

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОСТЫВАНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПРИ ПРЕРЫВИСТОМ РЕГУЛИРОВАНИИ ОТОПЛЕНИЯ

М.А. Мишин

Статья посвящена вопросам использования метода прерывистого отопления для жилых зданий массовой застройки. Разработана модель, описывающая процессы нагрева и остывания теплоносителя и воздуха помещений. Приведены экспериментальные данные, подтверждающие адекватность разработанной модели. Получены данные о времени начала замерзания теплоносителя в трубопроводах различных диаметров.

Ключевые слова: воздух, диаметр, жилое здание, замерзание, нагрев, остывание, прерывистое отопление, температура, теплоноситель, трубопровод.

ВВЕДЕНИЕ

На источниках тепловой энергии применяется качественный способ регулирования отпуска, т.е. температура сетевой воды меняется в зависимости от температуры наружного воздуха. По мнению авторов [1–4], центральное регулирование не в состоянии учесть особенности каждого потребителя, вследствие чего не может быть обеспечена устойчивая работа отдельных систем отопления. Устойчивость работы повышается при приближении места проведения регулирования к потребителю тепловой энергии. В данной статье обосновывается применимость метода прерывистого отопления для жилых зданий массовой застройки. Ранее этот метод рассматривался только применительно к нежилым зданиям с переменным тепловым режимом [4, 5].

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Для обоснования применимости метода прерывистого отопления был проведен ряд экспериментов по остыванию теплоносителя, жилых помещений и жилых домов. В качестве измерительных приборов служили узлы учета тепловой энергии «Взлет», «Метран», инфракрасный пирометр «Raytek». Для сопоставления экспериментальных данных с расчетными, а также для исследований процессов остывания теплоносителя в системах отопления была разработана модель остывания теплоносителя на основе закона Ньютона-Рихмана. Согласно этому закону, за бесконечно малый промежуток времени $d\tau$ тело отдаст в среду с единицы поверхности количество тепла, пропорциональное разности температур тела и среды, и величине промежутка времени $d\tau$:

$$dQ = \alpha \cdot (t_m - t_{cp}) d\tau; \quad (1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи.

За время $d\tau$ тело понизит свою температуру на величину dt , а количество тепла, отданное телом будет равно

$$dQ = mcdt; \quad (2)$$

где m – масса, в объеме, ограниченном поверхностью с единичной площадью; c – массовая теплоемкость тела. Приравнявая правые части уравнений (1) и (2), получаем уравнение остывания тела

$$d\tau = \frac{m \cdot c}{\alpha \cdot (t_m - t_{cp})} dt. \quad (3)$$

Применяя формулу (3) соответственно к процессам остывания теплоносителя системы отопления и воздуха помещений, получаем систему уравнений, описывающую нестационарный режим остывания теплоносителя:

$$\begin{cases} d\tau = \frac{K_T}{(t_T - t_B)} dt_m; \\ d\tau = \frac{K_B}{(t_B - t_H)} dt_s. \end{cases} \quad (4)$$

где t_T – температура теплоносителя; t_B – температура внутреннего воздуха; t_H – температура наружного воздуха; dt_m – изменение температуры теплоносителя; dt_s – изменение температуры внутреннего воздуха.

Коэффициенты K_T и K_B , формулы (5)–(6), введены для упрощения формы записи.

В предложенной модели время остывания определяется как запас тепла отнесенный к скорости расхода тепла. Первое уравнение в системе (4) описывает остывание теплоносителя в системе отопления, второе – остывание воздуха помещений.

Модель связывает температуру воздуха помещений с температурой теплоносителя в системе отопления и позволяет производить

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОСТЫВАНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПРИ ПРЕРЫВИСТОМ РЕГУЛИРОВАНИИ ОТОПЛЕНИЯ

регулирование по отклонению без установки дополнительных датчиков в помещении

$$K_T = \frac{c_T \cdot m_T}{k \cdot F} \quad (5)$$

$$K_B = \frac{(c_B \cdot m_B + c_{жб} \cdot m_{жб})}{V \cdot \left[\frac{P}{S} [k_c + \varphi \cdot (k_{ок} - k_c)] + \frac{1}{L} [k_c + \psi_1 k_{nm} + \psi_2 k_{пл}] \right]} \quad (6)$$

Здесь обозначено: $c_B, c_{жб}$ – удельные теплоемкости воздуха и железобетона; $m_B, m_{жб}$ – масса воздуха в помещениях и масса внутренних ограждений дома (согласно техпаспорта); c_T – удельная теплоемкость теплоносителя; m_T – масса теплоносителя в приборах системы отопления; k – коэффициент теплопередачи материала отопительных приборов; F – площадь поверхности отопительных приборов; $k_c, k_{ок}, k_{nm}, k_{пл}$ – коэффициенты теплопередачи стен, окон, пола нижнего этажа, потолка верхнего этажа; φ – коэффициент остекления; ψ_1, ψ_2 – поправочные коэффициенты на расчетный перепад температур для верхнего и нижнего горизонтальных ограждений [5]; V, P, S, L – геометрические характеристики здания (объем, периметр, площадь, высота).

В знаменателе формулы (6) использована формула профессора Н.С. Ермолаева [6], описывающая тепловые потери через ограждающие конструкции зданий.

Для решения системы уравнений (4) необходимо задавать начальные температуры, при которых будет остывать теплоноситель и воздух помещений: $t_{нт}$ – температура теплоносителя к началу остывания; $t_{нв}$ – температура внутреннего воздуха к началу остывания. Определим эти величины:

$$t_{нт} = \frac{t_{см} + t_2}{2}, \quad (7)$$

где $t_{см}$ – температура смешения, получаемая в результате подмеса теплоносителя на элеваторе;

$$t_{см} = \frac{t_1 + at_2}{a + 1}, \quad (8)$$

где a – коэффициент смешения, определяемый по формуле (9); t_1, t_2 – температуры подающего и обратного теплоносителя;

$$a = \frac{t_{1изм} - t_{см.изм}}{t_{см.изм} - t_{2изм}}, \quad (9)$$

где $t_{1изм}, t_{см.изм}, t_{2изм}$ – измеренные температуры теплоносителя (до и после элеватора и температура обратного теплоносителя).

ПОЛУЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 1 2010

Поскольку метод прерывистого отопления применяется для исключения перегрева помещений, смоделируем процесс остывания теплоносителя и воздуха помещений жилого дома при повышенной начальной температуре внутреннего воздуха и сравним полученные графики с экспериментальными данными. Исходные данные, необходимые для построения расчетных графиков остывания, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Исходные данные

Обозначение	Значение	Размерность
k_c	0,86	ккал/м ² ч°С
$k_{ок}$	1,07	ккал/м ² ч°С
$k_{пт}$	0,72	ккал/м ² ч°С
$k_{пл}$	0,72	ккал/м ² ч°С
ψ_1	0,8	безразм.
ψ_2	0,6	безразм.
φ	0,2	безразм.
V	63827	м ³
P	540	м
S	2533	м ²
L	25,2	м
$t_{нв}$	27	°С
$t_{н}$	-3	°С
a	1,4	безразм.
c_B	0,239	ккал/(кг°С)
m_B	66794	кг
c_T	1	ккал/(кг°С)
m_T	14,5	кг
$c_{жб}$	0,2	ккал/(кг°С)
$m_{жб}$	532096	кг
k	5,729	ккал/м ² ч°С
F	2,44	м ²

Данные таблицы 1 приняты по результатам анализа теплопотребления исследуемого дома, также используются справочные величины [8, 9]: коэффициенты $K_T = 1,037313$; и $K_B = 61,90048$; начальные температуры $t_{нт} = 51,12$ и $t_{нв} = 27$ °С.

Поскольку предполагаемое время остывания теплоносителя относительно невелико, примем температуру наружного воздуха постоянной, $t_{н} = -3$ °С.

Нахождение искомых значений температур, изображенных на графиках рисунка 2, выполнялось методом подбора при помощи ЭВМ. Метод заключался в подборе таких значений температур воздуха, соответствующих заранее заданным температурам теплоносителя, при которых разность значений времени, рассчитанных соответственно по первому и второму уравнениям системы (4), стремилась к нулю. Решение системы

уравнений модели остывания теплоносителя приведено на рисунке 1.

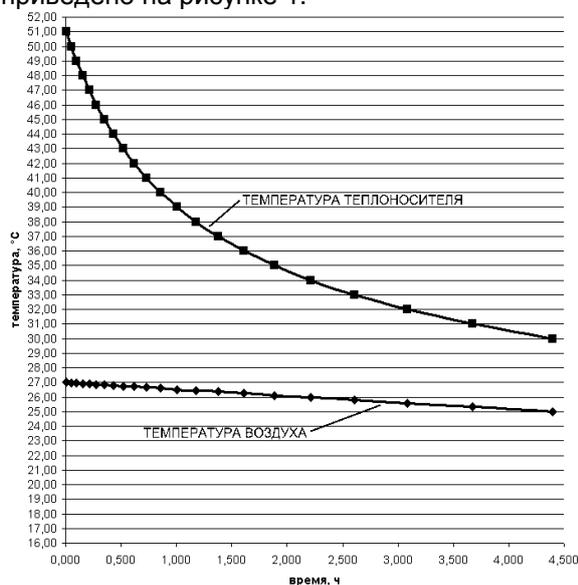


Рисунок 1 – Графики остывания теплоносителя и воздуха помещений

Анализируя график рисунка 1, видно, что теплоноситель системы отопления остывает по экспоненте, а воздух помещений остывает практически линейно. Дальнейшее исследование модели показывает, что в рассматриваемом случае температура воздуха помещений опустится до 20°C приблизительно через 18 часов после отключения подачи теплоносителя.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В общем случае теплотребление дома рассчитывается по формуле [7]:

$$Q = M \cdot (h_1 - h_2), \quad (10)$$

где M – массовый расход теплоносителя; h_1 , h_2 – удельные энтальпии теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах.

Из формулы (10) видно, что теплотребление дома можно сократить до нуля только при нулевом расходе теплоносителя. Если расход теплоносителя будет больше нуля, то тепловычислитель узла учета тепловой энергии будет умножать его на разницу температур теплоносителя в подающем и обратном трубопроводе. Причем температура обратного теплоносителя существенно понизится (в ряде случаев до комнатной температуры). В результате чего разница температур возрастет, и теплотребление дома снизится не существенно. Кроме того, при недостаточном расходе квартиры в конце системы отопления не будут отапливаться вообще, т.к. в подавляющем большинстве случаев системы отопления в нашей стране

рассчитывались для постоянного расхода теплоносителя.

На рисунке 2 изображен график теплотребления дома при неполном перекрытии подачи теплоносителя.

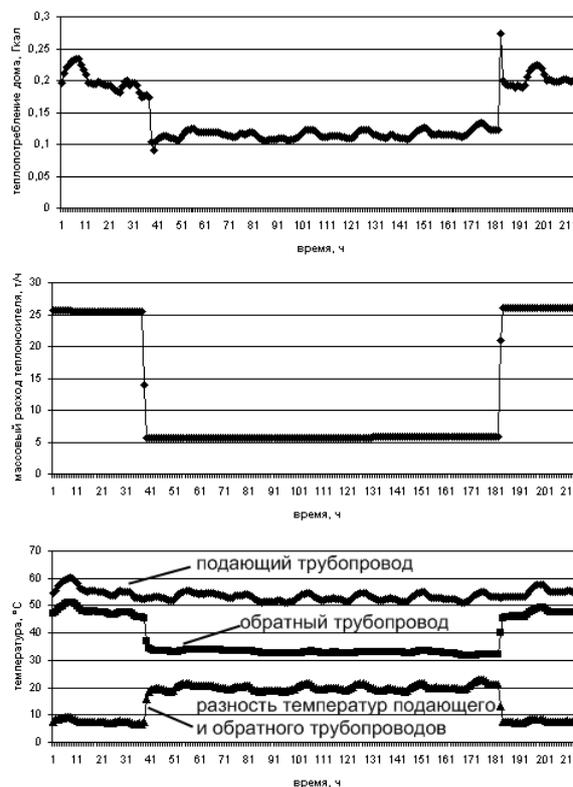


Рисунок 2 – График теплотребления дома при неполном перекрытии подачи теплоносителя

По графикам рисунка 2 видно, что сокращение расхода теплоносителя в 5 раз привело к сокращению теплотребления всего в 2 раза. При этом в период эксперимента (с 01.04 по 07.04.2010 г.) половина квартир в доме по адресу г. Барнаул, ул. Северо-Западная, 29 практически оставались без отопления вследствие недостаточного расхода теплоносителя.

В свете изложенного становится очевидной актуальность применения прерывистого отопления с полным перекрытием подачи теплоносителя. При таком способе регулирования теплотребления дома подача теплоносителя перекрывается полностью и происходит остывание теплоносителя и воздуха помещений до необходимых температур.

На рисунке 3 показаны данные эксперимента по остыванию жилого помещения по адресу г. Барнаул, ул. Павловский тракт 253-160. Дата испытаний – 25 октября 2009 года.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОСТЫВАНИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПРИ ПРЕРЫВИСТОМ РЕГУЛИРОВАНИИ ОТОПЛЕНИЯ

Время начала – 11:12, время окончания – 14:12. Температура наружного воздуха составляла -2°C к началу эксперимента.

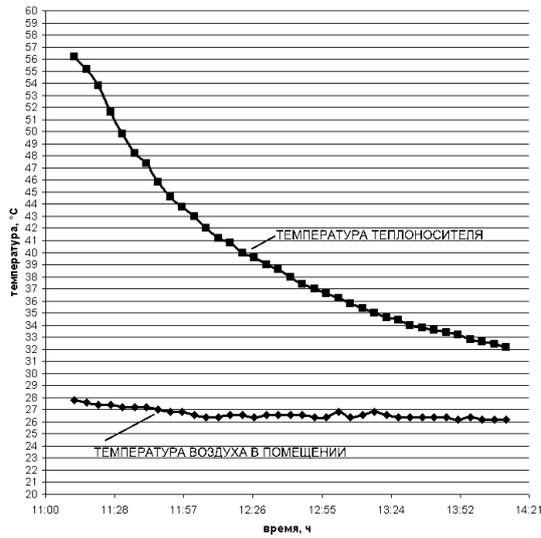


Рисунок 3 – Графики остывания теплоносителя и воздуха помещения

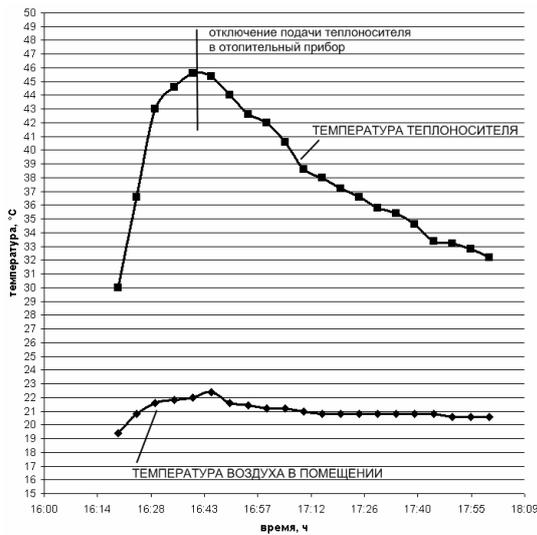


Рисунок 4 – Графики нагрева и остывания теплоносителя и воздуха помещения

За 3 часа температура внутреннего воздуха понизилась на $1,6^{\circ}\text{C}$, а температура теплоносителя – на 24°C . Учитывая небольшие несоответствия всех температур, заданных при моделировании, и влияние соседних помещений, данные эксперимента полностью соответствуют модели остывания.

Чтобы воссоздать процесс включения отопления с последующим отключением (рисунок 4), было выполнено отключение всех радиаторов и полное проветривание кварти-

ры в течение 2 часов, после чего был включен радиатор только в исследуемой комнате.

По графикам рисунка 3 видно, что процесс нагрева воздуха помещения происходит гораздо быстрее, чем процесс остывания. За 25 минут воздух нагрелся на 3°C , а остыл на $1,8^{\circ}\text{C}$ за 1 час 15 минут. Также видно, что воздух помещения начал остывать несколько позже, чем теплоноситель. В проветренном помещении воздух после нагрева остывал гораздо быстрее, чем в первом случае, хотя график остывания теплоносителя аналогичен первому.

На рисунке 5 изображены данные эксперимента по остыванию теплоносителя дома по адресу г. Барнаул, ул. 80 Гвардейской дивизии, 4а/1. Дата испытаний – 26 декабря 2009 года. Время отключения системы отопления дома – 10:10, время включения – 11:18. Время окончания эксперимента – 12:00. Температура наружного воздуха составляла -11°C к началу эксперимента и не менялась.

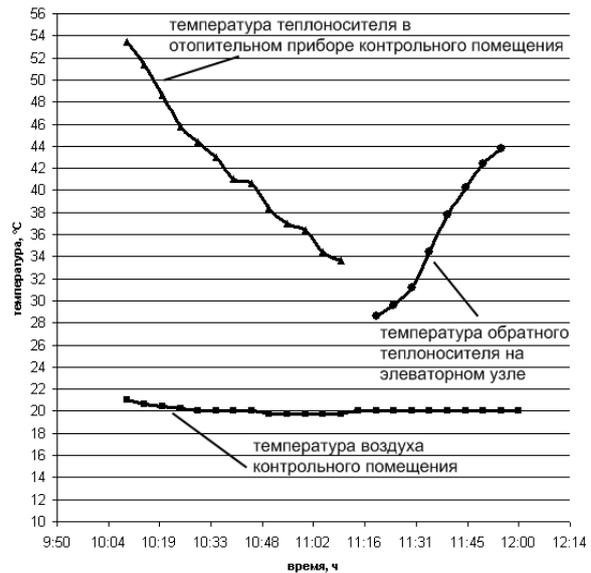


Рисунок 5 – Графики остывания воздуха и теплоносителя при отключении отопления дома

По графикам видно, что процессы остывания отдельно взятых помещений и всего дома аналогичны. Более быстрое остывание воздуха на графике рисунка 4 обусловлено более низкой температурой наружного воздуха, т.е. большими тепловыми потерями через ограждающие конструкции. Однако повышение температуры теплоносителя всего дома происходит несколько медленнее, чем на графике рисунка 4, вследствие чего нагреть воздух всех помещений также быстро как от-

дельно взятого не получится. Следовательно, моделировать процесс нагревания воздуха помещений нецелесообразно, т.к. этот процесс индивидуален для каждого здания и зависит от многих факторов.

Из всех вышеприведенных графиков следует, что в периоды перегрева помещений отключать подачу теплоносителя возможно на достаточно длительные периоды времени, при этом температура воздуха помещений не понижается ниже нормативных значений. Однако в любом жилом доме имеются места (такие как подъезды, подвалы, чердаки), где температура воздуха существенно ниже, чем в квартирах. Следовательно, при минусовой температуре возможны замерзания трубопроводов в этих местах при отключенном отоплении дома. Эта проблема также актуальна при аварийных отключениях подачи теплоносителя на источнике теплоснабжения. В этой связи были проведены эксперименты по остыванию теплоносителя в трубопроводах различных диаметров при средней температуре наружного воздуха 18,35°C (рисунок 6).

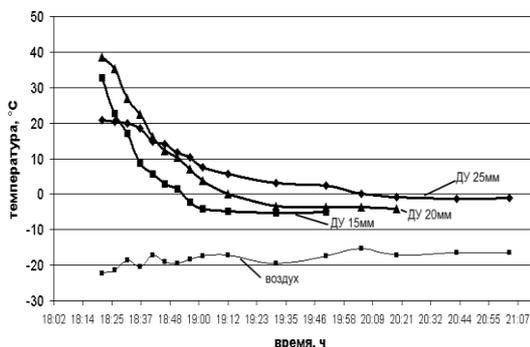


Рисунок 6 – Графики остывания поверхностей трубопроводов различных диаметров

В ходе испытаний, изображенных на рисунке 6, температура теплоносителя в трубах оценивалась косвенно, по температуре на поверхности трубы. В этой связи начальные температуры на графике ниже начальной температуры теплоносителя (70°C). Самая низкая начальная температура наблюдалась на поверхности трубы с диаметром условного прохода 25 мм. Это обусловлено более толстой стенкой трубы (2,8 мм).

Чтобы смоделировать процесс остывания теплоносителя в трубопроводах, воспользуемся вышеописанной моделью, используя только первое уравнение системы, температуру воздуха примем постоянной. Масса теплоносителя внутри труб, площадь поверхности и коэффициент теплопередачи

находятся по общеизвестным формулам и данным таблиц 1-2.

На рисунке 7 изображены расчетные графики остывания теплоносителя, согласно условиям эксперимента рисунка 6.

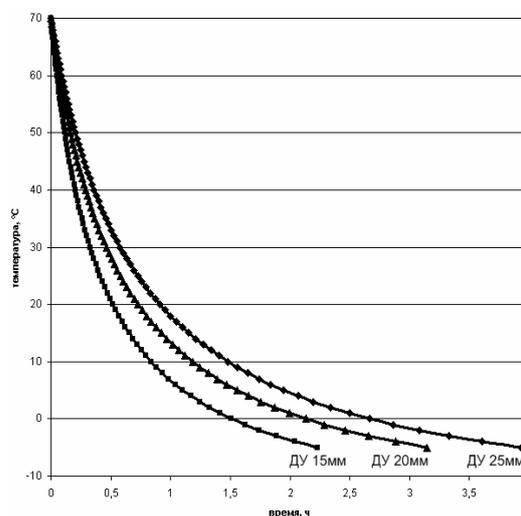


Рисунок 7 – Графики остывания теплоносителя в трубопроводах различных диаметров

Из рисунка 7 видно, что в ходе эксперимента по остыванию теплоносителя в трубопроводах при средней температуре наружного воздуха -18,35°C теплоноситель в трубе с ДУ 15мм не замерзал 1,5 часа, с ДУ 20мм – 2,13 часа, с ДУ 25мм – 2,67 часа, что соответствует графику рисунка 6.

Характеристики используемых труб, согласно ГОСТ 3262-75, показаны в таблице 2.

Для практической оценки времени остывания теплоносителя в трубопроводах систем отопления при нулевом расходе были рассчитаны графики для различных значений температур воздуха (рисунки 8-14). Значения времени в точках с нулевой температурой сведены в таблицу 3.

Таблица 2 – Характеристики трубопроводов

Условный проход, мм	Наружный диаметр, мм	Толщина стенки, мм
15	21,3	2,35
20	26,8	2,35
25	33,5	2,8

Таблица 3 – Время начала замерзания труб

t _н , °C	ДУ 15мм	ДУ 20мм	ДУ 25мм
-5	5,54	7,84	9,80
-10	2,77	3,91	4,90
-15	1,85	2,61	3,27
-20	1,39	1,96	2,45
-25	1,11	1,57	1,96
-30	0,92	1,31	1,63

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОСТЫВАНИЯ ТЕПЛОСИТЕЛЯ ПРИ ПРЕРЫВИСТОМ РЕГУЛИРОВАНИИ ОТОПЛЕНИЯ

-35	0,79	1,12	1,40
-----	------	------	------

в трубах с ДУ 15, 20 и 25 мм при $t_n = -25^\circ\text{C}$

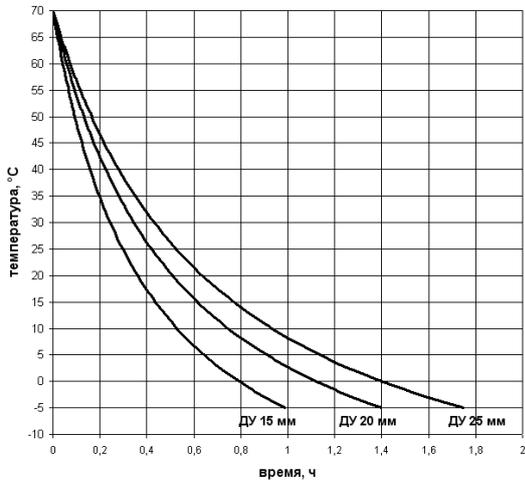


Рисунок 8 – Остывание теплоносителя в трубах с ДУ 15, 20 и 25 мм при $t_n = -35^\circ\text{C}$

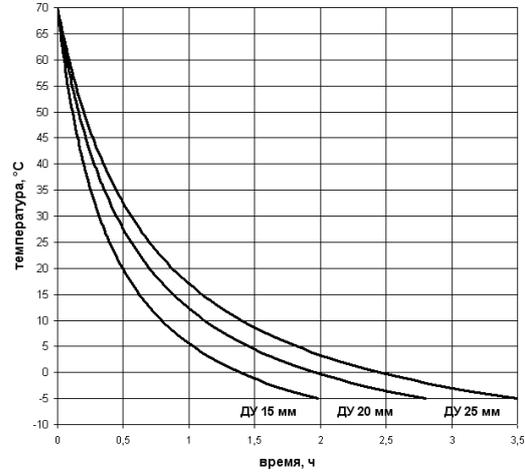


Рисунок 11 – Остывание теплоносителя в трубах с ДУ 15, 20 и 25 мм при $t_n = -25^\circ\text{C}$

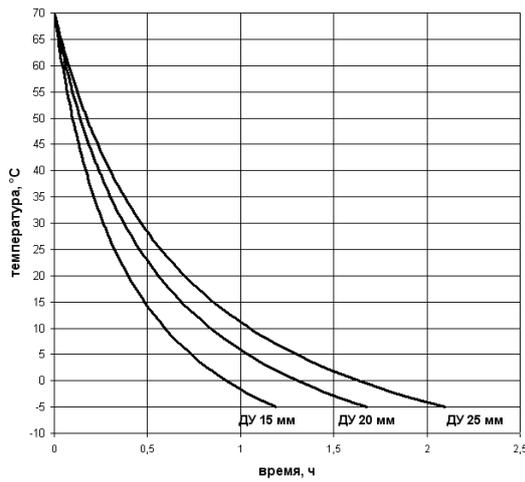


Рисунок 9 – Остывание теплоносителя в трубах с ДУ 15, 20 и 25 мм при $t_n = -30^\circ\text{C}$

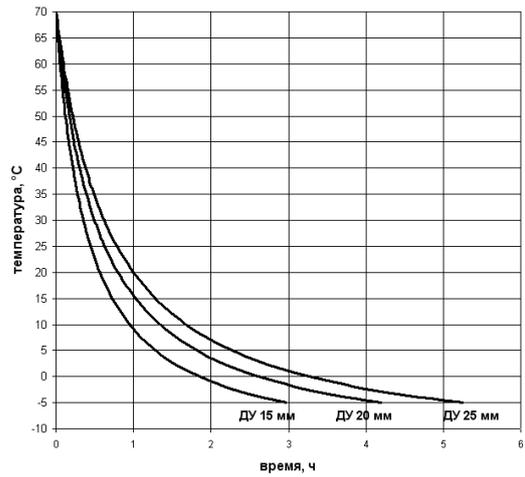


Рисунок 12 – Остывание теплоносителя в трубах с ДУ 15, 20 и 25 мм при $t_n = -15^\circ\text{C}$

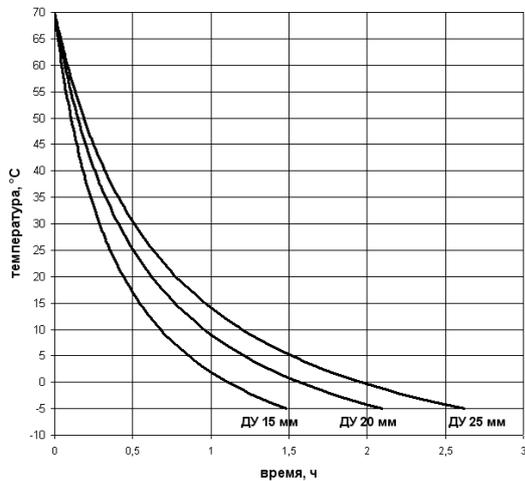


Рисунок 10 – Остывание теплоносителя

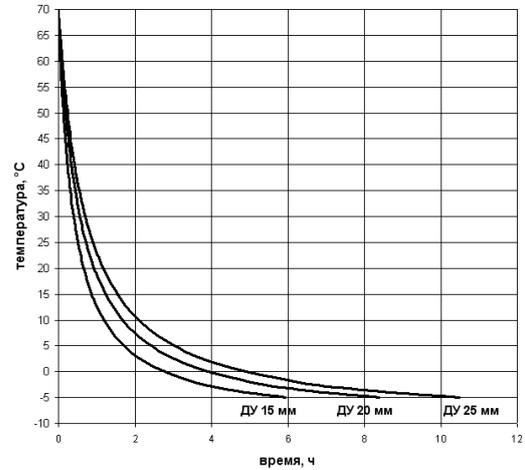


Рисунок 13 – Остывание теплоносителя

в трубах с ДУ 15, 20 и 25 мм при $t_{н}=-10^{\circ}\text{C}$

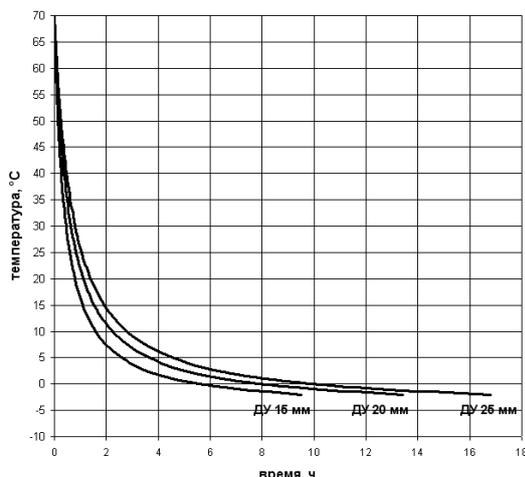


Рисунок 14 – Остывание теплоносителя в трубах с ДУ 15, 20 и 25 мм при $t_{н}=-5^{\circ}\text{C}$

На рисунке 15 графически представлены экспериментальные данные таблицы 3.

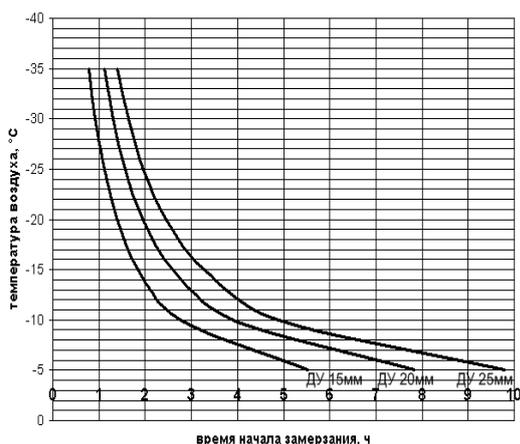


Рисунок 15 – Диаграмма для определения времени начала замерзания теплоносителя в трубопроводах

ВЫВОДЫ

1. Показана эффективность применения метода прерывистого отопления для жилых зданий массовой застройки, обосновано пол-

ное перекрывание подачи теплоносителя в периоды перегрева помещений.

2. Разработана модель, описывающая процессы остывания теплоносителя при прерывистом отоплении.

3. Модель связывает температуру воздуха помещений с температурой теплоносителя в системе отопления, что позволяет производить регулирование по отклонению без установки дополнительных датчиков в помещениях.

4. Получены данные о времени начала замерзания теплоносителя в трубопроводах различных диаметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Группа компаний СТКС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.stks.ru/>, свободный. Автоматизированные тепlopункты.
2. Дальневосточный энергопотребитель [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dalenergy.ru/>, свободный. Индивидуальное регулирование тепlopотребления.
3. Зингер Н.М. Гидравлические и тепловые режимы теплофикационных систем. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
4. Богословский В.Н., Сканава А.Н. Отопление: Учеб. для вузов. – М.: Стройиздат, 1991.
5. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: Учебник для вузов. – 7-е изд., стереот. – М.: Издательство МЭИ, 2001.
6. Ермолаев Н.С. К вопросу об определении тепловой характеристики зданий // Отопление и вентиляция. 1932. №4. С. 18-21.
7. Тепловычислитель СПТ942. Руководство по эксплуатации. – ЗАО НПФ ЛОГИКА, 2003.
8. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: Справочник. – М.: Издательство МЭИ. 1999.
9. Авчухов В.В., Паюсте Б.Я. Задачник по процессам тепломассообмена. Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат. 1986.

Мишин М.А.,
АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Барнаул
тел. 8-983-174-3541, E-mail: mishin_max@mail.ru