

Вариант имитационного моделирования систем теплоснабжения и отопления в SIMULINK/SIMSCAPE

Л. Г. Тугашова, А. Р. Батыров, М. Э. Мингалев, Д. Д. Мухаметшин

Альметьевский государственный технологический университет «Высшая школа нефти»
кафедра автоматизации и информационных технологий
E-mail: arslan.batyrov.01@mail.ru

Аннотация:

В настоящее время важной задачей является обеспечение энергоэффективного управления тепловым режимом зданий. Решение вышеназванной задачи предполагает разработку математических и имитационных моделей тепловых режимов зданий и систем теплоснабжения. Важным этапом является определение оптимальных параметров тепловых режимов зданий и технологических установок. Для определения параметров возможно применение имитационных моделей, реализованных, в частности, с применением программного пакета *Simulink/Simscape*. В системах теплоснабжения применяются автоматизированные индивидуальные тепловые пункты (ИТП). В состав ИТП входят теплообменники, насосы, регуляторы, системы автоматизации. Приведена схема ИТП, которая может быть зависимой или независимой. Также здания могут быть снабжены системами отопления, вентиляции и кондиционирования (ОВК, HVAC). ОВК представляет собой комплекс технологий, направленных на поддержание определенных параметров воздуха (температуры, влажности, химического состава) внутри помещений, а также салонов автомобилей (климат-контроль). Показан пример моделирования потока влажного воздуха в системе HVAC транспортного средства с применением *Simulink/Simscape*. Для решения задачи энергоэффективности на действующих технологических установках осуществляется модернизация существующей системы теплоснабжения. В работе приведен пример технического перевооружения блока стабилизации установки подготовки нефти. В существующую систему включены кожухотрубчатый теплообменник, ИТП, схема автоматизации. Результатом такого оснащения является возможность отказа от котельной и использование энергетических ресурсов технологической установки. В работе приведены расчетные значения температур теплоносителей кожухотрубчатого теплообменника. Автоматизация системы отопления на установке способствует повышению эффективности процесса и позволяет уменьшить нагрузку на операторов.

Общая постановка проблемы

Задачей исследования является разработка моделей систем теплоснабжения и отопления с применением программного пакета *Simscape* с целью оптимизации температурных режимов в жилых зданиях, а также на технологической установке.

Исследования

В настоящее время в системах теплоснабжения одним из способов решения задачи экономии тепловой энергии является внедрение индивидуальных тепловых пунктов (ИТП) с системой автоматики. Важным параметром, необходимым для определения оптимального температурного режима здания, является температура в помещениях. Задачей регулирования в системах теплоснабжения является поддержание температуры воздуха внутри помещений при воздействии

возмущающих факторов (температуры наружного воздуха и др.), а также температуры воды, поступающей в систему горячего водоснабжения (ГВС), при заданных ограничениях [1]. При управлении температурным режимом применяют различные решения, например, типовые регуляторы с заданиями по температурным графикам, системы с нечеткой логикой, нейросетевые алгоритмы и др.

Особенности состояния и свойств веществ, для которых требуется организовать обмен теплом, привели к появлению большого набора технических решений. Классификация рекуператоров включает более десятка разновидностей. Основные виды, наиболее часто встречающиеся в технике и быту, бывают такими:

- Трубчатые. Эта схема появилась одной из первых и в простейшем случае выглядит как

две прямые трубы, одна из которых проходит внутри другой большего диаметра.

- Кожухотрубчатые. Развитие трубчатой схемы, когда внутренний контур образован не одной, а множеством трубок, объединенных в пучок. Наружная труба выполняет функцию защитного кожуха.

- Пластинчатые. Более современное оборудование, обладающее большим КПД, а также минимальными размерами и малым весом. Такой аппарат состоит из отдельных пластин, имеющих гофрированную поверхность.

- Пластинчато-ребристые. Разновидность схемы, в которой каналы между пластин создаются не выштамповкой на поверхности, а дополнительными элементами (ребрами), закрепляемыми сваркой.

Основное преимущество ИТП – поставка горячей воды пользователям с минимальными потерями. С его помощью можно настраивать температуру в отдельном доме через специальные индивидуальные настройки.

Располагают устройство как в отдельном техническом строении, так и в подвалах.

ИТП обеспечивает подачу тепла и воды в конкретное помещение, а также организацию вентиляции объектов различного назначения: жилых, производственных, ЖКХ. Тепловые пункты обслуживают как одиночные здания – небольшие дома или постройки, так и группу или даже сеть объектов.

В каждом случае подбирается своя схема ИТП:

- учет расхода тепла и теплоносителя;
 - защита системы теплоснабжения от аварийного повышения параметров сетевой воды;
 - отключение системы;
 - равномерное распределение теплоносителя;
 - регулировка и контроль параметров циркулирующей жидкости;
 - преобразование вида теплоносителя.
- Схема ИТП изображена на рисунке 1.

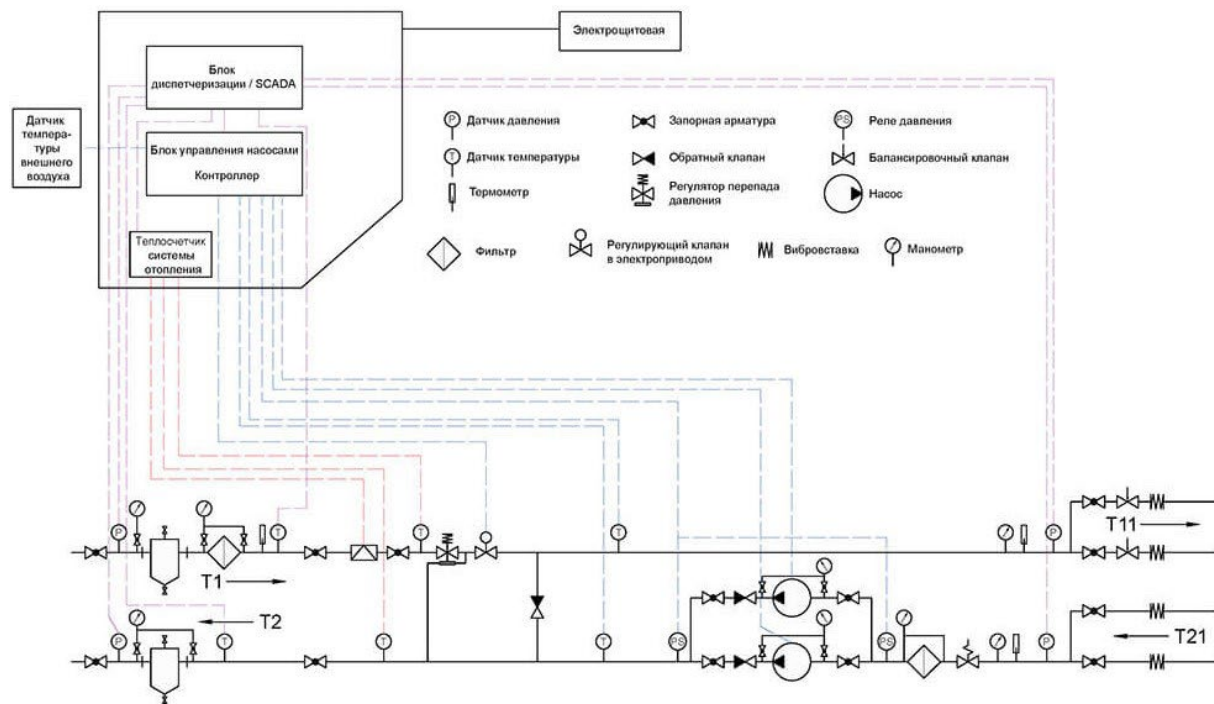


Рисунок 1 - Схема ИТП [3]

Классическая схема ИТП включает:

- ввод тепловой сети. Прибор учета.
- подключение системы вентиляции.
- подключение отопительной системы.
- подключение горячего водоснабжения.
- согласование давлений между системами теплоснабжения и теплоснабжения.
- подпитка подключенных по независимой схеме отопительных и вентиляционных систем.

У каждого теплоузла своя схема подключения, которая подбирается с учетом особенностей источника энергии. Схема ИТП может быть зависимой или независимой. В

первом случае вода поступает в контур отопления напрямую из внешней сети, и температура регулируется за счет смешивания с обратной водой. При независимой схеме ключевую роль играет двухконтурный теплообменник. Из контура котельной теплоноситель попадает в теплообменник и передает тепло в дополнительный контур.

Такая схема ИТП может применяться во всех способах подачи теплоты, начиная с отопления и заканчивая вентиляцией [4].

Кожухотрубчатые теплообменники относятся к поверхностным теплообменным аппаратам рекуперативного типа. Широкое распространение этих аппаратов обусловлено прежде всего надежностью конструкции и большим набором вариантов исполнения для различных условий эксплуатации:

- однофазные потоки, кипение и конденсация;
 - вертикальное и горизонтальное исполнение;
 - широкий диапазон давлений теплоносителей, от вакуума до 8,0 МПа;
 - площади поверхности теплообмена от малых (1 м²) до предельно больших (1000 м² и более);
 - возможность применения различных материалов в соответствии с требованиями к стоимости аппаратов, агрессивностью, температурными режимами и давлением теплоносителей;
 - использование различных профилей поверхности теплообмена как внутри труб, так и снаружи и различных турбулизаторов;
 - возможность извлечения пучка труб для очистки и ремонта.
- различают следующие типы кожухотрубчатых теплообменных аппаратов:
- теплообменные аппараты с неподвижными трубными решетками;
 - теплообменные аппараты с неподвижными трубными решетками и с линзовым компенсатором на кожухе;
 - теплообменные аппараты с плавающей головкой;
 - теплообменные аппараты с U-образными трубами;
 - кожухотрубчатые теплообменные аппараты с неподвижными трубными решетками отличаются простотой конструкции и, следовательно, меньшей стоимостью.

Кожухотрубчатый теплообменный аппарат представляет из себя пучок теплообменных труб, находящихся в цилиндрическом корпусе (кожухе). Один из теплоносителей движется внутри теплообменных труб, а другой омывает

наружную поверхность труб. Концы труб закрепляются с помощью вальцовки, сварки или пайки в трубных решетках.

В кожух теплообменного аппарата с помощью дистанционных трубок устанавливаются перегородки. Перегородки поддерживают трубы от провисания и организуют поток теплоносителя в межтрубном пространстве, интенсифицируя теплообмен. К кожуху теплообменного аппарата привариваются штуцеры для входа и выхода теплоносителя из межтрубного пространства.

На входе теплоносителя в межтрубное пространство в ряде случаев устанавливают отбойники, необходимые для уменьшения вибрации пучка труб, равномерного распределения потока теплоносителя в межтрубном пространстве и снижения эрозии ближайших к входному штуцеру труб. К кожуху теплообменного аппарата с помощью фланцевого соединения крепятся распределительная камера и задняя крышка со штуцерами для входа и выхода продукта из трубного пространства [5].

В рамках технического перевооружения систем управления подготовкой нефти возможна установка блочного индивидуального теплового пункта (БИТП) и кожухотрубчатого теплообменника (КТО). Вариант подключения кожухотрубчатого теплообменника показан на рисунке 2. Значения температур теплоносителей приведены в таблице 1.

Поток нефти, который поступает в КТО, проходит снизу колонны стабилизации для осуществления процесса теплообмена. Система отопления установки комплексной подготовки нефти основана на принципе теплообмена. Для этого используются теплоносители, которые циркулируют по системе и передают тепло от источника до объектов, которые необходимо подогревать.

Охлаждение нефти осуществляется с использованием промежуточного теплоносителя через теплообменник. Этот процесс играет ключевую роль в обеспечении безопасности и эффективности нефтеперерабатывающих предприятий.

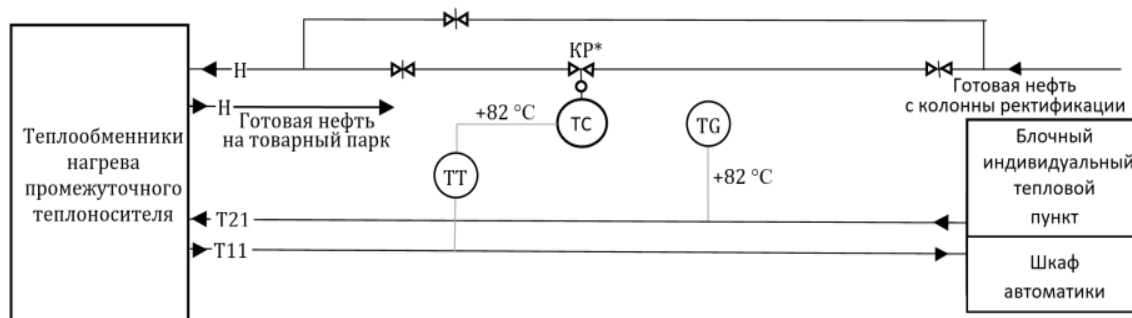


Рисунок 2 - Подключение кожухотрубчатого теплообменника на технологической установке

Таблица 1 - Данные по теплоносителям кожухотрубчатого теплообменника

Наименование частей теплообменного аппарата		Трубное	Межтрубное
Рабочая температура среды	на входе	145	78
	на выходе	82	100
Наименование рабочей среды		Нефть	Вода

В качестве теплоносителей применяются разнообразные вещества, такие как вода, водяной пар, электроэнергия, а также горячие газы и нефтепродукты. Каждый из этих теплоносителей обладает своими уникальными свойствами и преимуществами, что позволяет подобрать оптимальный вариант для конкретных условий и требований технологического процесса.

Наиболее распространённым и часто используемым теплоносителем является водяной пар. Его популярность объясняется рядом причин. Во-первых, водяной пар не представляет пожарной опасности, что особенно важно при работе с легко воспламеняющимися углеводородами. Во-вторых, он обладает высокой теплоотдачей, что способствует эффективному теплообмену и быстрому охлаждению нефти. В-третьих, водяной пар имеет относительно небольшой вес, что облегчает его транспортировку и распределение по теплообменной системе. И наконец, он легко транспортируется, что упрощает организацию производственного процесса и позволяет экономить ресурсы.

Таким образом, использование водяного пара в качестве теплоносителя для охлаждения нефти является обоснованным и эффективным решением, обеспечивающим высокую производительность и безопасность на всех этапах подготовки нефти.

Отопление, вентиляция и кондиционирование (ОВК), или HVAC (сокращение от англ. Heating, Ventilation, & Air Conditioning), представляют собой комплекс технологий, направленных на поддержание определённых параметров воздуха - температуры, влажности и химического состава - внутри помещений, включая салоны автомобилей (климат-контроль). Эти системы обеспечивают комфорт и безопасность в различных условиях, от жилых домов до коммерческих и промышленных объектов.

Разработка систем вентиляции и кондиционирования является важной частью инженерной отрасли, основанной на принципах термодинамики, гидродинамики и теплопередачи. Эти системы включают в себя широкий спектр оборудования и технологий,

таких как котлы, тепловые насосы, кондиционеры, вентиляторы и системы фильтрации воздуха. Они спроектированы для работы в разных климатических условиях и с разными типами зданий, от небоскребов до подземных сооружений.

Системы ОВК играют ключевую роль в обеспечении комфортных условий в промышленных и административных зданиях, бассейнах и других сооружениях, где поддержание оптимальных температур и влажности достигается через обработку наружного воздуха. Они обеспечивают не только комфорт, но и здоровье обитателей помещений, предотвращая проблемы, связанные с плохим качеством воздуха, такие как аллергии и респираторные заболевания.

ОВК-системы также играют важную роль в энергосбережении и экологической устойчивости. Современные системы разрабатываются с учётом энергоэффективности и минимизации воздействия на окружающую среду, используя инновационные технологии, такие как возобновляемые источники энергии и умное управление потреблением ресурсов. Они также являются неотъемлемой частью современных «умных» домов, где интеграция с системами автоматизации позволяет оптимизировать управление климатом в реальном времени, адаптируясь к изменяющимся условиям и предпочтениям пользователей.

Кроме того, системы ОВК используются для специфических задач, таких как обеспечение нужных климатических условий в медицинских учреждениях, лабораториях, дата-центрах и других специализированных объектах, где параметры воздуха критически важны для безопасности и функционирования оборудования и здоровья людей.

Таким образом, ОВК-системы представляют собой комплексный и многогранный элемент современной инфраструктуры, способствующий улучшению качества жизни, повышению производительности и защите окружающей среды.

Основные цели управления микроклиматом (HVAC) включают:

1) Создание и поддержание комфортного микроклимата для людей, растений, животных или материальных ценностей внутри зданий или сооружений.

2) Экономия энергии, необходимой для создания и поддержания желаемого микроклимата.

Это может быть применено в жилых помещениях, салонах автомобилей, космических аппаратах и других объектах. Управление микроклиматом осуществляется с помощью различных инженерных систем, таких как тёплые полы, холодные потолки, радиаторы, фанкойлы, системы кондиционирования и вентиляции, увлажнители и осушители воздуха, ионизаторы и другие. Для эффективного управления всеми этими устройствами необходима интегрированная система управления микроклиматом. При правильной настройке системы управления различные элементы должны работать гармонично в любых условиях, учитывая изменения, такие как открытые или закрытые окна, наличие людей в помещении, время суток, дни недели и изменения тарифов на энергоресурсы. Кроме того, современные здания могут быть оборудованы системами удалённого управления климатом через интернет, мобильные приложения или компьютеры диспетчеров. Пример системы (HVAC) транспортного средства изображён на рисунке 3. Представленная модель содержится в библиотеке *MatLab* [7].

В данном примере происходит моделирование потока влажного воздуха в

системе отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (HVAC) транспортного средства. Воздушный объем кабины автомобиля рассматривается как место, где влажный воздух обменивается теплом с окружающей средой. Влажный воздух проходит через рециркуляционную заслонку, вентилятор, испаритель, смешивающую дверцу и обогреватель перед возвращением в кабину. Рециркуляционная заслонка выбирает источник потока - из кабины или извне. Клапан смесителя направляет поток вокруг обогревателя для регулирования температуры.

Модель может быть запущена в двух режимах: с использованием заранее заданных системных входов или с ручным вводом данных. Параметры управления HVAC в предустановленных системных входах располагаются в подсистеме «Системные входы». В случае ручного ввода данных параметры управления могут быть настроены в процессе работы с помощью элементов управления на панели управления. Полученные графики результатов моделирования показаны на рисунке 4.

Одним из актуальных подходов к моделированию управления в системах теплоснабжения и ОВК является применение прогнозирующих моделей *MPC* (*Model Predictive Control*). В работах [8, 9] предложены подходы к управлению тепловыми режимами зданий на основе прогнозирующих моделей *MPC*. В статье [10] приведено решение по применению *MPC*-управления для систем ОВК.

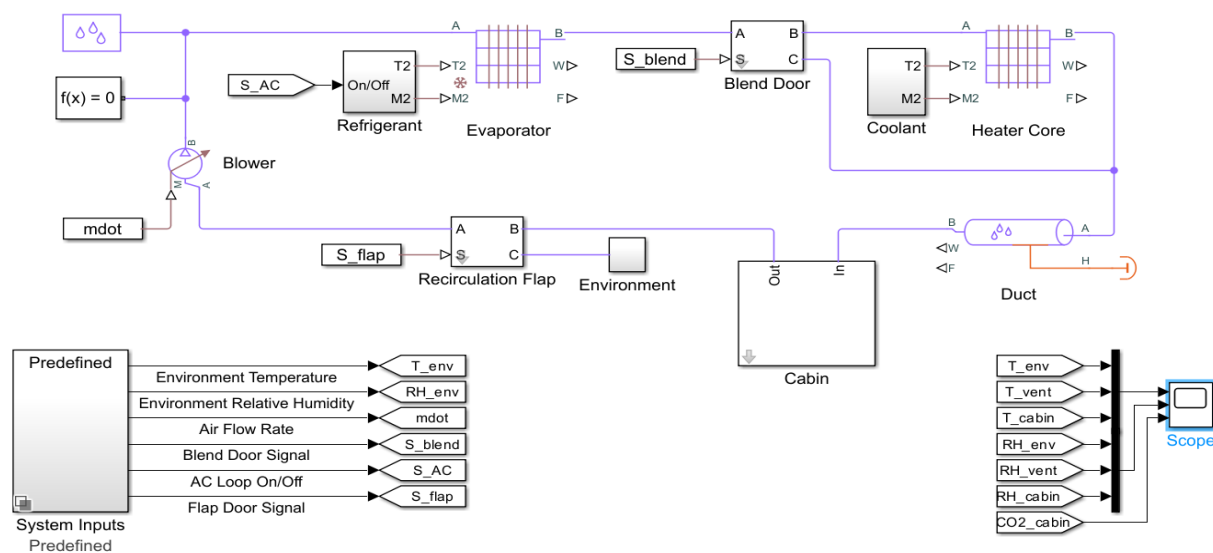


Рисунок 3 - Модель системы HVAC транспортного средства

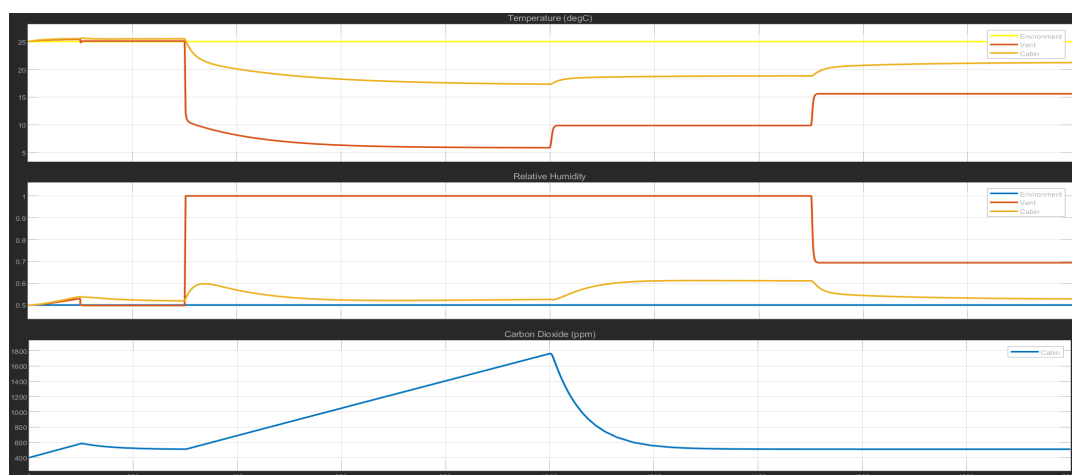


Рисунок 4 - Графики температурного режима

Выводы

Таким образом, для экономии тепловой энергии и улучшения качества переходных процессов при управлении тепловым режимом здания предлагается применять прогнозирующие модели. Эти модели позволяют более точно и эффективно контролировать параметры теплового режима, предсказывая изменения температурных условий и адаптируясь к ним. Для реализации данных моделей подходит использование библиотеки *Simscape* пакета *Matlab*, которая предоставляет мощные инструменты для моделирования физических систем.

Индивидуальный тепловой пункт (ИТП) представляет собой комплекс современных установок и оборудования, включающих теплообменники, насосы, регуляторы и системы автоматизации. Этот комплекс обеспечивает возможность не только значительной экономии теплоносителя, но и создания оптимального микроклимата внутри зданий и помещений, что напрямую влияет на комфорт и здоровье проживающих или работающих там людей.

Установка ИТП приносит множество эксплуатационных преимуществ. Во-первых, значительно снижаются эксплуатационные затраты, связанные с потреблением и транспортировкой тепловой энергии. Во-вторых, минимизируются тепловые потери благодаря более точному регулированию температуры и снижению излишков тепла.

Литература

1. Солдатенков А. С., Потапенко А. Н., Глаголев С. Н. Исследование математической модели управления автоматизированным индивидуальным тепловым пунктом с типовыми регуляторами // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. № 1 (2). Том 14. С. 679-684.
2. Алибекова М. А. Моделирование автоматической регулировки процесса

теплообмена // *Universum: технические науки* : электрон. научн. журн. 2022. 4(97).

3. International Telecommunication Union [Electronic resource] / Интернет-ресурс. - Режим доступа: <https://servicepto.ru/info/chtotakoe-individualnyi-teplovoy-punkt>.

4. Миронов А. Г. Учёт теплообменных процессов в моделях магистральных нефтепроводов в пакете *matlab/simscape* // Молодая нефть: сб. статей. Всерос. молодежной науч.-техн. конф. нефтегазовой отрасли / отв. за выпуск О.П. Калякина. 2015.

5. Борисов И. И., Колубин С. А. Комплексное моделирование мехатронных систем. Установка *Simscape Multibody Link* и экспорт моделей САПР. Моделирование захватных устройств. Описание механизма. 2020.

6. Потапов Н. С., Маслов А. А. Оценка адекватности модели адаптивной системы управления с применением средств математического моделирования // Наука - производству: материалы междунар. науч.-практ. конф. / Мурманский гос. техн. ун-т. Мурманск, 2018. С. 77-84.

7. Дьяконов В. П. «MATLAB. Полный самоучитель». ДМК Пресс. 2023. 769 с.

8. Тугашова Л. Г. Моделирование температурного режима системы теплоснабжения зданий // Решение: Материалы Шестой Всероссийской научно-практической конференции, г. Березники, 14 октября 2017 г. Пермь: ПНИПУ, С. 338-340.

9. Марьясин О. Ю., Колодкина А. С. Управление тепловым режимом зданий с использованием прогнозирующих моделей // Вестник СамГТУ. 2017. № 1 (53). С. 122-132.

10. Андрийчук В. Н., Соколов В. И., Андрийчук Н. Д. Управление системами отопления, вентиляции и кондиционирования на основе MPC-подхода // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2022. № 5(157). С. 5-13.

Тугашова Л.Г., Батыров А.Р., Мингалев М.Э., Мухаметишин Д.Д. Вариант имитационного моделирования технологического объекта в Simulink/Simscape. В настоящее время важной задачей является обеспечение энергоэффективного управления тепловым режимом зданий. Решение вышеназванной задачи предполагает разработку математических и имитационных моделей тепловых режимов зданий и систем теплоснабжения. Важным этапом является определение оптимальных параметров тепловых режимов зданий и технологических установок. Для определения параметров возможно применение имитационных моделей, реализованных, в частности, с применением программного пакета Simulink/Simscape. В системах теплоснабжения применяются автоматизированные индивидуальные тепловые пункты (ИТП). В состав ИТП входят теплообменники, насосы, регуляторы, системы автоматизации. Приведена схема ИТП, которая может быть зависимой или независимой. Также здания могут быть снабжены системами отопления, вентиляции и кондиционирования (ОВК, HVAC). ОВК представляет собой комплекс технологий, направленных на поддержание определенных параметров воздуха (температуры, влажности, химического состава) внутри помещений, а также салонов автомобилей (климат-контроль). Показан пример моделирования потока влажного воздуха в системе HVAC транспортного средства с применением Simulink/Simscape. Для решения задачи энергоэффективности на действующих технологических установках осуществляется модернизация существующей системы теплоснабжения. В работе приведен пример технического перевооружения блока стабилизации установки подготовки нефти. В существующую систему включены кожухотрубчатый теплообменник, ИТП, схема автоматизации. Результатом такого оснащения является возможность отказа от котельной и использование энергетических ресурсов технологической установки. В работе приведены расчетные значения температур теплоносителей кожухотрубчатого теплообменника. Автоматизация системы отопления на установке способствует повышению эффективности процесса и позволяет уменьшить нагрузку на операторов.

Ключевые слова: индивидуальный тепловой пункт, Simscape, моделирование, кожухотрубчатый теплообменник, отопление, кондиционирование.

Tugashova L.G., Batyrov A.R., Mingalev M.E., Mukhametshin D.D. Option for simulation modeling of a technological object in Simulink/Simscape. At present, an important task is to ensure energy-efficient management of the thermal regime of buildings. The solution to the above problem involves the development of mathematical and simulation models of thermal regimes of buildings and heat supply systems. An important stage is to determine the optimal parameters of thermal regimes of buildings and process units. To determine the parameters, it is possible to use simulation models implemented, in particular, using the Simulink / Simscape software package. Automated individual heating points (IHP) are used in heat supply systems. IHPs include heat exchangers, pumps, regulators, automation systems. The IHP diagram is given, which can be dependent or independent. Also, buildings can be equipped with heating, ventilation and air conditioning (HVAC) systems. HVAC is a set of technologies aimed at maintaining certain air parameters (temperature, humidity, chemical composition) inside buildings, as well as car interiors (climate control). An example of modeling a humid air flow in a vehicle HVAC system using Simulink / Simscape is shown. To solve the problem of energy efficiency at the existing process units, the existing heat supply system is being modernized. The paper provides an example of technical re-equipment of the stabilization unit of the oil treatment unit. The existing system includes a shell-and-tube heat exchanger, an ITP, and an automation scheme. The result of such equipment is the ability to refuse the boiler room and use the energy resources of the process unit. The paper provides the calculated values of the temperatures of the heat carriers of the shell-and-tube heat exchanger. Automation of the heating system at the unit helps to increase the efficiency of the process and reduces the load on operators.

Keywords: individual heating point, Simscape, modeling, shell-and-tube heat exchanger, heating.

Статья поступила в редакцию 02.06.2024
Рекомендована к публикации профессором Павлышом В. Н.