно выделить ее следующие составляющие:

- математическая модель энергосберегающей Системы индивидуального учета, распределения и потребления тепла и электроэнергии;
- алгоритмический блок управления различными подуровнями многоуровневой Системы;
- технические элементы Системы, включая беспроводные цифровые сенсоры и сенсорные сети,
- программное обеспечение Системы и используемый интерфейс.

## 2. Основные принципы построения теплоэнергетических моделей

Математическая модель теплоэнергетических процессов (теплоэнергетическая модель) в сложных инженерных объектах с функцией корреляции неэквивалентного расположения по отношению к внешним климатическим условиям эксплуатации является основой для построения алгоритма индивидуального учета, распределения и потребления энергии.

Требования к построению такой модели и ее функционированию (функциональной структуре) должны обеспечивать обобщенное применение разрабатываемой математической модели для различных типов объектов.

---

\* Работа выполнена в рамках Государственного контракта № 02.526.11.6004 Федерального агентства по науке и инновациям

Наиболее эффективными для построения математической модели теплоэнергетических параметров являются принципы системного подхода, реализуемые в модульном построении модели, в ее многоуровневом иерархическом структурировании, а также комплексном учете входных параметров (технических, экономических, организационно-правовых и т.д.).

В целом разрабатываемая математическая модель должна включать в себя несколько моделей (субмоделей) и алгоритмов, таких как:

- статическая модель теплового режима объекта и его отдельных элементов;
- динамическая модель теплового режима объекта и его отдельных элементов;
- модель неэквивалентного расположения отдельных элементов объекта (например, квартир внутри здания);
- модель корреляционного учета неэквивалентных внешних воздействий на объект;
- модель корреляционного учета действия различных источников тепла в объекте и его элементах;
- модуль обработки входных и выходных данных;
- алгоритм расчета коммерческих показателей тепловой и электрической энергии на границе балансной принадлежности;
- алгоритм индивидуального учета потребления тепловой и электрической энергии;
- алгоритм дистанционного ограничения электрической энергии.

### **3. Системный подход к построению математической модели**

Для построения математической модели необходимо использовать методологию системного анализа. Иерархическая структура математической модели включает в себя общую математическую модель и набор независимых либо связанных друг с другом модулей (субмоделей), которые должны функционировать так же совместно либо независимо друг от друга. Кроме того, субмодели различных иерархических уровней должны иметь способность адекватно описывать работу интегрированной системы учета и распределения тепловой и электрической энергии без использования структуры более высоких иерархических уровней.

Рассмотрим построение математической модели теплоэнергетических процессов в сложных инженерных объектах на примере зданий (сооружений).

Разрабатываемая математическая модель должна состоять из следующих иерархических уровней.

Статическая модель теплового режима здания, как единой теплоэнергетической системы, в состав которой входят следующие субмодели:

- математическая модель теплоаккумуляционных характеристик оболочки здания;
- математическая модель теплоэнергетического воздействия наружного климата на здание;
- математическая модель теплоэнергетического баланса помещений здания.

Статическая модель должна включать в себя наиболее полное описание теплоэнергетического состояния здания с учетом всех факторов, влияющих на это состояние.

Основное назначение статической модели – проведение поверочного расчета теплового режима здания (сооружения) в соответствии с рекомендациями, приведенными в Своде Правил СП 23–101–2000 «Проектирование тепловой защиты зданий», а также расчет коэффициентов для аппроксимационных зависимостей для использования в динамической модели теплового режима здания (сооружения).

Динамическая модель теплового режима здания включает в себя:

- математическое ядро, основанное на аппроксимационных зависимостях;
- модуль обработки текущих параметров, характеризующих текущее состояние распределения и потребления энергоресурсов в здании;
- модуль формирования выходных данных.

Динамическая модель должна обеспечить:

- сбор и предварительную обработку оперативных входных данных;
- математическую обработку (усреднение, интегрирование и т.д.) исходных и расчетных данных за отчетный период;
- поверочный расчет теплового режима здания в зависимости от текущих климатических условий;

– формирование выходных данных (корреляционных коэффициентов), которые позволяют получить уточненные сведения о теплотреблении того или иного помещения, учитывающих теплоэнергетическую неравноценность местоположения помещений для учетных подсистем распределения тепловой нагрузки по потребителям.

Алгоритм расчета коммерческих показателей тепловой и электрической энергии, а также водных ресурсов на границе балансной принадлежности должен обеспечить точный учет потребляемых ресурсов в соответствии с существующими нормативными документами (в настоящее время Строительные нормы и правила РФ СНиП 41–01–2003 «Отопление, вентиляция и кондиционирование»; «Правила учета тепловой энергии и теплоносителя», Москва, 1995 год; «Правила учета электрической энергии», утверждены Минтопэнерго и Минстроем РФ, 1996 год).

Алгоритм индивидуального учета потребленных ресурсов с учетом общих затрат на здание (сооружение) должен функционировать посредством учета корреляционных коэффициентов динамической модели объекта.

Алгоритм дистанционного управления ограничением электрической мощности предназначен для поэтапного ограничения электрической мощности индивидуальному потребителю в случае задержки оплаты за потребленные энергоресурсы.

Описанная структура математической модели в общем виде представлена на рис. 1.

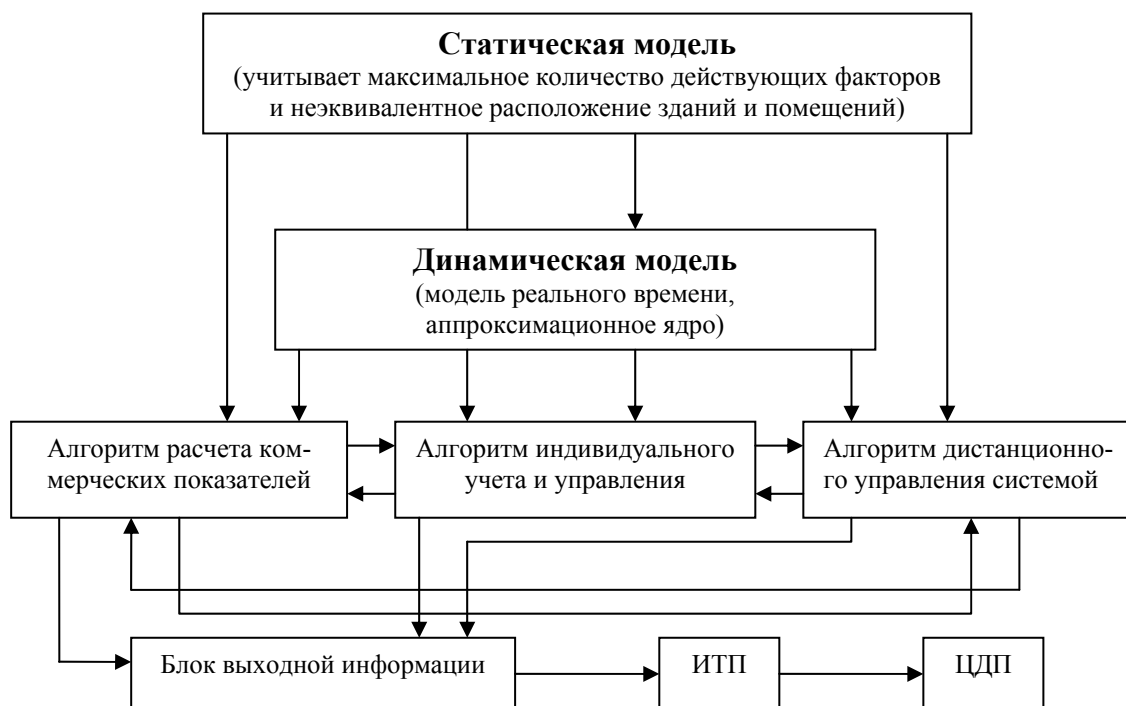


Рис. 1. Общая структура математической модели.  
(ИТП – индивидуальный тепловой пункт, ЦТП – центральный тепловой пункт)

Составляющие математической модели должны строиться на следующих исходных данных, содержащихся в теплоэнергетическом паспорте здания:

- общая информация: сведения о местоположении и времени возведения здания, разработке проекта и др.;
- расчетные условия: данные о функциональном назначении, типе и конструктивном решении здания, климатических характеристиках района строительства, включая данные об отопительном периоде, и параметры микроклимата помещений;

– геометрические показатели: общестроительные данные о геометрии и ориентации здания, его объем, площади помещений, площади наружных ограждающих конструкций (на основе этих данных вычисляются показатель компактности здания и коэффициент остекленности фасада здания);

– энергетические показатели: теплозащита здания, включающие приведенные сопротивления теплопередаче и воздухопроницаемость отдельных ограждений, воздухообмен; рассчитываются: приведенный коэффициент теплопередачи и приведенная воздухопроницаемость оболочки здания, тепловые потери за отопительный период, бытовые теплопоступления, теплопоступления за счет солнечной радиации.

Математическая модель должна строиться на принципах модульности. Модулем является индивидуальное помещение (квартира), связанное по средствам теплового баланса с соседними помещениями и окружающей средой. Границей модуля является совокупность внешних и внутренних ограждающих конструкций, проведенная по их внутренней стороне (обращенной в объем помещения).

#### 4. Функциональная структура математической модели

Анализ функционирования математической модели, взаимодействия ее субмоделей и модулей может быть проведен с помощью функциональной структуры математической модели.

Разработка такой структуры позволяет детализировать требования, предъявляемые к математической модели, установить взаимосвязи элементов модели, в случае необходимости легко варьировать составом субмоделей и модулей математической модели.

Функциональная структура позволяет создавать различные уровни математической модели, о которых шла речь выше.

И, наконец, с помощью функциональной структуры математической модели можно построить процедуру оптимизации учета, распределения, потребления энергоресурсов, как в рамках индивидуального помещения, так и всего здания в целом.

Предлагаемая структура математической модели представлена на рис. 2. Следует отметить, что модульное построение системы математического моделирования позволяет при необходимости откорректировать и функциональную структуру математической модели.

Входные данные для математической модели в соответствии с ее функциональной структурой формируются на основании шести блоков: «Условия комфортного проживания», «Типовые климатические условия», «Типовой проект зданий», «Текущие климатические условия», «Текущие температуры помещений», «Отклонение параметров».

В функциональной структуре математической модели, приведенной на рис. 2, использованы следующие обозначения: скорость и направление ветра ( $w_0$ ); атмосферное давление ( $p_0$ ); средняя температура воздуха в течение отопительного сезона ( $t_0$ ); среднее значение суммарной солнечной радиации ( $q_0$ ); относительная влажность наружного воздуха в течение отопительного сезона ( $\psi_0$ ).

Типовой модульный (квартирный) коэффициент – коэффициент для расчета индивидуального потребления тепла:

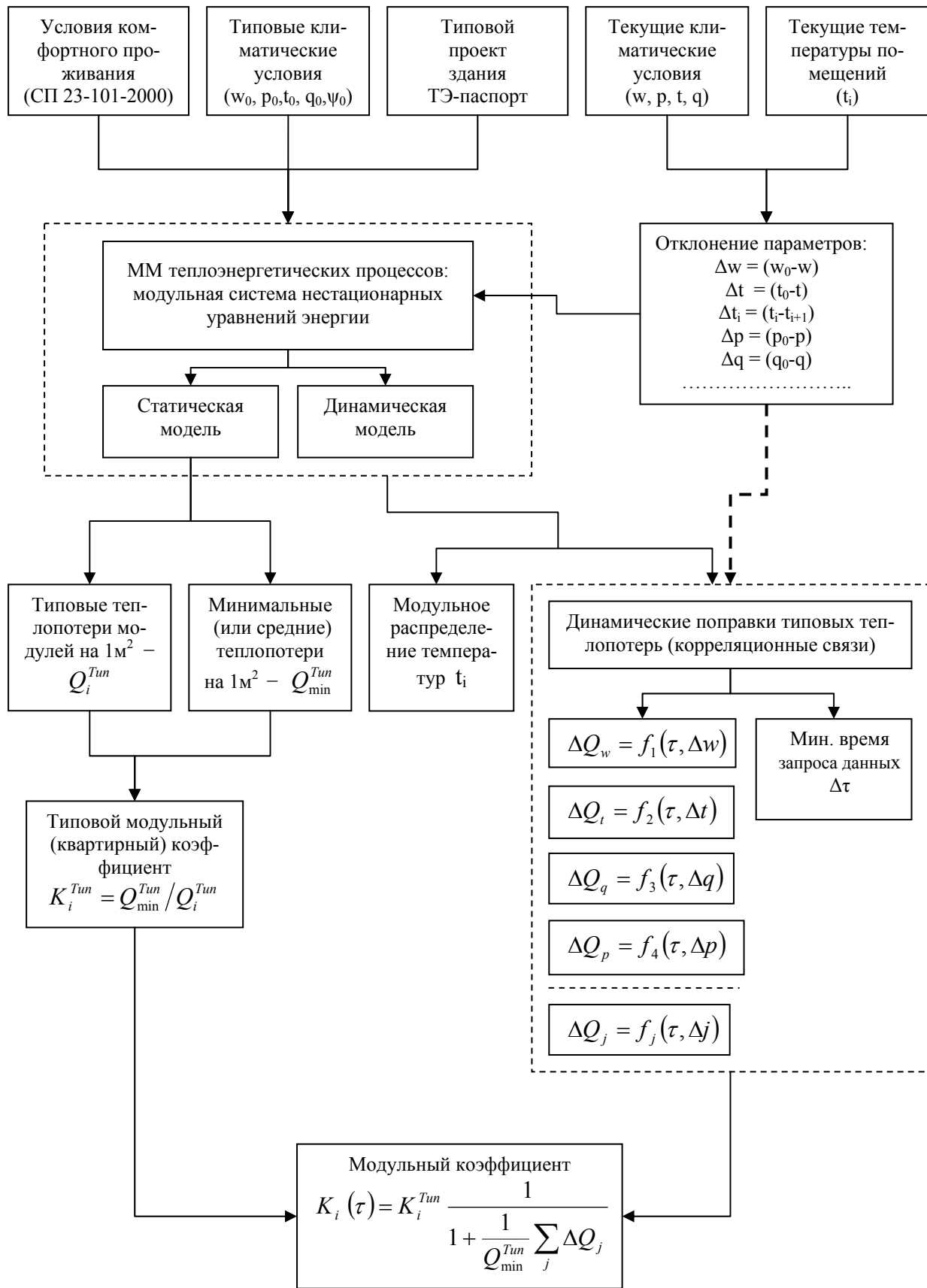
$$K_i^{Tun} = Q_{\min}^{Tun} / Q_i^{Tun},$$

где  $Q_i^{Tun}$ ,  $Q_{\min}^{Tun}$  – типовые и минимальные тепловые потери модулей на  $1\text{ м}^2$  площади;

Динамические поправки учитывают отклонение климатических параметров от реальных условий. Результирующая поправка к тепловым потерям определяется как сумма поправок по всем параметрам, а текущий модульный коэффициент определяется по соотношению:

$$K_i(\tau) = K_i^{Tun} \frac{1}{1 + \frac{1}{Q_{\min}^{Tun}} \sum_j \Delta Q_j},$$

где  $K_i^{Tun}$  – типовой модульный (квартирный) коэффициент.



--- — прохождение сигнала в составе системы теплоучета

Рис. 2. Функциональная структура математической модели теплоэнергетических параметров здания.

Расчетный комплекс функциональной структуры математической модели состоит из следующих блоков: «Математическая модель теплоэнергетических процессов», «Динамические поправки типовых тепловых потерь» (ограничены на рис. 2 тонкой пунктирной линией), «Модульное распределение температур».

## **5. Применение высокопроизводительных вычислений для математического моделирования**

При выборе математического метода решения системы уравнений математической модели должен быть выбран наиболее оптимальный, обеспечивающий не только требуемую точность математического моделирования по отношению к реальным процессам, но и требуемое быстрое действие.

Динамическая модель должна функционировать в составе опытного образца энергосберегающей системы индивидуального учета, распределения и потребления тепла и электроэнергии в зданиях и сооружениях в непрерывном круглосуточном режиме в реальном масштабе времени.

Решение поставленной задачи возможно только при использовании высокопроизводительных вычислений. Такая необходимость определена двумя свойствами предложенной математической модели: сложностью и разветвленностью связей между модулями математической модели, решения которых могут быть взаимозависимы, и необходимостью функционирования динамического модуля математической модели в режиме реального времени, оперируя одновременно большим количеством параметров.

Высокопроизводительный алгоритм строится с использованием параллельных вычислений на многопроцессорных вычислительных машинах. Решение рассматриваемой задачи с помощью параллельных алгоритмов позволит получить принципиально новое качество в моделировании теплоэнергетических параметров сложных инженерных систем, разработать процедуру оптимизации параметров таких систем, а также позволит получить алгоритмы динамического управления параметрами системы.

## **6. Заключение**

Математическая модель теплоэнергетических процессов (теплоэнергетическая модель) в сложных инженерных объектах, являющаяся ядром интегрированной Системы индивидуального учета, распределения и потребления энергетических ресурсов, представляет собой многоуровневую инвариантную систему, учитывающую целый набор процессов и факторов, определяющих характер теплоэнергетического состояния рассматриваемого объекта учета.

Разработка такой модели может быть проведена в соответствии с предложенной методологией исследования теплоэнергетических процессов в сложных инженерных объектах.

Проведение математического моделирования теплоэнергетических параметров (анализ теплоэнергетических моделей) сложных инженерных систем необходимо проводить с помощью высокопроизводительных вычислений, основанных на параллельных алгоритмах для многопроцессорных вычислительных систем.