

УДК 699.8:69.003.13

*Л.А. ОПАРИНА, канд. экон. наук (l.a.oparina@gmail.com),  
Ивановский государственный политехнический университет*

## Имитационное моделирование энергопотребления зданий в течение жизненного цикла на основе аппарата стохастических агрегативных систем

*Показана актуальность применения системного подхода к организации процессов жизненного цикла энергоэффективных зданий. Обоснована необходимость имитационного моделирования энергопотребления зданий на основе аппарата стохастических агрегативных систем. Предложено авторское определение термина «агрегаты энергопотребления». Формализована функция энергопотребления в виде кусочно-линейного сплайна.*

**Ключевые слова:** энергоэффективность, здание, системный подход, моделирование, жизненный цикл.

Вектор развития современной науки организации строительного производства энергоэффективных зданий направлен в сторону гармонизации отечественных и европейских норм по энергосбережению. Основные положения Федерального закона № 261-ФЗ «Об энергосбережении...» опираются на нормативную практику Европейского союза. По мнению специалистов АВОК, в Европейском союзе нормативная база энергоэффективности в строительстве действует уже более 10 лет, непрерывно совершенствуется, и логично было бы актуализировать уже апробированные нормативы в наших документах [1]. Несомненно, в России можно использовать успешный опыт развитых стран в сфере энергосбережения строительной отрасли. При этом особенно актуальным с методологической точки зрения, является применение системного подхода к организации процессов жизненного цикла энергоэффективных зданий, принятого в Европе, согласно которому здания рассматриваются как единые энергетические системы; при этом их энергоэффективность рассматривается комплексно на всех стадиях жизненного цикла, от проектирования до ликвидации. Строительное производство – это в первую очередь процесс, отображающий последовательную смену стадий жизненного цикла зданий [2]. Организация жизненного цикла энергоэффективных зданий должна начинаться на стадии проектирования, при этом необходимо учитывать, что суммарные удельные энергозатраты на строительство здания (в том числе на добычу и переработку сырья, производство строительных материалов и изделий-полуфабрикатов, строительно-монтажные работы, транспорт, оборудование здания и пр.) могут существенно превышать эксплуатационные энергозатраты на содержание здания за весь расчетный срок службы и затраты на дальнейший демонтаж здания и утилизацию строительных материалов.

Оценка жизненного цикла зданий является в настоящее время одним из актуальных направлений исследований как российских, так и зарубежных ученых [3–6]. Однако в изученных автором методиках не приводится оценка энергоемкости полного жизненного цикла зданий, от производства строительных материалов и конструкций до энергозатрат на их утили-

зацию после демонтажа или реставрацию зданий. Между тем проблема ресурсо- и энергосбережения и повышения энергоэффективности зданий остается острой, многоаспектной, которая должна учитывать не только энергетические, но и материальные, экологические, экономические и социальные стороны.

Целесообразно считать, что одним из критериев оптимальности выбранных проектных решений, в том числе и по выбору строительных материалов, должны служить совокупные удельные энергозатраты на строительство здания, его эксплуатацию (отопление, ремонт и т. п.) за весь расчетный срок службы, включая его демонтаж и дальнейшую утилизацию или рециклинг строительных материалов. Для достижения этого критерия на стадии инвестиционного замысла необходимо производить многовариантные сценарные расчеты, т. е. осуществлять имитационное моделирование. Учитывая, что энергоэффективность зданий является комплексной характеристикой, зависящей от множества факторов, имеющих вероятностный характер, от здания являются сложными энергетическими системами, имитационную модель процессов их жизненного цикла целесообразно описать с позиции стохастических агрегативных систем. Учет всех элементов зданий, архитектурно-конструкторских решений, характеристик инженерного оборудования, теплоступлений от людей и бытовых приборов, использование вторичных источников энергии и других параметров энергоэффективности является сложной и практически нереализуемой задачей. Однако объединение параметров энергоэффективности в обобщенные агрегаты позволяет учесть интегральные эффекты от их взаимодействия внутри здания как единой энергетической системы, а также при помощи имитационного моделирования проследить функционирование системы в динамике. Таким образом, автором предлагается ввести новый термин «агрегаты энергопотребления» – элементы здания как энергетической системы, интегрирующие расходы энергетических ресурсов по видам энергоносителей и по стадиям жизненного цикла здания.

Автором предлагается сформировать агрегаты энергопотребления зданий следующим образом (таблица).

Формирование агрегатов энергопотребления зданий

| Стадия жизненного цикла здания | Наименование агрегата   | Обозначение агрегата |
|--------------------------------|---|----------------------|
| Проектирование                 | Расходы энергетических ресурсов на производство строительных материалов и конструкций   | $a_1$                |
| Строительство                  | Расходы энергетических ресурсов на организацию строительной площадки и производство СМР   | $a_2$                |
| Эксплуатация                   | Расходы энергетических ресурсов на отопление здания   | $a_3$                |
|                                | Расходы энергетических ресурсов на электроснабжение, освещение здания, работу систем вентиляции и поддержания микроклимата в здании   | $a_4$                |
|                                | Расходы энергетических ресурсов на водоснабжение и водоотведение здания   | $a_5$                |
|                                | Расходы энергетических ресурсов на производство строительных материалов для производства текущего и капитального ремонтов   | $a_6$                |
|                                | Расходы энергетических ресурсов на производство работ по текущему и капитальному ремонту  | $a_7$                |
|                                | Расходы энергетических ресурсов на утилизацию строительных материалов от производства строительных материалов для произведения текущего и капитального ремонта и после демонтажа здания | $a_8$                |
|                                | Расходы энергетических ресурсов на работы по демонтажу здания   | $a_9$                |

Объединение агрегатов представляет собой агрегативные системы (А-системы), построенные на основе универсальных схем, содержащих математические схемы как частные случаи, имеющие динамический характер, описывающих обмен с внешней средой и учитывающих случайные факторы. Агрегативные системы представляют собой сложные системы, состоящие из элементов, обладающих свойствами агрегатов (имеющими входные, выходные и управляющие сигналы). Введенное выше определение агрегата энергопотребления позволяет формально описать элементы зданий как энергетических систем. Можно добиться существенных упрощений моделируемых алгоритмов, если рассматривать объекты чуть более частные, чем агрегат общего вида, но сохраняющие такую важную его особенность, как возможность описания достаточно широкого класса реальных систем. Стохастические динамические системы достаточно широко представляются вероятностными автоматами, переходы которых в новое состояние определяются заданными распределениями вероятностей. Поэтому решение задачи моделирования стохастических динамических систем обеспечивается применением аппарата теории марковских случайных процессов с дискретным вмешательством случая. Большое значение имеет интерпретация некоторого класса таких процессов в виде так называемых кусочно-линейных агрегатов, практически удобных для формализации таких сложных систем, как энергоэффективные здания.

Представленные агрегаты состоят из переменных величин, в той или иной степени меняющих свое значение на протяжении жизненного цикла здания. Их комплексное изменение обеспечивает набор характеристик, определяющих величину энергетической эффективности. Учитывая различную физическую природу агрегатов, их формирование и расчет целесообразно осуществлять в натуральных единицах измерения, а именно в тоннах условного топлива (т усл. т.), являющегося универсальной единицей измерения энергии, исключая потребление воды, которое учитывается отдельно в кубометрах. Итогом расчета агрегатов энергопотребления является интегрированная оценка общего количества использованных в течение жизненного цикла здания энергетических ресурсов. Образуется функция комплексной оценки ресурсного обеспечения, т. е. энергоемкость жизненного цикла.

Так как здание потребляет энергетические ресурсы непрерывно в течение всего жизненного цикла, кусочно-линейная функция энергопотребления является линейным сплайном, т. е. функцией, область определения которой

разбита на конечное число отрезков, на каждом из которых сплайн совпадает с некоторым алгебраическим полиномом.

Функция энергопотребления задана на каждом из интервалов, составляющих область определения, отдельной формулой:

$$f(x) = \begin{cases} k_0 t + b_0, & t < t_1 \\ k_1 t + b_1, & t_1 < t < t_2, \\ \dots \\ k_n t + b_n, & t_n < t \end{cases}$$

где  $t$  – интервал времени смены состояния агрегатов, при этом точки смены формул соответствуют изменению итоговых годовых расходов энергоресурсов, то есть всем сменам состояний здания:  $t=0$  – начало строительства;  $t=1$  – ввод в эксплуатацию;  $t=5$  – первый ремонт;  $t=6$  – эксплуатация после первого ремонта и так далее;  $k_0, k_1, k_n$  – энергопотребление на текущем интервале;  $b_0, b_1, b_n$  – энергопотребление на предыдущем интервале ( $t-1$ ) накопленным итогом.

В действительности это сплайн нелинейный и более сложный, но реализуемый программным путем посредством программных продуктов для имитационного моделирования. Следует подчеркнуть, что он обеспечивает преемственность показателей энергопотребления (фактически суммирует их). Добавление стохастического аппарата, присущего процессам жизненного цикла зданий, позволит производить более точные и сложные расчеты, получать прогнозы изменения энергопотребления зданием в зависимости от интервала времени жизненного цикла здания.

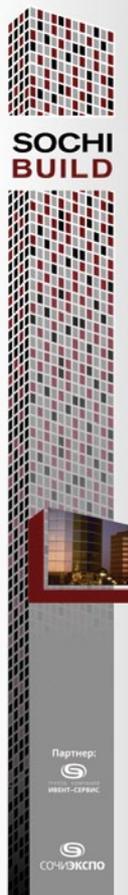
Созданная автором имитационная модель на этапе начальных вычислений реализована в Excel. Полностью рабочий вариант модели может быть реализован в программных продуктах, позволяющих проводить имитационное моделирование (GPSS, SIMPROCESS, Arena или др.). Для работы модели необходимо создать реляционную базу данных по энергопотреблению при производстве различных строительных материалов и конструкций, строительного-монтажных работ, ремонтных работ, утилизации строительных материалов, на процессы демонтажа здания и т. д. по агрегатам энергопотребления. Необходимо учесть стохастичность строительного производства и эксплуатации зданий, внедрить соответствующие вероятности в модель, что позволит более точно предвидеть энергозатраты в течение жизненного цикла зданий и управлять ими. На каждом этапе жизненного цикла расход энергоресурсов будет разным в зависимости от принимаемых организационно-технических решений.

Таким образом, имитационное моделирование позволяет проработать варианты по снижению энергоемкости зда-

ний на всех стадиях жизненного цикла с учетом многовариантности строительного производства; организовать процессы жизненного цикла зданий в зависимости от необходимого уровня энергоэффективности, требуемого заказчиком; получать таким образом оптимизацию затрат энергоресурсов не только при строительстве и эксплуатации здания, но и при выводе его из эксплуатации.

#### Список литературы

1. Табунщиков Ю.А., Наумов А.Л. Энергоэффективность в строительстве. Гармонизация отечественной нормативной базы // АВОК. 2012. № 6. С. 4–14.
2. Алоян Р.М., Петрухин А.Б., Опарина Л.А., Ставрова М.В. Функциональное моделирование как организационный инструмент проектирования, строительства и эксплуатации энергоэффективных зданий // Жилищное строительство. 2012. № 2. С. 2–5.
3. Голованова Л.А. Повышение эффективности инвестиций в энергосбережение по этапам жизненного цикла здания // Экономика строительства. 2005. № 8. С. 2–11.
4. Дьячкова О.Н. Методы оценки эффективности показателей жизненного цикла жилых многоэтажных зданий // Жилищное строительство. 2009. № 3. С. 2–3.
5. Кабанов Д.П., Попов Е.В. Принципы построения информационной системы поддержки жизненного цикла строительного объекта на стадии эксплуатации // Приволжский научный журнал. 2008. № 1. С. 20–25.
6. Асаул А.Н. Теория и практика управления и развития имущественных комплексов / А.Н. Асаул, Х.С. Абаев, Ю.А. Молчанов. СПб.: Гуманистика, 2006. 240 с.



**23 – 26 ОКТЯБРЯ 2013, г. СОЧИ**  
**Павильоны у Морпорта**

## SOCHI BUILD

**XIII МЕЖДУНАРОДНЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ ФОРУМ**

- АРХИТЕКТУРА. СТРОИТЕЛЬСТВО. БЛАГОУСТРОЙСТВО
- СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ОТДЕЛОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ. ОБОРУДОВАНИЕ
- КЛИМАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. ТЕПЛО-, ГАЗО-, ВОДОСНАБЖЕНИЕ
- ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
- СТРОЙСПЕЦТЕХНИКА. ДОРОГА. ТОННЕЛЬ
- ДИЗАЙН ИНТЕРЬЕРА, ЭКСТЕРЬЕРА. ДЕКОР
- ЗАГОРОДНОЕ ДОМОСТРОЕНИЕ. ЛАНДШАФТНЫЙ ДИЗАЙН
- ЭКОЛОГИЯ. БЕЗОПАСНОСТЬ

При поддержке:

- Администрации г. Сочи
- Союза Строителей (работодателей) Кубани
- Торгово-промышленной палаты г. Сочи

Партнер:

- ИНВЕНТ-СЕРВИС
- СОЧИЭКСПО

**Выставочная компания**  
**«Сочи-Экспо ТПП г. Сочи»**  
тел./факс: +7 (862) 264-87-00,  
264-23-33, 264-75-55, (495) 745-77-09  
e-mail: m.lepikova@sochi-expo.ru;  
www.sochi-expo.ru

# ОСЕННИЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ ФОРУМ

## 6-8 ноября 2013 г. Сургут

### ТЕМАТИКА ВЫСТАВКИ - ФОРУМА:

**СТРОИТЕЛЬСТВО И ПРОЕКТИРОВАНИЕ. СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ОТДЕЛОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**  
**ИНСТРУМЕНТ И ОБОРУДОВАНИЕ. ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ. ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ**  
**ВОДОСНАБЖЕНИЕ. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**  
**ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ. УМНЫЙ ДОМ**  
**ДИЗАЙН И ОФОРМЛЕНИЕ ИНТЕРЬЕРА. ЗАГОРОДНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО**  
**БЛАГОУСТРОЙСТВО ТЕРРИТОРИЙ. ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЕ**  
**СПЕЦОДЕЖДА. СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ. ФИНАНСОВЫЙ СЕКТОР. РИЭЛТЭКСПО**

**WWW.YUGCONT.RU; MANAGER2@YUGCONT.RU; ТЕЛ: (3462) 32-34-53; 32-04-32**