

УДК 697.9

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ
ПРИТОЧНО-ВЫТЯЖНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ЗДАНИЙ С УТИЛИЗАЦИЕЙ ТЕПЛОТЫ
УДАЛЯЕМОГО ВОЗДУХА В УСЛОВИЯХ ЕЕ РАБОТЫ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ
НАРУЖНОГО ВОЗДУХА

В.А. Зафатаев, С.В. Ланкович, А.С. Лapeзо

Полоцкий государственный университет, Республика Беларусь
e-mail: v.a.zafataev@pdu.by, s.lankovich@psu.by, a.lapezo@psu.by

Для решения проблем энергоресурсосбережения при эксплуатации инженерных систем создания и поддержания микроклимата помещений предлагается применение системы тепловой вентиляции, в которой осуществляется утилизация теплоты удаляемого из помещений воздуха, используется теплота солнечной радиации и теплота трансмиссионных потерь здания.

Ключевые слова: тепловой поток, утилизация теплоты, рекуперативный теплообменник, теплоизоляция, конвекция, вентиляция, энергосбережение.

THERMODYNAMIC SUBSTANTIATION OF FORCED-AND-EXHAUST VENTILATION SYSTEM
WITH THE REMOVABLE AIR HEAT-RECYCLING WORKING
AT LOW TEMPERATURES OF EXTERNAL AIR CONDITIONS

V. Zafatayeu, S. Lankovich, A. Lapezo

Polotsk State University, Republic of Belarus
e-mail: v.a.zafataev@pdu.by, s.lankovich@psu.by, a.lapezo@psu.by

For the purpose of solving the energy and resource saving problems in the exploited microclimate engineering systems of the premises, it is proposed to use a thermal ventilation system in which the solar radiation heat, building transmission heat-losses and heat of the removed air are utilized.

Keywords: heat flow, heat loss, recuperative heat exchanger, solar radiation, convection, ventilation.

Введение. Тепловая энергия в конечном потреблении секторами национальной экономики Республики Беларусь занимает лидирующую позицию – её доля в топливно-энергетическом балансе составляет до 33% (конечное потребление по всем видам топливно-энергетических ресурсов более 26000 т у.т./год), причём доля конечного теплопотребления в секторе промышленности и в жилищном секторе составляет 37 и 38% соответственно [1].

Согласно второму закону термодинамики справедливо утверждение о том, что использование любого вида энергии высокого потенциала для поддержания температуры

в помещениях на нормируемом уровне чрезвычайно расточительно [2]. Термодинамическая необратимость процессов преобразования энергии приводит к тому, что на последних этапах её преобразования, в том числе и у потребителя, остаток эксергии первичного топлива ничтожно мал, и финансовое возмещение потерь эксергии на предыдущих звеньях цепочки энергетических преобразований не может осуществляться потребителем в полном объёме по причине высокой стоимости. Очевидно, что указанные обстоятельства не обходят стороной и существующую в стране систему энергообеспечения и энергопотребления. Таким образом в строящихся, реконструируемых и модернизируемых зданиях для повышения эффективности энергопотребления следует рассмотреть возможность вовлечения вторичных и возобновляемых энергетических ресурсов – солнечной радиации, бытовых тепловыделений и др.

Постановка задачи. Основными путями экономии тепловой энергии в гражданских зданиях является повышение эффективности строительных конструкций, объёмно-планировочных решений, инженерных систем и вовлечение в оборот вторичных и природных топливно-энергетических ресурсов [3].

Тепловая эффективность зданий во многом зависит от ориентации здания по сторонам света. Например фасады, имеющие ориентацию с СЗ по СВ, в противоположность фасадам, ориентированным с ЮВ по ЮЗ, менее выгодны для полезного использования теплоты солнечного излучения на обогрев здания, поэтому при проектировании следует стремиться к тому, чтобы северную ориентацию имел наименьший по площади фасад [4].

Для повышения эффективности энергопотребления в эксплуатируемых зданиях предлагается система тепловой вентиляции, в которой реализована возможность использования вторичных и природных энергетических ресурсов. В дневное время суток в течение отопительного периода в системе тепловой вентиляции здания осуществляется подогрев наружного приточного воздуха в щелевом канале со стороны наружного светопрозрачного вентилируемого фасада под действием прямой и рассеянной солнечной радиации. При движении по щелевому каналу наружный приточный воздух аккумулирует теплоту солнечной радиации, в том числе отражённую от поверхности наружной стены.

Также в системе круглосуточно осуществляется передача теплоты от греющего теплоносителя – вытяжного воздуха – к нагреваемому приточному воздуху в прямоточном теплообменнике тепловой камеры, конструктивно выполненном по схеме «труба в трубе», оборудованном в нижней части устройством дополнительного подогрева воздуха, содержащим тепловую пушку с газовой горелкой и электронагреватель. Эффективность теплообмена зависит от размеров теплообменной поверхности теплообменника и чем выше здание, тем более значительна рекуперация теплоты удаляемого воздуха и выше эффект энергосбережения. В случае незадействования устройства дополнительного подогрева воздуха верхним температурным пределом для приточного воздуха в таком теплообменнике является температура воздуха, удаляемого из помещений, поскольку при попутном движении двух теплоносителей в поверхностном рекуперативном теплообменнике на его холодном конце всегда сохраняется конечный температурный напор, стремящийся к нулю лишь при бесконечной площади поверхности теплообмена.

Конструктивное решение системы тепловой вентиляции поясняется схемой на рисунке 1.

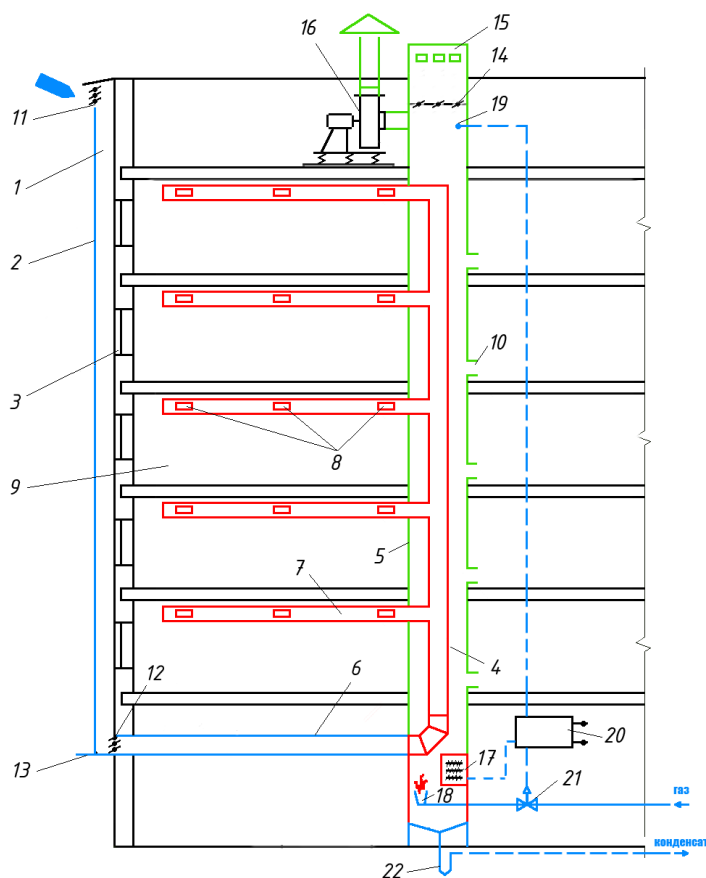


Рисунок 1. – Система тепловой вентиляции здания

Главные элементы системы тепловой вентиляции – это приточный и вытяжной вентиляционные тракты. Приточный тракт состоит из двух участков. Первый участок представляет собой первую теплообменную камеру и выполнен в виде щелевого канала 1, образованного наружным светопрозрачным вентилируемым фасадом 2 и поверхностью наружной стены с окнами 3. Второй участок приточного тракта представляет собой вторую теплообменную камеру и выполнен в виде вертикального воздуховода 4, расположенного внутри вытяжной шахты 5, соединённого с первой теплообменной камерой горизонтальным воздуховодом 6 в нижней части шахты. Приточный воздух поступает в вентилируемые помещения 9 через горизонтальные распределительные воздуховоды 7 и регулируемые приточные решётки 8. Вытяжной тракт включает вытяжные поквартирные патрубки 10, расположенные у пола помещений и присоединённые к вытяжной вертикальной шахте 5. Тёплый вытяжной воздух через стенки приточного воздуховода 4 передаёт теплоту наружному приточному воздуху, предварительно уже подогретому в щелевом канале 1 навесного фасада 2 за счёт теплоты, теряемой зданием через наружные ограждающие конструкции стен и окон 3.

Воздухозаборное устройство щелевого канала 1 включает регулируемую воздухозаборную решётку 11, расположенную в верхней части канала, а также утеплённый 12 и воздушный 13 клапаны, расположенные в нижней части щелевого канала.

Система наружного воздухоудаления включает оголовок 15 вытяжной шахты 5 с воздушным клапаном 14 и вентилятор 16.

Во второй теплообменной камере необходимый температурный режим поддерживается автоматически как с помощью электронагревателя 17, так и от газовой горелки 18. Сигналы датчика температуры – термометра сопротивления 19 по силовому электрокабелю поступают в шкаф автоматического управления 20. Электрическими импульсами осуществляется включение и отключение спиралей электронагревателя 17 или степень открытия и закрытия электромагнитного клапана 21 на газопроводе газовой горелки 18. Конденсат, образующийся в результате контакта продуктов сгорания с холодными поверхностями газохода, сливается в поддон с гидрозатвором 22 и сбрасывается в канализацию.

Задачами расчёта системы тепловой вентиляции здания является определение необходимости в использовании дополнительного подогрева приточного воздуха в электрокалорифере или за счёт теплоты, полученной при сжигании природного газа. При этом система тепловой вентиляции должна обеспечивать в помещениях нормируемую температуру воздуха вне зависимости от колебания температуры наружного воздуха и времени её стояния в течение отопительного периода, а экономический эффект от энергосбережения должен быть определён с учётом поступающей теплоты солнечной радиации и тепловых потерь здания через наружные ограждающие конструкции.

Исследовательская часть. Поступление теплоты от солнечной радиации не поддаётся упорядочиванию по часам суток и не зависит от температуры наружного воздуха (рисунок 2).



Рисунок 2. – Месячные поступления прямой солнечной радиации на вертикальную поверхность различной ориентации при средних условиях облачности в отопительный период, МДж/м² (метеорологическая станция «Полоцк», по данным СНБ 2.04.02-2000)

Поскольку наибольшее количество прямого солнечного излучения поступает на фасады зданий, имеющие ориентацию с ЮЗ по ЮВ, навесные панели предлагаемой системы тепловой вентиляции размещаются на этих стенах.

В практике градостроительства для светопрозрачных конструкций широко применяется обычное силикатное стекло толщиной от 2 до 6 мм, которое способно пропускать лучистую тепловую энергию от прямой и рассеянной солнечной радиации в зоне спектра видимых лучей, соответствующих длинам волн в пределах от 380 до 750 нм, и в инфракрасном диапазоне с длинами волн от 750 до 2500 нм. Вся эта теплота, проходя сквозь толщу остекления, воспринимается поверхностями из различного материала, которые при нагреве сами становятся источниками тепловой энергии в виде инфракрасного излучения с длиной волн от 7,5 до 14 мкм. Для излучения с таким диапазоном длин волн обычное стекло становится экраном с образованием в щели «парникового» эффекта, способствующего повышению теплозащитных качеств светопрозрачной конструкции.

Расчёт температуры воздуха в воздухоприёмном канале осуществлён на примере математической модели теплообмена в щели для двух случаев: 1. щель обогревается с одной стороны (прямая солнечная радиация отсутствует); 2. щель обогревается с двух сторон (навесная панель облучается прямой солнечной радиацией) ([5], [6]).

Исходные данные, принятые для расчёта:

а) Ширина и высота стекла навесной панели приняты кратными ширине и высоте стеновой панели одной жилой комнаты, а оптимальный размер щели воздухоприёмного канала принят как для вентилируемых воздушных прослоек [7].

б) Среднее по румбам значение суммарной солнечной радиации при средней облачности в отопительный период с октября по март включительно по данным табл. 3.15 СНБ 2.04.02-2000 для вертикальных поверхностей ограждений, ориентированных на В, ЮВ, Ю, ЮЗ и З составляет для г. Полоцка $I_{cp}=223$ Вт/м², для г. Минска $I_{cp}=227$ Вт/м².

в) Ввиду отсутствия зависимости между температурой наружного воздуха и интенсивностью солнечного излучения принято допущение, что за всё время стояния температур в пределах $-26...-22^{\circ}\text{C}$ (для г. Полоцка это 37 часов отопительного периода) сохранялось устойчивое солнечное излучение, равное согласно СНБ 2.04.02-2000 среднему расчётному количеству за шесть месяцев отопительного периода – 223 Вт/м².

г) Расчётная температура приточного воздуха, подаваемого в помещения, принята равной 18°C .

д) Производительность системы тепловой вентиляции принята исходя из нормируемого количества приточного воздуха на 1 м² жилой площади, равного 3 м³/(ч·м²) согласно требованиям ТКП 45-3.02-324-2018 «Жилые здания». Для многоквартирных жилых зданий типовых серий, применяемых в Республике Беларусь [8], воздухообмен одной жилой комнаты площадью пола $4\cdot5=20$ м² нами оценён величиной в $3\cdot20=60$ м³/ч. Соответственно в 9-этажном жилом здании система вентиляции должна обеспечивать воздухообмен девяти таких комнат в количестве $9\cdot60=540$ м³/ч.

е) Размеры поперечного сечения приточно-вытяжной шахты подбираются исходя из условий обеспечения скорости приточного и удаляемого воздуха не более 2 м/с.

ж) При наличии солнечного излучения интенсивностью I_{cp} количество воспринятой приточным воздухом радиационной теплоты определяется исходя из значения тепловой

эффективности существующих солнечных панелей, которая в настоящее время не превышает $E=0,14-0,17$ [7].

з) Коэффициент теплопропускания солнечного излучения стеклом навесной панели принят равным $C_{cm}=0,8$ [9].

и) солнечное излучение, частично пропущенное стеклом навесной панели, частично воспринятое потоком приточного воздуха, поглощается наружной стеной с коэффициентом поглощения $A=0,6$ [10], таким образом количество отражённой от стены в поток воздуха вторичной радиационной теплоты составляет $0,8 \cdot (1-A) \cdot (1-E) \cdot I_{cp}$.

Плотность результирующего теплового потока при теплообмене излучением между стенкой и воздухом [11]:

$$q_{изл.рез} = \varepsilon'_{cm} (E_{cm} - E_2) \quad (1)$$

где ε'_{cm} – эффективная степень черноты поверхностей канала,

$$\varepsilon'_{cm} = \frac{\varepsilon_{cm} + 1}{2};$$

ε_{cm} – степень черноты стенок канала, принята равной 0,93;

E_{cm} – плотность потока излучения, поглощённого воздухом от стенок канала (складывается из части излучения, падающего на навесную панель, и излучения, отражённого от поверхности стены);

E_2 – плотность потока собственного излучения воздуха при его температуре в воздухоприёмном канале.

к) При отсутствии солнечного излучения температура наружной поверхности стены на 2-3°C выше температуры наружного воздуха, и согласно теплотехническому расчёту по методике ТКП 45-2.04-43-2006 составила –22,1°C. При наличии солнечного излучения интенсивностью I_{cp} температура наружной поверхности стены согласно расчёту радиационного теплообмена [11] повысится до –5,4°C при температуре наружного воздуха –25°C;

л) Радиационная теплота солнечного излучения проходит через светопрозрачные оконные конструкции и нагревает внутренние поверхности помещений, что учитывается дополнительно при расчёте бытовых теплопоступлений как:

$$Q_{быт.дол} = 9 \cdot (1-\eta) \cdot F_{ном} + C_{cmn} \cdot C_{cm} \cdot (1-E) \cdot F_{осм}, \quad (2)$$

где η – коэффициент, учитывающий способ регулирования тепловой нагрузки системы отопления здания, принят равным 0,2 согласно прил.М СНБ 4.02.01-03; C_{cmn} – коэффициент теплопропускания стеклопакета, колеблется в пределах 0,3-0,75 [12], принят равным 0,6; $F_{ном}=4 \cdot 5=20$ м², $F_{осм}=1,5 \cdot 2=3$ м² – площади пола помещения и остекления соответственно.

м) Количество теплоты, требуемой для нагрева инфильтрирующегося воздуха, рассчитывается согласно методике прил.К СНБ 4.02.01-03 и учитывается в тепловом балансе только для периода отсутствия солнечного излучения. При наличии солнечного излучения инфильтрирующийся воздух подогревается за счёт теплоты солнечной радиации и входит в тепловой баланс как теплоприток. При отсутствии навесного фасада расход

теплоты на нагрев наружного воздуха при инфильтрации составляет по расчёту $Q_{инф} = 9151$ Вт.

В связи с вышеизложенным, теплообмен в дневное время суток может значительно отличаться от теплообмена в ночное время суток, и уравнение теплового баланса примет вид:

для периода без солнечного излучения

$$\pm \Delta Q = Q_{тр}^{ст} + Q_{тр}^{ок} + Q_{тр}^{пл} + Q_{тр}^{нм} + Q_{инф} - Q_{быт}, \text{ Вт}$$

для периода с наличием солнечного излучения

$$\pm \Delta Q = Q_{тр}^{ст} + Q_{тр}^{ок} + Q_{тр}^{пл} + Q_{тр}^{нм} - Q_{быт.доп} - Q_{конв}, \text{ Вт.}$$

Здесь $Q_{тр}^{ст}$, $Q_{тр}^{ок}$, $Q_{тр}^{пл}$, $Q_{тр}^{нм}$ – трансмиссионные потери теплоты через стены, окна, перекрытие подвала и покрытие (чердачное перекрытие); $Q_{инф}$ – потери теплоты на нагрев инфильтрирующегося воздуха; $Q_{быт}$, $Q_{быт.доп}$ – соответственно бытовые тепловыделения и тепловыделения в помещениях с учётом аккумулированной теплоты внутренними поверхностями; $Q_{конв}$ – конвективный тепловой поток от воздуха к стене в воздухоприёмном канале.

Прирост температуры приточного воздуха в воздухоприёмном канале в пределах одного этажа определён по формуле:

$$\Delta t = \frac{3600 \cdot (q_{изл.рез} + q_{конв}) \cdot F_{пан} \cdot z_{пан}}{L_{пр} \cdot \rho_{пр} \cdot c_{пр}} \quad (3)$$

где $q_{конв}$ – плотность конвективного потока между стеной и воздухом в воздухоприёмном канале, Вт/м²; $F_{пан}$ – площадь поверхности стены (без учёта оконного проёма), м²; $z_{пан}$ – количество навесных панелей для пропуска расчётного количества $L_{пр}$, м³/ч, приточного воздуха, штук; $\rho_{пр}$, $c_{пр}$ – плотность и теплоёмкость приточного воздуха в воздухоприёмном канале в пределах одного этажа соответственно, кг/м³, Дж/(кг·°С).

Давая технико-экономическую оценку энергосберегающим мероприятиям принято оценивать эффективность вариантов путём приведения расхода топливно-энергетических ресурсов к единому показателю – т у.т. Согласно справке Департамента по энергоэффективности Госкомитета по стандартизации РБ в 2018 г. расчетную стоимость 1 т у.т. принимают равной 220 долларов США, а официальный курс белорусского рубля по отношению к доллару США – на дату составления расчетов (2,16 BYN/\$US).

Годовое замещение тепловой энергии в пересчёте на условное топливо:

$$B_{тэ} = Q \cdot b_{тэ}, \text{ т у.т./год}, \quad (4)$$

где Q – теплопроизводительность системы тепловой вентиляции, Гкал;

$b_{тэ} = 0,1666$ т у.т./Гкал – удельный расход топлива на производство тепловой энергии на теплоисточнике.

Годовой расход электрической энергии в пересчёте на условное топливо:

$$B_{ээ} = N \cdot b_{ээ} \cdot 10^{-3}, \text{ т у.т./год}, \quad (5)$$

где N – потребляемая электрическая мощность, кВт·ч/год (привода вентилятора);

$b_{ээ} = 0,2818$ кг у.т./кВт·ч – удельный расход топлива на производство электрической энергии на источнике.

Годовое денежное выражение экономии и затрат:

$$З = B_{ээ} \cdot C_{топл}, \text{ ВУН/год}, \quad (6)$$

где $C_{топл} = 220 \cdot 2,16$ ВУН – стоимость 1 т у.т.

Экономия теплоты, Гкал, за время стояния температур в пределах $-26...-22^{\circ}\text{C}$ в случае наличия в эти часы устойчивого солнечного излучения в количестве 223 Вт/м^2 определится по формуле:

$$\mathcal{E}_Q = 8,6 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\left| Q_{тр}^{cm} + Q_{тр}^{ок} + Q_{тр}^{nl} + Q_{тр}^{nm} - Q_{быт.дон} - Q_{конв} \right| + Q_{ТВТ} \right) \cdot z_{ч}, \quad (7)$$

где $Q_{ТВТ}$ – подогрев приточного воздуха в прямоточном теплообменнике тепловой камеры, конструктивно выполненном по схеме «труба в трубе», кВт; $z_{ч}$ – время стояния температур наружного воздуха, часов.

Затраты теплоты, Гкал, за время стояния температур в пределах $-26...-22^{\circ}\text{C}$ в случае отсутствия в эти часы солнечного излучения:

$$\mathcal{Z}_Q = 8,6 \cdot 10^{-4} \cdot \left(Q_{тр}^{cm} + Q_{тр}^{ок} + Q_{тр}^{nl} + Q_{тр}^{nm} + Q_{инф} - Q_{быт} - Q_{ТВТ} \right) \cdot z_{ч}. \quad (8)$$

Затраты электроэнергии, кВт·ч, на работу вентилятора предлагаемой системы тепловой вентиляции:

$$\mathcal{Z}_N = (N_{кан} + N_{ТВТ}) \cdot z_{ч}, \quad (9)$$

где $N_{кан}$, $N_{ТВТ}$ – требуемые мощности на прокачку воздухоприёмного канала, а также приточного и вытяжного каналов теплообменника «труба в трубе», кВт.

Результаты исследований. За счёт солнечного излучения средней интенсивностью 223 Вт/м^2 приточный воздух в количестве $540 \text{ м}^3/\text{ч}$, проходящий в воздухоприёмном канале, имеющем ориентацию на В, ЮВ, Ю, ЮЗ или З, подогревается на $29,6-58,1^{\circ}\text{C}$ (минимальные значения – для одной навесной панели, максимальные – для четырёх) при его начальной температуре -25°C , – рисунок 3.

Степень утилизации тепловых потерь через наружные ограждающие конструкции здания для целей подогрева приточного воздуха в воздухоприёмном канале зависит от величины этих потерь, тепловой инерционности ограждений (времени хода процесса передачи теплоты) и температуры наружной поверхности наружных ограждающих конструкций. Так, жилые здания, теплозащитная оболочка которых обеспечивает нормируемый уровень теплозащиты согласно требованиям ТКП 45-2.04-43-2006, имеют удельные тепловые потери с 1 м^2 утеплённой конструкции стены, как правило, не более

6-8 Вт/м², а температура на наружной поверхности теплозащитной оболочки выше температуры наружного воздуха не более чем на 2-3°C, т.е. не более чем на величину абсолютной погрешности метода тепловизионных измерений. Таким образом за счёт трансмиссионной теплоты, теряемой зданием, приточный воздух, проходящий в воздухоприёмном канале, согласно нашим расчётам подогреется на 1,2-2,7°C (минимальные значения – для одной навесной панели, максимальные – для четырёх) при его начальной температуре –25°C, – рисунок 3.

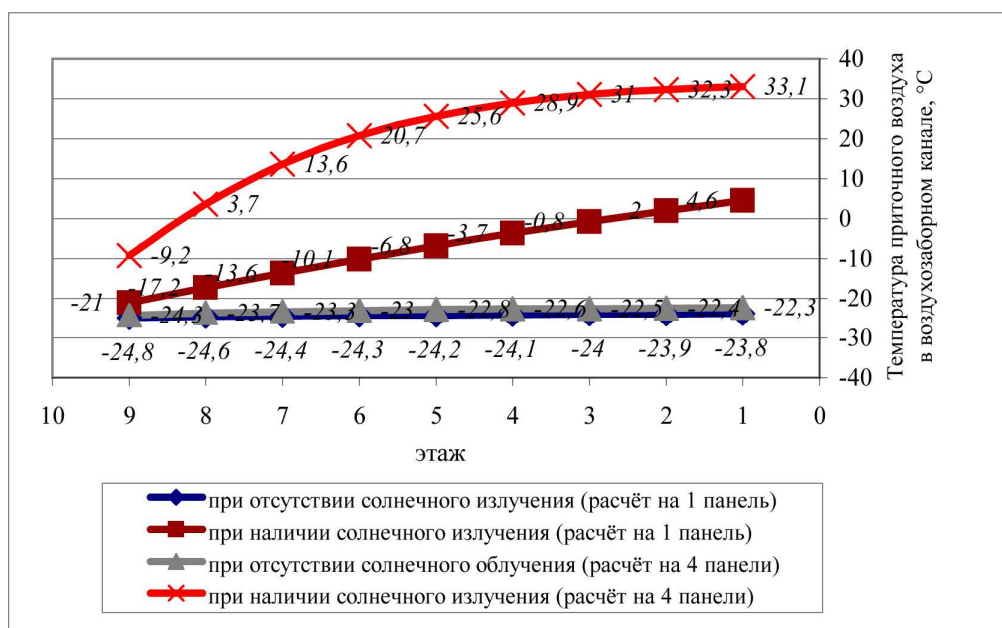


Рисунок 3. – Зависимость температуры приточного воздуха в воздухоприёмном канале от высоты здания

Результаты расчёта теплообмена в воздухоприёмном канале показывают, что чем большее количество секций солнечной панели используется для пропуска расчётного количества приточного воздуха (540 м³/ч), тем быстрее увеличивается подогрев воздуха на двух верхних этажах здания, и тем ближе по абсолютной величине становятся величины плотностей результирующего потока излучением и конвекцией (рисунок 4). При этом от верха к низу по ходу движения воздуха результирующий поток излучением падает медленнее, чем конвективный поток, который уменьшается до нуля в месте нулевого температурного напора между воздухом и стеной, и затем вновь начинает возрастать, изменив направление. По мере восприятия новых порций теплового излучения температура приточного воздуха в воздухоприёмном канале повышается и наконец становится выше, чем температура поверхности стены. В этот момент вектор конвективного теплового потока меняет направление на противоположное, в результате воздух по мере продвижения вниз начинает охлаждаться, отдавая стене теплоту конвекцией. Возрастание температуры приточного воздуха при движении по воздухоприёмному каналу к нижним этажам постепенно прекращается из-за возрастающего «экономайзерного» эффекта в ограждающей конструкции.

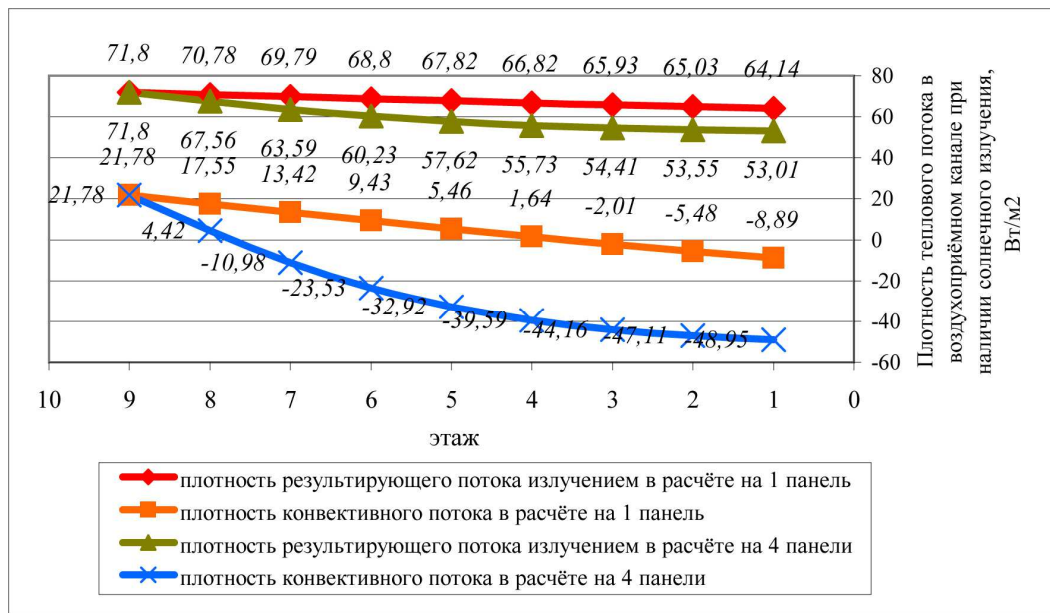


Рисунок 4. – Зависимость плотности теплового потока в воздухоприёмном канале от высоты здания при наличии солнечного облучения

При устойчивом солнечном облучении навесной панели интенсивностью 223 Вт/м^2 за время стояния температур $-26...-22^\circ\text{C}$ подогрев $540 \text{ м}^3/\text{ч}$ приточного воздуха даёт экономию теплоты $0,16 \text{ Гкал}$ ($181 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$), или в денежном выражении $12,32 \text{ бел.руб.}$ За тот же период времени при тех же температурах наружного воздуха в случае отсутствия устойчивого солнечного излучения затраты на обогрев составляют $0,32 \text{ Гкал}$ ($375,9 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$), или в денежном выражении $25,60 \text{ бел.руб.}$ Затраты электроэнергии на компенсацию аэродинамических потерь в системе тепловой вентиляции с расходом воздуха $540 \text{ м}^3/\text{ч}$ за тот же период времени составляют $1,11 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$, или в денежном выражении $0,15 \text{ бел.руб.}$

Таким образом, за счёт организации воздухозаборного канала с шириной стекла навесной панели равной ширине стеновой панели одной жилой комнаты и размещения его на стенах, ориентированных на В, ЮВ, Ю, ЮЗ или З, экономия теплоты на обогрев при наличии солнечного излучения составит $50,7\%$ от затрат тепловой энергии в традиционных системах отопления и вентиляции гражданских зданий. Затраты электроэнергии на работу вентилятора системы тепловой вентиляции невелики и составляют $0,57\%$ относительно получаемого эффекта за счёт экономии теплоты на обогрев. Приточно-вытяжная шахта в виде теплообменника типа «труба в трубе» даёт $37,2\%$ теплового эффекта системы тепловой вентиляции, однако в случае повышения температуры наружного воздуха или организации воздухозаборного канала, содержащего две и более навесных панели по ширине для пропуска расчётного количества приточного воздуха, тепловая эффективность теплообменника типа «труба в трубе» будет снижаться по причине фиксированного положительного температурного напора на его холодном конце.

При устойчивом солнечном облучении навесной панели интенсивностью 223 Вт/м^2 в диапазоне температур наружного воздуха $-26...+8^\circ\text{C}$ в отопительный период температура поверхности стены здания внутри воздухоприёмного канала повышается с $-5,4^\circ\text{C}$

до +18,4°C (рисунок 5). При этом температура воздуха на выходе из воздухоприёмного канала в расчёте на одну солнцеприёмную панель возрастает до 4,6...31,1°C (рисунок 6).

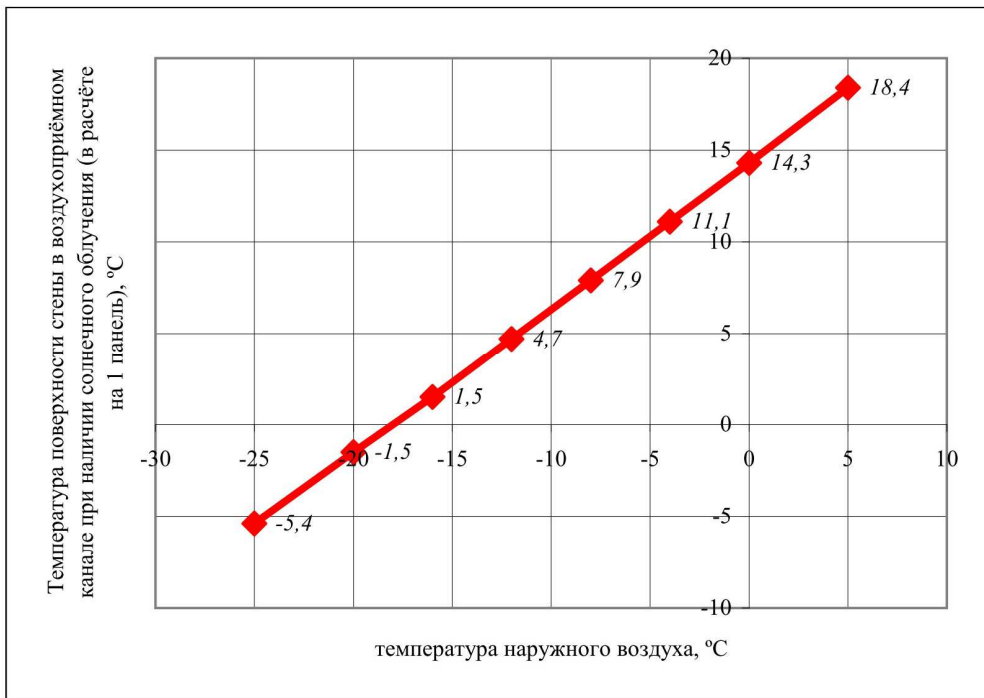


Рисунок 5. – Зависимость температуры облучённой поверхности стены внутри воздухоприёмного канала от температуры наружного воздуха (при наличии устойчивого солнечного облучения)

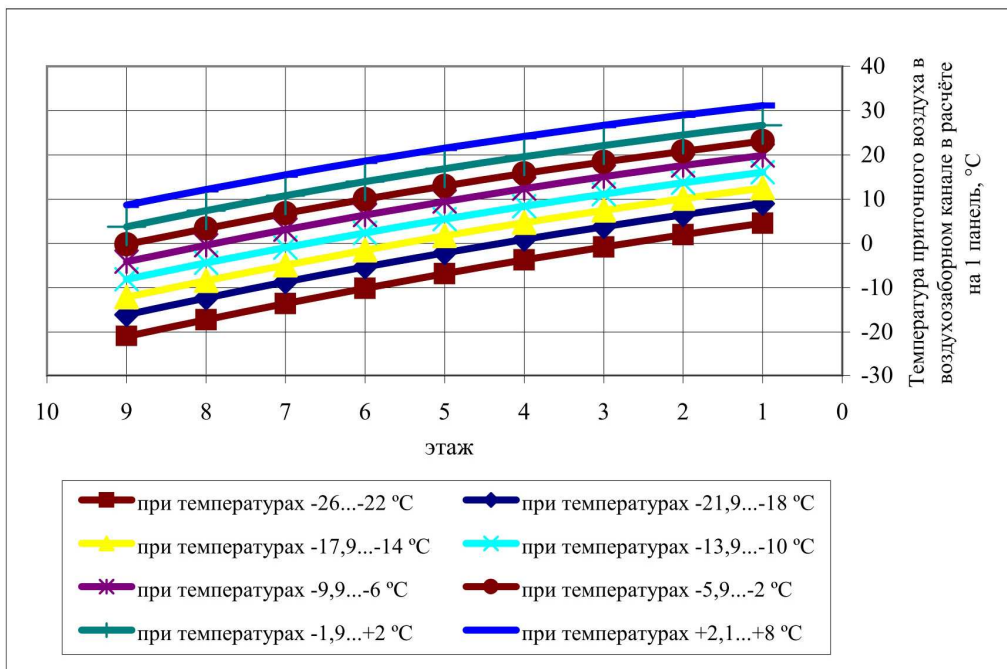


Рисунок 6. – Изменение температуры воздуха в воздухоприёмном канале по этажам здания при различных температурах наружного воздуха (при наличии устойчивого солнечного облучения)

Как видно из рисунка 6 при повышении температуры наружного воздуха требуемая мощность догрева приточного воздуха в теплообменнике типа «труба в трубе» снижается и при температурах наружного воздуха от $-5,9^{\circ}\text{C}$ и выше при наличии устойчивого солнечного облучения навесной панели становится равной нулю. Таким образом, для недопущения перегрева помещений в вышеуказанные периоды следует перекрывать канал удаляемого воздуха в теплообменнике типа «труба в трубе», соответственно выключая последний из работы, а удаление загрязнённого воздуха из помещений производить по резервным вентиляционным шахтам без рекуперации его теплоты в системе рассматриваемой тепловой вентиляции. Необходимость использования дополнительного подогрева приточного воздуха в электрокалорифере или теплоты сжигания природного газа в предлагаемой системе тепловой вентиляции отпадает при температурах наружного воздуха от -18°C и выше – догрев воздуха осуществляется в теплообменнике типа «труба в трубе».

Определение степени экономии энергии на нужды отопления здания по месяцам отопительного периода за счёт применения предлагаемой системы тепловой вентиляции затруднительно, поскольку в действующих ТНПА отсутствует информация о времени стояния температур наружного воздуха по месяцам. Кроме того, невозможно установить определённую взаимосвязь между помесечной продолжительностью солнечного сияния (рисунок 7) и температурой наружного воздуха (рисунок 8).

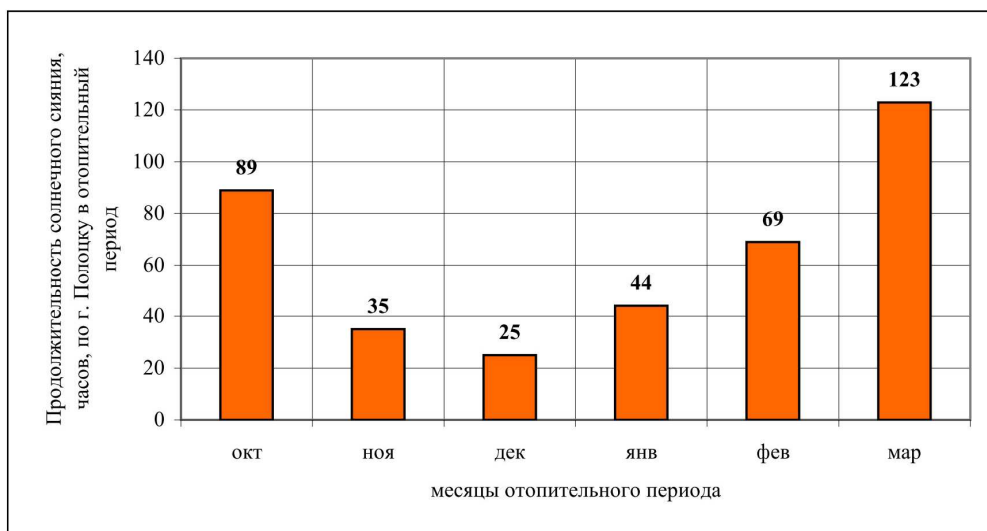


Рисунок 7. – Продолжительность солнечного сияния, часов, по г. Полоцку по месяцам отопительного периода (по данным СНБ 2.04.02-2000)

Таким образом, оценку степени экономии энергии на нужды отопления здания за счёт применения предлагаемой системы тепловой вентиляции в денежном выражении можно дать только для отопительного периода в целом, взяв за основу общее количество часов солнечного сияния в течение отопительного периода, – 385 часов для г. Полоцка согласно рисунку 7, и общее количество дней стояния температур в диапазоне –

26...+8°C, – 4968 часов для г. Полоцка согласно рисунку 8. Тогда оценка помесечной экономии энергии на нужды отопления может быть дана в виде доли от общей экономии в отопительный период, где коэффициентом пропорциональности будет выступать продолжительность солнечного сияния в часах по каждому месяцу отопительного периода, отнесённая к среднему количеству часов в месяце отопительного периода. Так для г. Полоцка длительность отопительного периода составляет 207 суток или 4968 часов, что в среднем на каждый из 6 месяцев составляет 828 часов. Таким образом, время солнечного сияния в октябре составит 10,7% от среднемесечного времени работы системы тепловой вентиляции, в ноябре – 4,2%, в декабре – 3,0%, в январе – 5,3%, в феврале – 8,3%, в марте – 14,9%.

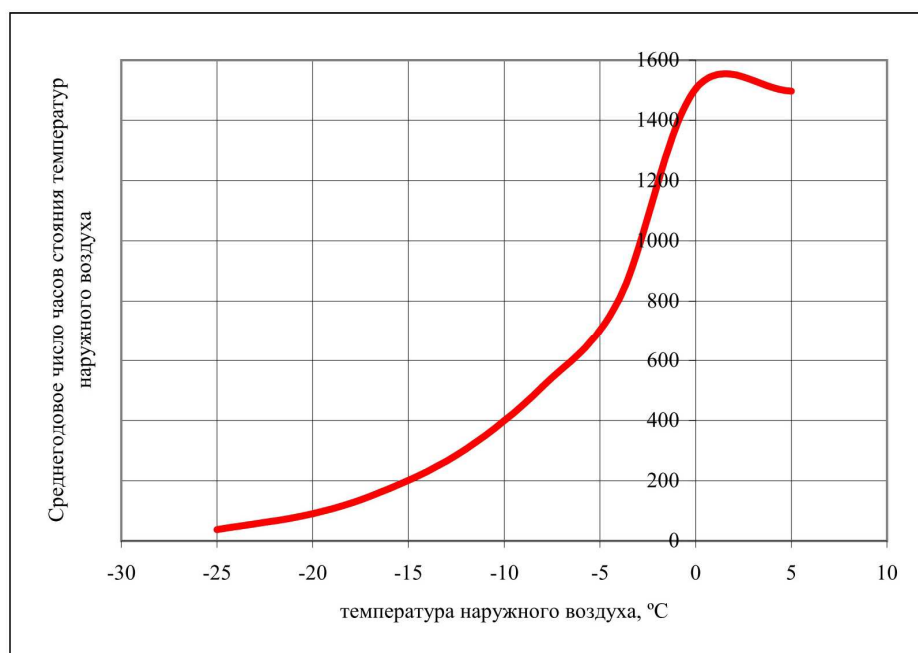


Рисунок 8. – Среднегодовое число часов стояния температур наружного воздуха по г. Полоцку (по данным СНБ 2.04.02-2000)

На рисунке 9 показано изменение величин экономии энергии на нужды отопления за счёт применения предлагаемой системы тепловой вентиляции (при наличии устойчивого солнечного облучения) и величин затрат энергии на нужды отопления (в случае неприменения или при отсутствии средств рекуперации тепловой энергии из удаляемого воздуха, трансмиссионных потерь теплоты зданием, а также теплоты солнечной радиации) в зависимости от температуры наружного воздуха.

Согласно выполненным расчётам (рисунок 9) видно, что необходимость в использовании дополнительных средств поддержания параметров микроклимата в помещениях здания отпадает при температурах наружного воздуха от -2°C и выше при наличии устойчивого солнечного облучения здания, поскольку расчётная величина возможной экономии энергии за счёт рекуперации тепловой энергии из удаляемого воздуха, трансмиссионных потерь теплоты зданием, а также теплоты солнечной радиации в предлага-

емой системе тепловой вентиляции будет превышать затраты энергии на отопление аналогичного здания, не оборудованного предлагаемой системой тепловой вентиляции. Максимальные затраты энергии на нужды отопления в отопительный период по зданию без средств рекуперации энергии или в случае полного отсутствия солнечного облучения могут составить 15,63 Гкал (1237,29 бел. руб.), а максимальная экономия энергии на нужды отопления за отопительный период в аналогичном здании с предлагаемой системой тепловой вентиляции в случае наличия устойчивого солнечного облучения составит 13,35 Гкал (1057 бел. руб.). Реальная экономия в расчёте на одну солнцеприёмную панель девяти типовых жилых комнат за 385 часов солнечного сияния в течение отопительного периода составляет 1,04 Гкал или 82,61 бел. руб.

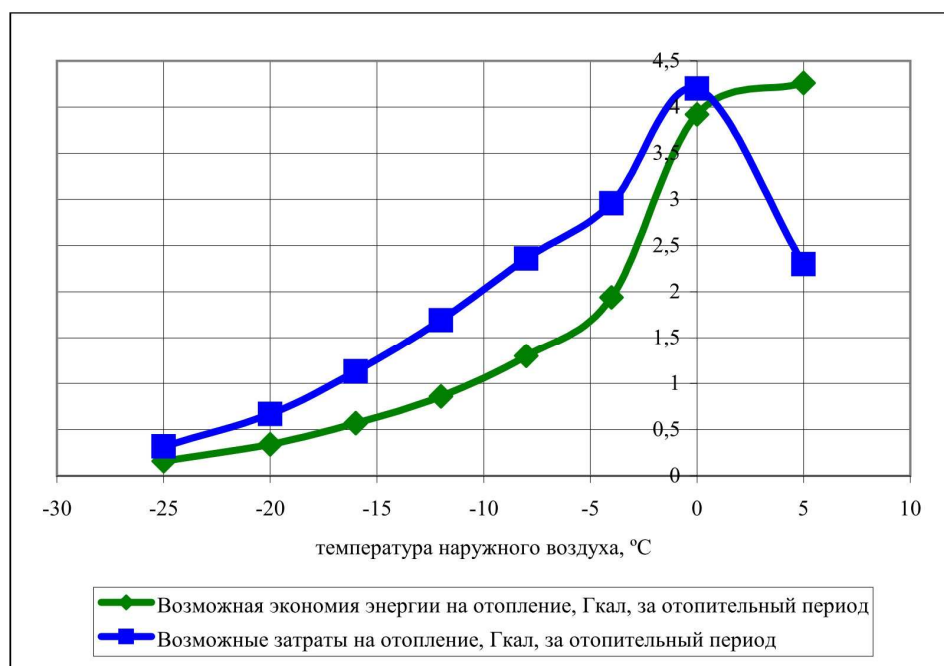


Рисунок 9. – Возможная экономия и затраты энергии на нужды отопления, Гкал, за отопительный период в расчёте на одну солнцеприёмную панель девяти типовых жилых комнат

Заключение. Результаты выполненных исследований могут служить руководством для совершенствования отопительно-вентиляционных систем, поскольку настоящим показана возможность повышения эффективности энергопотребления эксплуатируемых зданий за счёт использования теплоты солнечного излучения, теплоты удаляемого из помещений воздуха, а также низкопотенциальной трансмиссионной теплоты, теряемой зданием в окружающую среду при низких температурах наружного воздуха.

ЛИТЕРАТУРА

1. Энергетический баланс Республики Беларусь / редкол.: И.В. Медведева (отв. ред.) [и др.] / Мн., 2017. – 153 с. – (Статистический сборник / Национальный статистический комитет Республики Беларусь).

2. Кузнецов, Ю.В. Энергосберегающие технологии и мероприятия в системах энергосбережения / Ю.В. Кузнецов, С.В. Федорова. – Екатеринбург: УрО РАН, 2008. – 356 с.
3. Молодёжникова, Л.И. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях / Л.И. Молодёжникова. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 205 с.
4. Беляев, В.С. Проектирование энергоэкономичных и энергоактивных гражданских зданий / В.С. Беляев, Л.П. Хохлова. – М.: Высш. шк., 1991. – 255 с.
5. Бессонный, А.Н. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения / А.Н. Бессонный, Г.А. Дрейцер, В.Б. Кунтыш. – Спб.: Недра, 1996. – 512 с.
6. Маньковский, О.Н. Теплообменная аппаратура химических производств / О.Н. Маньковский, А.Р. Толчинский, М.В. Александров. – Л.: Химия, 1976. – 369 с.
7. Ганжа, В.Л. Основы эффективного использования энергоресурсов: теория и практика энергосбережения / В.Л. Ганжа. – Мн.: Белорус. наука, 2007. – 451 с.
8. Серии домов и планировки [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://tipdoma.com/serii-domov-belarus/> . – Дата доступа 11.11.2017.
9. Сазонов, Э.В. Вентиляция общественных зданий : учеб. пособие / Э.В. Сазонов. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 1991. – 188 с.
10. Русланов, Г.В. Отопление и вентиляция жилых и гражданских зданий / Г.В. Русланов, Э.Л. Ямпольский. – Киев: Будивельник, 1983. – 272 с.
11. Брюханов, О.Н. Тепломассообмен / О.Н. Брюханов, С.Н. Шевченко. – М.: Издательство АСВ, 2005. – 460 с.
12. Фокин, В.М. Основы энергосбережения и энергоаудита / В.М. Фокин. – М.: «Издательство Машиностроение-1», 2006. – 256 с.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС:
ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**

ЭЛЕКТРОННЫЙ СБОРНИК СТАТЕЙ
II МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

(Новополоцк, 28–29 ноября 2019 г.)

Новополоцк
Полоцкий государственный университет
2020

Об издании – [1](#), [2](#)

1 – дополнительный экран – сведения об издании

УДК 72:624/628+69(082)

Редакционная коллегия:

Л. М. Парфенова (председатель),
А. С. Катульская (отв. секретарь), Е. Д. Лазовский,
Н. В. Давыденко, Р. М. Платонова

АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС: ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ
[Электронный ресурс] : электронный сборник статей II международной научной конференции, Новополоцк, 28–29 нояб. 2019 г. / Полоцкий государственный университет ; под ред. Л. М. Парфеновой. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2020. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

ISBN 978-985-531-701-3.

Рассмотрены вопросы архитектуры и градостроительства в современных условиях, прогрессивные методы проведения инженерных изысканий и расчета строительных конструкций. Приведены результаты исследований ресурсо- и энергосберегающих строительных материалов и технологий, энергоресурсосберегающие и природоохранные инновационные решения в инженерных системах зданий и сооружений. Проанализированы организационные аспекты строительства и управления недвижимостью, проблемы высшего архитектурного и строительного образования.

Для научных и инженерно-технических работников исследовательских, проектных и производственных организаций, а также преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов строительных специальностей учреждений образования.

*Сборник включен в Государственный регистр информационного ресурса.
Регистрационное свидетельство № 3671815379 от 26.04.2018.*

211440, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, Беларусь
тел. 8 (0214) 53 53 92, e-mail: a.bakatovich@psu.by; l.parfenova@psu.by

№ госрегистрации 3671815379.

ISBN 978-985-531-701-3

@Полоцкий государственный университет, 2020

2 – дополнительный титульный экран – производственно-технические сведения

Для создания текстового электронного издания «Архитектурно-строительный комплекс: Проблемы, перспективы, инновации» использованы текстовый процессор Microsoft Word и программа Adobe Acrobat XI Pro для создания и просмотра электронных публикаций в формате PDF.

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС:
ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**

ЭЛЕКТРОННЫЙ СБОРНИК СТАТЕЙ
II МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

(Новополоцк, 28–29 ноября 2019 г.)

Технический редактор *Т. А. Дарьянова.*

Компьютерная верстка *Т. А. Дарьяновой.*

Компьютерный дизайн обложки *Е. А. Балабуевой.*

Подписано к использованию 09.09.2020.

Объем издания: 21,05 Мб. Тираж 3 диска. Заказ 420.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

Свидетельство о государственной регистрации
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/305 от 22.04.2014.

ЛП № 02330/278 от 08.05.2014.

211440, ул. Блохина, 29,
г. Новополоцк,
Тел. 8 (0214) 59-95-41, 59-95-44
<http://www.psu.by>