



# Математическое моделирование – универсальный инструмент управления теплоэнергопотреблением здания

**Ю. А. Табунщиков**, доктор техн. наук, профессор Московского Архитектурного института (Государственная академия), президент НП «АВОК»

**Ключевые слова:** математическое моделирование, математическая модель, тепловой режим здания, теплоэнергетическое проектирование, тепловой режим помещения, системный подход

Математическое моделирование является совершенно замечательным универсальным инструментом для исследования сложных технических систем, к которым относится здание как единая энергетическая система. Общеизвестна роль математического моделирования и его эффективности при теплоэнергетическом проектировании отопления, вентиляции, кондиционирования воздуха и теплоизоляции зданий, позволяющего научным путем заранее оценить последствия каждого предлагаемого решения, заранее отбросить недопустимые варианты и рекомендовать наиболее удачные.

Однако возможности математического моделирования не ограничиваются только задачами исследования сложных технических систем: не менее эффективна и занимает особое место роль математического моделирования в управлении сложными техническими системами. В нашем случае это относится к управлению теплоэнергопотреблением, тепловым режимом и микроклиматом здания. Возникают понятия «интеллектуальное здание», а затем «здание, которое может мыслить».

Необходимо понимать, что математические модели здания как единой энергетической системы как для исследования, так и для управления создаются по одним и тем же принципам на основе методов системного подхода [1]. Хотя системный подход уже проявил свои огромные возможности, его нельзя

рассматривать как совокупность строго установленных правил, применение которых позволяет автоматически получить решение сложной задачи. Большое значение имеют опыт, знания, способности и даже интуиция исследователя. Здесь недостаточно обладать только математическими или только техническими знаниями.

Сегодня системный анализ – это обширная синтетическая дисциплина, включающая в себя целый ряд разделов, носящих характер самостоятельных научных дисциплин.

Математическое моделирование – это процесс создания упрощенной модели сложной системы и использования этой модели для анализа и прогнозирования поведения реальной системы. По назначению использования математические модели здания как единой энергетической системы условно можно разделить на три вида: математические модели для исследования, математические модели для проектирования и математические модели для управления.

В соответствии с природой изучаемого процесса теплового режима здания как единой энергетической системы будем различать вероятностные и детерминированные математические модели, описывающие этот процесс. Введем следующую классификацию вероятностных и детерминированных математических моделей теплового режима здания как единой энергетической системы.

1. Математические модели теплового режима помещения как объекта с распределенными параметрами. Сюда будем относить математические модели, которые описывают температурное поле в плане и по высоте помещения и отдельно учитывают лучистый и конвективный теплообмен в помещении.

2. Математические модели теплового режима помещения как объекта с частично распределенными параметрами. Сюда будем относить математические модели, которые отдельно учитывают лучистый и конвективный теплообмен в помещении, а температура воздуха принимается одинаковой по объему помещения.

3. Математические модели теплового режима помещения как объекта с частично сосредоточенными параметрами. Сюда будем относить математические модели, которые описывают теплообмен в помещении без разделения на конвективную и лучистую составляющие, а температура воздуха принимается одинаковой по объему помещения.

Математическая модель для исследований должна обладать универсальностью, основанной на учете многочисленных возможных факторов, применимостью для широкого класса различных зданий как единой энергетической системы.

Математическая модель для проектирования должна включать в себя необходимые нормативные требования и возможные ограничения.

Математическая модель для управления должна отвечать специфике здания и особенностям системы

— **Холодильные машины**  
для систем кондиционирования и технологического охлаждения

- с воздушным охлаждением, 5—1800 кВт
- free cooling, 41—1700 кВт
- с водяным охлаждением, 87—2400 кВт

— **Тепловые насосы**

- воздух – вода, 4—1160 кВт
- вода – вода, 5—2400 кВт

— **Системы нагрева и охлаждения воды**

Решения для одновременного производства холодной и горячей воды, 33—850 кВт

— **Крышные кондиционеры**

23—468 кВт

— **Прецизионные кондиционеры**

- с непосредственным охлаждением и на охлаждающей воде
- охлаждающие блоки со стеллажами
- охлаждающие дверные блоки
- моноблочные системы для внутренней и наружной установки

JAPAN

Реклама



**CLIMVENETA**  
SUSTAINABLE COMFORT

A Group Company of



**MITSUBISHI  
ELECTRIC**

[aircon@mer.mee.com](mailto:aircon@mer.mee.com)

его климатизации, а также допускать возможности ее идентификации, т.е. определения по реализации входных и выходных переменных, полученных в условиях функционирования объекта, неизвестных или приближенно заданных параметров модели.

**Проблема принятия решения при проектировании системы климатизации и теплозащиты здания, т.е. выбор одной из возможных альтернатив, является сложной ввиду многообразия факторов, влияющих на этот выбор. Каждый вариант решения обладает какими-то преимуществами и какими-то недостатками, причем в силу многообразия факторов не сразу ясно, какой из вариантов лучше (предпочтительнее) других и почему.**

Как правило, у специалистов появляются сомнения в том, что принятое решение является наилучшим. В этом случае возникает необходимость в наличии научного метода, позволяющего вести поиск «наилучшего решения».

Чем сложнее, дороже и масштабнее проектируемый объект, тем большую опасность представляют «волевые» решения и тем важнее становятся научные методы, позволяющие заранее оценить последствия каждого решения, заранее отбросить недопустимые варианты и рекомендовать наиболее удачные. Слишком опасно в таких случаях опираться на свою интуицию, на «опыт и здравый смысл» и даже на наиболее распространенный в наше время метод поиска наилучшего решения, так называемый «метод проб и ошибок». В наше время техника и технология меняются настолько быстро, что «опыт» просто не успевает накапливаться, а «здравый смысл» легко может обмануть, если не опираться на научный метод поиска наилучшего решения.

В настоящее время для построения и реализации математических моделей сложных энергетических объектов, к которым может быть отнесено здание, используется методология системного подхода.

**Системный подход в рассматриваемом нами случае построения математической модели теплового режима здания предполагает выполнение следующих этапов.**

1. Выделение из общей энергопотребляющей системы рассматриваемого объекта, например выделение здания из микрорайона, цеха в здании завода или отдельного корпуса, помещения в жилом или общественном здании.

2. Выяснение состава элементов, их внутренней структуры и видов связей между ними.

3. Расчленение объекта с помощью метода декомпозиции на более простые элементы и его последующее восстановление с помощью теории графов.

4. Разработка системы взаимосвязанных математических моделей отдельных элементов здания и обобщенной математической модели теплового режима здания в целом.

Технический прогресс приводит к появлению большого многообразия архитектурных, объемно-планировочных и конструктивных решений зданий с существенно различными особенностями формирования теплового режима в помещениях, обусловленными их технологическим назначением и применяемыми системами регулирования микроклимата. Основной предпосылкой для использования в рамках системного подхода метода декомпозиции является наличие ограниченного числа основных типовых элементов, из которых складывается здание как единая энергетическая система.

**Декомпозиция здания как единой энергетической системы может быть представлена тремя основными энергетически взаимосвязанными подсистемами:**

1) энергетическим воздействием наружного климата на оболочку здания;

2) энергией, содержащейся в оболочке здания, т.е. в наружных ограждающих конструкциях здания;

3) энергией, содержащейся внутри объема здания, т.е. во внутреннем воздухе, внутреннем оборудовании, внутренних ограждающих конструкциях и т.д.

При необходимости каждая из указанных подсистем может быть представлена методом декомпозиции более мелкими энергетически взаимосвязанными элементами. Тогда математическая модель здания как единой энергетической системы будет состоять из трех подмоделей:

1) математические модели наружного климата;

2) математические модели теплопередачи через оболочку здания;

3) математические модели лучистого и конвективного теплообмена в помещениях, зданиях.

В соответствии с принципами системного анализа целесообразно при проектировании энергоэффективного здания рассматривать две независимые энергетические подсистемы:

- наружный климат как источник энергии;
- здание как единая энергетическая система.

Анализ первой подсистемы позволяет вычислить энергетический потенциал наружного климата и определить методы его исследования для



тепло- и холодоснабжения здания. Анализ второй подсистемы позволяет определить характеристики архитектурно-конструктивных, теплотехнических и энергетических показателей здания как единой энергетической системы.

Проектирование энергоэффективного здания заключается в оптимизации трех энергетически взаимосвязанных подсистем, указанных ранее, и здания в целом как единой энергетической системы и включает в себя:

- определение оптимальных архитектурно-планировочных, теплотехнических или энергетических параметров отдельных элементов здания с учетом взаимосвязи между ними;
- определение оптимальных архитектурно-планировочных, теплотехнических или энергетических параметров здания как единой энергетической системы.

При реальном проектировании выбор оптимальной совокупности взаимосвязанных инновационных архитектурно-планировочных и инженерных решений энергоэффективного здания может быть стеснен рядом ограничений, так называемых «дисциплинирующих условий», которые фиксированы с самого начала и не могут быть нарушены (например, этажность или протяженность здания). При этом ставится задача оптимизации с заданными ограничениями, и цель достигается при получении оптимального решения

с учетом заданных ограничений. В этом случае целесообразно ввести показатель тепловой эффективности проектного решения, который характеризует отличие принятого к проектированию здания от здания, наиболее эффективного в тепловом отношении:

$$\eta = W_{\min} / W, 0 < \eta \leq 1,$$

где  $W_{\min}$  – затраты тепловой энергии на обеспечение теплового режима здания, наиболее эффективного в тепловом отношении,  $W_{\text{т}}$ ;

$W$  – затраты тепловой энергии на обеспечение теплового режима здания, принятого для проектирования,  $W_{\text{п}}$ .

Максимальная тепловая эффективность достигается при  $\eta = 1$ .

В соответствии с представлением здания как единой энергетической системы тремя основными энергетически взаимосвязанными подсистемами показатель тепловой эффективности проектного решения может быть записан так:

$$\eta = \eta_1 \eta_2 \eta_3,$$

$$0 < \eta_i \leq 1, i = 1, 2, 3,$$

где  $\eta_1$  – показатель тепловой эффективности в части оптимального учета наружного климата;  $\eta_2$  – то же в части оптимального выбора теплозащиты ограждающих конструкций;

$\eta_3$  – то же в части оптимального выбора системы обеспечения теплового режима здания.

Принятие окончательного решения относится к компетенции ответственного лица (чаще группы лиц), которому предоставлено право окончательного выбора и на которого возложена ответственность за этот выбор. Делая выбор, он может учитывать наряду с рекомендациями, вытекающими из математического расчета, еще ряд соображений количественного и качественного характера, которые в этих расчетах не были учтены.

Будущее в теории и, главное, в практике математического моделирования, безусловно, принадлежит поиску оптимальных решений, например, на основе решения задач методами вариационного исчисления, или методами академика Л. С. Понтрягина, или аналогичными другими методами оптимизации. Большие возможности поисков наилучшего решения предлагают методы «системного» анализа – дисциплины, занимающиеся проблемами принятия решения в условиях, когда выбор альтернативы требует анализа сложной информации различной физической природы.

К сожалению, в области климатизации и теплозащиты зданий оптимальные решения являются единичными замечательными примерами. Проблема такой ситуации состоит в том, что специалисты, хорошо владеющие математическим аппаратом, редко занимаются анализом конкретных технических систем и, наоборот, исследователи конкретных технических систем редко владеют достаточно широким арсеналом математических средств.

## Литература

1. Моисеев Н. Н. Математические задачи системного анализа. М.: Наука, 1981.
2. Табунщиков Ю. А., Бродач М. М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности здания. М.: АВОК-ПРЕСС, 2012.
3. Табунщиков, Ю. А., Бродач М. М. Научные основы проектирования энергоэффективных зданий // АВОК.– 1998.– № 1.– С. 6–10.
4. Табунщиков Ю. А. Расчет теплопотерь помещения при раздельном учете конвективного и лучистого теплообмена // АВОК.– 2007.– № 8.– С. 38–44.
5. EN ISO 13790:2008. Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling.– 2008–03–01.
6. Energyplus energy simulation software [Electronic resource] / U. S. Department of Energy.– Mode of access: [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/?utm\\_source=EnergyPlus&utm\\_medium=redirect&utm\\_campaign=EnergyPlus%2Bredirect%2B1](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/?utm_source=EnergyPlus&utm_medium=redirect&utm_campaign=EnergyPlus%2Bredirect%2B1).
7. Total energy use in buildings: Analysis and evaluation methods, Final report of Annex 53 // International Energy Agency, Programme on Energy in Buildings and Communities.– 2014–11.
8. Табунщиков Ю. А. Здание должно мыслить. Новогоднее эссе // АВОК.– 2016.– № 1.
9. Бродач М. М. Метод теплоэнергетической оптимизации формообразования здания // АВОК.– 2017.– № 6. ■

## ПРОГРАММА

### «ОПРЕДЕЛЕНИЕ КЛАССА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ МНОГОКВАРТИРНОГО ДОМА»

смотрите на сайте [soft.abok.ru](http://soft.abok.ru)



Программа позволяет определить фактические и расчетные удельные показатели потребления энергетических ресурсов в соответствии с Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 6 июня 2016 года № 399/пр «Об утверждении Правил определения класса энергетической эффективности многоквартирных домов».

Проведя расчет, можно вывести декларацию о фактических значениях годовых удельных величин расхода энергетических ресурсов и ход расчетов в формулах.

Класс энергетической эффективности многоквартирного дома определяется исходя из сравнения (определения величины отклонения) фактических или расчетных (для вновь построенных, реконструированных и прошедших капитальный ремонт многоквартирных домов) значений показателя удельного годового расхода энергетических ресурсов, отражающего удельный расход энергетических ресурсов на отопление, вентиляцию, горячее водоснабжение, а также на электроснабжение в части расхода электрической энергии на общедомовые нужды, и базовых значений показателя удельного годового расхода энергетических ресурсов в многоквартирном доме, при этом фактические (расчетные) значения должны быть приведены к расчетным условиям для сопоставимости с базовыми значениями.