

Рационализация коммунального теплоснабжения: Территориальный опыт создания и тиражирования объектов энергоэффективности и энергосбережения

К.т.н. Е.Г. Гашо, доцент, Московский энергетический институт (технический университет)

Руководство Центрального округа столицы поставило перед специалистами МЭИ задачу выявления резервов энергосбережения в коммунальном комплексе, сокращения нерациональных потерь энергии при транспортировке и потреблении населением, создания демонстрационного комплекса для отработки решений и их дальнейшего тиражирования. В качестве точки отсчета совместно с Префектурой был выбран типичный московский микрорайон «Скатертный», состоящий из 22 зданий разных лет постройки, находящийся на территории Управы «Пресненская». Все здания суммарным объемом около 190 тыс. м³, в которых проживают 680 человек и располагаются офисно-торговые помещения, снабжаются теплом от одного ЦТП 739/015 с расчетной нагрузкой 3 Гкал/ч по отоплению и 1,1 Гкал/ч по горячему водоснабжению.

Для выполнения такой комплексной задачи были привлечены специалисты различного профиля по аудиту, электро- и теплоэнергетики, инновационные предприятия по выпуску и монтажу приборов учета энергоресурсов, специалисты по системам управления и мониторинга. На первом этапе в течение первого полугодия 2001 г. после проведения комплексного энергетического обследования зданий, тепловизорной съемки зданий были уточнены тепловые балансы зданий, баланс микрорайона в целом, выявлены основные резервы энергосбережения. Во втором квартале 2001 г. в зданиях были смонтированы системы учета тепловой энергии, горячей и холодной воды на комплексе зданий, охватывающем свыше 85 % общего объема и 84 % населения. На основе информации от датчиков приборов учета смонтирована система мониторинга и диспетчеризации с выводом информации на центральный компьютер в диспетчерской ДЕЗ. В течение следующего года специалистами МЭИ был завершён монтаж системы частотного привода и управления насосами горячей и холодной воды на ЦТП, проведен теплофизический эксперимент по уточнению теплоэнергетических характеристик зданий с точки зрения диагностики и уменьшения «перетоков» зданий, разработаны методики определения энергетической эффективности ограждений, систем отопления, скорректированы энергетические паспорта зданий, функционирует демонстрационная зона энергетической эффективности.

В содружестве со специалистами Дирекции единого заказчика района «Пресненский», Мосгортепло, Мостеплоэнерго нам удалось, на наш взгляд, разносторонне рассмотреть междисциплинарную проблематику энергосбережения в коммунальном комплексе крупного города, предложить набор мер для по-

этапного повышения эффективности использования ресурсов.

В целом полученные за это время результаты можно условно разделить на три группы. **Технические** демонстрационные результаты показали реальные затраты энергоресурсов и воды населением в типичном фонде строений города, выявлены расхождения договорных и фактических значений тепловых нагрузок, несбалансированность гидравлических режимов.

Научно-методические результаты связаны с выявлением типичных резервов энергосбережения в зданиях, разработкой комплекса показателей, номограмм оценки энергетической эффективности домов, созданием методик уточнения и коррекции тепловых нагрузок. В **социально-экономическом** плане определены функции энергосервисных компаний, предложена структура нового механизма расчетов с энергоснабжающими компаниями за отпущенные ТЭР, осуществляется подготовка и переподготовка специалистов для тиражирования полученных решений.

В рамках проведения работ на 70 объектах установлены 36 узлов учета тепла отопления, 28 узлов учета по ГВС, 43 узла учета потребления холодной воды.

Узлы учета тепловой энергии на отопление и горячее водоснабжения установлены в 11 зданиях, узлы учета холодной воды – в 7 зданиях. Значения расчетной тепловой нагрузки на отопление определены специалистами МЭИ в результате энергетического аудита по скорректированным значениям удельных тепловых характеристик (для максимальной расчетной температуры наружного воздуха в г. Москве –26 °С). Фактические значения потребления тепловой энергии на отопление определены по приборам учета тепла в зданиях, в среднем за прошедший отопительный период. В среднем фактическое теплопотребление зданиями составляет около 30 % от договорных и 50 % от расчетных значений. Значения «перетоков» зданий в среднем составляют около 35 %, это в разной степени относится к различным зданиям микрорайона. Около 60 % зданий имеют термическое сопротивление ограждений 1,5 К·м²/Вт, оставшиеся 40 % – 1,15 К·м²/Вт.

Средний расход воды по указанным зданиям составляет 310 литров на человека в сутки, при нормативе 400 литров. Показатели существенного перерасхода горячей воды относятся к зданиям, в которых располагаются арендаторы («Лукойл» и «Эксима»), в которых только 4 квартиры занимают жители. Соотношение расчетных и фактических тепловых нагрузок по всему ЦТП показано на рис. 1. При этом зданиям все равно требуется для поддержания нормативных значений микроклимата еще на 35 % меньше тепловой энергии, чем они получают от ЦТП.

Удельные показатели затрат тепла на обогрев единицы объема зданий достаточно устойчивы и практически не отличаются для разных типов зданий (рис. 2), что свидетельствует о несбалансированной работе отопительных систем. Различие между значениями договорной и фактической нагрузки составляет до 40-45%. На рис. 1-2 видно, что полное расхождение между договорными значениями и реально необходимым теплом достигает практически двух третей общей цифры.

Отметим, что если первая часть «экономии» устаревает с установкой соответствующих контрольно-измерительных приборов, для реализации дальнейшего потенциала энергосбережения необходима распределенная многоуровневая система регулирования теплоснабжения зданиями. Комплексный энергетический аудит и уточнение теплового баланса зданий микрорайона позволили обнаружить расхождение реального энергопотребления с договорными значениями, предложить комплекс мероприятий сокращения энергозатрат, разветвленную систему регулирования. Здания с данными значениями термических сопротивлений стен ($1,15-1,5 \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$) достаточно приемлемо удерживают тепло, приводя в ряде случаев к «перетопам»; в процессе работы выявлены существенные значения «перетоков» зданий в пределах 13-15%.

Для прояснения этих вопросов в зданиях были проведены дополнительные исследования связи тепловлажностных режимов в помещениях с особенностями функционирования отопления. Результаты эксперимента в целом подтвердили принятые ранее допущения по коррекции удельных отопительных характеристик, расчетам тепловых балансов зданий практически во всем диапазоне значений температур наружного воздуха. Значения удельных расходов на отопление зданий с различными тепловыми сопротивлениями ограждений практически не отличаются, т.к. определяются исключительно режимами функционирования отопительной системы, работой узлов смешения на входе в здание и гидравлическими особенностями конкретных объектов. Существенный разброс в полученных значениях удельных энергозатрат за отопительный сезон лишний раз свидетельствует о несбалансированной работе системы как в отдельных домах, так и по всему микрорайону в целом (табл. 1).

Основные распределители теплоты – отопительные батареи, теплопроизводительность которых, в первую очередь, определяется разницей температур между теплоносителем и воздухом в помещении. Теплоприток в здания выбранного микрорайона обеспечивается стандартными отопительными приборами (алюминиевые конвекторы, чугунные батареи) с расчетным коэффициентом теплопередачи $K=9-11 \text{ Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$. Отопительные устройства зданий в целом находятся в хорошем состоянии. Так как ограждения зданий обеспечивают

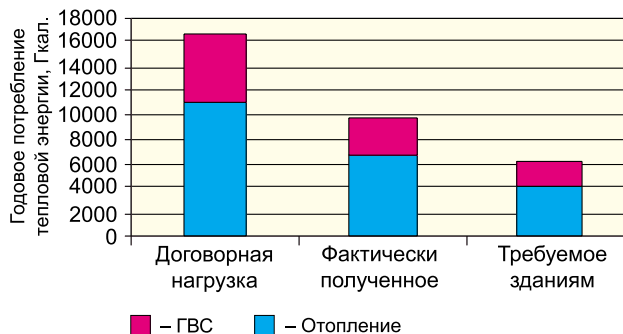


Рис. 1. Соотношение договорных, фактических и требуемых зданиям тепловых нагрузок.

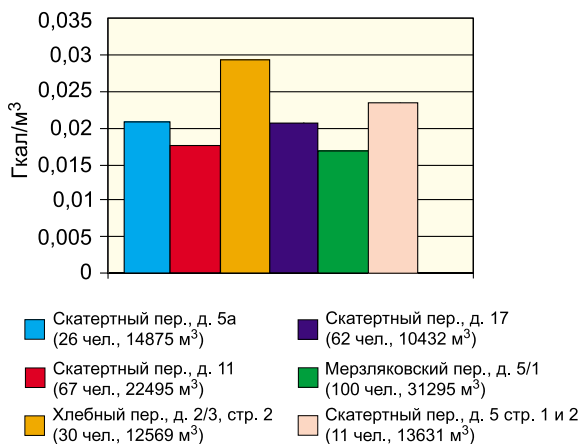


Рис.2. Удельное теплоснабжение на отопление различными зданиями.

удовлетворительный температурный режим, мощность отопительных систем определялась, исходя из натурных замеров расходов тепловой энергии на входе в здания. Критической величиной, определяющей эффективность отопительной системы, является потенциал теплоты, т.е. температура прямой сетевой воды, поступающей в здание.

Помимо регулирования температуры на источнике и непосредственно в ЦТП, отопительные системы зданий снабжаются различными устройствами, которые тоже регулируют температуру воды. При этом смесительные устройства – элеваторы, устанавливаются непосредственно на входе в здание, выполняя важную гидравлическую функцию стабилизации давления. Вместе с тем элеваторы, подмешивая к прямой сетевой воде обратную, существенно снижают температуру теплоносителя в системе отопления и, соответственно, эффективность отопления. Температура прямой сетевой воды определяется температурой наружного воздуха, и при небольших отрицательных температурах воздуха, она поддерживается в диапазоне 60-65 °С. Непосредственно к батареям теплоноситель уже приходит с температурой около

Таблица 1. Удельные энергозатраты на отопление зданий микрорайона.

Энергозатраты, Мкал/м³	Здания первой группы (1,5 К·м²/Вт)					Здания первой группы (1,15 К·м²/Вт)			
	14	21	12	9	8	5	2-3	16	10,5

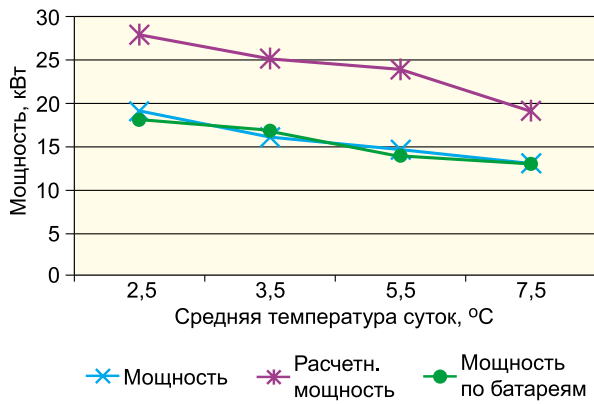


Рис. 3. Режимные зависимости и характеристики отопления здания.

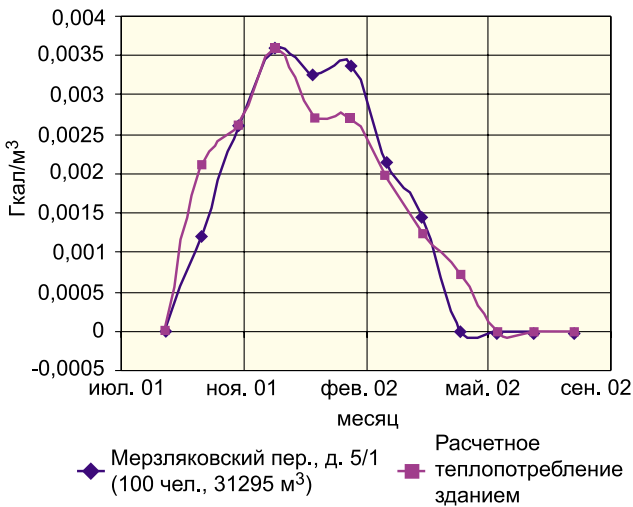


Рис. 5. Сравнение расчетных и фактических значений теплотребления здания с $R=1,15 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$.

50-55 °C, при которой невелик и коэффициент теплопередачи, и общее количество передаваемой теплоты.

Расчеты и результаты эксперимента показывают, что удельный расход сетевой воды на единицу отданной мощности существенно возрастает при падении температуры прямой сетевой воды на 20-25 °C. При этом существенно падает интенсивность теплоотдачи отопительных приборов – с 9-10 Вт/М·К до 4,5-5 Вт/М·К. Таким образом, отопительная система снимает в среднем «верхнюю треть» отопительного потенциала сетевой воды, приходящей в здание, в зависимости от ряда факторов: температуры прямой сетевой воды, перепада давления на элеваторах, площади отопительных приборов, скорости воды в отопительной системе, состояния отопительной системы в целом.

Базовые режимные характеристики здания второй группы представлены на рис. 3. Очевидна полная сходимость характеристик общей мощности, полученной по показаниям узла учета тепловой энергии, и мощности, рассчитанной по реальным режимам работы батарей через их площадь и уточненный коэффициент теплопередачи. Значение требуемой расчетной мощности, полученное по уточненному значе-

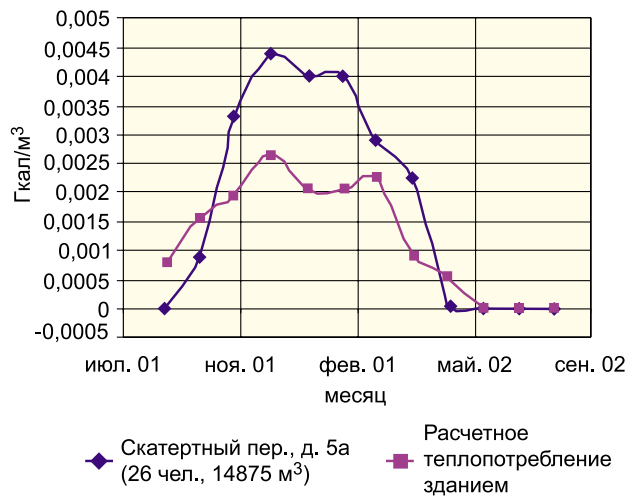


Рис. 4. Сравнение расчетных и фактических значений теплотребления здания с $R=1,5 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$.

нию удельной отопительной характеристики, выше примерно на треть.

Зданиям и на самом деле требуется большее количество тепловой энергии для покрытия номинальных теплотерь ограждениями. Это дополнительное количество энергии выделяют люди и находящиеся в квартирах агрегаты (холодильники, плиты, стиральные машины, осветительные приборы). В отопительной технике эту величину принимают на уровне 20,9 Вт/м². Проблема состоит в том, что мы не можем точно определить, какая доля этой теплоты идет на нагрев воздуха помещений до нормативных значений, и какая является излишней, можно условно разделить эту цифру ориентировочно пополам.

Таким образом, здание второй группы объемом 6670 м³, удельная отопительная характеристика которого составляет 0,23 Вт/м³·К, получает с системой отопления в конце отопительного сезона (середина марта 2002 г.) 13-19 кВт, или 1,9-2,8 Вт/м³ здания, и с внутренними тепловыделениями до 3 Вт/м³. При этом в здании наблюдались небольшие значения избытков теплоты. Как уже отмечалось выше, это связано с приемлемыми значениями термических сопротивлений ограждений, достаточно эффективными приборами системы отопления.

Рис. 4 наглядно демонстрирует величины «перетопов» в здании, рис. 5 иллюстрирует совпадение теплопритоков и теплотерь ограждением практически в течение всего отопительного периода. Для экспресс-анализа картины с «перетопами» или «недотопами» зданий в процессе составления энергетических балансов можно воспользоваться функциональной балансовой диаграммой «генерации-диссипации», по оси абсцисс которой откладываем интегральные значения термических сопротивлений ограждений, по оси ординат – удельную расчетную (фактическую) мощность системы отопления. Положение здания на диаграмме обусловлено, в первую очередь, практически постоянным значением $R_{огр}$, значения же удельной тепловой мощности q_v варьируется в зависимости от температур сетевой воды. Предельное значение q_v

определяется, исходя из температурного графика и количества отопительных устройств (табл. 2-3).

Применение комплексной функционально-балансовой диаграммы для всесторонней оценки энергоэффективности здания позволяет получить ряд других важных результатов:

- показывает необходимое тепловое сопротивление ограждений для данной мощности отопления при данных температурах отопительного периода, определяет динамику условий по степени комфортности в течение отопительного периода, указывает наиболее эффективные способы повышения тепловой эффективности здания, позволяет определить оптимальные значения тепловых сопротивлений стен для данных температур наружного воздуха и мощности отопления;

- показывает необходимую мощность системы отопления для данных значений теплового сопротивления ограждений при данных температурах отопительного периода, позволяет определить интегральное состояние микроклимата в здании для каждой температуры отопительного периода при данных сочетаниях мощности отопления и теплосопротивления ограждений;

- определяет реальные затраты энергии на обеспечение необходимого комфорта в здании при данных температурах наружного воздуха и мощности отопления, дает зависимость регулирования отопительной мощности от температуры наружного воздуха при данных значениях теплового сопротивления ограждений.

Визуальное представление зданий 1-ой и 2-ой групп на диаграмме демонстрирует предельные температуры наружного воздуха, диапазоны возможного регулирования тепловой нагрузки. Совпадение положения зданий с изотермами на диаграмме иллюстрирует баланс отопления и теплопотерь ограждениями. Вместе с тем видно, что для зданий условной 3-ей группы с недостаточным термическим сопротивлением ограждений (около 0,5-0,6 м²·К/Вт), даже максимальная мощность отопления едва обеспечит компенсацию теплопотерь при -5° - 10°С.

Именно в балансовых функциональных координатах целесообразно построение функциональной типологии зданий, опирающейся на понимание модели здания как распределенного объекта.

Отдельной проблемой оценки эффективности отопительной системы является и пространственная неравномерность ее

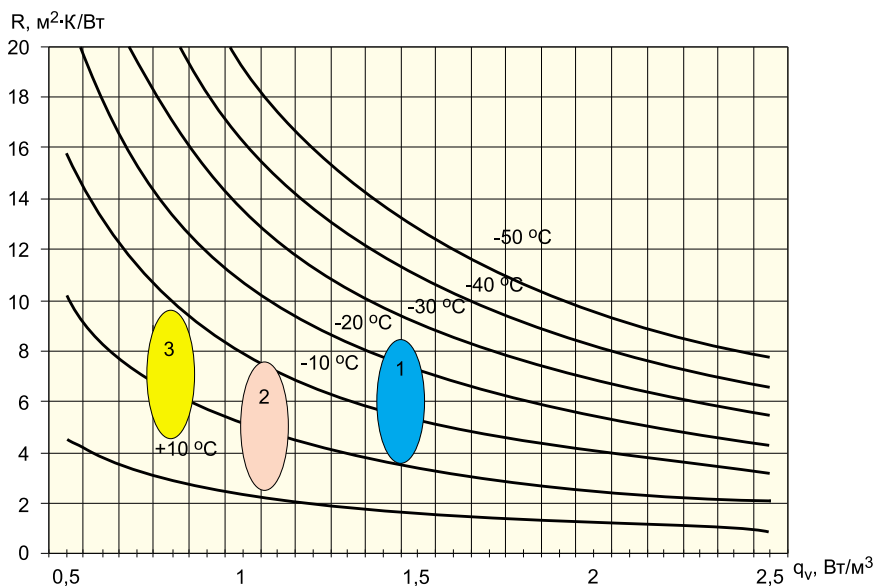


Рис. 6. Энергофункциональная балансовая диаграмма для зданий выделенных трех групп. По оси абсцисс – приведенное тепловое сопротивление ограждений – R , м²·К/Вт, по оси ординат – удельная мощность отопительной системы здания – q_v , Вт/м³.

функционирования, обусловленная самыми различными причинами, что требует отдельного исследования. Объемы современных жилых и общественных зданий приводят к тому, что различия в параметрах разных частей здания весьма велики, и обеспечить эффективное регулирование отопительно-вентиляционной нагрузки в таких зданиях возможно с помощью распределенной системы, сочетающей качественное регулирование температуры магистральной сетевой воды на источнике, регулирование нагрузки ЦТП и регулирование в зданиях.

Выразим коэффициент компактности здания:

$$K = \frac{F}{V}; 1/м,$$

где: F – общая площадь внешних ограждающих конструкций, м²;

V – внешний объем здания, м³.

Таблица 2. Мощность системы отопления при известных расходах теплоносителя и разнице температур, кВт.

G, т/ч	5 °С	10 °С	15 °С	20 °С	25 °С	30 °С	35 °С
1	5,8	11,6	17,4	23,2	29	34,8	40,6
2	11,6	23,2	34,8	46,4	58	69,6	81,2
3	17,4	34,8	52,2	69,6	87	104,4	121,8
4	23,2	46,4	69,6	92,8	116	139,2	162,2
5	29	58	87	116	145	174	214,6
6	34,8	69,6	104,4	149,2	174	208,9	243,6
7	40,6	81,2	121,8	162,4	203	243,6	284,2
8	46,4	92,8	139,2	185,6	232	278,4	324,8
9	52,2	104,4	156,6	208,8	261	313,2	365,4
10	58	116	174	232	290	348	406

Таблица 3. Удельная объемная мощность отопления при известных объемах зданий, Вт/м³.

	10	20	30	40	50	60	70	80	100	125	150	175	200	250	300	350	400
2000	5	10	15	20	25												
4000	2,5	5	7,5	10	12,5	15											
6000	1,6	3,3	5	6,6	8,3	10	11,6	13,3	16,6								
8000	1,25	2,5	3,75	5	6,25	7,5	8,75	10	12,5	15,6							
10000	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12,5	15	17,5					
12000	0,83	1,66	2,5	3,3	4,16	5	5,8	6,6	8,3	10,4	12,5	14,6	16,6				
14000		1,4	2,14	2,8	3,6	4,3	5	5,7	7,1	8,9	10,7	12,5	14,3				
16000		1,25	1,87	2,5	3,12	3,75	4,37	5	6,25	7,8	9,37	11	12,5	15,6			
18000		1,11	1,6	2,12	2,77	3,3	3,9	4,4	5,55	6,9	8,3	9,7	11,1	13,8	16,6		
20000		1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5	6,25	7,5	8,75	10	12,5	15		
25000			1,2	1,6	2	2,4	2,8	3,2	4	5	6	7	8	10	12	14	
30000			1	1,3	1,66	2	2,3	2,66	3,3	4,17	5	5,83	6,7	8,3	10	11,7	13,3
35000				1,14	1,43	1,7	2	2,3	2,8	3,57	4,3	5	5,7	7,14	8,6	10	11,4
40000				1	1,25	1,5	1,75	2	2,5	3,12	3,75	4,37	5	6,25	7,5	8,75	10
45000					1,11	1,3	1,5	1,8	2,2	2,8	3,3	3,9	4,4	5,5	6,66	7,8	8,9
50000					1	1,2	1,4	1,6	2	2,5	3	3,5	4	5	6	7	8

Тогда важнейший теплоэнергетический показатель – удельную отопительную характеристику – выразим следующим образом:

$$q = K/R, \text{ Вт/м}^3\cdot\text{К}$$

здесь R – интегральное термическое сопротивление ограждений, К·м²/Вт.

При росте размеров здания от 1 тыс. м³ до 100 тыс. м³, коэффициент компактности падает с 0,5 до 0,1.

Расчеты показывают, что при разделении «единого здания» общим объемом 100 тыс. м³ на 10 строений объемом по 10 тыс. м³, теплотери ограждающими конструкциями возрастают в 2,5 раза, т.к. возрастает внешняя площадь ограждающих конструкций. При дальнейшем делении на 100 строений по 1 тыс. м³, площадь возрастает еще в 2 раза, следовательно, и потери также.

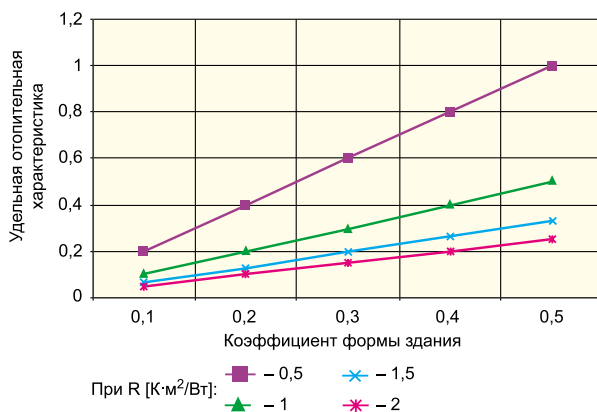


Рис. 7. Влияние формы здания на энергетические характеристики.

Очевидно, что уменьшение размеров зданий меньше 2,5-3 тыс. м³ существенно повышает теплотери ограждающими конструкциями. Наоборот, достаточно большие объемы в какой-то мере снижают влияние недостаточных термических сопротивлений ограждающих конструкций. То есть, чем меньше здание, тем большую роль играет термическое сопротивление ограждений.

Неравномерность, нестабильность работы отопления может быть обусловлена и гидравлической разбалансированностью системы. Фиксация гидравлических характеристик здания в паспорте и их соблюдение являются важной предпосылкой обеспечения оптимальных теплогидравлических режимов. Безусловно, вопрос об эффективности непосредственно отопительных систем зданий тесно увязан с рациональной работой всего теплоэнергетического комплекса города. Если здания, в силу различных причин, плохо «снимают» подводимое тепло, следствием является высокая температура обратной сетевой воды и, как следствие, снижение эффективности работы городских ТЭЦ и РТС. Увеличивается и расход воды в магистралях, количество электроэнергии на ее подкачку, подпитка сети и др. Таким образом, отклонение буквально одного-двух параметров настройки сети приводит к системному спаду эффективности. Тем более важно понимать, как согласовать работу различных участков и элементов комплекса жизнеобеспечения, обеспечить соблюдение оптимальных режимов всех звеньев разветвленной региональной системы энергообеспечения.

Коррекция энергетического паспорта здания целесообразна именно в направлении выявления функциональной эффективности здания и составляющих его инженерных систем. Паспортизация зданий в результате проведения энергетических обследований должна давать ясные представления об эффективности здания с точки зрения степени достижения оптимальных параметров. При этом само понятие «оптимальности» здания как теплоэнергетической многоуровневой системы также требует дополнительной теоретической и методологической проработки.

Выводы

Таким образом, комплексный подход и энергетический аудит зданий микрорайона позволил выявить существенные значения перетоков зданий в пределах 13-15%. Результаты эксперимента в целом подтвердили принятые ранее допущения по коррекции удельных отопительных характеристик, расчетам тепловых балансов зданий практически во всем диапазоне значений температур наружного воздуха. Мониторинг данных узлов учета тепла отопления, горячей и холодной воды микрорайоном показал существенные расхождения договорных, расчетных и реальных цифр. Фактическое потребление тепла зданиями составило около 60% от договорных начений.

Критическим диапазоном R, ниже которого энергопотери зданием зимой растут слишком быстро, являются значения 0,6-0,8 м²·К/Вт. Здания обеих показанных групп имеют тепловое сопротивление ограждений свыше 1 м²·К/Вт, и в этой связи утепление ограждений не является критическим звеном сокращения теплопотерь. На основе анализа ряда объектов уточнены состав критериев, удельные показатели, описывающих системы теплоэнергоснабжения зданий и микрорайонов (теплоплотность, удельная протяженность, удельные потери при транспортировке и др.) для классификации систем теплоснабжения и выявления максимальных потерь энергии и, соответственно, потенциала энергосбережения.

По результатам реальных измерений очевидна коррекция договорных величин теплопотребления зданиями практически на 45-50%. Для реализации потенциала энергосбережения необходима многоуровневая система регулирования отопления - на ЦТП, у входа в здания, пофасадного регулирования. Важным элементом такой системы является установленное на ЦТП оборудование частотного привода насосов холодного и горячего водоснабжения. За счет управления давлением в соответствии с требуемой нагрузкой сети достигнута существенная экономия воды, электроэнергии и теплоты.

В комплексе с узлами учета разработана и создана система диспетчеризации и управления энергопотреблением, система мониторинга данных потребления ТЭР микрорайоном. В ЦТП микрорайона создан информационно-демонстрационный комплекс зоны высокой энергетической эффективности. Создание информационно-демонстрационной системы мони-

торинга энергопотребления позволяет обеспечить эффективную и наглядную обратную связь. Установка узлов учета ТЭР на зданиях микрорайона позволит, кроме того, проводить активную работу с населением, представителями жилищных кооперативов и ТСЖ по экономии энергоресурсов на основании точных значений потребления энергии.

Тиражирование подобных энергосберегающих решений по территории ЦАО развернуто практически во всех районных Управах округа. В районах выбраны площадки для создания различных объектов, отражающих различные аспекты многогранной и междисциплинарной проблематики коммунального энергосбережения. С целью развертывания широкой системы мониторинга энергопотребления коммунальным комплексом в районах проанализированы все потребители, произведен технико-экономический расчет для оценки эффективности подобных мероприятий. Показано, что критическим значением тепловой нагрузки, выше которого установка узлов учета окупается в обозримые сроки, является величина 0,2 МВт (0,175 Гкал/ч). Поэтапная реализация программы создания системы учета на крупных объектах коммунального хозяйства в районах, таким образом, занимает от 4 до 8 лет. В течение этого срока все крупные (свыше 0,2 МВт) потребители будут оснащены системами учета тепловой энергии, что приведет к суммарной экономии бюджетных средств на энергоресурсы в среднем около 2 млрд руб. при затратах 0,8 млрд руб.

ЛИТЕРАТУРА

1. Байдаков С.Л., Роголев Н.Д. О комплексном территориальном подходе к повышению энергетической эффективности коммунального хозяйства города. // Энергосбережение. 2002 г., № 1.
2. Богословский В.Н. Тепловой режим зданий. - М., Стройиздат, 1979 г.
3. Гашо Е.Г., Козырь А.В. Опыт и проблемы реализации регионального балансового подхода на территории мегаполиса. // Новости теплоснабжения. 2002 г., № 2.
4. Гашо Е.Г., Михайлов О.Ю. Информационно-методические и правовые проблемы повышения эффективности теплоснабжения в регионах. // Новости теплоснабжения. 2002 г., № 8.
5. Дегтев Г.В. Территориальные аспекты энергосбережения в коммунальном хозяйстве крупного города. // Энергосбережение, 2001 г. № 6.
6. Дегтев Г.В. Организационно-экономические аспекты реализации программы энергосбережения в жилищно-коммунальном хозяйстве Центрального административного округа г. Москвы. // Энергосбережение. 2002 г., № 6.
7. Коваль А.В., Строганов С.А. Установка и эксплуатация узлов учета тепловой энергии на объектах микрорайона «Скертный». // Новости теплоснабжения. 2002 г., № 2.
8. Отопление и вентиляция. Справочник. Под ред. В.Н.Богословского, Сканава А.Н. - М., Стройиздат, 1975 г.
9. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. - М., Издательство МЭИ, 1999 г.
10. Табунщиков Ю.А., Бродач М.М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. - М.: НП АВОК, 2002 г.