



ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

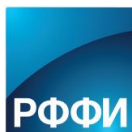
ТРУДЫ

*Девятой
международной
школы-семинара
молодых ученых
и специалистов*

5 – 12 октября 2018 г.
Москва

Москва
Издательский дом МЭИ
2018

УДК 620.92.004.14(063)
ББК 31.15я5
Э 653



**Мероприятие проводится при финансовой поддержке РФФИ
грант № 18-38-10045/18**

Энергосбережение — теория и практика: Труды Девятой
Э 653 Международной школы-семинара молодых ученых и специали-
стов (Москва, 5—12 октября 2018 г.) — М.: Издательский дом МЭИ,
2018. — 576 с.

ISBN 978-5-383-01312-0

Публикуемые доклады содержат результаты исследований молодых ученых и преподавателей из многих регионов России, а также из-за рубежа по вопросам теории и практики энергосбережения, касающихся оптимизации систем генерации энергии и систем потребления ТЭР различных видов в промышленности и ЖКХ, термодинамического анализа энергогенерирующих систем, использования нетрадиционных источников энергии, использования энергетического потенциала бытовых отходов и местных топлив, получения дизельного топлива, теплонасосных установок, интенсификации процессов тепло-и массообмена, совершенствования механизмов реализации энергосберегающего потенциала в промышленности и ЖКХ.

УДК 620.92.004.14(063)
ББК 31.15я5

ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ — ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

Труды Девятой Международной школы-семинара
молодых ученых и специалистов

Редактор *Л.В. Егорова*
Верстка *М.Н. Маркиной*

Подписано в печать с оригинала-макета 24.09.2018 Формат 60×84/8
Усл. печ. л. 68,36 Тираж 30 экз.

АО «Издательский дом МЭИ», 111024, Москва, ул. 2-я Кабельная, д. 2
тел/факс: (495) 280-12-46, адрес в Интернете: <http://www.idmei.ru>,
электронная почта: info@idmei.ru

Отпечатано в АО «Т8 Издательские Технологии», Москва, Волгоградский пр-т, д. 42, к. 5

ISBN 978-5-383-01312-0

© АО «Издательский дом МЭИ», 2018

К ВОПРОСУ СОСТАВЛЕНИЯ ПРОГНОЗНЫХ ФУНКЦИЙ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ МЕТОДАМИ ОПИСАТЕЛЬНОЙ СТАТИСТИКИ

АННОТАЦИЯ

Вопросы целесообразности внедрения энергосберегающих мероприятий в условиях развивающейся экономики Российской Федерации, как правило, сводятся к экономической оценке эффективности финансовых вложений по сравнению с иными возможными вариантами увеличения капитала. Необходимость расчета эффективности энергосберегающего эффекта с требуемой точностью часто является ключевым пунктом останки проекта ввиду крайней трудоемкости проведения подобных расчетов. Современная нормативно-правовая база не содержит приемлемого способа составления прогнозных функций энергопотребления. Наиболее перспективными путями решения подобных задач является применение как методов описательной статистики, так и нейронечетких сетей. Каждый из методов обладает своими преимуществами и недостатками, анализу которых посвящена настоящая статья.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящий момент одним из направлений энергосбережения в промышленном и социальном секторах экономики России является внедрение энергосберегающих мероприятий на основе контура энергоменеджмента при управлении руководящими структурами. Для проведения этих ЭСМ заказчиком должны быть выделены определенные денежные средства. Эффективность вложений этих средств необходимо оценивать с достаточной точностью, чтобы в последующем определить дальнейшие целесообразные направления энергосбережения. Однако в настоящее время обоснованно доказать эффективность внедрения ЭСМ часто не представляется возможным. Это связано с тем, что сравнение должно проводиться в одинаковых условиях (температура наружного воздуха, влажность, сырье, численность персонала, степень загрузки технологического оборудования, ответственность персонала, современность оборудования и т.д.). Для сравнения энергопотребления используют «сопоставимые условия». Они позволяют проводить формирование приблизительных прогнозных функций энергопотребления.

2. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ НОРМАТИВНО-ПРАВОВЫХ АКТОВ

В настоящее время актуальны как распоряжения федеральных органов исполнительной власти, содержащие рекомендации по прогнозированию нагрузок [1–11], так и национальные стандарты [12–18]. Тем не менее, достаточно обоснованно утверждать на основе этих данных об экономии энерго-

ресурсов на предприятии также не всегда представляется возможным, поскольку набор условий, приводимых к сопоставимым, может различаться для разных предприятий и, как правило, не является полным и достаточным; данные методики являются упрощенными, что является как их преимуществом, так и их недостатком.

Анализ приведенной выше нормативной документации показывает, что предлагаемый в документах математический аппарат ориентирован в первую очередь на аналитику мероприятий, включенных в региональные и муниципальные программы муниципальных образований и/или субъектов Российской Федерации, и не предназначен для прогнозирования объемов потребляемых энергоресурсов. Большинство методик, принятых в национальных стандартах, используют исключительно способ составления простейших математических пропорций для определения удельных значений и долей. Вопрос прогнозирования объемов энергопотребления в сопоставимых условиях в нормативе не освещен. Один из поздних стандартов [16] наиболее удобен для краткосрочных и технологически несложно оцениваемых ЭСМ, реализуемых в малых и средних зданиях. В случае длительного расчета или модернизации большой и сложной инженерной системы велика вероятность возникновения значительных ошибок, что приведет к недопустимой для сторон договора погрешности при осуществлении финансовых расчетов. К недостаткам относятся:

- способ не определяет набор факторов, необходимый и достаточный для получения результата с необходимой точностью и достоверностью;
- способ не разделяет факторы на значимые и зависимые;
- способ предлагает единый подход расчета как для простейших зданий, содержащих только тепловые и электрические потребители, так и для крупных промышленных агломератов, имеющих в своем составе и открытые цеха, и собственные генерирующие мощности.

В этих условиях является важной разработкой точных, обоснованных и проверенных на практике методов определения энергопотребления промышленных и социальных объектов для определения энергетической и экономической эффективности проведения тех или иных ЭСМ, для доказательства правильности использования как бюджетных средств, так и средств самих предприятий. Это даст возможность выбирать более эффективные меро-

приятия, даст возможность градации ЭСМ для различных групп предприятий.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДОВ ОПИСАТЕЛЬНОЙ СТАТИСТИКИ

Для достижения поставленной цели рассмотрим семейства методов, используемые в «описательной статистике». К процедурам для представления количественных данных способом, который позволяет определить характеристики распределения данных, применяют методы:

- планирование экспериментов;
- проверка гипотез;
- измерительный анализ;
- анализ возможностей процесса;
- регрессионный анализ;
- анализ надежности;
- выборочный контроль;
- моделирование;
- карты статистического контроля процесса (карты СКП);
- статистическое назначение допуска;
- анализ временных рядов.

Данные методы опираются на такие широко используемые методы анализа статистических данных, как диаграмма Исикавы (причинно-следственная диаграмма); диаграмма Парето; контрольные карты и листы; диаграммы расслоения; диаграммы разброса; гистограммы. Первая, но не единственная сложность при использовании перечисленных способов – определение вида распределения статистических данных для оценки состояния процесса и для выявления зависимости между несколькими массивами данных. На практике можно применить правило: если распределение изучаемой непрерывной случайной величины неизвестно, но абсолютная величина отклонения превышает утреннее среднее квадратическое отклонений лишь в 0,27 % случаев или меньше, т.е. можно предполагать, что изучаемая величина распределена нормально; в противном случае она распределена не нормально. Для большинства случаев анализ типа распределения массивов исходного и уточняющих факторов при прогнозировании объемов потребления энергоресурсов показал соответствие их распределению Стьюдента. Но это соответствие является таковым только при принятии некоторых приближений и допущений. Поэтому в целом использовать математические аппараты, характерные только для некоторых типов распределений, является неверным.

Более корректным с точки зрения методов обработки статистической информации является применение регрессий и авторегрессий. Наиболее распространенной моделью стационарных рядов является авторегрессия. Авторегрессионная модель – модель временных рядов, в которой значения временного ряда в данный момент линейно зависят от преды-

дущих значений этого же ряда. Авторегрессионный процесс для объемов потребляемых энергоресурсов определяется следующим образом:

$$P_t = c + \varphi_1 P_{t-1} + \dots + \varphi_i P_{t-i} + \dots + \varphi_p P_{t-p} + \varepsilon_t. \quad (1)$$

Другой распространенной моделью временного ряда является модель скользящего среднего. Чаще всего модель используется для моделирования случайных ошибок временных рядов электрических нагрузок. Модель временного ряда, скользящего среднего, определяется следующим видом:

$$P_t = \varepsilon_t - \Theta_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - \Theta_i \varepsilon_{t-i} - \dots - \Theta_p \varepsilon_{t-p}. \quad (2)$$

Зачастую модели авторегрессии и скользящего среднего объединяют и используют модель Бокса-Дженкина (модель авторегрессии-проинтегрированного скользящего среднего). Данные модели – гомогенные нестационарные, которые можно привести к стационарным посредством последовательного дифференцирования наблюдений. Гомогенность модели заключается в том, что все члены временного ряда представляет собой энергетическую нагрузку. Модель авторегрессии-проинтегрированного скользящего среднего определяется по формуле

$$P_t^d = c + \varphi_1 P_{t-1}^d + \dots + \varphi_i P_{t-i}^d + \dots + \varphi_p P_{t-p}^d + \varepsilon_t - \dots - \Theta_j \varepsilon_{t-1} - \dots - \Theta_j \varepsilon_{t-j} - \Theta_q \varepsilon_{t-q}. \quad (3)$$

Используя данный математический аппарат проанализирована, корреляция суточного потребления электрической энергии и среднесуточной температуры воздуха для Смоленской энергосистемы за 2015 год [19]. Результатом расчета является функция

$$P = -6E-13 \cdot x_6 + 8E-10 \cdot x_5 - 3E-07 \cdot x_4 + 6E-05 \cdot x_3 - 0,0036 \cdot x_2 + 0,1421 \cdot x - 4,9049. \quad (4)$$

Квадрат среднего отклонения R^2 составляет 0,8186, что является хорошим показателем для однофакторной корреляции. Можно сделать вывод о том, что фактор «среднесуточная температура воздуха» является значимым фактором при расчете суточного потребления электрической энергии для Смоленской энергосистемы.

Аналогичные расчеты для ГБУ «Спортивная школа олимпийского резерва № 42» Москомспорта позволили достичь точности 94,36 %. При расчете использовался анализ пяти факторов: среднемесячная температура воздуха (x1); относительная среднемесячная влажность воздуха (x2); объемы потребления электроэнергии (x3); объемы потребления ГВС (x4); объемы потребления ХВС (x5). Результатом расчета является прогнозная функция теплопотребления:

$$Q = 9.546679 - 0.44173 \cdot x_1 + 0.003019 \cdot x_2 + 0.00008 \cdot x_3 + 0.136238 \cdot x_4 - 0.1384 \cdot x_5. \quad (5)$$

Можно сделать вывод о том, что фактор «объемы потребления электроэнергии» является незначи-

мым фактором, а факторы «среднемесячная температура воздуха» и «объемы потребления ГВС» – наиболее значимыми.

Другим примером может служить вагоноремонтный завод, для которого осуществлялось составление прогнозной функции для объемов потребления электрической энергии. Исходные факторы: ежегодный объем производства железнодорожных вагонов (x_1); ежегодные объемы потребления природного газа (x_2); ежегодные объемы потребления мазута (x_3); ежегодные объемы потребления питьевой воды (x_4); ежегодные объемы потребления технической воды (x_5); среднегодовая температура воздуха (x_6); относительная среднегодовая влажность воздуха (x_7).

$$P = 4168.03 + 27.55984 \cdot x_1 + 2.156796 \cdot x_2 - 1.1903 \cdot x_3 - 5.55881 \cdot x_5. \quad (6)$$

Различия фактических и прогнозных значений составили 0 %. Анализ показал, что факторы «ежегодные объемы потребления питьевой воды», «среднегодовая температура воздуха», «относительная среднегодовая влажность воздуха» являются незначимыми факторами, а факторы «ежегодный объем производства железнодорожных вагонов» и «ежегодные объемы потребления технической воды» – наиболее значимыми.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Еще одним способом составления прогнозных моделей является использование интеллектуальных методов. Наибольшее применение для оперативного и краткосрочного прогнозирования электрических нагрузок получили искусственные нейронные сети. Под искусственной нейронной сетью понимается совокупность нейронных элементов и связей между ними. ИНС состоит из формальных нейронов, выполняющих нелинейное преобразование произведений входных сигналов на коэффициенты веса, просуммированных по всем сигналам. Для использования искусственных нейронных сетей их необходимо обучить, кроме самообучающихся моделей. Обучение искусственной нейронной сети – это процесс, в котором параметры нейронной сети настраиваются посредством моделирования среды, в которую эта сеть встроена. Существует большое количество алгоритмов обучения сети и их модификаций. Наиболее распространен алгоритм обратного распространения ошибки, в котором минимизируется среднеквадратичная ошибка с использованием метода градиентного спуска для весовых коэффициентов и порогов нейронной сети.

Недостаток модели состоит в том, что она работает как «черный ящик» и не позволяет интерпретировать результаты прогнозирования в понятной эксперту форме, что делает невозможным анализ полученных зависимостей. Устранение данного недостатка привело к созданию нечетких нейронных сетей. Применение теории нечетких множеств для

прогнозирования электрических нагрузок стало активно развиваться с начала 90-х годов за рубежом. Сначала это были экспертные системы с использованием нечетких множеств, так называемые Fuzzy Expert Systems. Последующее развитие привело к появлению гибридных систем (экспертная система и нейронная сеть) и нейронные сети с нечеткой логикой – Fuzzy Neural Networks (FNN). Модель нечеткой нейронной сети для оперативного прогнозирования электрических нагрузок представлена на рис. 1.

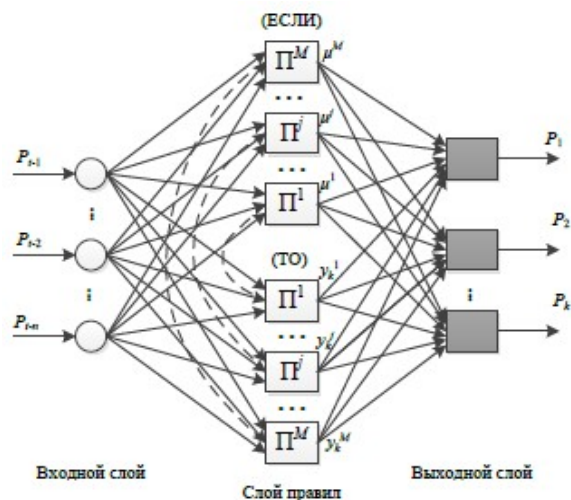


Рис. 1. Модель нечеткой нейронной сети

Сеть состоит из трех слоев: входного, скрытого (слоя правил вида «ЕСЛИ – ТО») и выходного. Нейроны, изображенные в виде кругов, представляют собой один узел, а нейроны в виде квадратов имеют в своем составе большое количество узлов. Входными параметрами являются почасовые значения электрической нагрузки P_i ($i = 1, \dots, 48$) для суток, предшествующих прогнозируемому (24 значения), и для суток недельной давности (24 значения). Во втором слое значения нормируются, т.е. преобразуются в относительные единицы, находящиеся в пределах $[0,1]$. Каждая пара нейронов в скрытом слое составляет нечеткое правило. Выбрана форма правил, в которой нечеткие множества включаются только во вступительную часть правил.

Таблица 1. Ошибка прогнозирования, полученная при использовании различных видов нейронной сети [19]

Глубина прогноза, ч	Ошибка прогнозирования, %	
	искусственная нейронная сеть	нечеткая нейронная сеть
24 (1 день)	4,70	2,36
168 (7 дней)	4,47	4,70
744 (31 день)	2,73	2,56

Примером применения данной модели может являться прогноз электрической нагрузки за февраль 2016 г. в г. Смоленске. Результаты вычисления ошибки прогнозирования приведены в табл. 1. Результаты данного моделирования не могут быть универсальными для всех энергосистем. Вместе с

тем, необходимо отметить, что средняя ошибка для случая использования нечеткой нейронной сети составляет 3.2 %, что почти в 2 раза меньше, чем наилучший показатель для случая использования многофакторного регрессионного анализа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены некоторые способы составления прогнозных функций энергопотребления методами описательной статистики. Использованный аппарат многофакторного регрессионного анализа имеет неоспоримое преимущество относительной простоты использования. При соблюдении условия достаточности исходных данных погрешность расчета, как правило, не ниже 5.5 %. При небольшой недостаточности либо некорректности исходных данных погрешность резко увеличивается и может находиться в диапазоне 7–12 %, что является недостатком способа.

К преимуществу использования нечетких нейронных сетей относится достижение существенно меньшей погрешности – не выше 4,7 % при средней погрешности 3.2 %. К недостаткам относится невозможность работы без специализированного программного обеспечения и навыков по работе с ним.

Дальнейшим направлением развития методов составления прогнозных функций энергопотребления наиболее целесообразным является создание специализированных приложений, объединяющих удобства статистических методов и точность нейронных сетей.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ЭСМ — энергосберегающие мероприятия;
 P_t — объемы потребления энергоресурсов;
 c — постоянная ряда;
 φ_i — коэффициенты авторегрессии;
 ε_t — белый шум;
 Θ_i — параметр скользящего среднего
 $P_t^d = \Delta^d P_t$ — объем энергопотребления;
 Δ — оператор взятия разности;
 Θ_j — параметр скользящего среднего.

Индексы:
 p — лаг времени;
 q — временной лаг;
 t — временная шкала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Федеральный закон** от 23 ноября 2009 г. N 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
2. **Методика** расчета значений целевых показателей в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности, в том числе в сопоставимых условиях. Утв. прик. Минрегионразвития Российской Федерации от 07 июня 2010 г. № 273.
3. **Постановление** Правительства РФ от 01 июня 2010 г. № 391 «О порядке создания государственной информационной системы в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности и условий для ее функционирования».
4. **Приказ** Минэнерго России от 24 октября 2011 № 591 «О порядке определения объемов снижения потребляемых государственным (муниципальным) учреждением ресурсов в сопоставимых условиях».
5. **Постановление** Правительства Москвы от 14 сентября 2011 года № 429-ПП. Государственная программа города Москвы «Энергосбережение в городе Москве» на 2011, 2012-2016 гг. и на перспективу до 2020 года.
6. **Распоряжение** Правительства Москвы от 03 июня 2012 года № 342-РП «О требованиях к вводу в промышленную эксплуатацию информационных систем, создаваемых в городе Москве».
7. **Приказ** Минэнерго России от 30 июня 2014 № 399 «Об утверждении методики расчета значений целевых показателей в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности, в том числе в сопоставимых условиях».
8. **Приказ** Минэнерго России от 30 июня 2014 г. № 401 «Об утверждении Порядка предоставления информации об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности».
9. **Методика** отнесения объектов и технологий к энергоэффективным. Утв. Прик. Мин. пром. и торг. РФ, 2014 г.
10. **Методика** определения расчетно-измерительным способом объема потребления энергетического ресурса в натуральном выражении для реализации мероприятий, направленных на энергосбережение и повышение энергетической эффективности. Утв. прик. Минэнерго России, 2015 г.
11. **Постановление** Правительства Москвы от 13 мая 2015 г. № 260-ПП «Об информационной системе энергосбережения на объектах города Москвы».
12. **ГОСТ Р ИСО/ТО 10017–2005** «Статистические методы. Руководство по применению в соответствии с ГОСТ Р ИСО 9001. ISO/TR 17:2003 Guidance on statistical techniques for ISO 9001:2000», Москва, 2003.
13. **ГОСТ 51814.3–2001** «Методы статистического управления процессами в автомобилестроении».
14. **ГОСТ Р 50779.42–99** «Статистические методы. Контрольные карты Шухарта», дата актуализации: 01.01.2018.
15. **СТО 001–2014** «Измерения и верификация энергетической эффективности», 2014.
16. **ГОСТ Р 56743–2015** «Измерение и верификация энергетической эффективности. Общие положения по определению экономии энергетических ресурсов».
17. **ГОСТ Р 51380–99** «Энергосбережение. Методы подтверждения соответствия показателей энергетической эффективности энергопотребляющей продукции их нормативным значениям».
18. **СО 153-34.20.118–2003** «Методические рекомендации по проектированию развития энергосистем».
19. **Луферов Ю.С.** Способ и программные средства прогнозирования электрических нагрузок на основе нечетких временных рядов: магист. дисс. / научн. руков. Борисов В.В. Смоленск: «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООВОГО УЗЛА ПОСРЕДСТВОМ ПЕРЕХОДА НА СХЕМУ ИТП С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСТРОЙСТВ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА

АННОТАЦИЯ

В настоящее время в России особенно актуальна проблема энергосбережения. Замена центральных тепловых пунктов индивидуальными позволит значительно снизить потребление тепловой энергии, что в свою очередь является эффективным как технически, так и экономически энергосберегающим мероприятием.

Установка индивидуальных тепловых пунктов дает возможность регулирования потребляемой тепловой энергии, с помощью чего можно достичь оптимальной температуры в отапливаемых помещениях и снизить потери теплоты в окружающую среду.

Замена ЦТП на ИТП хоть и дает существенную экономию тепловой энергии, но требует сравнительно немалых первоначальных затрат. Решением данной проблемы может стать внедрение в ИТП корректирующего контура с импульсной циркуляцией теплоносителя, что в свою очередь сможет снизить первоначальные затраты на оборудование посредством повышения коэффициента теплопередачи.

1. ПОДРОБНОЕ РАССМОТРЕНИЕ ЦТП И ИТП, ИХ СРАВНЕНИЕ

1.1. Сравнение ЦТП и ИТП

Тепловой пункт (ТП) предназначен для подачи, преобразования, т.е. изменения и поддержания заданных значений параметров (температуры и давления) теплоносителя, регулирования и учета расхода теплоносителя и теплоты, отпускаемой в системы отопления, горячего водоснабжения и вентиляции зданий различного назначения, а также в технологические системы предприятий. Теплоноситель, подаваемый в системы отопления, вентиляции или кондиционирования воздуха из ТП, может забираться непосредственно из подающего трубопровода или после смешения с теплоносителем из обратного трубопровода внешней теплосети. Такие схемы принято называть зависимыми.

Существуют также независимые схемы присоединения, в которых теплоноситель, циркулирующий в указанных системах потребителей, нагревается теплоносителем из внешней теплосети в рекуперативных (поверхностных) теплообменниках. А для обеспечения циркуляции теплоносителя в контурах потребителей устанавливаются дополнительные насосы.

Обычно к тепловым пунктам подходят два теплопровода: подающий и обратный, а от теплового пункта к отдельным зданиям, сооружениям или помещениям – четырехтрубные сети: две трубы для

присоединения систем отопления и вентиляции и две трубы (подающая и рециркуляционная) для присоединения систем горячего водоснабжения.

Если система ГВС тупиковая, то система трубопроводов между ЦТП и зданием проектируется трехтрубной, так как трубопровод рециркуляции воды в системе ГВС отсутствует.

В подвальных или цокольных этажах жилых, общественных, гражданских или промышленных зданий часто размещаются дополнительные тепловые пункты, называемые тепловыми узлами (ТУ), в которых находятся раздающие (распределительные) и собирающие теплоноситель коллекторы. В ТУ могут быть также установлены повысительные насосы, устройства для смешения теплоносителя из подающих и обратных трубопроводов, термометры и манометры и др.

Тепловые пункты различаются по типу и количеству подключений, по способам размещения (непосредственно в здании или отдельно), и таким образом делятся на несколько типов [1]:

- центральный тепловой пункт (ЦТП);
- индивидуальный тепловой пункт (ИТП);
- модульный (или блочный) тепловой пункт (БТП) — созданная на одной раме конструкция, может применяться для ИТП или ЦТП.

Индивидуальные тепловые пункты (ИТП) (рис. 1) предназначены для присоединения систем отопления, вентиляции, горячего водоснабжения и технологических теплоиспользующих установок одного здания или его части; центральные тепловые пункты (ЦТП) – то же, для двух зданий или более.

Допускается устройство ЦТП для присоединения систем теплоснабжения одного здания, если для этого здания требуется устройство нескольких ИТП [2].

Системы теплоснабжения в России характеризуются максимальным упрощением оборудования тепловых вводов большинства потребителей, которое заключается в использовании элеваторов на вводе и наличие центральных тепловых пунктов. ЦТП обслуживают большие группы зданий, а порой и целые микрорайоны, что обуславливается значительными потерями тепла при транспортировке теплоносителя потребителю.

Главным недостатком центральных тепловых пунктов является невозможность регулирования потребления тепловой энергии для каждого здания.

Решение подобной проблемы заключается в замене ЦТП на индивидуальные тепловые пункты.

Повышение эффективности оборудования посредством автоматического регулирования отопления позволяет экономить до 30 % тепловой энергии, используемой на данный момент. В масштабах жилищного фонда это составит огромный резерв тепловой энергии. Так же большое преимущество ИТП по сравнению с ЦТП, заключается в отсутствии тепловых потерь в трубопроводах, соединяющих здания с тепловым пунктом.

Замена ЦТП на ИТП имеет и ряд других преимуществ, а именно удобство эксплуатации и обслуживания, возможность мониторинга состояния тепловых сетей. Данное энергосберегающее мероприятие имеет низкие сроки окупаемости, что позволяет отнести его к малозатратным и быстрокупаемым [3].

Задачи интенсификации теплообмена сводятся к уменьшению габаритов и массы теплообменных устройств или к снижению температурного напора по сравнению с их величиной, которая достигается в данных условиях обычными путями.

Выделяются два направления интенсификации. Одно из них связано с увеличением теплового потока без учета дополнительных потерь энергии.

Второе направление связано с увеличением теплового потока при заданной величине энергии, затрачиваемой на перекачку теплоносителя, т.е. с увеличением эффективности теплоотдачи. Оно становится особенно важным для стационарно ра-

ботающих теплообменных аппаратов большой мощности [4].

Наиболее перспективным способом интенсификации теплообмена, относящимся ко второму направлению, является создание импульсного течения теплоносителя в теплообменном аппарате.

1.2. Импульсная циркуляция теплоносителя как средство интенсификации теплообмена

В последнее время усилия исследователей направлены на интенсификацию тепло- и массопереноса в различных технологиях с целью повышения производительности, придания агрегатам более компактных размеров и форм, улучшения технико-экономических показателей.

Выбор мощности теплообменников осуществляется исходя из обеспечения максимальной тепловой нагрузки. При этом продолжительность пиковой нагрузки зачастую незначительна, т.е. теплообменники продолжительное время работают при расходах ниже номинального.

Снижение расхода, как известно, приводит к уменьшению коэффициента теплопередачи и снижению энергетической эффективности теплообменника. Благодаря своей компактности, высокому коэффициенту теплопередачи пластинчатые теплообменники получили широкое распространение в системах теплоснабжения.

Повышение коэффициента теплопередачи можно осуществить путем создания пульсирующего режима течения теплоносителя, который создается при помощи одноклапанного преобразователя потока (ПП).

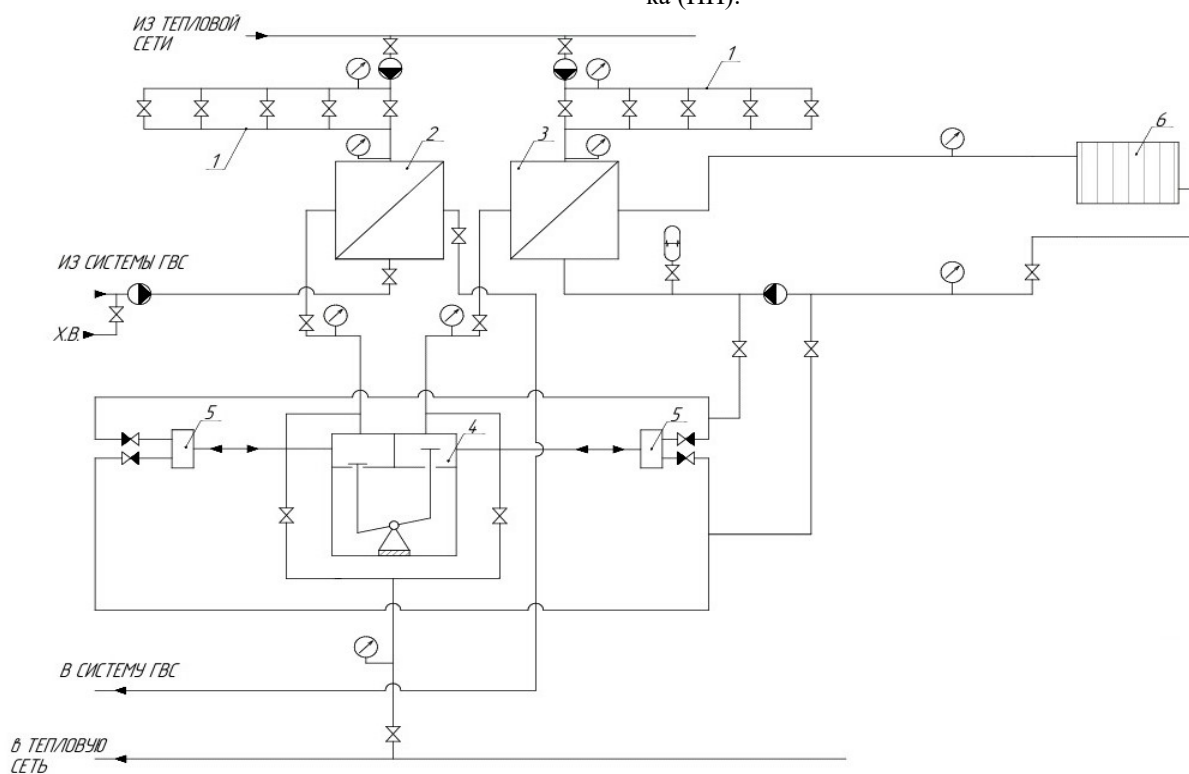


Рис. 1. Принципиальная схема ИТП с корректирующим контуром импульсной циркуляции [5]: 1 – разгонные трубы; 2 – пластинчатый т.а. ГВС; 3 – пластинчатый т.а. отопления; 4 – двухклапанный преобразователь потока; 5 – мембранные насосы; 6 – отопительные приборы

Левцев А.П. в результате проведенных исследований разработал систему теплоснабжения с импульсной циркуляцией теплоносителя на основе одноклапанного ПП. Внедрение данной схемы позволило получить увеличение относительного коэффициента теплоотдачи кожухотрубного теплообменника на 12 %. Основным недостатком данного решения является низкая надежность одноклапанного ПП. Левцевым А.П. была разработана и запатентована конструкция двухклапанного ПП, позволявшая расширить диапазон расходов устойчивой работы ПП.

2. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕНЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ПРИ СТАЦИОНАРНОМ И ИМПУЛЬСНОМ РЕЖИМАХ ТЕЧЕНИЯ

Для проведения расчета были использованы формулы числа Нуссельта для пластинчатых теплообменников (табл. 1):

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda} = a Re^n Pr^m \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0.25}, \quad (1)$$

где $n = 0,73$, $m = 0.43$ при турбулентном режиме течения; $N = m = 0.33$ при ламинарном режиме течения.

Таблица 1. Поправочный коэффициент в зависимости от геометрии пластины и характера течения [6]

Поверхность пластины f , м ²	Коэффициент a :				
	0,2	0,3	0,5	0,6	1,3
Турбулентный режим	0,065	0,1	0,135	0,135	0,135
Ламинарный режим	0,46	0,6	0,6	0,6	0,6

Для определения числа Нуссельта при импульсном режиме течения было использовано критериальное уравнение, полученным А.Б. Бирюковым с допущением схожести поведения импульсного течения потока с рассматриваемым случаем при частоте пульсаций 3,3 Гц:

$$Nu = 0.33 Re^{0.6} Pr^{0.36} \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}} \right)^{0.25} (Sh)^{0.0971}, \quad (2)$$

где

$$Sh = \frac{f d_3}{\omega} \quad (3)$$

– число Струхала – критерий подобия нестационарных режимов течения; f – характерная частота процесса [7].

Графическая интерпретация значений коэффициента теплопередачи для тепловой мощности 80–600 кВт и т.а. с различными площадями пластин представлена на рис. 2–4.

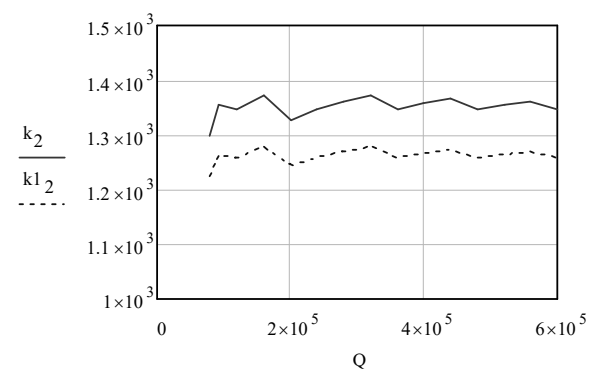
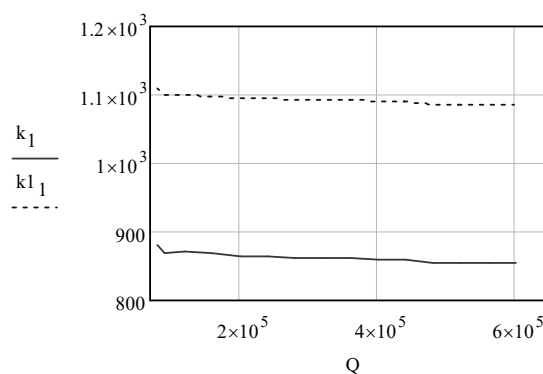


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопередачи от тепловой мощности для т.а. РИДАН 43 с площадью пластины 0.3 м²; k_2 – значение при стационарном режиме течения; $k_{1.2}$ – при импульсном

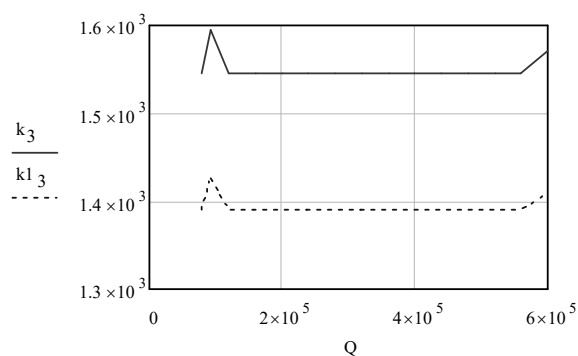


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплопередачи от тепловой мощности для т.а. РИДАН 47 с площадью пластины 0.5 м²; k_3 – значение при стационарном режиме течения; $k_{1.3}$ – при импульсном

Расчет всех т.а. проводился в одинаковом диапазоне тепловых мощностей (от 80 до 600 кВт) для обеспечения более точного сравнения влияния импульсного течения на коэффициент теплопередачи.

Для теплообменника РИДАН 14 среднее увеличение коэффициента теплопередачи составило 26,7 %, причем по мере возрастания тепловой мощности т.а. возрастает и прирост коэффициента теплопередачи. Так, например, для 80 кВт прирост составляет 25.86 %, а для 600 кВт уже 27.175 % (рис. 2).

Для т.а. РИДАН 43 при импульсном режиме течения теплоносителя значение коэффициента теплопередачи снизилось в среднем на 6,6 % (рис. 3). Характерный вид полученного графика объясняется значительным округлением расчетных значений требуемого количества пластин и соответственно различием площадей и проходных сечений в идеальном и реальном случае.

Применение импульсного течения в т.а. РИДАН 47 дало еще более негативный результат. Снижение коэффициента теплопередачи составило в среднем 10 % (рис. 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из данных, полученных в ходе расчета различных т.а., можно сделать вывод, что применение импульсного режима течения целесообразно только для теплообменников с площадью пластины менее $0,2 \text{ м}^2$ – для них средний прирост коэффициента теплопередачи составил 25 %.

Применение импульсного режима течения для т.а. с площадью пластины более $0,2 \text{ м}^2$ оказывает негативное воздействие на коэффициент теплопередачи.

Импульсную циркуляцию как средство интенсификации теплообмена также целесообразно применять в случае, если ближайший т.а. меньшего

размера не удовлетворяет допустимому отклонению тепловой мощности.

В таком случае вместо подбора т.а. большего размера возможно установить т.а. с меньшей площадью пластин в совокупности с преобразователем потока для создания импульсного течения среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Теплопрофи.** [Электронный ресурс]; URL: <https://www.teploprofi.com/komplektaciya-itp-podklyuch/>
2. **СП 41-101-95.** Проектирование тепловых пунктов.
3. Портал по энергосбережению [Электронный ресурс]; URL: <http://www.energsovet.ru/entech.php?idd=31>
4. **Методы** интенсификации теплообмена. Студенческая библиотека онлайн [Электронный ресурс]; URL: http://studbooks.net/1443934/tovarovedenie/metody_intensifikatsii_teploobmena
5. **Корректирующий** контур с импульсной циркуляцией теплоносителя в составе теплового пункта системы теплоснабжения / А.П. Левцев, А.Н. Макеев, Я.А. Нарватов, А.А. Голянин // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2.
6. **Ведерникова В.И., Таланкин В.С.** Расчет пластинчатых теплообменников / под ред. Н.А. Майера. Екатеринбург: УГЛТУ, 2008.
7. **Бирюков А.Б., Алехина Н.В.** Исследование влияния импульсной подачи сред на интенсификацию конвективного тепло- и массопереноса // Металл и литье Украины. 2012. № 4.