

## Моделирование системы теплоснабжения здания в аварийном режиме\*

Морозов М. Н., аспирант, Стрижак П. А., доктор физ.-мат. наук

**Национальный исследовательский Томский политехнический университет**

Разработана модель системы теплоснабжения, состоящая из источника энергии, индивидуального теплового пункта и системы отопления. Выполнены исследования тепловой защиты здания в аварийном режиме работы системы теплоснабжения. Проведено сравнение динамики снижения температуры теплоносителя и воздуха в помещениях различной конфигурации. Сделаны выводы о влиянии конструктивных особенностей отопительной системы и циркуляции теплоносителя на время его остывания до критической температуры.

**Ключевые слова:** имитационная модель, тепловая защита здания, система теплоснабжения, отопительный прибор, аварийный режим работы, система регулирования теплопотребления.

Проблема обеспечения эффективного и надежного функционирования систем централизованного теплоснабжения становится все более актуальной. Основной причиной высокой их аварийности является большая физическая изношенность. Анализ статистических данных [1, 2] показывает, что чаще всего аварии происходят на тепломагистралях, генерирующих объектах (ТЭЦ, ГРЭС, котельные и др.) и в распределительных сетях. Распространенными причинами аварийной работы систем теплоснабжения становятся также перебои в электроснабжении.

Работы по устранению аварий регламентированы нормативной документацией (например, [3–5]), где установлено максимально допустимое время восстановления теплоснабжения для различных категорий потребителей в зависимости от температуры воздуха внутри здания. Однако большая часть аварий происходит в наиболее холодное время отопительного периода, когда проведение ремонтных работ осложнено погодными условиями. Как следствие, возрастает их длительность и снижается качество. Ежегодно фиксируются довольно длительные перерывы теплоснабжения зданий. В таких условиях происходит промерзание ограждающих конструкций и элементов систем отопления (СО) зданий и сооружений.

Одна из основных проблем при планировании аварийно-восстановительных работ — недостаток оперативной информации о состоянии тепловых сетей. Важно также знать состав потребителей для выявления зданий с

наихудшими теплозащитными свойствами и ненадежных участков распределительных сетей системы теплоснабжения. Для реализации превентивных действий с целью скорейшей локализации аварий целесообразно прибегать к методам их прогнозирования. Особую роль играют исследования тепловой защиты зданий, позволяющие оценить динамику изменения температур воздуха, ограждающих конструкций и теплоносителя СО.

Для анализа тепловой защиты здания в аварийном режиме работы СО, как правило, создается имитационная модель. Известны результаты исследований, выполненных по двум направлениям: для здания в целом (по укрупненным показателям) [6, 7] и для контрольных помещений [8, 9]. В первом случае не учитываются значительная разница температур внешних и внутренних ограждающих конструкций, геометрические особенности здания, конфигурация СО и другие особенности. Во втором случае исследуется выбранное контрольное помещение, но при этом не учитываются архитектура, теплоемкость СО и пространственное расположение помещения. Общим недостатком таких анализов является невозможность мониторинга динамики температуры теплоносителя в СО. С целью уточнения параметров моделирования проводят натурные эксперименты. Поскольку для них необходимо принудительно прерывать теплоснабжение здания, такие эксперименты требуют больших трудозатрат и ограничены погодными условиями. К тому же в реальных условиях постоянно изменяются влияющие факторы (в частности, ветровая нагрузка, интенсивность светового излучения).

Компьютерное моделирование позволяет при относительно небольших трудозатратах в

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госконтракт 2.80.2012).

короткие сроки проводить исследования без нарушения условий безопасной эксплуатации реальных объектов [10, 11]. При этом не требуется наличие специализированных аппаратных и программных средств для организации системы сбора данных. Появляется возможность определять динамику внешних и внутренних возмущений, а также имитировать различные нештатные ситуации. Данные преимущества дают возможность расширить спектр исследований систем теплоснабжения. Основная сложность — создание комплексной модели, содержащей математическое описание конструкций здания и системы теплоснабжения с учетом геометрических и теплофизических характеристик.

В настоящей статье представлены результаты исследования аварийного режима функционирования системы теплоснабжения и его влияния на динамику снижения температуры воздуха в помещениях и остывания теплоносителя СО здания. В качестве объекта исследования выбрана система централизованного теплоснабжения типового административного трехэтажного здания общей площадью 9870 м<sup>2</sup> и объемом 35 926 м<sup>3</sup>. Система состоит из индивидуального теплового пункта (ИТП), подающих и отводящих трубопроводов, стояков, отопительных приборов и запорно-регулирующей арматуры.

Индивидуальный тепловой пункт спроектирован по независимой схеме с принудительной насосной циркуляцией и подмешиванием теплоносителя из обратного трубопровода в подающий. Теплоснабжение от центрального теплового пункта (ЦТП) осуществляется по температурному графику 95/70 °С. В ИТП реализована погодозависимая автоматическая система регулирования (АСР) теплопотребления (используется принцип регулирования по возмущению) [12]. Это позволяет эффективно компенсировать основное возмущающее воздействие — температуру наружного воздуха  $T_{нар}$ , которая в течение отопительного периода изменяется в широком диапазоне.

Для исследования выбраны две группы помещений — из угловой и центральной частей здания. Принята следующая нумерация: № 1–3 — угловые помещения 1–3-го этажей, № 4–6 — центральные помещения 1–3-го этажей. Отопительные приборы внутри каждой группы соединены последовательно (вертикальная однотрубная конфигурация с верхним распределением теплоносителя). Помещения характеризуются идентичной планировкой. Угловые помещения имеют до-

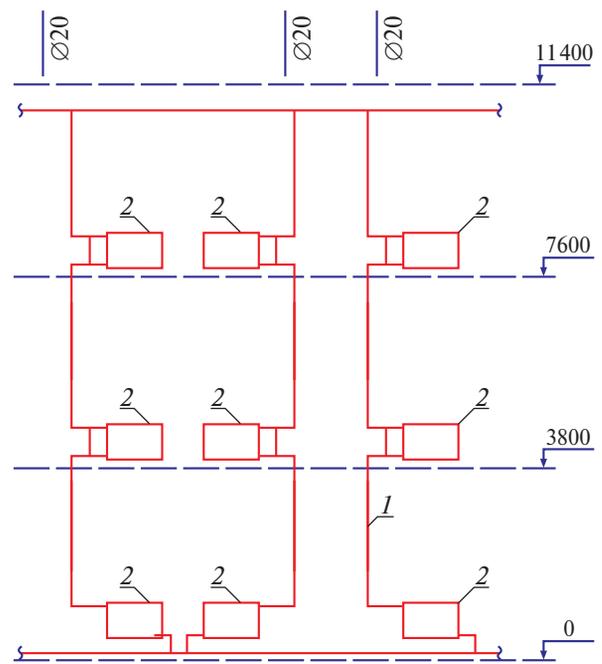


Рис. 1. План однотрубной системы отопления угловой группы помещений:

1 — водопроводная труба; 2 — отопительный прибор

полнительное окно (для соответствия реальной практике). План СО помещений угловой группы приведен на рис. 1.

С целью имитации аварийного режима работы СО указанного объекта разработана тепловая модель здания. В качестве платформы выбрано приложение Simulink математического пакета Matlab. Применен блочно-ориентированный подход к моделированию и “визуальному” программированию системы теплоснабжения здания в совокупности с широким набором математических инструментов Matlab. При разработке модели использовали также пакет расширения Simscape, реализующий концепцию “физического” моделирования. Модель характеризуется универсальностью и позволяет проводить прогностическое моделирование процессов теплоснабжения зданий и сооружений.

Источником теплоснабжения здания служит централизованная городская тепловая сеть. После ИТП теплоноситель направляется в СО здания. В структуре тепловой модели каждого помещения присутствуют как источники, так и потребители теплоты. В модели тепловая энергия поступает в помещение от нагревательных приборов СО, а теряется посредством процессов теплопередачи через наружные ограждающие конструкции в окружающую среду. Такой подход позволяет создавать модель типового помещения. Согласно этому подходу для формирования

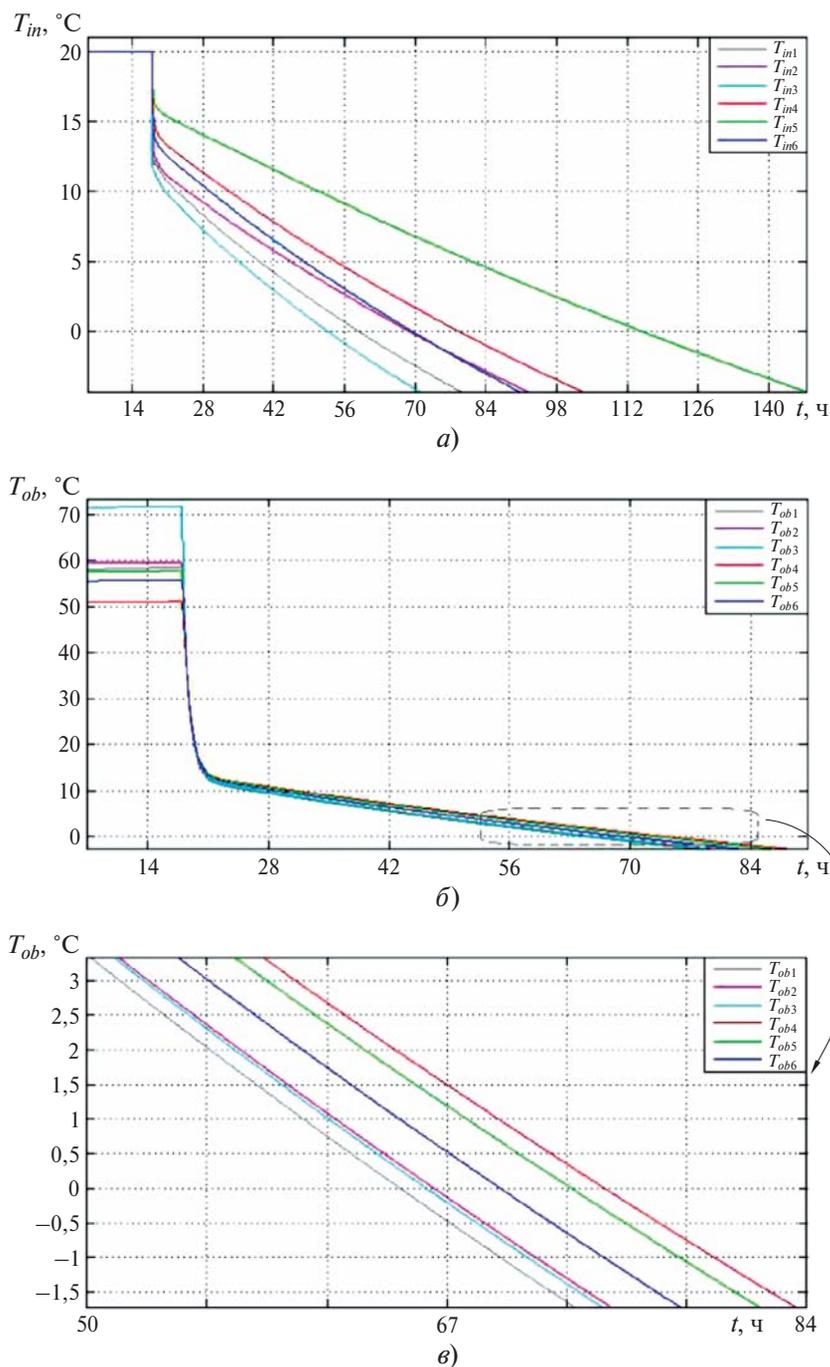


Рис. 2. Результаты моделирования для случая непрерывной циркуляции теплоносителя СО:

а — графики снижения температуры воздушной среды помещений ( $T_{in i}$  — температура воздуха внутри  $i$ -го помещения); б, в — графики остывания теплоносителя отопительной системы ( $T_{ob i}$  — температура теплоносителя в системе отопления  $i$ -го помещения);  $i = 1 \div 6$  — номер помещения

суммарной тепловой нагрузки здания необходимо масштабировать модель с учетом геометрических и теплофизических особенностей отдельных групп помещений.

Тепловая модель системы теплоснабжения здания основана на законе сохранения энергии для типового помещения [13]. Для моделирования различных механизмов теплообмена между компонентами модели применяли закон теплопроводности Фурье, а также за-

кон Ньютона — Рихмана, описывающий механизм конвективного теплообмена. Изменение давления  $p$  в системе не рассматривали в предположении, что значения  $p$  внутреннего контура теплоснабжения находятся в допустимых рамках [4].

Имитация аварийного режима работы отопительной системы заключается в прекращении подачи теплоты от ЦТП. Особенность функционирования модели — возможность

управления циркуляцией теплоносителя в СО. После прекращения подачи теплоты независимая конфигурация позволяет циркулировать теплоносителю в трубопроводах непосредственно до его остывания.

Моделирование выполнено для двух случаев:

1) при продолжении циркуляции теплоносителя во внутреннем контуре СО даже после наступления аварийного режима;

2) при отсутствии циркуляции (может быть вызвано принудительным отключением насосов или перебоем электроснабжения).

Начальная температура воздуха  $T_{in}$  принята одинаковой во всех помещениях и равной 20 °С. Моделирование проводили в экстремальных погодных условиях при температуре наружного воздуха – 40 °С. Прекращение подачи теплоты от ЦТП началось в 17 ч 47 мин. Помимо температуры воздуха внутри помещений  $T_{in}$ , фиксировали также температуру теплоносителя СО  $T_{ob}$ . Это позволяет более точно и детально проанализировать процессы остывания в здании. Результаты моделирования для случая непрерывной циркуляции теплоносителя представлены на рис. 2.

Мониторинг температуры воздушной среды  $T_{in}$  помещений двух групп в пределах одного этажа показывает, что угловые комнаты характеризуются большей динамикой ее снижения, чем центральные (см. рис. 2, а). Если же помещения одной группы расположены на разных этажах, быстрее остальных остывает комната верхнего этажа, тогда как помещение 2-го этажа характеризуется наименьшей интенсивностью остывания.

Максимальная динамика остывания среди всех шести контрольных помещений зафиксирована для угловой комнаты 3-го этажа: продолжительность снижения температуры воздуха от начального значения до 0 °С составляет 34 ч 38 мин для первого случая (непрерывная циркуляция теплоносителя) и 31 ч 5 мин для второго (отсутствие циркуляции). Наименьшей интенсивностью снижения температуры воздуха характеризуется центральное помещение 2-го этажа: продолжительность снижения составляет 96 ч 17 мин. Полученные результаты объясняются более высокими теплотерями помещений угловой группы из-за большей площади внешних ограждающих конструкций — 66,747 м<sup>2</sup> по сравнению с 37,012 м<sup>2</sup>.

Важным моментом при исследовании процессов остывания здания является монито-

ринг температуры теплоносителя  $T_{ob}$  (см. рис. 2 б, в). Критической выбрана температура 0 °С как индикатор начала процесса остывания теплоносителя. В случае его непрерывной циркуляции во внутреннем контуре здания минимальная продолжительность остывания воды до критической температуры зафиксирована для угловой комнаты 1-го этажа (46 ч 45 мин). Максимальная длительность охлаждения (56 ч 13 мин) наблюдалась у центрального помещения 1-го этажа. При отсутствии циркуляции теплоносителя время его остывания до критической температуры сопоставимо с временем снижения температуры воздуха.

На основании полученных результатов для случая непрерывной циркуляции теплоносителя можно сделать следующие выводы:

слабым местом СО является обратный трубопровод углового помещения 1-го этажа, где наблюдалось самое быстрое остывание теплоносителя;

время остывания теплоносителя в угловом помещении 1-го этажа до критической температуры увеличивается с 41 ч 43 мин (при отсутствии циркуляции) до 46 ч 45 мин.

Наибольшая динамика остывания теплоносителя на уровне помещения 1-го этажа объясняется особенностью конфигурации однотрубной СО с верхним расположением подающих трубопроводов: до нижних отопительных приборов теплоноситель доходит с наименьшей температурой.

### Выводы

1. Разработанная универсальная компьютерная модель системы централизованного теплоснабжения типового административного здания на базе приложения Simulink с применением концепции “физического” моделирования” позволяет проводить исследования тепловой защиты здания, а именно — процессов снижения температуры воздуха в индивидуальных помещениях, внешних ограждающих конструкциях, а также остывания теплоносителя отопительной системы.

2. Мониторинг воздушной среды помещений выявил сильный разброс по времени снижения температуры до критического значения (34 ч 38 мин — для углового помещения верхнего этажа, 96 ч 17 мин — для центральной комнаты).

3. Анализ динамики изменения температуры теплоносителя позволил выявить слабое место системы отопления — угловое помещение первого этажа.

4. Установлено влияние конструктивных особенностей отопительной системы и циркуляции теплоносителя на динамику изменения его температуры.

#### Список литературы

1. **Схема** теплоснабжения города — программа развития городского хозяйства / В. М. Лебедев, С. В. Приходько, А. В. Коваленко, Е. В. Васина. — Промышленная энергетика, 2013, № 8.
2. **Парыгин А. Г., Волкова Т. А., Куличихин В. В.** О энергонезависимости и надежности тепловых пунктов. — Энергетик, 2013, № 3.
3. **СП 124.13330.2012.** Свод правил “Тепловые сети”. — М.: Министерство регионального развития Российской Федерации, 2012.
4. **Постановление** Правительства РФ от 23.05.2006 № 30 “О порядке предоставления коммунальных услуг гражданам”.
5. **МДС 41-6.2000.** Организационно-методические рекомендации по подготовке к проведению отопительного периода и повышению надежности систем коммунального теплоснабжения в городах и населенных пунктах Российской Федерации. — М.: Госстрой России, 2000.
6. **Мишин М. А.** Исследование процессов остывания теплоносителя при прерывистом регулировании отопления. — Ползуновский вестник, 2010, № 1.
7. **Мишин М. А.** Тепловой режим жилых зданий. — Ползуновский вестник, 2011, № 1.
8. **Бурцев В. В., Басин А. С., Байтингер Н. М.** Математическая модель регулирования объекта теплопотребления. — Ползуновский вестник, 2004, № 1.
9. **Математическая** модель теплоснабжения помещений для АСУ энергосбережения / А. В. Пуговкин, С. В. Купреков, Д. В. Абушкин и др. (Доклады ТУСУР). — Управление, вычислительная техника и информатика, 2010, № 2 (22), ч. 1.
10. **Маккавеев В. В.** К вопросу моделирования систем централизованного теплоснабжения, обслуживающих группы автоматизированных потребителей. — Промышленная энергетика, 2011, № 2.
11. **Карелин А. Н.** Применение моделирования на основе специализированных измерительных стендов с целью совершенствования управления системами теплоснабжения. — Промышленная энергетика, 2012, № 11.
12. **Воеводин А. Г., Горинова Н. А.** Оптимизация системы теплоснабжения потребителей с индивидуальными терморегуляторами. — Промышленная энергетика, 2013, № 6.
13. **Lauenburg P., Wollerstrand J.** Modelling space heating systems connected to district heating in case of electric power failure. — Building simulation, Eleventh International Conference. Glasgow, Scotland, 2009.

benm6@yandex.ru