



Research Article






Received: May 20, 2023

Accepted: June 17, 2023

Published: July 4, 2023

ISSN 2304-6295

# The heat flow rejection from double skin facade buffer zones by aeration

Gorshkov Alexandr Sergeevich <sup>1</sup>   
 Tyutyunnikov Anatoliy Ivanovich <sup>1</sup>   
 Nemova Darya Victorovna <sup>2</sup>   
 Andreeva Daria Sergeevna <sup>2\*</sup>   
 Olshevskiy Vyacheslav Yanushevich <sup>2</sup> 

<sup>1</sup> AO Gazprom Promgaz, 142702, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

[alsgor@yandex.ru](mailto:alsgor@yandex.ru) (G. A. S); [A.Tutunnikov@spb.promgaz.gazprom.ru](mailto:A.Tutunnikov@spb.promgaz.gazprom.ru) (T. A. I.); [darya0690@mail.ru](mailto:darya0690@mail.ru) (N.D.V.); [andreeva\\_ds@spbstu.ru](mailto:andreeva_ds@spbstu.ru) (A.D.S.); [olshevskij\\_vya@spbstu.ru](mailto:olshevskij_vya@spbstu.ru) (O. V. Y.)

Correspondence:\* email [andreeva\\_ds@spbstu.ru](mailto:andreeva_ds@spbstu.ru); contact phone +79312564594

**Keywords:** High-rise buildings; Enclosure Structure; Heat transfer; Convective; Facades; Double Glazing; Buffer Zone; Thermal Surpluses; Aeration; Air Conditioning; Cooling

## Abstract:

**The object of research** is a ventilated facade with air buffer zones. The problem of heat flow rejection from double skin facade buffer zones by aeration is urgent to reduce the cooling systems load of buildings and reduce energy costs in the summer period. **Methods.** The article presents a method for calculating heat flow rejection from double-skin facade buffer zones by aeration. The method is based on the application of the following mathematical equations and calculation methods: the equation of external air density and air in the buffer zone, the equation of gravitational pressure and mass external air flow through the supply hole. **Results.** The dependence of the heat flow rejection from double skin facade buffer zones by aeration from different internal air temperatures is established and can be

represented by a linear dependence of the form  $Q_{\text{АЭРО}} = f(t_{\text{БВФ}} - t_{\text{Н}}) = a + b \cdot (t_{\text{БВФ}} - t_{\text{Н}})$ . The calculation of the heat flow rejection from double skin facade buffer zones by aeration of the Tower high-rise building «Lakhta Center» located in the cold continental climate zone (Dfb) is presented. The heat flow removed from the buffer zone during its aeration is 14676 W. Based on the linear approximation of

the dependence graph  $Q_{\text{АЭРО}} = f(t_{\text{БВФ}} - t_{\text{Н}}) = a + b \cdot (t_{\text{БВФ}} - t_{\text{Н}})$ , the following coefficients are obtained:  $a = -3873.4$ ; The coefficients can be used to determine the load on the cooling system of the building. The results can be adapted to calculate the heat flow rejection from double skin facade buffer zones by aeration for any facade building with air buffer zones for any climatic conditions.

## 1 Introduction / Введение

В составе высотных офисных зданий все чаще находят применение фасады с двумя нитками остекления, между которыми располагается пространство, называемое буферной зоной. Применение таких фасадных систем распространено, т. к. для высотных офисных зданий характерно наличие больших остекленных поверхностей, которые обеспечивают достаточное естественное освещение. Светопрозрачные вентилируемые фасады придают зданию эстетически привлекательный и современный облик. Два слоя остекления обеспечивают повышенные теплоизоляционные характеристики здания по сравнению с однослойными системами, т.к. воздушный зазор между стеклами служит дополнительным барьером, обеспечивая энергоэффективность здания. Следует отметить, что использование двойного

Gorshkov, A.; Tyutyunnikov, A.; Nemova, D.; Andreeva, D.; Olshevskiy, V.

The heat flow rejection from double skin facade buffer zones by aeration;

2023; Construction of Unique Buildings and Structures; **109** Article No 10904. doi: 10.4123/CUBS.109.4



остекления также способствует улучшению комфорта внутри здания, а также меньший уровень шума от дорожного движения и других источников внешнего шума. В то же время, использование двойного остекления требует больше затрат на обслуживание и ремонт.

Двойные вентилируемые фасады представляют собой ограждающие конструкции, в которых используется вентилируемая воздушная полость, предназначенная для предотвращения образования конденсата на утеплителе зимой, а также для уменьшения нагрузки на системы охлаждения зданий летом [1], [2].

Вентилируемые фасады могут быть исполнены как с естественной вентиляцией воздушной прослойки, так и с механической (посредством нагнетания в воздушную прослойку воздуха вентилятором) [3]. Свободная (естественная) конвекция возникает вследствие разности температур нагретых и холодных частиц газа. Вынужденная конвекция возникает под действием внешних сил [4].

Фасадные системы с вентилируемой воздушной прослойкой могут вентилироваться [5], [6]:

- 1) воздухом из помещения,
- 2) наружным воздухом,
- 3) приточным воздухом из системы вентиляции-кондиционирования,
- 4) комбинированной подачей воздуха.

Для решения задач теплоэнергосбережения зданий актуальным является вопрос отвода избыточного тепла из объема буферных зон фасада в теплое время года [7], [8]. Перегрев полости двойного вентилируемого фасада приводит к снижению тепловых характеристик здания в теплое время года [9], [10].

Перегрев полости двойного вентилируемого фасада в теплое время года может быть вызван несколькими факторами:

1. Теплопоступления от солнечного излучения.
2. Недостаточная вентиляция: Если воздух в полости фасада не обновляется должным образом, тепло накапливается, что приводит к перегреву.
3. Отражение тепла от земной поверхности или соседних зданий: даже при отсутствии прямого солнечного излучения, здание может нагреваться от отраженного тепла.
4. Тепло, производимое внутри здания: Это особенно актуально для коммерческих и офисных зданий, где электрооборудование, осветительные приборы и большое количество людей могут создавать дополнительные теплопоступления.
5. Недостаточная теплоизоляция: Если внутренние стены или потолок не обеспечивают надлежащей изоляции, тепло может проникать в полость фасада.
6. Материалы фасада: Некоторые материалы, такие как стекло или металл, могут нагреваться под воздействием солнечных лучей, что также может способствовать перегреву.

Удаление избыточного тепла из полости фасада может быть осуществлено путем естественной аэрации воздушного канала, а также механическим способом (принудительной вентиляцией) [11], [12].

В работе [13] представлен метод, позволяющий оценивать тепловые характеристики двойных вентилируемых фасадов с учетом солнечной радиации. Эффекты солнечной радиации оценивались с помощью аналитической модели, а для оценки сопряженного теплообмена использовалось численное моделирование с применением вычислительной гидродинамики. Предложенный метод может быть использован с целью последующего проектирования двойных вентилируемых фасадов.

Авторы [14] предложили новый тип двойного вентилируемого фасада, интегрированного с регулируемыми жалюзи для повышения энергоэффективности и решения проблем с перегревом в теплое время года. Экспериментальные исследования тепловых характеристик фасада показали, что предложенная конструкция обеспечивает значительную экономию энергии, снижая перегрев от солнечной радиации.

В статье [15] представлен новый тип двойного вентилируемого фасада, оснащенного вентиляцией воздушной полости и затеняющими устройствами, позволяющими снизить риск перегрева в теплое время года. В Австралии проведено экспериментальное исследование предложенной конструкции для оценки тепловой эффективности фасада в зависимости от геометрических переменных (ширина полости, угол наклона жалюзи) и условий окружающей среды (скорость и направление ветра, скорость движения воздуха в полости и солнечная радиация). Установлено, что наиболее важным фактором для контроля риска перегрева полости



является скорость воздуха внутри полости, в то время как влияние угла наклона жалюзийных планок незначительно.

Результаты экспериментального исследования показали, что применение фасадов с механически вентилируемым воздушным каналом и со встроенными жалюзи позволяет поддерживать температуру в помещении на  $2^{\circ}\text{C}$  ниже температуры наружного воздуха и сократить тепlopоступления от солнечной радиации без ущерба для теплового комфорта в помещении. В то же время авторы выявили неспособность системы предотвращать перегрев воздушных полостей, температура в которых на  $10\text{--}30^{\circ}\text{C}$  выше температуры наружного воздуха [16], [17].

В работах представлены результаты экспериментального исследования термодинамических характеристик двойного вентилируемого фасада с естественной и механической вентиляцией полости в жаркое и холодное время года. Результаты показали, что вентиляция полости, сочетающая горизонтальные и вертикальные отверстия, обеспечивает наилучшую тепловую эффективность в теплое время года. В холодное время года воздушный канал действует как тепловой буфер между зданием и наружным воздухом [18], [19].

Результаты экспериментального исследования тепловых характеристик двойного вентилируемого фасада в летнее время года показали, что использование механической вентиляции полости не привело к значительному снижению теплоотдачи в стационарных условиях [20]–[23].

Авторами проведены численные исследования теплопередачи в воздушной полости двойного вентилируемого фасада с помощью вычислительной гидродинамики. Численные расчеты верифицированы с экспериментальными данными. Рассчитаны числа Рейнольдса и средние числа Нуссельта в диапазоне от 28 000 до 56 500 и от 134 до 272, соответственно, построена безразмерная корреляционная зависимость между числами Рейнольдса и Нуссельта для оценки теплопередачи в полости фасада [24], [25].

Буферные зоны не предназначены для постоянного пребывания в них людей и по этой причине кондиционирование воздуха чаще всего является неоправданным. Для предотвращения конденсации влаги на остеклении и поддержания положительной температуры в холодный период буферные зоны обогреваются отопительными конвекторами, установленными вдоль наружного остекления [26], [27].

Наличие буферных пространств позволяет в теплое время года сократить тепlopоступления в кондиционируемые помещения за счет поглощения и отражения наружным остеклением значительной части поступающей на фасады солнечной радиации, а также путем удаления теплоизбытков аэрацией объема буферных зон наружным воздухом [28], [29].

Обзор литературы показал, что существуют различные способы удаления избыточного тепла из буферных зон фасада, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки, а также область применения. В настоящей статье приведена методика расчета теплового потока, удаляемого при аэрации буферной зоны.

Целью статьи является разработка методики/алгоритма расчета избыточного теплового потока, удаляемого при аэрации буферной зоны с целью последующего снижения тепlopоступлений от солнечной радиации в кондиционируемые помещения; а также установление зависимости величины теплового потока, удаляемого из буферной зоны аэрацией, при различной температуре внутреннего воздуха в буферной зоне.

## 2 Материалы и Методы / Materials and Methods

Расчет приведен на примере объекта, расположенного в зоне холодного континентального климата Dfb в соответствии с международной классификацией климата Кеппена. Классификация основана на учете температурного режима и количества осадков.

Данный метод расчета может быть адаптирован для любых климатических условий и зданий с вентилируемыми воздушными каналами.

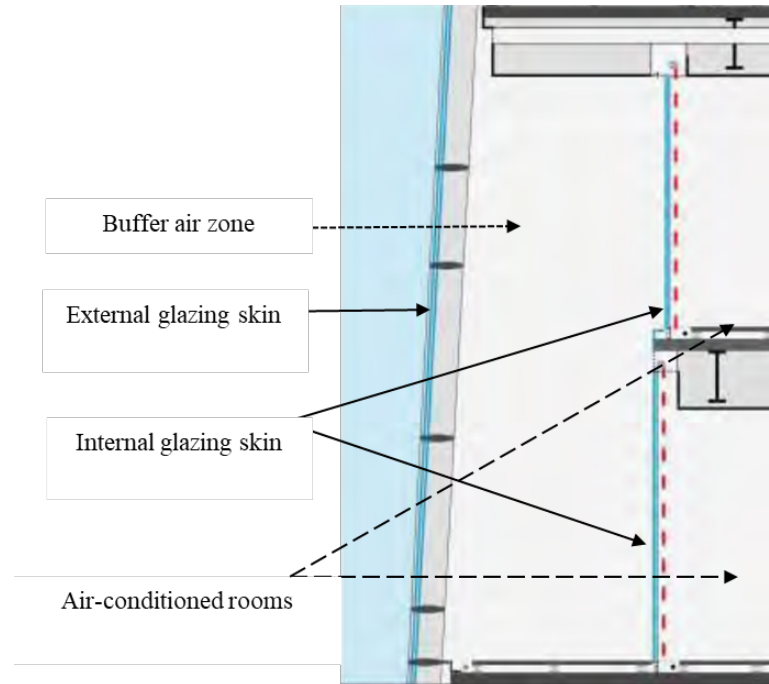
Для примера расчета в качестве объекта исследования выбрано здание «Башни» в составе многофункционального комплекса высотного здания «Лахта-Центр» (г. Санкт-Петербург, Россия) по следующим критериям:

- 1) Лахта-Центр является уникальным высотным зданием высотой 462 м. Крупнейший объект "Лахта Центр" - это высочайшее здание в России и Европе, и одно из самых высоких зданий в мире. Высотные здания представляют значительный интерес для исследования Gorshkov, A.; Tyutyunnikov, A.; Nemova, D.; Andreeva, D.; Olshevskiy, V. The heat flow rejection from double skin facade buffer zones by aeration; 2023; Construction of Unique Buildings and Structures; **109** Article No 10904. doi: 10.4123/CUBS.109.4

тепловых потоков буферных зон вентилируемого фасада из-за больших перепадов температур между верхними и нижними этажами, что может оказывать значительное влияние на характеристики тепловых потоков внутри системы вентилируемого фасада.

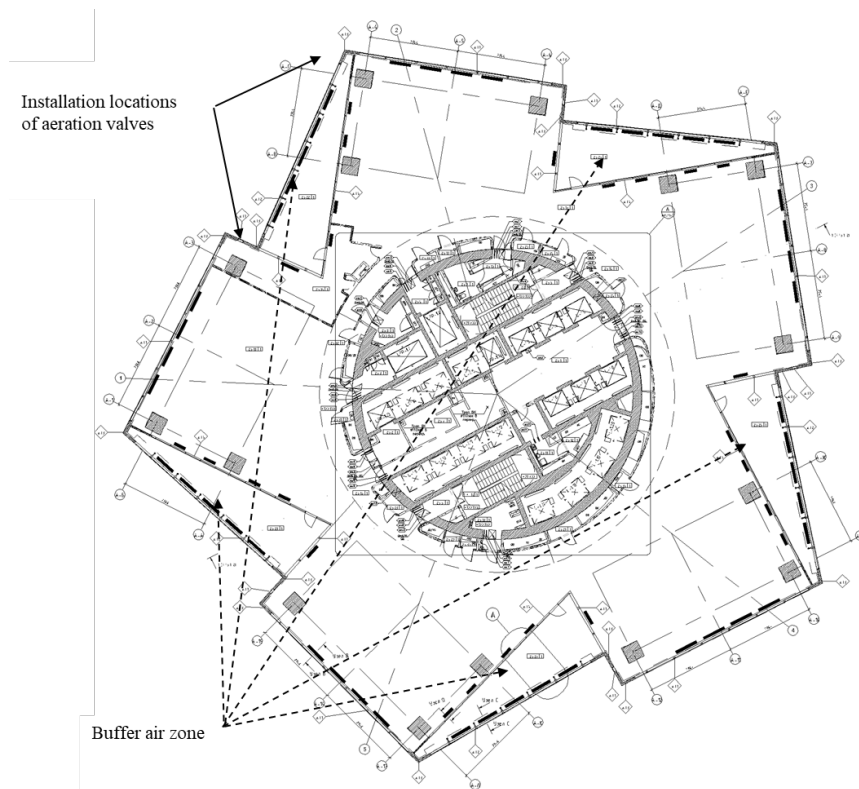
2) В здании «Башни» Лахта-Центра используется уникальная система модульных светопрозрачных двойных фасадных систем с воздушными буферными зонами, что представляет собой особый интерес для исследований энергоэффективности и тепловых свойств конструкций.

Высотное здание Лахта-Центра с модульными светопрозрачными двойными фасадными системами с воздушными буферными зонами представляет повышенный интерес для исследования тепловых потоков внутри буферных зон фасада, вопросов энергоэффективности зданий и тепловых характеристик ограждающих конструкций.



**Рис. 1 - Буферная зона между внешней и внутренней нитками остекления здания Башни**  
**Fig. 1 - Buffer zone of the external and internal glazing of the Tower building facade**

Особенности эксплуатации объекта исследования в холодный период года рассмотрены в работе [30]. В рамках настоящего исследования рассмотрены особенности его эксплуатации в теплый период года.



**Рис. 2 - План этажа с указанием положений на нем буферных зон и мест установки аэрационных клапанов на фасаде Башни**

**Fig. 2 - Floor plan indicating the positions of buffer zones and places of installation of aeration valves on the Tower facade**

В здании Башни буферные зоны (рис. 1) представляют собой пространство, расположенное между внешней и внутренней нитками остекления Башни.

Фасад Башни, реализованный в виде навесной фасадной остекленной системы, частично выполнен в виде двухниточной конструкции. Пространство между двумя нитками остекления предназначено для создания двухсветных буферных зон, выполняющих в том числе энергосберегающую функцию. Аэрация буферных зон осуществляется через аэрационные клапаны, которые располагаются по краям наружного остекления буферной зоны (рис. 2), – в нижней и верхней ее зонах, и управляются автоматически по датчику температуры, размещенному в помещении буферной зоны.

Режим аэрации буферных зон рассчитывается по следующему алгоритму:

1. определяется плотности наружного воздуха и воздуха в буферной зоне:

$$\rho_H = \frac{353}{273 + t_H};$$

$$\rho_{БУФ} = \frac{353}{273 + t_{БУФ}},$$
(1)

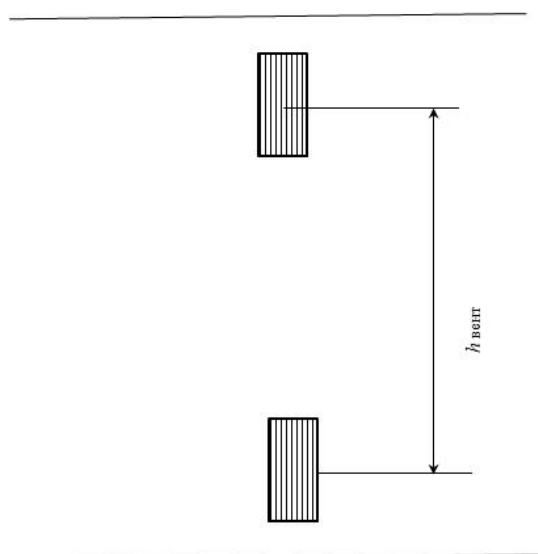
где  $t_H$  – это температура наружного воздуха, °С; для рассматриваемого объекта исследования для летнего режима эксплуатации расчетная температура наружного воздуха принята равной 30°С;  $t_{БУФ}$  – это температура воздуха в буферной зоне, °С.

2. рассчитывается гравитационное давление, Па:

$$P_{ГР} = 9.81 \cdot h_{вент} \cdot (\rho_H - \rho_{БУФ}),$$
(2)

где  $\rho_H$ ,  $\rho_{БУФ}$  – то же, что и в формуле (1);

3);  $h_{\text{вент}}$  – это расстояние между отметками центров приточного и вытяжного клапанов (рис.



**Рис. 3 - Схема аэрации (проветривания) буферной зоны**  
**Fig. 3 - Scheme of aeration (ventilation) of the buffer zone**

3. распределяется в равных долях давление между приточными  $\Delta P_{\text{ПРИТ}}$  и вытяжными  $\Delta P_{\text{ВЫТ}}$  отверстиями, Па, т. е. принимается допущение, согласно которому:

$$\Delta P_{\text{ПРИТ}} = \Delta P_{\text{ВЫТ}} = 0.5 \cdot P_{\text{ГР}} \quad (3)$$

4. определяется массовый (секундный) расход наружного воздуха через приточное отверстие  $G_{\text{ПРИТ}}$ , кг/с:

$$G_{\text{ПРИТ}} = A_{\text{ПРИТ}} \cdot \mu_{\text{ПРИТ}} \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta P_{\text{ПРИТ}} \cdot \rho_{\text{Н}}}, \quad (4)$$

где  $A_{\text{ПРИТ}}$  – это площадь приточных отверстий, м<sup>2</sup>;

$\mu_{\text{ПРИТ}} = \frac{1}{\sqrt{\xi_{\text{ПРИТ}}}}$  – это коэффициент расхода; величина  $\mu_{\text{ПРИТ}}$  определяется для

приточного устройства по значению  $\xi_{\text{ПРИТ}}$  на основании аэродинамических характеристик, приведенных в проектной документации или по данным справочников; для рассматриваемого приточного клапана составляет 0,4;

$\xi_{\text{ПРИТ}}$  – это коэффициент местного сопротивления приточного отверстия;

$\Delta P_{\text{ПРИТ}}$  – то же, что и в формуле (3), Па;

$\rho_{\text{Н}}$  – то же, что и в формуле (1), кг/м<sup>3</sup>.

5. рассчитывается тепловой поток, удаляемый из буферной зоны при ее аэрации:

$$Q_{\text{АЭРО}} = C \cdot G_{\text{ПРИТ}} \cdot (t_{\text{БУФ}} - t_{\text{Н}}), \quad (5)$$

где  $C \sim 1000$  Дж/(кг·К) – это массовая теплоемкость воздуха;

$G_{\text{ПРИТ}}$  – то же, что и в формуле (4), кг/с;

$t_{\text{БУФ}}$ ,  $t_{\text{Н}}$  – то же, что и в формуле (1), °С.

Из уравнения (5) следует, что величина теплового потока, удаляемого из буферной зоны аэрацией, может быть представлена линейной зависимостью вида:

$$Q_{\text{АЭРО}} = f(t_{\text{БУФ}} - t_{\text{Н}}) = a + b \cdot (t_{\text{БУФ}} - t_{\text{Н}}), \quad (6)$$

где  $a$ ,  $b$  – это коэффициенты аппроксимации.

Данная зависимость позволяет рассчитать тепловой поток, удаляемый из буферной зоны аэрацией, при различной температуре внутреннего воздуха в буферной зоне.

### 3 Results and Discussion

Приведен расчет теплового потока, удаляемого при аэрации буферной зоны согласно методике, описанной выше.

Исходные данные для расчета приняты следующими:

- расстояние между отметками центров приточного и вытяжного отверстий (см. рис. 1)  $h_{\text{вент}} = 6$  м;
- площадь «живого» сечения приточных отверстий  $A_{\text{ПРИТ}} = 1.26$  м<sup>2</sup>;
- коэффициент расхода  $\mu_{\text{ПРИТ}} = 0.4$ ;
- температура наружного воздуха  $t_{\text{Н}} = 30$  °С;
- температура воздуха в буферной зоне  $t_{\text{БУФ}} = 45$  °С; при данной температуре воздуха в буферной зоне происходит автоматическое открывание аэрационных клапанов (рис. 3).

При принятых исходных данных плотность наружного воздуха составит:

$$\rho_{\text{Н}} = \frac{353}{273 + t_{\text{Н}}} = \frac{353}{273 + 30} = 1.165 \text{ (кг/м}^3\text{)};$$

плотность воздуха в буферной зоне:

$$\rho_{\text{БУФ}} = \frac{353}{273 + t_{\text{БУФ}}} = \frac{353}{273 + 45} = 1.11 \text{ (кг/м}^3\text{)}.$$

При полученных значениях плотностей воздуха гравитационное давление составит:

$$P_{\text{ГР}} = 9.81 \cdot h_{\text{вент}} \cdot (\rho_{\text{Н}} - \rho_{\text{БУФ}}) = 9.81 \cdot 6 \cdot (1.165 - 1.11) = 3.24 \text{ (Па)};$$

давление в приточном клапане:

$$\Delta P_{\text{ПРИТ}} = 0.5 \cdot P_{\text{ГР}} = 0.5 \cdot 3.24 = 1.62 \text{ (Па)};$$

расход наружного воздуха через приточный клапан:

$$G_{\text{ПРИТ}} = 1.26 \cdot 0.4 \cdot \sqrt{2 \cdot 1.62 \cdot 1.165} = 0.98 \text{ (кг/с)}.$$

Влияние ветрового напора в данном случае не рассматривается, т.к. и для верхнего (вытяжного) и для нижнего (приточного) клапанов ветровой напор окажется одинаковым и одного знака.

Тогда тепловой поток, удаляемый из буферной зоны при ее аэрации, составит:

$$Q_{\text{АЭРО}} = 1000 \cdot 0.98 \cdot (45 - 30) = 14676 \text{ (Вт)}.$$

Тепловой поток, удаляемый из буферной зоны аэрацией, при иных температурах воздуха в буферной зоне, представлен в таблице 1, а график зависимости  $Q_{\text{АЭРО}} = f(t_{\text{БУФ}} - t_{\text{Н}})$  для рассматриваемого случая – на рис. 4.

**Таблица 1. Тепловой поток, удаляемый из буферной зоны аэрацией, при различной температуре внутреннего воздуха в буферной зоне**

**Table 1. Heat flow removed from the buffer zone by aeration at different indoor air temperatures of the buffer zone**

$t_{\text{БУФ}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{\text{Н}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$(t_{\text{БУФ}} - t_{\text{Н}}), \text{ }^\circ\text{C}$	$Q_{\text{АЭРО}}, \text{ Вт}$
45	30	15	14676

44	30	14	13254
43	30	13	11878
42	30	12	10551
41	30	11	9275
40	30	10	8052
39	30	9	6886
38	30	8	5780
37	30	7	4738
36	30	6	3766

Полученные результаты представлены в виде графика зависимости теплового потока, удаляемого из буферных зон от температуры внутреннего воздуха внутри буферной зоны на рисунке 4. Из графика на рисунке 4 видно, что зависимость теплового потока от разности температур близка к линейной.

На основании линейной аппроксимации графика зависимости  $Q_{\text{АЭРО}} = f(t_{\text{БУФ}} - t_{\text{Н}}) = a + b \cdot (t_{\text{БУФ}} - t_{\text{Н}})$ , получены следующие коэффициенты:

$$a = -3873.4;$$

$$b = 1215.1.$$

Полученные коэффициенты могут быть использованы для определения теплового потока, удаляемого из буферной зоны аэрацией, при температурных напорах, отличающихся от приведенных в таблице 1.

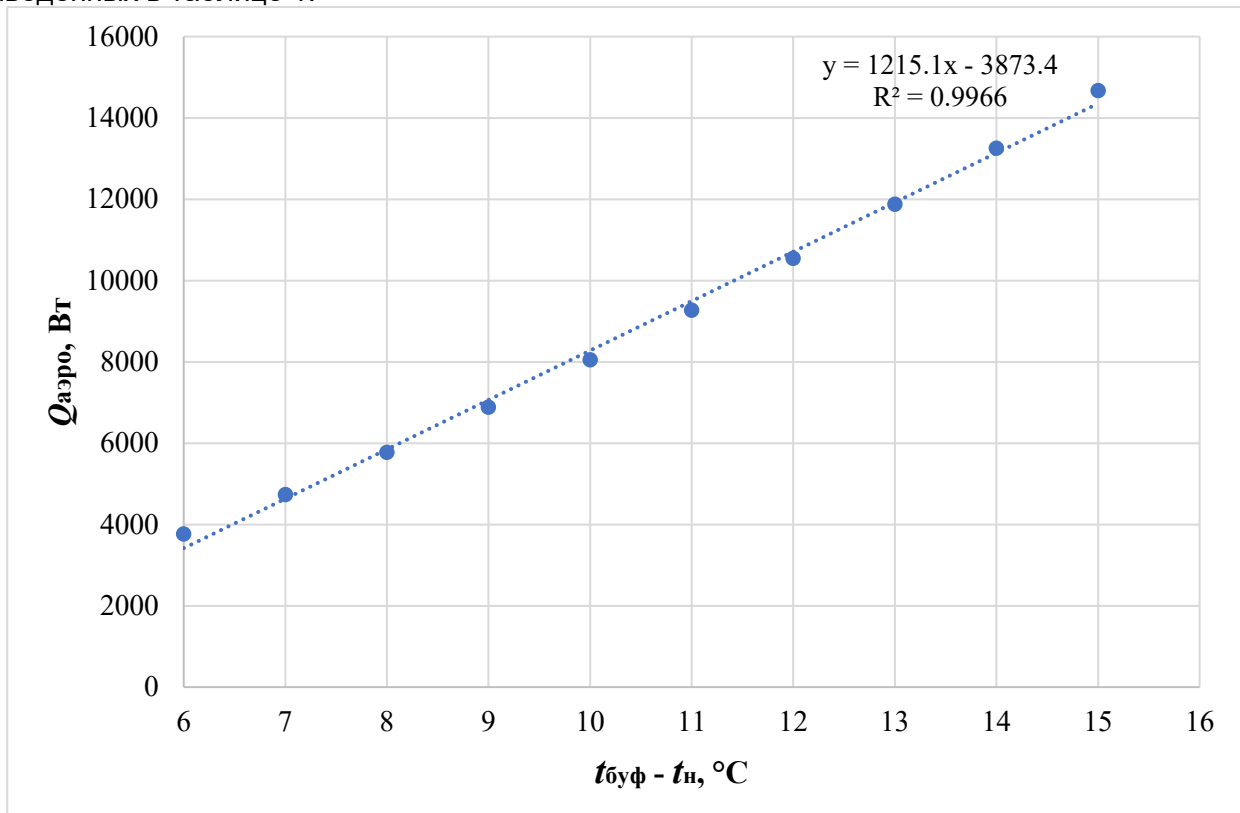


Рис. 4 - График зависимости теплового потока, удаляемого из буферных зон от температуры внутреннего воздуха внутри буферной зоны

Fig. 4 - Graph of the dependence of the heat flow removed from the buffer zones from the temperature of the internal air of the buffer zone

## 4 Conclusions

Для решения теплоэнергосбережения в летнее время года и для регионов с жарким климатом для зданий с буферными зонами необходимо обеспечить отвод избыточных теплоступлений в буферные зоны с целью снизить нагрузку на системы охлаждения зданий.

В данной статье:

Gorshkov, A.; Tyutyunnikov, A.; Nemova, D.; Andreeva, D.; Olshevskiy, V.

The heat flow rejection from double skin facade buffer zones by aeration;

2023; Construction of Unique Buildings and Structures; **109** Article No 10904. doi: 10.4123/CUBS.109.4





1) Разработана и представлена методика/алгоритм расчета теплового потока, удаляемого из буферных зон, расположенных между двумя нитками остекления в результате аэрации буферных зон.

2) Установлена зависимость величины теплового потока, удаляемого из буферной зоны аэрацией, при различной температуре внутреннего воздуха в буферной зоне.

3) Проведен расчет теплового потока, удаляемого из буферных зон, расположенных между двумя нитками остекления для здания Башни в составе высотного здания «Лахта-Центр», г. Санкт-Петербург, расположенного в холодной континентальной климатической зоне (Dfb). Полученные значения следует использовать при определении расчетной нагрузки на систему охлаждения здания.

Полученные новые научно-технические результаты могут быть использованы для расчета избыточного теплового потока, удаляемого из буферных зон, для любого здания с воздушными буферными зонами при различных климатических условиях, а также для определения теплопоступлений от солнечной радиации в кондиционируемые помещения.

## 5 Fundings

Проект выполнен при поддержке Российского научного фонда, соглашение 21-79-10283 от 29.07.2021 <https://rscf.ru/project/21-79-10283/>

This work is supported by the Russian Science Foundation under grant 21-79-10283, date 29.07.2021 <https://rscf.ru/project/21-79-10283/>

## References

- 1 Ascione, F., Bianco, N., Iovane, T., Mastellone, M. and Mauro, G.M. (2021) The Evolution of Building Energy Retrofit via Double-Skin and Responsive Façades: A Review. *Solar Energy*, Elsevier Ltd, **224**, 703–717. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2021.06.035>.
- 2 Ascione, F., Bianco, N., De Rossi, F., Iovane, T. and Mauro, G.M. (2021) Energy Refurbishment of an Office Building by Addition of a Second Skin: Improvement of Thermal Behavior, Energy Performance and Possible Conversion by PV. *2021 6th International Conference on Smart and Sustainable Technologies, SpliTech 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.23919/SPLITECH52315.2021.9566358>.
- 3 Zhang, T., Tan, Y., Yang, H. and Zhang, X. (2016) The Application of Air Layers in Building Envelopes: A Review. *Applied Energy*, Elsevier, **165**, 707–734. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2015.12.108>.
- 4 Montazeri, H., Blocken, B., Derome, D., Carmeliet, J. and Hensen, J.L.M. (2015) CFD Analysis of Forced Convective Heat Transfer Coefficients at Windward Building Facades: Influence of Building Geometry. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Elsevier B.V., **146**, 102–116. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.07.007>.
- 5 Tabadkani, A., Roetzel, A., Li, H.X. and Tsangrassoulis, A. (2022) Simulation-Based Personalized Real-Time Control of Adaptive Facades in Shared Office Spaces. *Automation in Construction*, Elsevier, **138**, 104246. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2022.104246>.
- 6 Kuru, A., Oldfield, P., Bonser, S. and Fiorito, F. (2021) Performance Prediction of Biomimetic Adaptive Building Skins: Integrating Multifunctionality through a Novel Simulation Framework. *Solar Energy*, Elsevier Ltd, **224**, 253–270. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.06.012>.
- 7 Preet, S., Sharma, M.K., Mathur, J., Chowdhury, A. and Mathur, S. (2020) Performance Evaluation of Photovoltaic Double-Skin Facade with Forced Ventilation in the Composite Climate. *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd, **32**. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101733>.
- 8 Chen, H., Cai, B., Yang, H., Wang, Y. and Yang, J. (2022) Study on Natural Lighting and Electrical Performance of Louvered Photovoltaic Windows in Hot Summer and Cold Winter Areas. *Energy and Buildings*, Elsevier Ltd, **271**. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112313>.
- 9 Zhang, T. and Yang, H. (2019) Flow and Heat Transfer Characteristics of Natural Convection in Vertical Air Channels of Double-Skin Solar Façades. *Applied Energy*, Elsevier Ltd, **242**, 107–120. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.072>.
- 10 Roversi, R., Cinquepalmi, F., Cumo, F. and Pennacchia, E. (2018) Experimental Envelopes and Their Integration in the Building Information Modeling Energy Simulation Process. *International Journal of Energy Production and Management*, WITPress, **3**, 97–109.



<https://doi.org/10.2495/EQ-V3-N2-97-109>.

- 11 Popa, C., Ospir, D., Fohanno, S. and Chereches, C. (2012) Numerical Simulation of Dynamical Aspects of Natural Convection Flow in a Double-Skin Façade. *Energy and Buildings*, **50**, 229–233. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.042>.
- 12 Jiru, T.E., Taob, Y.X. and Haghghat, F. (2011) Airflow and Heat Transfer in Double Skin Facades. *Energy and Buildings*, Elsevier Ltd, **43**, 2760–2766. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.038>.
- 13 Fuliotto, R., Cambuli, F., Mandas, N., Bacchin, N., Manara, G. and Chen, Q. (2010) Experimental and Numerical Analysis of Heat Transfer and Airflow on an Interactive Building Facade. *Energy and Buildings*, **42**, 23–28. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.07.006>.
- 14 Lin, Z., Song, Y. and Chu, Y. (2022) Summer Performance of a Naturally Ventilated Double-Skin Facade with Adjustable Glazed Louvers for Building Energy Retrofitting. *Energy and Buildings*, Elsevier Ltd, **267**. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112163>.
- 15 Matour, S., Garcia-Hansen, V., Omrani, S., Hassanli, S. and Drogemuller, R. (2022) Thermal Performance and Airflow Analysis of a New Type of Double Skin Façade for Warm Climates: An Experimental Study. *Journal of Building Engineering*, Elsevier Ltd, **62**. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105323>.
- 16 Yezioro, A. and Capeluto, I.G. (2007) A Model for the Energetic-Economic Optimization of Office Buildings. *Architectural Science Review*, **50**, 331–339. <https://doi.org/10.3763/ASRE.2007.5040>.
- 17 Aleksandrowicz, O. and Yezioro, A. (2018) Mechanically Ventilated Double-Skin Facade in a Hot and Humid Climate: Summer Monitoring in an Office Tower in Tel Aviv. *Architectural Science Review*, Taylor and Francis Ltd., **61**, 171–188. <https://doi.org/10.1080/00038628.2018.1450726>.
- 18 Hudişteanu, S.V., Ţurcanu, F.E., Cherecheş, N.C., Verdeş, M., Ancaş, A.D., Popovici, C.G. and Ciocan, V. (2023) Mathematical Modelling and Design of Photovoltaic System for Free-Standing Application. *Lecture Notes in Networks and Systems*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, **605 LNNS**, 612–621. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-22375-4\\_49](https://doi.org/10.1007/978-3-031-22375-4_49).
- 19 Chereches, M.L., Chereches, N.C., Ciobanu, A.A., Hudisteanu, S.V., Turcanu, E.F., Brădu, A. and Popovici, C.G. (2021) Experimental Study on Airflow and Temperature Predicting in a Double Skin Façade in Hot and Cold Seasons in Romania. *Applied Sciences (Switzerland)*, MDPI, **11**. <https://doi.org/10.3390/APP112412139>.
- 20 Jankovic, A. and Goia, F. (2022) Characterization of a Naturally Ventilated Double-Skin Façade through the Design of Experiments (DOE) Methodology in a Controlled Environment. *Energy and Buildings*, Elsevier Ltd, **263**. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112024>.
- 21 Jankovic, A., Siddiqui, M.S. and Goia, F. (2022) Laboratory Testbed and Methods for Flexible Characterization of Thermal and Fluid Dynamic Behaviour of Double Skin Facades. *Building and Environment*, Elsevier Ltd, **210**. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108700>.
- 22 Jankovic, A. and Goia, F. (2022) Control of Heat Transfer in Single-Story Mechanically Ventilated Double Skin Facades. *Energy and Buildings*, Elsevier Ltd, **271**. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112304>.
- 23 Jankovic, A. and Goia, F. (2021) Impact of Double Skin Facade Constructional Features on Heat Transfer and Fluid Dynamic Behaviour. *Building and Environment*, Elsevier Ltd, **196**. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107796>.
- 24 Pekdogan, T., Tokuç, A., Ezan, M.A. and Başaran, T. (2021) Experimental Investigation on Heat Transfer and Air Flow Behavior of Latent Heat Storage Unit in a Facade Integrated Ventilation System. *Journal of Energy Storage*, Elsevier Ltd, **44**. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103367>.
- 25 Inan, T., Basaran, T. and Erek, A. (2017) Experimental and Numerical Investigation of Forced Convection in a Double Skin Façade. *Energies*, MDPI AG, **10**. <https://doi.org/10.3390/EN10091364>.
- 26 Vatin, N.I., Rymkevich, P.P. and Gorshkov, A.S. (2020) Climate Change and the Thermal Island Effect in the Million-plus City. *Construction of Unique Buildings and Structures*, **90**, 8902–8902. <https://doi.org/10.18720/CUBS.89.2>.
- 27 Perlova, E., Karpova, S., Rakova, X.M., Bondarenko, E., Platonova, M. and Gorshkov, A.S. (2015) The Architectural Concept of the Building with Low Energy Consumption. *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publications, Ltd., **725–726**, 1580–1588. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMM.725-726.1580>.
- 28 Vatin, N., Gorshkov, A., Rymkevich, P., Nemova, D. and Tarasova, D. (2014) Nonstationary Thermal Conduction through the Building Envelope. *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publications Ltd, **670–671**, 365–369. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMM.670->

Gorshkov, A.; Tyutyunnikov, A.; Nemova, D.; Andreeva, D.; Olshevskiy, V.

The heat flow rejection from double skin facade buffer zones by aeration;

2023; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **109** Article No 10904. doi: 10.4123/CUBS.109.4



671.365.

- 29 Vatin, N., Gorshkov, A., Nemova, D. and Tarasova, D. (2014) Energy Efficiency of Facades at Major Repairs of Buildings. *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publications Ltd, **633–634**, 991–996. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMM.633-634.991>.
- 30 Varlamov, N. V., Gorshkov, A.S., Yuferev, Y. V., Lezer, A.Y., Zhirnov, A.E. and Parashchenko, N.A. (2023) The Heat-Storage Capacity of the Lakhta Center Multifunctional Complex Tower Building. *Thermal Engineering*, Pleiades Publishing Ltd, **70**, 32–40. <https://doi.org/10.1134/S0040601523010081/METRICS>.