

## АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ В ЭНЕРГЕТИКЕ

### ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ЗДАНИЯ БАШНИ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА “ЛАХТА ЦЕНТР”

© 2023 г. Н. В. Варламов<sup>а, \*</sup>, А. С. Горшков<sup>а</sup>, Ю. В. Юферев<sup>а</sup>, А. Ю. Лезер<sup>а</sup>,  
А. Е. Жирнов<sup>а</sup>, Н. А. Парашенко<sup>а</sup>

<sup>а</sup>АО “Газпром промгаз”, Вокзальная ул., д. 23, г. Видное, 142702 Россия

<sup>\*</sup>e-mail: N.Varlamov@promgaz.gazprom.ru

Поступила в редакцию 24.05.2022 г.

После доработки 19.07.2022 г.

Принята к публикации 27.07.2022 г.

В настоящее время светопрозрачные фасадные конструкции все чаще используются при строительстве небоскребов и высотных зданий, особенно при возведении административных комплексов. В ряде случаев коэффициент остекленности фасадов таких сооружений составляет 0.8 и более. В рамках данного исследования рассмотрен тепловой режим здания Башни – доминанты в составе многофункционального комплекса “Лахта Центр”. Смоделированы режимы включения и отключения системы отопления объекта исследования, которые характеризуют параметры микроклимата в здании в начале и конце отопительного периода, а также в случае аварийного отключения теплоснабжения. Составлено уравнение баланса для Башни с учетом теплопритоков и теплопотерь. Учтено влияние теплоаккумулирующей способности наиболее массивных и теплоемких строительных конструкций, расположенных в пределах отапливаемого объема здания. Обоснована целесообразность использования в качестве расчетной температуры наружного воздуха при проектировании системы отопления остекленных зданий температуры наиболее холодных суток заданной обеспеченности. Получено уравнение изменения температуры воздуха внутри здания  $t_{\text{вн}}$  при аварийном отключении системы отопления. Показано, как изменяется  $t_{\text{вн}}$  при температурах наружного воздуха  $t_{\text{н}}$  от  $-28$  до  $8^{\circ}\text{C}$  с шагом  $4^{\circ}\text{C}$ . Для каждого выбранного значения  $t_{\text{н}}$  выполнена оценка ориентировочного времени достижения допустимой  $t_{\text{вн}}$  после аварийного отключения системы отопления в здании. Установлено, что количество тепловой энергии, которое необходимо затратить, чтобы нагреть все массивные конструктивные элементы, расположенные внутри отапливаемого объема здания, на  $1\text{ K}$ , составляет  $160.84\text{ ГДж}$ , потери через остекленные фасады здания –  $179.1\text{ кВт/К}$ . Коэффициент тепловой аккумуляции рассматриваемого объекта исследования, показывающий время, в течение которого после отключения системы отопления первоначальная разность температур уменьшится в  $e$  раз, составил примерно  $250\text{ ч}$ . Отсюда следует, что Башня обладает достаточным запасом тепловой энергии, позволяющим в течение длительного времени поддерживать в помещениях комфортную температуру воздуха.

*Ключевые слова:* небоскреб, высотное здание, “Лахта Центр”, наружная ограждающая конструкция, светопрозрачный фасад, коэффициент остекленности фасадов, коэффициент теплопередачи, отопление, аварийное отключение, теплоаккумулирующая способность, микроклимат, температура воздуха внутри здания

**DOI:** 10.56304/S0040363623010083

В настоящее время в крупных городах все чаще строятся высотные здания со светопрозрачными ограждающими конструкциями, имеющими высокий коэффициент остекленности фасадов.

Для зданий исторической постройки данный показатель, как правило, не превышает 0.15 (15%). Это обусловлено тем, что сопротивление теплопередаче окон в исторических зданиях было более чем вдвое ниже, чем непрозрачных ограждающих конструкций (наружных стен, покрытий, чердачных перекрытий), а стоимость энергоносителей

(дров) в отопительный период резко возростала. Благодаря уменьшению коэффициента остекленности фасадов и обеспечению тем самым минимальной естественной освещенности помещений в дневное время суток были минимизированы трансмиссионные потери тепловой энергии в холодный период года. Компактная застройка внутри исторических кварталов с примыканием торцевых наружных стен двух соседних зданий вплотную друг к другу так же способствовала минимизации потерь тепловой энергии через оболочку.

По мере развития систем централизованного теплоснабжения, повышения их эффективности, применения более эффективных теплоизоляционных строительных материалов, введения более строгих нормативных требований по тепловой защите зданий, улучшения теплоизоляционных характеристик ограждающих конструкций, в том числе светопрозрачных, появились условия для строительства зданий с более высоким коэффициентом остекленности фасадов.

По сравнению с более ранними периодами массовой застройки, в настоящее время теплоизоляционные свойства светопрозрачных заполнений световых проемов значительно улучшились. Современные ограждающие (оконные блоки, в том числе мансардные, люкарны, зенитные фонари, дормеры) и навесные (модульные, стоечно-ригельные, фахверковые, вантовые, бескаркасные, комбинированные) светопрозрачные конструкции стали более герметичными (воздухонепроницаемыми). Благодаря этому уменьшились так называемые инфильтрационные потери тепловой энергии через наружную оболочку зданий. Появились стеклопакеты с пленочным селективным покрытием (мягким и твердым), различным межстекольным пространством, разным количеством переплетов, с заполнением межстекольного пространства инертными газами, имеющими меньшую теплопроводность по сравнению с воздухом, с усовершенствованной конструкцией профиля, с использованием менее теплопроводных материалов в конструкции профиля, с увеличенным количеством и разной формы замкнутых воздушных камер внутри профиля. В совокупности эти меры позволили повысить сопротивление теплопередаче светопрозрачных ограждающих конструкций и уменьшить тем самым трансмиссионные потери тепловой энергии через оболочку [1, 2].

Сопротивление теплопередаче современных оконных блоков и иных типов светопрозрачных заполнений может достигать  $1 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ , что сопоставимо по теплоизоляционным свойствам с однородным фрагментом каменной кладки толщиной в три кирпича, характерной для наружных стен исторических зданий постройки до 1917 г. [3–5]. Это позволило строить здания с практически полностью остекленными фасадами – с коэффициентом остекленности 0.8 и выше.

Несмотря на широкое распространение высотных зданий со светопрозрачными фасадами, некоторые аспекты их эксплуатации в России с немалым количеством климатических поясов и зон, различающихся по числу градусо-суток отопительного периода и интенсивности солнечной радиации, остаются невыясненными. Один из таких аспектов касается теплоустойчивости зданий, выполненных с большим коэффициентом

остекленности фасадов, но имеющих массивное железобетонное ядро, которое обладает значительной теплоаккумулирующей способностью. Этому вопросу на примере конкретного объекта и посвящена данная статья.

## ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Объект исследования настоящей работы – здание Башни в составе многофункционального комплекса “Лахта Центр” (рис. 1) высотой 462 м. Остекленный фасад Башни с частично двухниточной оболочкой витражной светопрозрачной конструкции имеет ярко выраженную форму двоякой кривизны с вертикальными стойками – фальш-колоннами, обрамляющими 10 граней фасада (рис. 2). Внешние нитки фасада представляют собой навесную модульную (элементную) фасадную систему, в которой все импосты стоек расположены под углом к вертикали, а все ригели строго горизонтальны. Панели стеклопакетов составляют около 90% фасада внешней оболочки Башни, являются однотипными и имеют форму параллелограмма со стороной основания примерно 2.8 м (в осях) и высотой 4.2 м в осях горизонтальных отметок ригелей. Коэффициент остекленности фасадов объекта исследования составляет 0.87.

Цель исследования – оценка изменения температуры воздуха в помещениях Башни при отключении и запуске системы отопления, а также в случае аварийного отключения отопления. Для этого рассмотрен характер изменения температуры воздуха внутри здания при включении и отключении системы отопления.

Теплоснабжение объекта осуществляется от газовой котельной, работающей в режиме как основного, так и резервного источника тепла.

Изменение температуры внутри эксплуатируемых помещений зависит от теплоаккумулирующей способности здания и теплотехнических характеристик его наружных ограждающих конструкций (НОК). В качестве таких теплотехнических характеристик рассматривается сопротивление теплопередаче или обратная ему величина – коэффициент теплопередачи.

За начальный момент времени принимается начало отопительного периода, когда температура наружного воздуха начинает постепенно уменьшаться. До некоторой разности температур воздуха внутри и снаружи здания комфортные параметры микроклимата могут поддерживаться только благодаря внутренним источникам тепловой энергии: от работающего инженерного оборудования, бытовых приборов, офисной оргтехники, людей и солнечной радиации (в светлое время суток). По мере уменьшения температуры



Рис. 1. Многофункциональный комплекс “Лакhta Центр”

наружного воздуха и исчерпания запаса теплоаккумулирующей способности здания температура воздуха внутри Башни также начинает постепенно (с запаздыванием относительно изменения параметров наружного воздуха) снижаться. Ввиду выравнивания температур внутренних ограждений и воздуха в помещениях падает и температура внутренних ограждающих конструкций. Когда температура воздуха в помещениях становится ниже оптимального или допустимого уровня, для компенсации увеличивающихся потерь тепловой энергии включается система отопления. Тепловая энергия, поступающая в систему, расходуется на нагрев внутренних конструкций, интерьера и оборудования и компенсацию трансмиссионных потерь тепловой энергии через наружную оболочку.

Благодаря системе вентиляции Башни воздух в помещения подается заданной температуры, в

связи с чем при составлении уравнения теплового баланса расход тепловой энергии на подогрев свежего воздуха не учитывается, что является одним из допущений рассматриваемой авторами модели.

С учетом того что наружные ограждающие конструкции Башни практически полностью выполнены светопрозрачными, за исключением покрытия верхнего эксплуатируемого этажа, площадь которого ( $467 \text{ м}^2$ ) значительно меньше площади светопрозрачных ограждений, нагревом НОК также можно пренебречь.

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Пусть за время  $dt$  при включении системы отопления в здание поступает количество энергии  $Q_0$ , которое расходуется на нагрев на  $dt$  градусов внутренних ограждающих конструкций, эле-

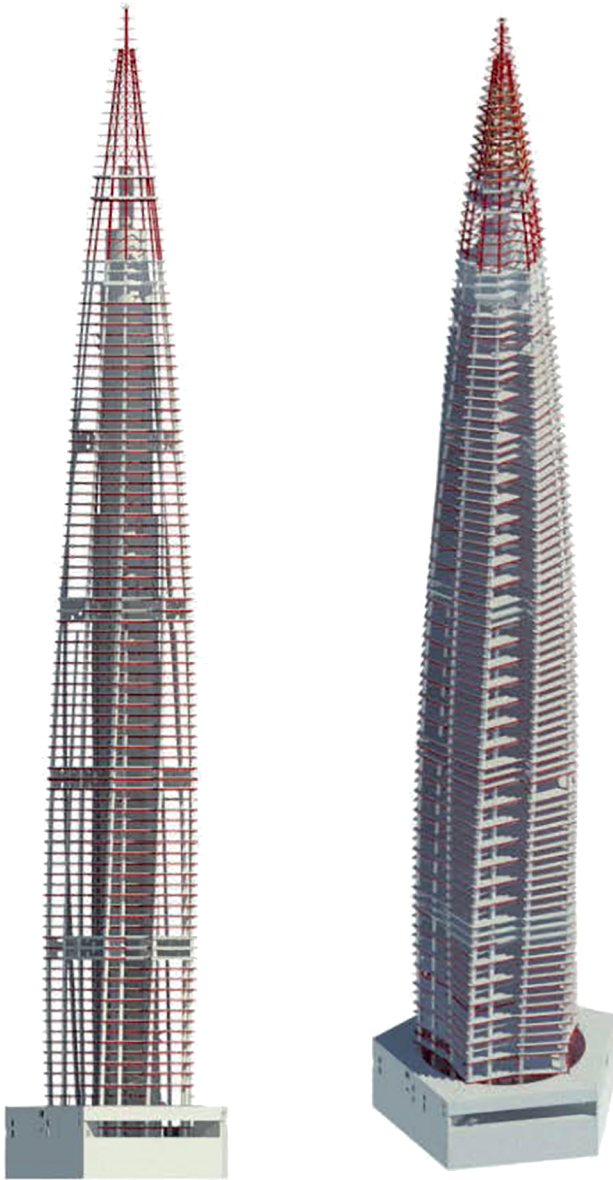


Рис. 2. Несущий каркас Башни

ментов интерьера, мебели, инженерного оборудования и компенсацию теплопотерь через НОК.

В рамках настоящего исследования учитывается теплоемкость только внутренних железобетонных и металлических несущих и ограждающих конструкций рассматриваемого здания, так как их массивность существенно выше массивности иных строительных конструкций и элементов, расположенных внутри здания. Тогда с учетом принятых допущений уравнение баланса теплопритоков и теплопотерь здания можно представить в виде

$$Q_0 d\tau = c\rho_{\text{вн}}\delta_{\text{вн}}S_{\text{вн}}dt + k_{\text{НОК}}S_{\text{НОК}}\Delta t d\tau, \quad (1)$$

где  $c$  – теплоемкость материала внутренних массивных ограждений и колонн,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $\rho_{\text{вн}}$  – плотность материала наиболее массивных внутренних конструкций здания,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\delta_{\text{вн}}$ ,  $S_{\text{вн}}$  – толщина, м, и площадь поверхности,  $\text{м}^2$ , внутренних железобетонных конструкций здания;  $dt$  – изменение температуры внутренних ограждающих конструкций здания за счет поступления тепловой энергии при включении системы отопления,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $k_{\text{НОК}}$ ,  $S_{\text{НОК}}$  – коэффициент теплопередачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , и площадь поверхности наружных ограждающих конструкций;  $\Delta t = t_{\text{вн}} - t_{\text{н}}$  – разница температур воздуха внутри и снаружи здания,  $^{\circ}\text{C}$ .

Пусть при достижении температурой воздуха внутри помещений  $t_{\text{вн}}$  заданного значения  $t_{\text{вн}}^*$ , т.е.

при  $t_{\text{вн}} = t_{\text{вн}}^*$  вся подводимая в систему отопления тепловая энергия расходуется на компенсацию теплопотерь через НОК:  $c\rho_{\text{вн}}\delta_{\text{вн}}S_{\text{вн}}dt = 0$ . Такой режим считается условно установившимся. Разница между температурами воздуха внутри и снаружи здания в этом случае составит  $\Delta t^* = t_{\text{вн}}^* - t_{\text{н}}$ . Тогда уравнение (1) примет вид

$$Q_0 d\tau = k_{\text{НОК}}S_{\text{НОК}}\Delta t^* d\tau. \quad (2)$$

Из (2) нетрудно вывести выражение для разницы температур внутреннего и наружного воздуха при установившемся процессе:

$$\Delta t^* = \frac{Q_0}{k_{\text{НОК}}S_{\text{НОК}}}. \quad (3)$$

Используя (3), количество энергии можно найти по формуле

$$Q_0 = k_{\text{НОК}}S_{\text{НОК}}\Delta t^*. \quad (4)$$

При подстановке выражения (4) в уравнение (1) получается

$$k_{\text{НОК}}S_{\text{НОК}}\Delta t^* d\tau = c\rho_{\text{вн}}\delta_{\text{вн}}S_{\text{вн}}dt + k_{\text{НОК}}S_{\text{НОК}}\Delta t d\tau; \quad (5)$$

$$k_{\text{НОК}}S_{\text{НОК}}(\Delta t^* - \Delta t) d\tau = c\rho_{\text{вн}}\delta_{\text{вн}}S_{\text{вн}}dt.$$

Преобразование (5) дает уравнение вида

$$(\Delta t^* - \Delta t) d\tau = \frac{c\rho_{\text{вн}}\delta_{\text{вн}}S_{\text{вн}}}{k_{\text{НОК}}S_{\text{НОК}}} dt, \quad (6)$$

где множитель перед  $dt$  в правой части уравнения можно обозначить

$$\beta = \frac{c\rho_{\text{вн}}\delta_{\text{вн}}S_{\text{вн}}}{k_{\text{НОК}}S_{\text{НОК}}}. \quad (7)$$

Параметр  $\beta$  имеет размерность времени и характеризует теплоаккумулирующие свойства конкретного здания. В ряде источников, например в [6], он носит название коэффициента тепловой аккумуляции здания.

С учетом данного параметра (6) имеет вид

$$(\Delta t^* - \Delta t) d\tau = \beta dt. \quad (8)$$

Разделив переменные в (8), можно получить

$$\frac{1}{\beta} d\tau = \frac{dt}{\Delta t^* - \Delta t}. \quad (9)$$

Решением дифференциального уравнения (9) является выражение

$$\Delta t = \Delta t^* \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\beta}\right) \right]. \quad (10)$$

Уравнение (10) выражает экспоненциальный закон изменения текущей разности температур воздуха внутри и снаружи здания от времени  $\tau$  в режиме нагревания. Проанализировав (10), можно сделать вывод, что со временем  $\tau$  текущая разность между фактической температурой воздуха внутри помещения и температурой наружного воздуха возрастает.

Текущее значение температуры воздуха внутри здания будет меняться по закону

$$t_{\text{вн}} = t_{\text{н}} + \Delta t^* \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\tau}{\beta}\right) \right]. \quad (11)$$

При  $\tau = 0$  разность температур  $\Delta t = 0$ , а  $t_{\text{вн}} = t_{\text{н}}$ . Это условие не совсем корректно, так как при включении системы отопления, как правило, температура воздуха в эксплуатируемых помещениях оказывается несколько выше температуры наружного воздуха из-за наличия внутренних теплопоступлений, которые можно рассматривать в качестве переменного источника тепловой энергии со случайной мощностью.

При  $\tau \rightarrow \infty$   $\Delta t = \Delta t^*$ ,  $t_{\text{вн}} = t_{\text{н}} + \Delta t^*$ .

При  $\tau = \beta$   $\Delta t = \Delta t^* \left(1 - \frac{1}{e}\right) \approx \Delta t^* \times 0.63$ , т.е. начальная разность температур увеличится примерно на 37%.

При отключении системы отопления (при  $Q_0 = 0$ ) уравнение (1) примет вид

$$-c\rho_{\text{вн}}\delta_{\text{вн}}S_{\text{вн}}dt = k_{\text{НОК}}S_{\text{НОК}}\Delta t d\tau. \quad (12)$$

Характер изменения текущей разности температур при этом изменится на противоположный:

$$\Delta t = \Delta t^* \exp\left[-\frac{\tau}{\beta}\right], \quad (13)$$

а температура воздуха внутри помещения будет определяться как

$$t_{\text{вн}} = t_{\text{н}} + \Delta t^* \exp\left[-\frac{\tau}{\beta}\right]. \quad (14)$$

Из уравнений (13) и (14) следует, что с течением времени  $\tau$  температура воздуха внутри здания и разность температур  $\Delta t$  будут убывать. При

этом закон их изменения будет оставаться прежним — экспоненциальным.

Следует рассмотреть некоторые граничные условия описываемого процесса охлаждения помещения.

При  $\tau = 0$   $\Delta t = \Delta t^*$ ,  $t_{\text{вн}} = t_{\text{н}} + \Delta t^* = t_{\text{вн}}^*$ .

При  $\tau \rightarrow \infty$   $\Delta t = 0$ ,  $t_{\text{вн}} = t_{\text{н}}$ , т.е. по истечении достаточно большого промежутка времени температуры воздуха внутри и снаружи здания выравниваются.

При  $\tau = \beta$   $\Delta t = \frac{\Delta t^*}{e}$ , это означает, что начальная разность температур уменьшится в  $e$  раз (примерно в 2.72).

Важно отметить, что и в режиме отключения системы отопления остаются случайные внутренние источники теплопоступлений, влияние которых на полученные уравнения тем выше, чем меньше разность температур воздуха внутри и снаружи здания.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ранее получены выражения для качественной оценки изменения температуры воздуха внутри здания при включении и отключении отопления. В целях количественной оценки рассматриваемого процесса следует определить параметр  $\beta$ , численное значение которого можно оценить на основании анализа данных, представленных в проектной документации.

Удобство рассматриваемого объекта (Башни) заключается в том, что его НОК в основном однотипны и достаточно подробно исследованы, а площади несветопрзрачных ограждающих конструкций здания существенно меньше, чем светопрзрачных.

Приведенное сопротивление теплопередаче остекления фасада  $R_{\text{фас}}^{\text{пр}}$  рассчитано с помощью программы BISCO (версия 10.0w) при стандартных граничных условиях [коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности равен  $23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ]. В реальных условиях эксплуатации теплоотдача от наружной поверхности зависит от фактического аэродинамического режима рассматриваемого высотного объекта, скорости ветра и ее изменения по высоте здания, что будет оказывать влияние на тепловой режим помещений. Ввиду отсутствия сведений об аэродинамическом режиме здания, в модели приняты проектные значения теплотехнических характеристик фасада Башни, а именно: сопротивление теплопередаче составляет  $0.71 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ , а обратный ему коэффициент теплопередачи  $k_{\text{НОК}} = 1.41 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

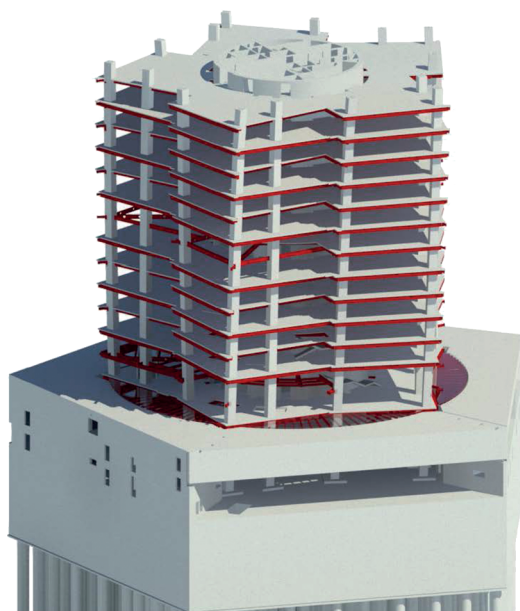


Рис. 3. Фрагмент железобетонного ядра Башни

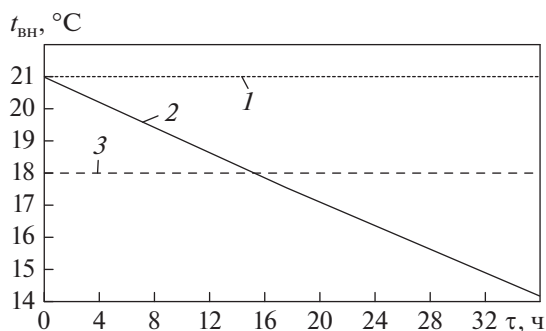


Рис. 4. График изменения температуры воздуха в здании  $t_{\text{вн}}$  после отключения системы отопления при  $t_{\text{н}} = -30^\circ\text{C}$ .

$t_{\text{вн}}$ : 1 – проектная; 2 – расчетная; 3 – допустимая

Теплоаккумулирующая способность фасадного остекления из-за его незначительной массивности по сравнению с внутренними железобетонными и металлическими конструкциями может не учитываться.

Выражение  $\rho_{\text{вн}} \delta_{\text{вн}} S_{\text{вн}}$  в формуле (7) характеризует массу всех внутренних конструкций здания. Для упрощения расчетов можно учесть массы (взяты из проектной документации) только наиболее массивных (железобетонных и металлических) конструкций, расположенных внутри надземной части здания.

Так как часть конструктивных элементов объекта расположена вне отопляемого объема, для дальнейших расчетов масса конструктивных эле-

ментов железобетонного ядра Башни (рис. 3), аутригерных балок, композитных колонн, металлических балок перекрытий и железобетонных перекрытий надземной части принята равной 200 000 т ( $2 \cdot 10^8$  кг), из которых на металл приходится 20 000 т, а на железобетон – 180 000 т. Теплоемкость последнего составляет  $0.84$  кДж/(кг · К), стали –  $0.482$  кДж/(кг · К).

Тогда числитель в выражении (7) будет равен, кДж/К:

$$\sum c\rho_{\text{вн}} \delta_{\text{вн}} S_{\text{вн}} = 160840000,$$

где знак  $\sum$  означает сложение масс металлических и железобетонных конструкций по отдельности [уравнение (7) дано в общем виде].

Полученное значение – это количество тепловой энергии, которое необходимо затратить, чтобы нагреть все конструктивные элементы, расположенные внутри отопляемого объема здания, на 1 К. Соответственно, столько же тепловой энергии выделится из них при уменьшении температуры на 1 К.

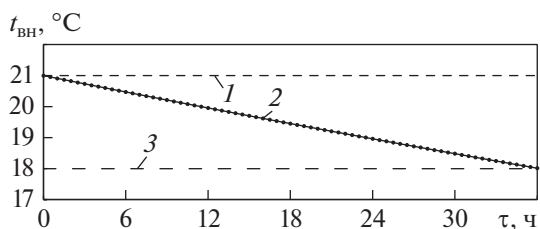
В нестационарном случае процесс нагревания и охлаждения конструктивных элементов здания будет более сложным: с учетом наличия теплоизоляционных свойств отделочных материалов и покрытий, нестационарности теплообмена на их поверхностях, влияния внутренних теплопоступлений [7–10]. Нестационарные тепловые режимы отопительных установок подробно описаны в [11]. На их основе в работе [12] предложена система группового регулирования отопительной нагрузки в зданиях, построенная методом математического моделирования. В монографии [13] рассмотрены способы управления режимами систем теплоснабжения и отопления с использованием средств автоматики и вычислительной техники. Однако, как было отмечено ранее, в настоящем исследовании рассматривается приближенная оценка изменения температуры в помещениях Башни. Поэтому при принятых исходных данных

$$\beta = \frac{\sum c\rho_{\text{вн}} \delta_{\text{вн}} S_{\text{вн}}}{k_{\text{НОК}} S_{\text{НОК}}} = 898196 \text{ с} \approx 250 \text{ ч} \approx 10 \text{ сут.}$$

Таким образом, параметр  $\beta$  для рассматриваемого объекта составляет приблизительно 250 ч, или около 10 сут. В течение этого времени, согласно уравнению (13), начальная разность температур уменьшится в 2.72 раза.

На рис. 4 показан график изменения температуры внутреннего воздуха в течение первых 36 ч после отключения системы отопления при  $t_{\text{н}} = -30^\circ\text{C}$ .

В большинстве случаев при проектировании систем отопления зданий используется температура воздуха наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0.92, принимаемая равной  $-24^\circ\text{C}$  для



**Рис. 5.** График изменения температуры воздуха в здании  $t_{вн}$  после отключения системы отопления при  $t_{н} = -1.2^{\circ}\text{C}$ . Обозначения см. рис. 4

климатических условий Санкт-Петербурга. По всей видимости, идея использования данного параметра в качестве расчетного для систем отопления впервые была предложена в работе [14]. Ее автор, К.Ф. Фокин, в течение 5 сут исследовал теплопотери каменной стеновой конструкции из полнотелого кирпича толщиной 640 мм в двух различных режимах: при переменной температуре наружного воздуха и при постоянной температуре, равной средней для переменного режима проведения испытаний. Фокин установил, что теплопотери для обоих режимов сопоставимы между собой [15]. На основании этого температура воздуха наиболее холодной пятидневки была принята в качестве расчетной для проектирования систем отопления зданий.

Позднее в стандартах по строительной теплотехнике было введено понятие тепловой инерции  $D$ . В зависимости от значения  $D$  были установлены различные значения расчетных температур наружного воздуха:

для массивных ограждающих конструкций с  $D > 7$  — средняя температура наиболее холодной пятидневки;

для легких ограждающих конструкций с  $D \leq 4$  — средняя температура наиболее холодных суток;

для ограждающих конструкций средней массивности с  $4 < D \leq 7$  — средняя из двух указанных выше температур.

Таким образом, выбор расчетных условий для ограждающих конструкций был обусловлен различием их теплоустойчивости. При похолодании теплопотери через ограждения с малой теплоустойчивостью по времени будут следовать практически сразу за изменениями температуры наружного воздуха, а теплопотери через теплоустойчивые ограждения будут отставать во времени от графика изменения этой температуры, и, чем более теплоустойчивы будут наружные ограждения, тем значительнее для них будет время запаздывания [16].

С учетом тепловой инерции остекленные фасады следует относить к легким по степени массивности ограждающим конструкциям. Поэтому

при проектировании системы отопления рассматриваемого объекта целесообразно использовать среднюю температуру наиболее холодных суток обеспеченностью 0.92, которая для климата Санкт-Петербурга составляет  $-28^{\circ}\text{C}$ . Ввиду вышесказанного объекта расчетная температура наружного воздуха в проекте принята равной  $-30^{\circ}\text{C}$ .

На рис. 4 приведены несколько граничных значений температуры воздуха внутри здания:

проектная  $t_{вн} = 21^{\circ}\text{C}$  — принятая по проекту;

допустимая  $t_{вн} = 18^{\circ}\text{C}$  — минимальная из диапазона допустимых для помещений общественного и административного назначения 2-й категории значений  $t_{вн}$ .

Режим изменения температуры воздуха внутри здания в общем случае будет зависеть от времени суток, а также от интенсивности теплопоступлений от солнечной радиации и наличия бытовых внутренних теплопоступлений. В ночное время температура воздуха внутри здания будет убывать быстрее, чем в дневное, при одной и той же  $t_{н}$ .

Из представленного графика следует, что после отключения системы отопления фактическая  $t_{вн}$  достигнет допустимого значения ( $18^{\circ}\text{C}$ ) примерно через 15 ч. Через сутки после отключения отопления температура воздуха в Башне составит  $16.3^{\circ}\text{C}$ , а через 36 ч —  $14.1^{\circ}\text{C}$ . Следует отметить, что в холодный период года в интервалы рабочего времени, когда помещения общественных и административно-бытовых зданий не используются, а также в нерабочее время допускается снижение  $t_{вн}$  до  $12^{\circ}\text{C}$ .

При иной, более высокой температуре наружного воздуха температура воздуха внутри здания будет убывать медленнее.

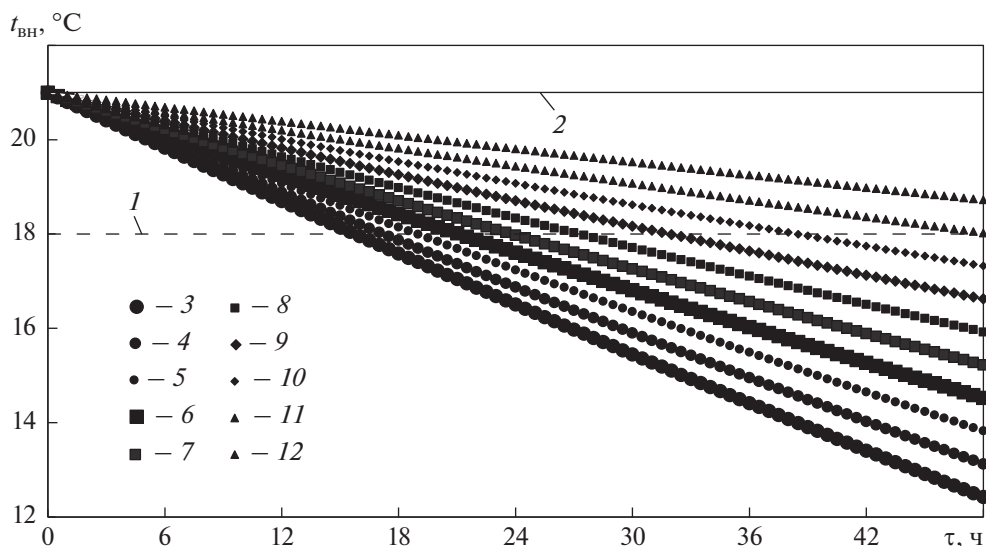
На рис. 5 представлен график изменения  $t_{вн}$  после отключения системы отопления при температуре  $t_{н} = -1.2^{\circ}\text{C}$ , средней для климатических условий Санкт-Петербурга в течение стандартизованного отопительного периода.

При  $t_{н} = -1.2^{\circ}\text{C}$  фактическая температура воздуха в помещениях достигнет допустимой через 36 ч.

Графики изменения  $t_{вн}$  в здании в течение первых 2 сут (48 ч) после отключения системы отопления при иных температурах наружного воздуха в диапазоне от  $-28$  до  $8^{\circ}\text{C}$  с шагом  $4^{\circ}\text{C}$  приведены на рис. 6.

Из представленных данных следует, что чем ниже температура наружного воздуха, тем более интенсивно после отключения системы отопления убывает температура воздуха внутри помещений.

Некоторые значения расчетных температур воздуха внутри здания, которые установятся в Башне по истечении некоторого заданного после отключения системы отопления промежутка вре-



**Рис. 6.** График изменения температуры воздуха внутри здания  $t_{\text{вн}}$  после отключения системы отопления при температуре наружного воздуха  $t_{\text{н}}$  от  $-28$  до  $8^{\circ}\text{C}$ .

$t_{\text{вн}}$ : 1 – допустимая; 2 – проектная;  $t_{\text{н}}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ : 3 – ( $-28$ ); 4 – ( $-24$ ); 5 – ( $-20$ ); 6 – ( $-16$ ); 7 – ( $-12$ ); 8 – ( $-8$ ); 9 – ( $-4$ ); 10 – 0; 11 – 4; 12 – 8

мени в зависимости от температуры наружного воздуха, показаны в табл. 1.

Ориентировочное время  $\tau$  снижения температуры воздуха в помещениях Башни до допустимого значения ( $18^{\circ}\text{C}$ ) после отключения в ней системы отопления при различных температурах наружного воздуха  $t_{\text{н}}$  указано в табл. 2.

Рассмотренная модель имеет ряд недостатков, среди которых в первую очередь необходимо отметить следующие.

Модель справедлива для достаточно больших времен прогнозирования переходных процессов нагревания и охлаждения помещений, так как при малых временах (меньше суток) на результаты

прогнозирования в значительной степени будут оказывать влияние принятые в модели допущения.

В модели не учтены некоторые внутренние (люди, оборудование) и внешние (солнечная радиация) источники теплопоступлений, которые будут оказывать замедляющее действие на процесс остывания помещений при аварийном отключении системы отопления в Башне.

В модели не принято во внимание накопление тепловой энергии предметами мебели, интерьера и отделки ввиду их малости по сравнению с массивными конструктивными элементами здания. Как и в предыдущем пункте, их влияние также будет оказывать замедляющее действие на процесс остывания помещений.

**Таблица 1.** Расчетная температура воздуха внутри здания,  $^{\circ}\text{C}$

$t_{\text{н}}, ^{\circ}\text{C}$	Начальная	Через 24 ч	Через 48 ч	Через 72 ч	Допустимая
$-28$	21	16.5	12.4	8.7	18
$-24$	21	16.9	13.1	9.7	18
$-20$	21	17.2	13.8	10.7	18
$-16$	21	17.6	14.5	11.7	18
$-12$	21	18.0	15.2	12.7	18
$-8$	21	18.3	15.9	13.7	18
$-4$	21	18.7	16.6	14.7	18
0	21	19.1	17.3	15.7	18
4	21	19.4	18.0	16.7	18
8	21	19.8	18.7	17.7	18



**Таблица 2.** Ориентировочное время  $\tau$  снижения температуры воздуха внутри здания Башни до допустимого значения ( $18^\circ\text{C}$ ) при различных значениях температурах наружного воздуха  $t_n$

$t_n$	$\tau$ , ч	$t_n$	$\tau$ , ч
-28	15.5	-8	27.0
-24	17.0	-4	31.5
-20	19.0	0	38.0
-16	21.0	4	48.0
-12	23.5	8	64.5

Устранение указанных недостатков может быть достигнуто путем устранения недостатков для проведения натурных исследований теплового режима отапливаемых помещений объекта и уточнения рассмотренной в работе теоретической модели.

## ВЫВОДЫ

1. Исследован режим изменения температуры воздуха в помещениях здания Башни, являющейся доминантой в составе многофункционального комплекса “Лахта Центр”, после отключения системы отопления в зависимости от температуры наружного воздуха и с учетом теплоаккумулирующей способности ее наиболее массивных конструктивных элементов – железобетонных перегородок, перекрытий, металлических балок и композитных колонн суммарной массой 200000 т.

2. Количество тепловой энергии, которое необходимо затратить для нагрева на 1 К всех конструктивных элементов, расположенных внутри отапливаемого объема здания, составляет 160 840 000 кДж, потери через остекленные фасады здания соответствуют 179070 Вт/К. Исходя из полученных значений коэффициент тепловой аккумуляции Башни, показывающий промежуток времени, в течение которого после отключения системы отопления первоначальная разность температур уменьшится в  $e$  раз, равен приблизительно 250 ч. Таким образом, рассматриваемый объект обладает существенным запасом тепловой энергии, позволяющим значительно увеличить время достижения допустимой температуры воздуха внутри помещений даже с учетом того, что основная часть фасадов Башни выполнена из немассивных навесных светопрозрачных ограждающих конструкций.

3. При принятых исходных данных при  $t_n = -30^\circ\text{C}$  температура воздуха внутри Башни опустится до допустимого значения ( $18^\circ\text{C}$ ) через 15 ч, а при более высоких температурах наружного воздуха время достижения минимально допустимой  $t_{\text{вн}}$  окажется еще больше. Следовательно, будет обеспечен достаточный запас времени в

случае аварийного отключения системы отопления Башни.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Spiridonov A.V., Shubin I.L. Development of translucent structures in Russia // Light Eng. 2014. V. 22. Is. 3. P. 78–85.
2. Spiridonov A.V., Shubin I.L., Osipov V.I. Development of fenestration in Russia: status and prospects // Glass and Ceramics. 2014. V. 70. Is. 9–10. P. 374–379. <https://doi.org/10.1007/s10717-014-9583-4>
3. Горшков А.С., Ливчак В.И. История, эволюция и развитие нормативных требований к ограждающим конструкциям // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 3 (30). С. 7–37. <https://doi.org/10.18720/CUBS.30.1>
4. Горшков А.С. Инженерные системы. Руководство по проектированию, строительству и реконструкции зданий с низким потреблением энергии: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013.
5. Горшков А.С. Обзор нормативных требований к ограждающим конструкциям зданий: от урочного положения до 1995 года // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2016. № 3–4 (206–207). С. 41–45.
6. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: учеб. для вузов. 9-е изд., стер. М.: Издательский дом МЭИ, 2009.
7. Nonstationary thermal conduction through the building envelope / N. Vatin, A. Gorshkov, P. Rymkevich, D. Nemova, D. Tarasova // Appl. Mech. Mater. 2014. V. 670–671. P. 365–369. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.670-671.365>
8. Energy efficiency of facades at major repairs of buildings / N. Vatin, A. Gorshkov, D. Nemova, D. Tarasova // Appl. Mech. Mater. 2014. V. 633–634. P. 991–996. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.633-634.991>
9. Zadvinskaya T.O., Gorshkov A.S. Comprehensive method of energy efficiency of residential house // Adv. Mater. Res. 2014. V. 953–954. P. 1570–1577. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.953-954.1570>
10. Горшков А.С., Рымкевич П.П. Диаграммный метод описания процесса нестационарной теплопередачи // Инженерно-строит. журн. 2015. № 8 (60). С. 68–82. <https://doi.org/10.5862/МСЕ.60.8>
11. Соколов Е.Я., Извеков А.В., Рожков Н.Н. Нестационарные тепловые режимы отопительных установок // Теплоэнергетика. 1988. № 9. С. 62–65.
12. Система группового регулирования отопительной нагрузки, построенная на основе метода математического моделирования / Е.Я. Соколов, Н.Н. Рожков, А.В. Извеков, Д.Н. Анисимов // Теплоэнергетика. 1990. № 3. С. 40–44.
13. Автоматизированные системы теплоснабжения и отопления / С.А. Чистович, В.К. Аверьянов, Ю.Я. Темпель, С.И. Быков. Л.: Стройиздат, 1987.

14. **Фокин К.Ф.** Расчетные температуры наружного воздуха. М.: Стандартгиз, 1946.
15. **Малявина Е.Г.** Теплотери здания: справ. пособие. М.: АВОК-ПРЕСС, 2007.
16. **Богословский В.Н.** Строительная теплофизика (теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха): учеб. для вузов. 3-е изд. СПб.: АВОК Северо-Запад, 2006.

## The Heat-Storage Capacity of the Lakhta Center Multifunctional Complex Tower Building

N. V. Varlamov<sup>a, \*</sup>, A. S. Gorshkov<sup>a</sup>, Yu. V. Yuferev<sup>a</sup>, A. Yu. Lezer<sup>a</sup>,  
A. E. Zhirnov<sup>a</sup>, and N. A. Parashchenko<sup>a</sup>

<sup>a</sup>AO Gazprom Promgaz, Vidnoe, 142702 Russia

\*e-mail: N.Varlamov@promgaz.gazprom.ru

**Abstract**—Translucent facade structures are increasingly more often used currently in constructing skyscrapers and high-rise buildings, especially in constructing office complexes. In a number of cases, the facade glazing-to-wall ratio of such structures is 0.8 or higher. Within the framework of this study, the thermal operation conditions of the tower, which is dominant in the Lakhta Center multifunctional complex, is considered. The studied object's space-heating system switching-on and switching-off modes, which characterize the building's indoor microclimate parameters at the heating season beginning and end, as well as in the case of heat supply emergency disconnection, are modeled. A heat-balance equation is set up that takes into account the heat gains and heat losses for the tower. The influence of the heat-storage capacity of the most bulky and heat-absorptive civil structures located within the building's heated volume is taken into account. The advisability of using the coldest day temperature of the specified exceedance probability as the design outdoor air temperature in designing the space-heating system of glazed buildings is substantiated. An equation describing the variation of the indoor air temperature  $t_{in}$  in the case of the space-heating system's emergency disconnection is obtained. The  $t_{in}$  variation pattern at outdoor air temperatures  $t_{out}$  varying from  $-28$  to  $8^{\circ}\text{C}$  at  $4^{\circ}\text{C}$  steps is shown. For each selected  $t_{out}$  value, the tentative time taken for  $t_{in}$  to reach its permissible value after the emergency disconnection of the building's space-heating system is evaluated. It has been determined that the amount of heat that has to be spent for heating all bulky structural elements located inside of the building heated volume by 1 K makes 160.84 GJ, and the heat losses through the building glazed facades are 179.1 kW/K. The heat-storage coefficient of the considered object under study, which shows the time for which the initial difference of temperatures will decrease by  $e$  times after disconnection of the space-heating system, has been found to be approximately 250 h. This means that the tower has a sufficient thermal energy storage, which allows a comfortable indoor air temperature to be maintained for a long period of time.

**Keywords:** skyscraper, high-rise building, Lakhta Center, external enclosing structure, translucent facade, facade glazing-to-wall ratio, heat-transfer coefficient, space heating, emergency disconnection, heat-storage capacity, microclimate, indoor air temperature