

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2023, Том 15, № 4 / 2023, Vol. 15, Iss. 4 <https://esj.today/issue-4-2023.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/05SAVN423.pdf>

2.1.3. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Псаров, С. А. Анализ эффективности теплоснабжения зданий по показаниям приборов учета / С. А. Псаров, Е. В. Шумилин // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15. — № 4. — URL:

<https://esj.today/PDF/05SAVN423.pdf>

For citation:

Psarov S.A., Shumilin E.V. Analysis of the efficiency of heat consumption of buildings according to the readings of metering devices. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023; 15(4): 05SAVN423. Available at:

<https://esj.today/PDF/05SAVN423.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.)

УДК 697.341

Псаров Сергей Александрович

ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия

Доцент

Кандидат физико-математических наук

E-mail: 006212@pnu.edu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4368-7848>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=36410

Шумилин Евгений Викторович

ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия

Старший преподаватель

E-mail: 002194@pnu.edu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3210-1469>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=603395

Анализ эффективности теплопотребления зданий по показаниям приборов учета

Аннотация. Для расчета экономической целесообразности мероприятий по энергосбережению всегда необходимо предварительно определять резервы экономии энергетических ресурсов. Сравнивая количество тепловой энергии, фактически потребляемой зданиями по показаниям приборов учета, с эффективным значением, можно выявить такие резервы. Определение уровня эффективного потребления тепловой энергии зданиями представляет собой сложную задачу из-за множества влияющих факторов: эксплуатационные факторы, теплофизические свойства ограждающих конструкций здания, коэффициенты теплопередачи отопительных приборов, и биотехническим характером системы: интенсивным вмешательством человека в формирование микроклимата. Так, например, температура наружного воздуха и теплопотребление от системы отопления связаны между собой, только если температура в помещении близка к комфортной. При существенном недогреве или перегреве помещений человек поддерживает минимальную или максимальную комфортную температуру в помещении с помощью дополнительных теплопоступлений или увеличения воздухообмена. В этом случае теплопотребление от системы отопления зависит только от температуры воздуха внутри помещений и не зависит от температуры наружного воздуха.

В данной работе рассмотрен один из способов анализа теплотребления зданий по данным приборов учета тепловой энергии, позволяющий выделить диапазоны данных, в которых наблюдается зависимость теплотребления от температуры наружного воздуха, области существенного избытка и недостатка тепловой энергии; получить температурный график регулирования отопительной нагрузки, который учитывает реальное состояние системы отопления здания (изменение коэффициента смешения элеваторов, площади отопительных приборов), теплозащитные свойства ограждающих конструкций, бытовые теплопотупления; определить погрешность результатов статистическими методами по экспериментальным данным; определить уровень эффективного теплотребления.

Ключевые слова: энергосбережение; теплоснабжение; теплотребление; учет тепловой энергии; отопление; энергоэффективность; температурный график; микроклимат

Введение

На сегодняшний день потребителям тепловой энергии помимо услуг по установке и сервисному обслуживанию узлов учета и автоматизированных тепловых пунктов энергосервисными компаниями предлагаются услуги информационного характера в области энергосбережения. Это в первую очередь АСКУЭ — автоматизированные системы контроля и управления энергией. В большинстве случаев это всего лишь системы мониторинга, позволяющие в т. ч. считывать данные с теплосчетчиков, контролировать текущее потребление теплоты и теплоносителя, составлять отчеты и графики за требуемый период времени. Отдельные программы имеют расширенные возможности. Например, в программе лаборатории энергоресурсосбережения (ЛЭРС)¹ имеется возможность сравнения текущего теплотребления с договорными величинами, сигнализации о превышении средних значений и пр. Большинству потребителей указанных возможностей вполне достаточно, т. к. для более детального анализа уже требуется персонал с высоким уровнем квалификации.

К программам с функцией анализа, используемым при проведении энергетических исследований квалифицированными специалистами, можно отнести информационно-аналитическую систему оперативного наблюдения и ретроспективного анализа режимов функционирования потребителей тепловой энергии [1]. Данная система позволяет оценивать эффективность регулирования теплотребления путем сравнения с регрессионной моделью объекта энергетики без регулирования [2], с виртуальным регулированием с другими настройками [3], при изменении настроек регулирования [4].

Как видно из рассмотренных описаний программ — одной из основных функций является визуализация данных о потреблении ресурсов. В некоторых программах возможна сигнализация при достижении параметрами предела, устанавливаемого пользователем. Анализ полученных данных и графиков с точки зрения эффективности потребления энергоресурсов в большинстве случаев приходится выполнять потребителю самостоятельно, либо привлекать дорогостоящих квалифицированных специалистов с соответствующим программным обеспечением.

Постановка задачи

Первое, что приходит на ум при необходимости анализа теплотребления по показаниям узла учета, является использование методики сравнения фактически потребленного количества теплоты с расчетным значением, пересчитанным на фактическую

¹ О программе «ЛЭРС учёт». URL: <https://docs.lers.ru/manual/> (дата обращения: 04.07.2023).

температуру наружного воздуха. Использованию этой простой методики посвящено множество работ. Примеры использования такого подхода рассмотрены в работах [5; 6]. К недостаткам данной методики можно отнести то, что при сравнении не учитывается: выполнение температурного графика теплоснабжающей организацией, отличие гидравлического режима от расчетного, техническое состояние отопительной системы и т. п. Кроме того, само расчетное значение может быть получено с высокой погрешностью из-за отклонения реальных характеристик материалов и конструкций ограждений от принятых в расчете, отклонения режимов работы вентиляционных систем, изменения теплопоступлений и др.

Применение более сложных методик анализа теплоснабжения с нормализацией данных по температуре и скорости наружного воздуха, по температурам, расходу и разнице давлений теплоносителя, рассмотренных в работах [7; 8], позволяет повысить качество анализа, но не учитывает участие человека в формировании внутреннего микроклимата помещений.

Эффективность функционирования систем, осуществляющих потребление тепловой энергии, в основном определяется степенью соответствия количества теплоты, потребленной каждым объектом, некоторому энергоэффективному для данного объекта уровню. Сравнивая количество реально потребленной энергии с эффективным значением, можно выявить резервы экономии энергетических ресурсов и финансовых средств, разработать мероприятия по устранению потерь энергии и определить их экономическую целесообразность.

Определение эффективного уровня потребления тепловой энергии зданиями представляет собой сложную задачу. Это связано как с большим количеством факторов, влияющих на температуру внутри помещений: эксплуатационные факторы (температура наружного воздуха, скорость и направление ветра, солнечная радиация и т. д.), теплофизические свойства ограждающих конструкций здания, коэффициенты теплопередачи отопительных приборов, так и биотехническим характером системы: интенсивным вмешательством человека в формирование микроклимата (изменение режимов работы вентиляции, бытовые теплопоступления и т. д.).

Наиболее простой и эффективный способ регулирования параметров микроклимата человеком — это изменение величины воздухообмена в помещении. Только с помощью изменения воздухообмена в помещении можно поддерживать комфортную температуру $T_{в} = 22 \pm 2^{\circ}\text{C}$ при изменении тепловой мощности отопительных приборов от 80 % до 160 % (по отношению к требуемой при данной температуре наружного воздуха). Поэтому даже при существенном перегреве температуры в помещениях приближаются к верхнему уровню комфорта и остаются неизменными при дальнейшем повышении теплоотдачи отопительных приборов [9; 10].

Таким образом, мы приходим к выводу, что температура наружного воздуха и теплоснабжение от системы отопления будут связаны только если температура в помещении близка к комфортной, т. к. только в этом случае участие человека в формировании микроклимата минимально. При существенном недогреве или перегреве человек поддерживает минимальную или максимальную комфортную температуру в помещении с помощью дополнительных теплопоступлений или увеличения воздухообмена. В этом случае теплоснабжение от системы отопления зависит только от температуры воздуха внутри помещений и не зависит от температуры наружного воздуха. Таким образом, для корректного определения зависимости теплоснабжения от температуры наружного воздуха из общего массива данных необходимо исключить указанные точки перегрева и недогрева.

На рисунке 1 приведен расчетный температурный график для г. Хабаровска и фактическая зависимость среднесуточной температуры подающего трубопровода T_1 от среднесуточной температуры наружного воздуха $T_{н}$.

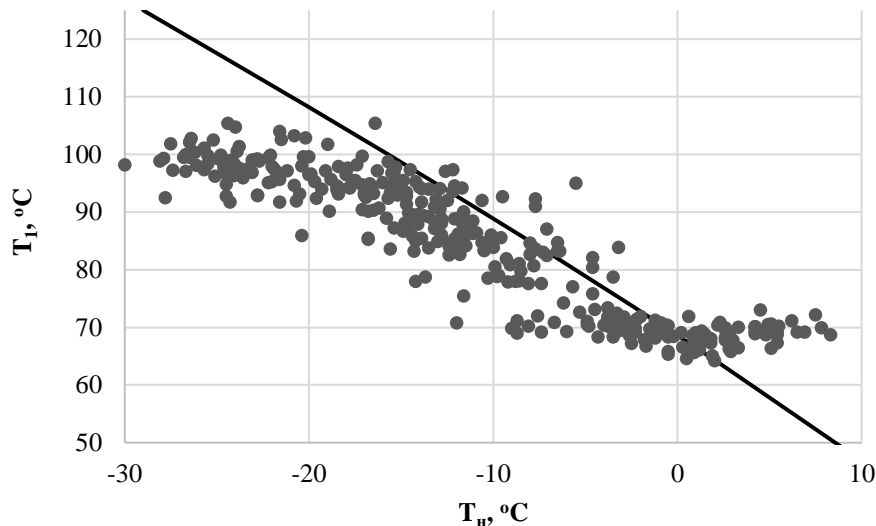


Рисунок 1. Экспериментальные значения среднесуточной температуры подающего трубопровода T_1 от среднесуточной температуры наружного воздуха за отопительные периоды 2021–2022 и 2022–2023 года (точки) и расчетный температурный график подающего трубопровода (составлено авторами)

Значительный разброс значений фактической температуры подающего трубопровода, показанный на рисунке 1 позволяет надеяться, что, несмотря на несанкционированные изменения коэффициента смешения элеваторов, площади отопительных приборов и другие вмешательства в работу тепловых узлов и систем отопления, в имеющемся объеме данных будут присутствовать точки, в которых теплотребление окажется связанным с температурой наружного воздуха.

В данной работе на примере группы зданий Тихоокеанского государственного университета рассмотрен один из возможных способов анализа данных узлов учета тепловой энергии, позволяющий выделить данные, в которых теплотребление связано с температурой наружного воздуха, и проведен анализ эффективности теплотребления.

Теоретические положения

Запишем уравнения теплового баланса здания в следующем виде:

$$\begin{cases} Q_o = k_i F_i (T_{\text{пр}} - T_{\text{в}})^{n+1} \\ Q_o + Q_{\text{сл.пост}} - Q_{\text{сл.пот}} = (T_{\text{в}} - T_{\text{н}}) V_{\text{от}} \end{cases}, \quad (1)$$

где Q_o — тепловая мощность системы отопления; $\theta = \sum k_i F_i$ — сумма произведений коэффициентов теплопередачи и площадей отопительных приборов; $T_{\text{пр}}$ — средняя температура отопительных приборов; $T_{\text{в}}$ — температура воздуха внутри помещения; n — коэффициент, учитывающий нелинейность теплоотдачи отопительного прибора; $Q_{\text{сл.пост}}$ — дополнительные случайные тепlopоступления (бытовые, солнечная радиация и т. д.); $Q_{\text{сл.пот}}$ — дополнительные случайные тепlopотери (прветривание, увеличение инфильтрации при изменении скорости и направления ветра и т. д.); $q_{\text{от}}$ — удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию зданий; $V_{\text{от}}$ — отапливаемый объем зданий; $T_{\text{н}}$ — температура наружного воздуха. Колебания расхода воды через систему отопления по показаниям прибора учета несущественны, поэтому в первом уравнении (1) поправки на изменение расхода воды через отопительный прибор не учитывались.

Если известны параметры θ и $q_{от}$, расчетная температура внутреннего воздуха $T_{в.р}$, средние значения и дисперсии случайных теплотерь и тепlopоступлений, то с помощью системы (1) можно определить среднюю температуру приборов как функцию наружной температуры $T_{пр.эфф} = f(T_H)$. При этом дисперсии случайных величин позволят зафиксировать требуемый уровень обеспеченности $T_{в.р}$. Регулирование тепlopотребления с использованием полученной зависимости является наиболее эффективным. Любое отклонение приводит либо к нерациональным затратам тепловой энергии, либо нарушению санитарно-гигиенических условий. Поэтому одной из основных задач при анализе тепlopотребления является определение оптимальной средней температуры отопительных приборов как функции наружной температуры $T_{пр.эфф} = f(T_H)$ по имеющимся экспериментальным данным.

Анализ данных потребления тепловой энергии

В работе рассмотрены суточные данные по расходу тепловой энергии на отопление группы зданий Тихоокеанского государственного университета в течение двух отопительных периодов, аккумулированные в приборе учета, выполненном на базе теплосчетчика КМ-5. Системы отопления указанных зданий подключены к системе теплоснабжения через элеваторные установки, какое-либо регулирование тепlopотребления отсутствует.

Среднюю температуру отопительных приборов вычислим с использованием температуры теплоносителя в подающем T_1 и обратном T_2 трубопроводах по формуле²:

$$T_{пр} = T_1 - \frac{0,5+u}{1+u} (T_1 - T_2), \quad (2)$$

где u — средний коэффициент смешения элеваторов. Коэффициент смешения элеваторов в исследуемой группе зданий равен нулю по причине перекрытия подмешивающей линии пластиной в межфланцевом соединении, что приводит к постоянному завышению температуры приборов относительно расчетного значения. Причины перекрытия линии подмеса — невыполнение температурного графика теплоснабжающей организацией в наиболее холодное время отопительного периода (рис. 1).

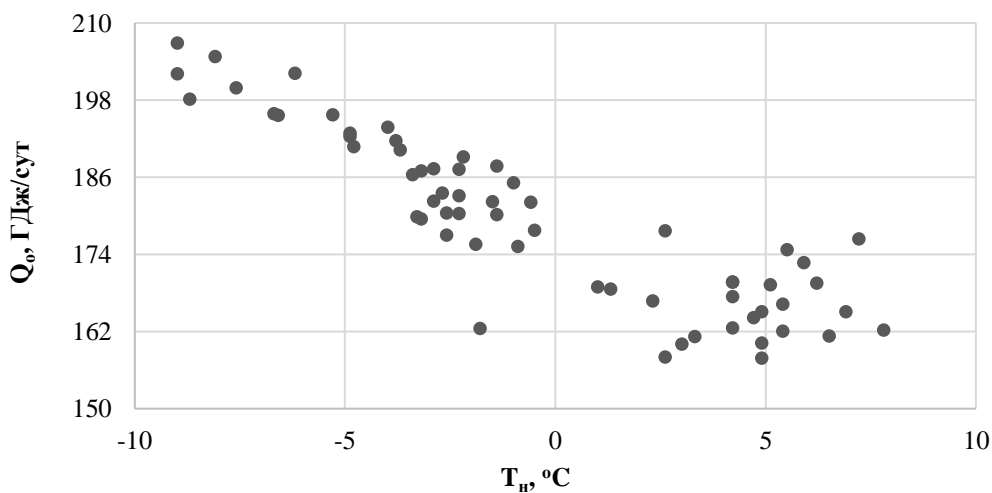


Рисунок 2. Экспериментальные значения среднесуточного тепlopотребления Q_0 от температуры наружного воздуха T_H при средней температуре отопительных приборов $T_{пр} = 61 \pm 1,5$ °C (составлено авторами)

² Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. — М.: Издательство МЭИ, 2001. — 472 с.

Согласно системе (1) количество потребленной теплоты Q_o зависит от двух детерминированных параметров T_{np} и T_n . Предварительно данные были сгруппированы по средним температурам отопительных приборов $T_{np} = 58 \pm 1,5; 61 \pm 1,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ и так далее до $T_{np} = 88 \pm 1,5 \text{ } ^\circ\text{C}$. Зависимости количества потребленной теплоты от температуры наружного воздуха при средних температурах приборов $T_{np} = 61; 67; 79 \text{ } ^\circ\text{C}$ показаны на рисунке 2–4. (Значения осей ординат выбраны с шагом 12 ГДж/сут для удобства дальнейшего анализа).

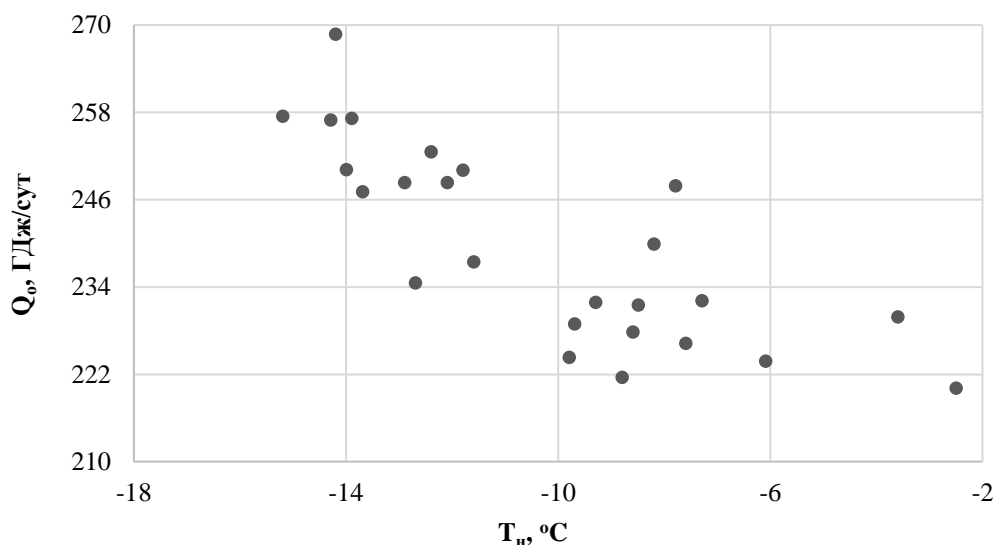


Рисунок 3. Экспериментальные значения среднесуточного теплопотребления Q_o от температуры наружного воздуха T_n при средней температуре отопительных приборов $T_{np} = 67 \pm 1,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ (составлено авторами)

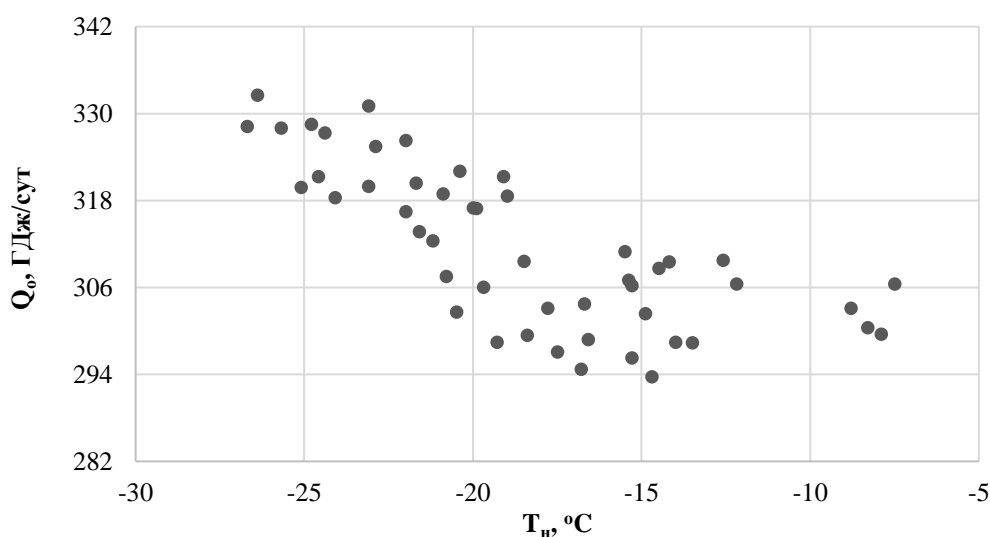


Рисунок 4. Экспериментальные значения среднесуточного теплопотребления Q_o от температуры наружного воздуха T_n при средней температуре отопительных приборов $T_{np} = 79 \pm 1,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ (составлено авторами)

На рисунках 2–4 видно, что при низких температурах наружного воздуха теплопотребление зависит от температуры наружного воздуха, однако при превышении температурой воздуха определенного значения эта зависимость исчезает (наблюдается перетоп), а разброс данных несколько увеличивается из-за вмешательства людей в регулирование температуры внутреннего воздуха.

Для того, чтобы выделить данные, в которых наблюдается явная зависимость теплопотребления от температуры наружного воздуха использовалось следующее предположение. Если теплопотребление не зависит от температуры наружного воздуха (при перегреве и недогреве), то данное теплопотребление будет наблюдаться при различных температурах наружного воздуха. В тоже время, если зависимость теплопотребления от температуры наружного воздуха присутствует, то определенное значение теплопотребления будет наблюдаться в узком диапазоне температур наружного воздуха. Например, на рисунке 4 видно, что теплопотребление равное 306 ГДж/сут наблюдается при T_n от минус 21 до минус 7,5°C; теплопотребление равное 318 ГДж/сут при T_n от минус 25,1 до минус 19°C; теплопотребление равное 330 ГДж/сут при T_n от минус 26,7 до минус 22°C. Таким образом для классификации данных можно использовать методы дисперсионного анализа.

Дальнейшая группировка данных осуществлялась по значениям теплопотребления $Q_o = 132 \pm 6; 144 \pm 6$ ГДж/сут и далее до $Q_o = 372 \pm 6$ ГДж/сут. (Значения осей ординат на рис. 2–4 соответствуют диапазонам группировки.) Таким образом, получаем таблицу значений температур наружного воздуха, сгруппированных по средним температурам отопительных приборов и значениям теплопотребления. Для каждой группы температур наружного воздуха рассчитывалась дисперсия, значения которой для данных, представленных на рисунках 2–4, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Дисперсия выборок температур наружного сгруппированных по средним температурам приборов и значениям теплопотребления

Средняя температура отопительных приборов $T_{np} = 61 \pm 1,5^\circ\text{C}$					
Q_o ГДж/сут	156 ±6	168 ±6	180 ±6	192 ±6	204 ±6
Дисперсия	$s_{11} = 2,216$	$s_{12} = 5,613$	$s_{13} = 8,735$	$s_{14} = 2,374$	$s_{15} = 1,168$
Средняя температура отопительных приборов $T_{np} = 67 \pm 1,5^\circ\text{C}$					
Q_o ГДж/сут	216 ±6	228 ±6	240 ±6	252 ±6	264 ±6
Дисперсия	—	$s_{22} = 5,944$	—	$s_{24} = 4,237$	—
Средняя температура отопительных приборов $T_{np} = 79 \pm 1,5^\circ\text{C}$					
Q_o ГДж/сут	216 ±6	228 ±6	240 ±6	252 ±6	264 ±6
Дисперсия	—	$s_{32} = 15,718$	$s_{33} = 17,304$	$s_{34} = 5,674$	—

Составлено авторами

Согласно указанному выше предположению, данные, для которых наблюдается зависимость теплопотребления от температуры наружного воздуха (первая группа) должны иметь существенно меньшую дисперсию, чем данные, для которых данная зависимость отсутствует (вторая группа).

Для разделения данных на первую и вторую группы для каждой строки таблицы, начиная с крайних значений, проводилась попарная проверка гипотезы равенства дисперсий с помощью критерия Романовского.

Если гипотеза равенства дисперсий s_{n1} и s_{n5} отклонялась и $s_{n1} > s_{n5}$, то данные из ячейки с s_{n1} относили ко второй группе значений, а данные из ячейки с s_{n5} к первой группе. Далее дисперсии в промежуточных ячейках сравнивали с дисперсиями s_{n1} и s_{n5} . Если при сравнении одна гипотеза о равенстве дисперсий отклонялась, а вторая не отклонялась, то данные из промежуточной ячейки относили к соответствующей группе. Если при сравнении обе гипотезы отклонялись или не отклонялась ни одна гипотеза, то данные в ячейке исключались из дальнейшего анализа. Например, при средней температуре отопительных приборов 79°C данные из второй и третьей ячеек были отнесены ко второй группе, а данные из четвертой ячейки к первой.

Если гипотеза равенства дисперсий s_{n1} и s_{n5} не отклонялась, то к сравнению добавляли дисперсии s_{n2} и s_{n4} с целью найти пару различных дисперсий. При этом дисперсия, расположенная в таблице левее, должна быть больше дисперсии, расположенной правее. После нахождения такой пары дисперсий разделение данных на первую и вторую группу проводилось согласно процедуре, описанной в предыдущем параграфе. Если ни для пары дисперсий гипотеза равенства не отклонялась, то все данные в строке исключались из дальнейшего анализа. Например, при средней температуре отопительных приборов 61°C данные из первой и пятой ячеек были исключены, поскольку гипотеза о равенстве дисперсий не была отклонена в сравнении с другими дисперсиями из-за небольшого количества данных в этих ячейках; данные второй и третьей ячеек были отнесены ко второй группе, а данные из четвертой ячейки к первой. Данные при средней температуре отопительных приборов 67°C были полностью исключены.

Минимальное количество данных для применения критерия Романовского равно шести, поэтому данные, количество которых в ячейке меньше шести, также исключались из дальнейшего анализа.

После разделения на первую и вторую группы к данным были применены методы регрессионного анализа. Для этого заметим, что в ограниченном диапазоне температур нагревательных приборов зависимость Q_o от $T_{\text{пр}}$ (первое уравнение системы (1)) аппроксимируется прямой линией с точностью, намного превышающей точность экспериментальных данных. Поэтому добавление квадратичных членов, степени $(n + 1)$ и т. д. приведет к большой погрешности определения этих коэффициентов. С учетом сделанного замечания систему (1) для первой группы данных перепишем в виде линейной системы:

$$\begin{cases} Q_o = a(T_{\text{пр}} - T_{\text{в}}) + b \\ Q_o + Q_{\text{сл}} = q_{\text{от}}(T_{\text{в}} - T_{\text{н}})V \end{cases} \quad (3)$$

Коэффициенты a и b зависят от θ , n и диапазона $T_{\text{пр}}$, для которого производится аппроксимация. Решая (3) относительно Q_o , получим

$$Q_o = \frac{q_v a}{q_v + a}(T_{\text{пр}} - T_{\text{н}}) + \frac{q_v b - Q_{\text{сл}} a}{q_v + a} = c_1(T_{\text{пр}} - T_{\text{н}}) + d_1. \quad (4)$$

На рисунке 5 представлены экспериментальные значения Q_o от $(T_{\text{пр}} - T_{\text{н}})$ для первой группы данных и аппроксимирующая эти данные прямая. Значения коэффициентов оказались следующими $c_1 = 4,28 \pm 0,13$ ГДж/(сут. $^{\circ}\text{C}$) и $d_1 = -103,12 \pm 12$ ГДж/сут.

Для данных второй группы только первое уравнение системы (3) имеет смысл. Представим его в следующем виде:

$$Q_o = aT_{\text{пр}} + b - aT_{\text{в}} = c_2 T_{\text{пр}} + d_2. \quad (5)$$

Экспериментальные значения Q_o от $T_{\text{пр}}$ для второй группы данных и аппроксимирующая прямая показаны на рисунке 6. Для подгоночных параметров получены следующие значения: $c_2 = 7,10 \pm 0,11$ ГДж/(сут. $^{\circ}\text{C}$) и $d_2 = -257,6 \pm 12$ ГДж/сут.

Приравнявая уравнения (4) и (5), получим зависимость $T_{\text{пр.в}}$ от $T_{\text{н}}$:

$$T_{\text{пр.в}} = -1,52T_{\text{н}} + 54,7. \quad (6)$$

Полученная зависимость показана на рисунке 7 штрихпунктирной линией.

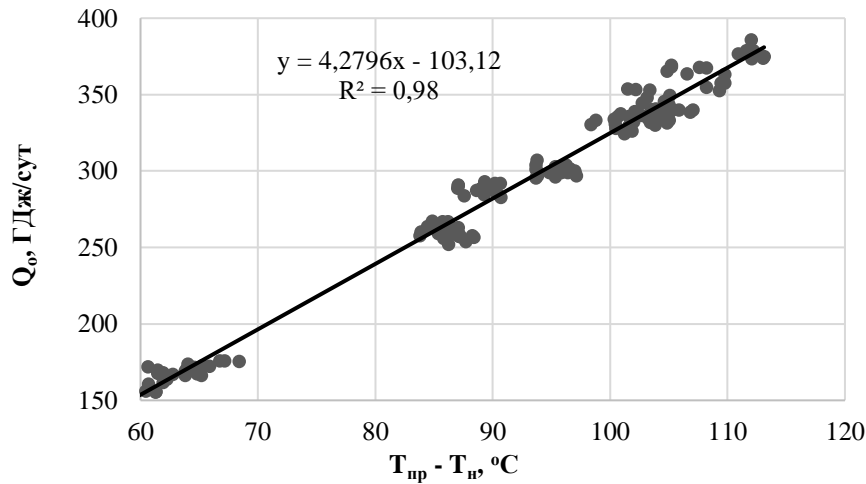


Рисунок 5. Экспериментальные значения Q_o от $(T_{\text{пр}} - T_{\text{н}})$ для данных первой группы и аппроксимирующая эти данные прямая (составлено авторами)

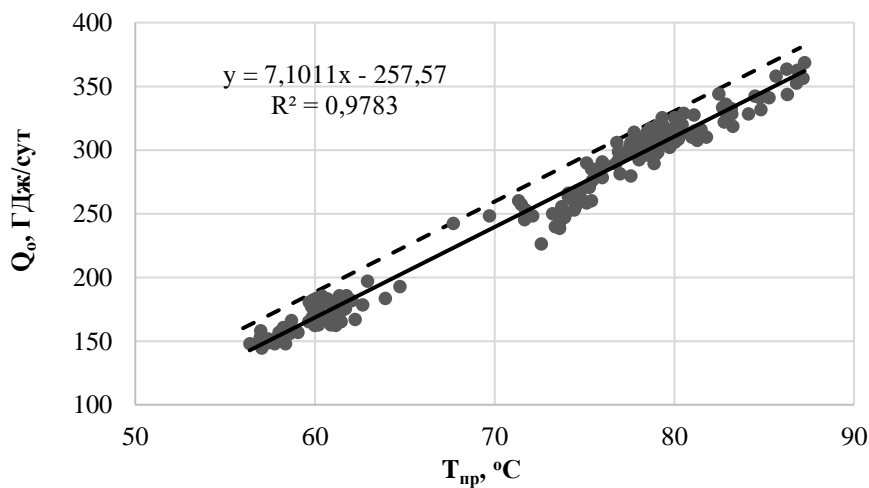


Рисунок 6. Экспериментальные значения Q_o от $T_{\text{пр}}$ для данных второй группы и аппроксимирующая эти данные прямая. Пунктиром показана прямая, соответствующая минимальной комфортной температуре внутри помещения (составлено авторами)

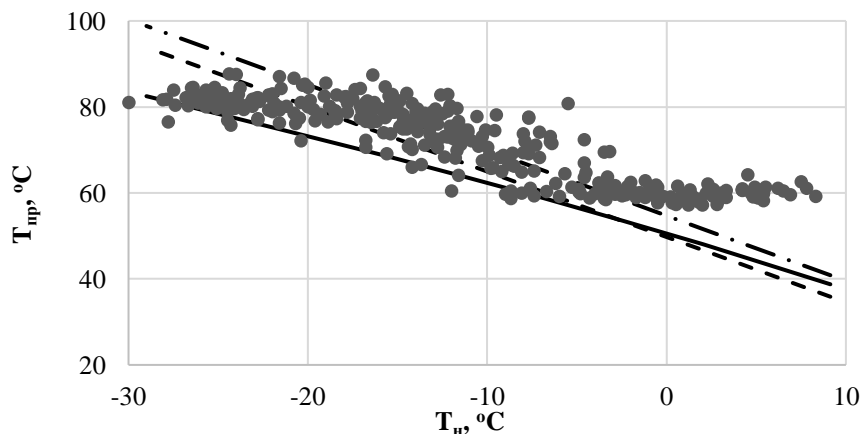


Рисунок 7. Зависимость средней температуры отопительных приборов от температуры наружного воздуха: экспериментальные значения (точки), расчетное для отопительного графика 95–70°C (сплошная линия), оценка для $T_{\text{пр.эфф}}$ (пунктирная линия), оценка для $T_{\text{пр.в}}$ (штрихпунктирная линия) (составлено авторами)

На рисунке 7 видно, что оценка $T_{\text{пр.в}}$ имеет больший по модулю наклон, чем расчетный температурный график. Это свидетельствует о заниженной площади поверхности нагревательных приборов в исследуемых зданиях относительно расчетного значения. Поэтому регулирование средней температуры приборов по отопительному графику привело бы к недостатку теплоты при низких температурах наружного воздуха. Компенсировать этот недостаток можно либо увеличением площади приборов, либо изменением графика регулирования. Первый способ более дорогостоящий, но позволяет получить более высокую надежность системы отопления, если теплоснабжающая организация будет поставлять теплоноситель с заниженными параметрами.

Второй вывод, который можно сделать из рисунка 7, заключается в следующем. Даже после увеличения площади отопительных приборов при низких температурах наружного воздуха в диапазоне $T_{\text{н}} = -20^{\circ}\text{C} \dots -29^{\circ}\text{C}$, экономия энергоресурсов не может быть достигнута восстановлением подмеса элеваторов. Из-за неудовлетворительного выполнения температурного графика в указанном диапазоне увеличение коэффициента смещения приведет к недостатку тепловой энергии. Поэтому с точки зрения энергосбережения наиболее эффективным будет регулирование температуры отопительных приборов по полученному температурному графику, который в последствие можно уточнять по мере накопления большего количества данных.

Отметим также, что полученная зависимость $T_{\text{пр.в}}$ от $T_{\text{н}}$ является верхней границей комфортной температуры внутри помещений. Когда температура отопительных приборов выше $T_{\text{пр.в}}$ регулирование микроклимата в помещении происходит изменением воздухообмена. При этом воздухообмен, скорее всего, не будет увеличен человеком настолько, что в помещении установится температура ниже комфортной. Поэтому все точки на рисунке 6 можно считать принадлежащими зоне комфорта, а зависимость $Q_o(T_{\text{пр}})$ провести с тем же наклоном по верхней границе экспериментальных точек (пунктирная прямая на рисунке 6). То есть, если регулирование теплоты осуществлять с помощью графика $T_{\text{пр.в}}$ от $T_{\text{н}}$, то температура внутри помещений будет поддерживаться на уровне $26-27^{\circ}\text{C}$. Поэтому, воспользовавшись данным предположением, температуру отопительных приборов можно понизить еще на несколько градусов относительно $T_{\text{пр.в}}$. Например, для эффективной температуры приборов, уменьшенной на 5°C относительно $T_{\text{пр.в}}$ получим:

$$T_{\text{пр.эфф}} = -1,52T_{\text{н}} + 49,7. \quad (7)$$

Зависимость эффективной температуры приборов от наружной температуры воздуха показана на рисунке 7 пунктирной линией.

Экономия энергоресурсов, которую можно получить при регулировании отопительной нагрузки по предложенной зависимости $T_{\text{пр.эфф}}$ от $T_{\text{н}}$, равна разнице между потребленным количеством теплоты Q_o и требуемым при данной температуре наружного воздуха:

$$Q_{\text{тр}} = 7,10 \cdot (-1,52T_{\text{н}} + 49,7) - 237. \quad (8)$$

Экономия энергоресурсов за весь отопительный период определялась как сумма суточных значений и составила 5200 ± 880 ГДж или $13,5 \pm 2,3$ %.

Заключение

Предложенный в работе способ анализа эффективности теплотребления зданий позволяет получить следующие данные. Во-первых, выделить диапазоны данных, относящиеся к областям комфорта, существенного избытка и недостатка тепловой энергии. Во-вторых,

получить температурный график регулирования отопительной нагрузки, который учитывает реальное состояние системы отопления здания, теплозащитные свойства ограждающих конструкций, бытовые теплопоступления. В-третьих, вычислить погрешность результатов статистическими методами по экспериментальным данным, в то время как погрешность расчетов теплового сопротивления ограждающих конструкций обычно определить невозможно. Кроме того, при использовании данного способа нет необходимости составлять точный тепловой баланс здания: определять долю теплоты, долю бытовых теплопоступлений и т. д., поскольку положение области комфорта от этого не зависит.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов, Р.С. Информационно-аналитическое обеспечение систем мониторинга, анализа и управления объектами теплоэнергетики / Р.С. Кузнецов, В.П. Чипулис // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. — 2016. — № 4(188). — С. 116–124. — EDN XHOEBF.
2. Чипулис, В.П. Анализ эффективности регулирования теплопотребления с использованием регрессионных моделей объектов теплоэнергетики / В.П. Чипулис, Р.С. Кузнецов // XII всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014, Москва, 16–19 июля 2014 года / Москва: Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова РАН, 2014. — С. 7529–7539. — EDN SSMTUH.
3. Чипулис, В.П. Выбор и оценка эффективности регулирования режимов теплопотребления / В.П. Чипулис // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". — 2016. — Т. 2. — С. 193–197. — EDN WHWLJX.
4. Волошин, Е.В. Оценка эффективности приборного учета и регулирования тепловой энергии / Е.В. Волошин, Р.С. Кузнецов, В.П. Чипулис // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". — 2018. — Т. 2. — С. 37–41. — EDN YAFFGX.
5. Немченко В.И., Посашков М.В. Методика оценки качества теплоснабжения по данным коммерческого учёта тепловой энергии // СОК. 2019. № 08(212). С. 44–47.
6. Борисов, К.Б. Влияние качества теплоснабжения на фактические тепловые нагрузки систем отопления и горячего водоснабжения многоквартирных домов. Опыт Кемерово / К.Б. Борисов // Энергосбережение. — 2021. — № 7. — С. 58–67. — EDN MESSEY.
7. Гашо, Е.Г. Определение теплоэнергетических характеристик зданий на основе анализа архивных данных узлов учета тепловой энергии / Е.Г. Гашо, А.М. Фокин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета имени Г.И. Носова. — 2023. — Т. 21, № 2. — С. 146–155. — DOI 10.18503/1995-2732-2023-21-2-146-155. — EDN DJVHSB.
8. Беспалов, Е.А. Способы формирования контрольных матриц информационного образа потребителя для оценки достоверности учета тепловой энергии / Е.А. Беспалов // Результаты современных научных исследований и разработок: сборник статей XIII Всероссийской научно-практической конференции, Пенза, 27 мая 2021 года. — Пенза: Общество с ограниченной ответственностью "Наука и Просвещение", 2021. — С. 79–85. — EDN FAGLPX.

9. Кононович Ю.В. Тепловой режим зданий массовой застройки. — М.: Стройиздат, 1986. — 157 с.
10. Ливчак В.И. Энергоаудит и энергетическая паспортизация жилых зданий — путь стимулирования энергосбережения // Журнал «АВОК». — 2002. — № 2. — С. 8–16.

Psarov Sergey Alexandrovich

Pacific National University, Khabarovsk, Russia
E-mail: 006212@pnu.edu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4368-7848>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=36410

Shumilin Evgeny Viktorovich

Pacific National University, Khabarovsk, Russia
E-mail: 002194@pnu.edu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3210-1469>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=603395

Analysis of the efficiency of heat consumption of buildings according to the readings of metering devices

Abstract. In order to calculate the economic feasibility of energy saving measures, it is always necessary to determine beforehand the reserves of saving energy resources. Comparing the amount of thermal energy actually consumed by buildings according to meter readings with the effective value, it is possible to identify such reserves. Determining the level of effective heat energy consumption by buildings is a difficult task due to a variety of influencing factors: operational factors, thermophysical properties of building enclosing structures, heat transfer coefficients of heating appliances, and the biotechnical nature of the system: intensive human intervention in the formation of the microclimate. For example, the outdoor temperature and the heat consumption from the heating system are related only if the room temperature is close to comfortable. With a significant underflow or overflow, a person maintains a minimum or maximum comfortable temperature in the room with the help of additional heat or increased air exchange. In this case, the heat consumption from the heating system depends only on the indoor air temperature and does not depend on the outdoor air temperature.

In this paper, we consider one of the ways to analyze the heat consumption of buildings according to heat energy meters, which allows us to identify data ranges in which there is a dependence of heat consumption on outdoor air temperature, areas of significant excess and lack of heat energy; to obtain a temperature schedule for regulating the heating load, which takes into account the real state of the building heating system (change in the mixing coefficient of elevators, areas of heating appliances), heat-protective properties of enclosing structures, household heat access; to determine the error of the results by statistical methods based on experimental data; to determine the level of effective heat consumption.

Keywords: energy saving; heat supply; heat consumption; heat energy accounting; heating; energy efficiency; temperature schedule; microclimate