



УДК 697.9

ТЕРМОЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОТОПИТЕЛЬНО-ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ЗДАНИЯ С УТИЛИЗАЦИЕЙ ТЕПЛОТЫ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ВЫБРОСОВ В РЕКУПЕРАТИВНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ

В.А. Зафатаев

THERMO-ECONOMIC ANALYSIS OF THE HEATING-VENTILATION SYSTEM ACCOMPANIED WITH THE UTILIZATION OF VENTILATION EMISSIONS HEAT IN RECUPERATIVE HEAT EXCHANGERS

V.A. Zafataev

Аннотация. С целью решения проблем энергоресурсосбережения при эксплуатации инженерных систем обеспечения параметров микроклимата предлагается применение в зданиях отопительно-вентиляционных систем, в которых осуществляется утилизация явной и скрытой теплоты удаляемого воздуха, а также полезно используется теплота трансмиссионных потерь здания и солнечная энергия.

Ключевые слова: *теплота; эксергия; утилизация; рекуперативный теплообменник; солнечное излучение.*

Abstract: In order to solve the energy and resource saving problems in the field of climate providing engineering systems exploitation, it is proposed to use heating and ventilation systems where the carried-off air heat is utilized, and building transmission losses heat and solar energy are also beneficially used.

Key words: *heat; exergy; utilization; recuperative heat exchanger; solar radiation.*

Продолжительное время на территории бывшего СССР строительство зданий осуществлялось с минимальным использованием теплоизоляционных элементов. Такой подход основывался на возможности получения относительно дешевой энергии для отопления. Это привело к тому, что к 2000 году в Республике Беларусь потребление энергии на отопление и вентиляцию жилых помещений составляло 120-260 кВт·ч на 1 м² отапливаемой площади за отопительный период в зависимости от архитектурно-планировочного решения здания. Для сравнения со странами такими как Швеция и Финляндия, этот показатель составляет 140 кВт·ч/(м²·год) [1], в Дании – 88 кВт·ч/(м²·год), в Германии – 85 кВт·ч/(м²·год) [2]. Из-за высокой стоимости тепловой энергии ежегодно до 40 % расходной части городского бюджета направляется на дотацию затрат жилищно-коммунальных предприятий на отопление жилых зданий.

Действующий в республике ТКП 45-2.04-196 «Тепловая защита зданий. Теплоэнергетические характеристики» устанавливает классы жилых зданий по показателю потребления тепловой энергии на отопление и вентиляцию – А+, А, В, С, D, E, F. Согласно ТКП 196 т.е. удельный расход тепловой энергии на отопление и вентиляцию вновь возводимых жилых зданий не должен превышать 91 кВт·ч/м² для зданий высотой до 3 этажей, 52 кВт·ч/м² для зданий до 6 этажей и 48 кВт·ч/м² для зданий в 7 этажей и выше.

Энергопотребление в зданиях зависит от климатических и технических факторов, а также потребительских привычек [2]. К климатическим факторам относятся: температура наружного воздуха отопительного периода, количество солнечной радиации, скорость ветра, количество осадков. К техническим факторам относятся: теплозащитные характеристики наружных ограждений, тип, размер, конструкция и направленность окон, архитектурно-планировочное решение здания, наличие и настройки системы автоматики регулирования

отопления и вентиляции. Термин «потребительские привычки» обозначает такие факторы, как, например, количество расходуемой горячей воды, частота открывания окон, приготовления пищи, использование освещения, люди, отвечающие за эксплуатацию систем отопления, вентиляции и всего здания.

Исследования теплового режима зданий показывают, что фактическая тепловая защита наружных ограждений на 15-20% ниже нормативной [2]. Причинами являются низкое качество строительства и эксплуатации зданий, а также не учтённый фактор неоднородности конструкций на момент разработки проектно-сметной документации строительства. Это приводит к неучтенным потерям теплоты, неудовлетворительному микроклимату и снижению долговечности зданий.

Основными путями экономии энергии в гражданских зданиях являются повышение тепловой эффективности строительных конструкций, архитектурно-планировочных решений, инженерных систем и использование вторичных и природных видов энергии [2].

Повышение тепловой эффективности зданий достигается увеличением плотности застройки, увеличением протяженности и ширины корпуса, оптимизацией этажности, уменьшением периметра здания. Объёмно-планировочные решения зданий оказывают существенное влияние на энергопотребление. Например, здания с широким корпусом потребляют на 15-18 % меньше энергии, чем здания с обычным корпусом. Поэтому необходимо разрабатывать объёмно-планировочные решения с наименьшей площадью наружных конструкций для зданий одинакового объёма [2]. Увеличение протяженности дома с 4 до 10 секций влечет снижение удельного расхода тепла на отопление до 5...7%; увеличение ширины корпуса с 12 до 15 м дает 9...10% экономии теплоты, а повышение этажности зданий с 5 до 9 этажей – 3...5% [3].

Тепловая эффективность зданий зависит от влияния ориентации здания по сторонам света. Для отдельного здания фасады, ориентированные на направления от СЗ до СВ, в противоположность фасадам, ориентированным на направления от ЮВ до ЮЗ, не получают заметного притока теплоты от солнечного излучения, поэтому при проектировании зданий, отличных от прямоугольной планировки, следует стремиться к тому, чтобы на север была ориентирована наименьшая поверхность фасадов [3].

Если руководствоваться вторым законом термодинамики – законом снижения качества энергии, то использование высококачественной энергии в любом виде для поддержания температуры в доме на уровне 20°C является чрезвычайно расточительным мероприятием [1]. Термический КПД производства энергии на ТЭС невысок и составляет около 40-45%. При этом за счёт термодинамической необратимости процессов перехода теплоты с одного температурного уровня на другой на конечных звеньях цепочки теплового перехода (в нашем случае конечным звеном является вентилируемое помещение, куда подаётся подогретый воздух) величина остатка эксергии первичного топлива близка к нулю, другими словами на указанных конечных звеньях цепи преобразований энергии используется критически малая часть первичной энергии источника, а финансовое покрытие деградации эксергии на предыдущих звеньях цепи неопределимо дорого, и не может быть возмещено потребителем в полном объёме. Поэтому становится очевидной необходимость повышения эффективности потребления энергии во вновь строящихся, а также реконструируемых и модернизируемых зданиях за счёт использования солнечной радиации, тепловыделений от находящихся там людей и оборудования для приготовления пищи, санитарно-бытовых нужд и т. д.

В целях повышения эффективности использования энергии при эксплуатации зданий предложена технологическая схема вентиляции зданий с использованием вторичных и природных энергетических ресурсов для отопления и вентиляции [4].

Предлагаемое конструктивное решение отопительно-вентиляционной системы здания поясняется принципиальной схемой, представленной на рис.1.

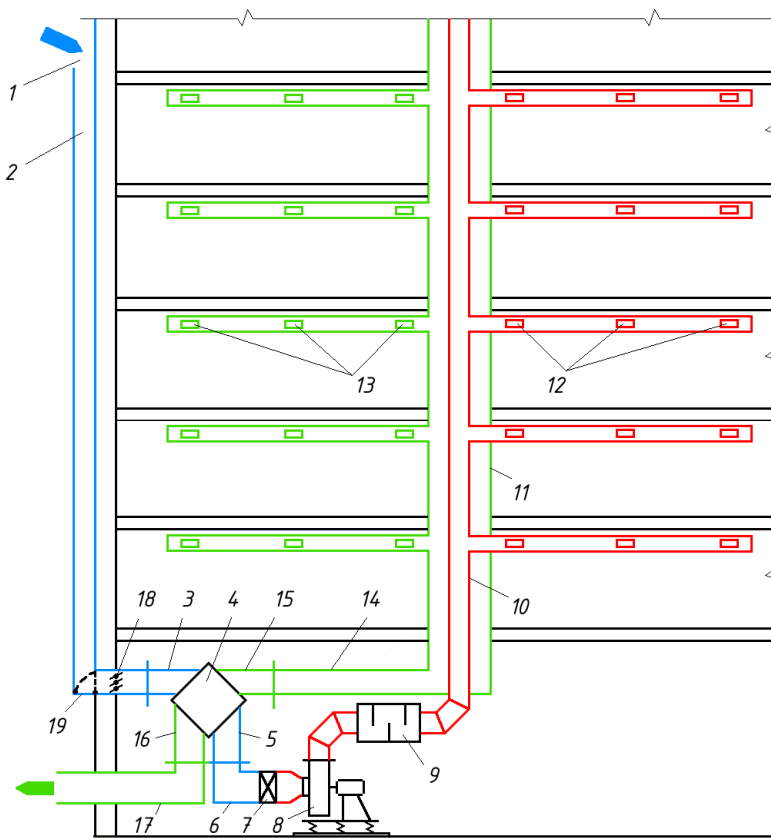


Рисунок 1 – Отопительно-вентиляционная система здания

Отопительно-вентиляционная система включает приточный и вытяжной воздушные циркуляционные контуры. Приточный воздушный циркуляционный контур имеет воздухоприёмное отверстие 1, расположенное сверху воздухозаборного канала 2, образованного навесными панелями и наружными поверхностями стен здания. Канал 2 через приёмный приточный патрубок 3 рекуперативного пластинчатого перекрёстно-точного теплообменника-утилизатора 4 связан с приточной вентиляционной камерой 5, в которой размещён дополнительный источник теплоты 7 (например, калорифер), вентилятор 8 и шумоглушитель 9. Вентилятор 8 соединён с вертикальным приточным воздуховодом 10, размещённым внутри вытяжной вентиляционной шахты 11. Канал 10 через поэтажные горизонтальные приточные воздуховоды с регулируемыми решётками 12 сообщается с вентилируемыми помещениями. Вытяжной контур включает вытяжную вентиляционную шахту 11, с которой связаны выходы горизонтальных вытяжных поэтажных воздуховодов, снабжёнными регулируемыми решётками 13. Вытяжная вентиляционная шахта 11 снизу через горизонтальный вытяжной воздуховод 14 и приёмный вытяжной патрубок 15 пластинчатого теплообменника-утилизатора 4, выходной вытяжной патрубок 16 пластинчатого теплообменника-утилизатора 4 связана с выбросным вытяжным воздуховодом 17, имеющим выход в атмосферу в нижней части здания. Фактически приточный воздуховод 10 и вытяжная вентиляционная шахта 11 конструктивно образуют противоточный рекуперативный теплообменник-утилизатор типа «труба в трубе». В конструкции отопительно-вентиляционной системы предусмотрены жалюзи 18 для регулирования расхода приточного воздуха и воздушный клапан 19, расположенные в нижней части воздухозаборного канала 2.

Отопительно-вентиляционная система работает следующим образом. Свежий наружный приточный воздух под действием принудительной циркуляции, создаваемой вентилятором 8, через воздухоприёмное отверстие 1, воздухозаборный канал 2 и приёмный приточный патрубок 3 поступает в пластинчатый теплообменник-утилизатор 4, в котором за

счёт рекуперации воспринимает часть теплоты, оставшейся в вытяжном вентиляционном воздухе после прохождения теплообменника-утилизатора «труба в трубе» перед выбросом в атмосферу. Таким образом, наружный приточный воздух предварительно подогревается сначала при прохождении воздухозаборного канала 2 за счёт трансмиссионной теплоты, теряемой зданием через наружные вертикальные ограждающие конструкции и за счёт теплоты солнечной радиации через навесные панели в дневное время суток.

Далее, пройдя две стадии утилизации теряемой зданием теплоты, наружный воздух поступает в приточную вентиляционную камеру 8, где при необходимости подогревается до расчётных значений от дополнительного источника теплоты 7 и вентилятором 8 через шумоглушитель 9 подаётся в вертикальный приточный воздухоподающий канал 10, где по всей высоте здания воспринимает теплоту через стенки канала от встречного потока тёплого вытяжного воздуха, проходящего внутри вытяжной вентиляционной шахты 11. Из вертикального приточного воздухоподающего канала 10 приточный воздух поступает через поэтажные горизонтальные приточные воздуховоды и регулируемые решётки 12 в обслуживаемые помещения, откуда под избыточным давлением в режиме эксфильтрации выдавливается через поэтажные горизонтальные вытяжные воздуховоды с регулируемыми решётками 13, вытяжную вентиляционную шахту 11, вытяжной горизонтальный воздуховод 14, приёмный вытяжной патрубок 15 пластинчатого теплообменника-утилизатора 4, выходной вытяжной патрубок 16 пластинчатого теплообменника-утилизатора 4 и выбросной вытяжной воздуховод 17 выбрасывается в атмосферу. В летний период времени в целях исключения перегрева здания в конструкции предусмотрена установка воздушного клапана 19, который открывает отверстие в нижней части воздухозаборного канала 2 и обеспечивает активное естественное охлаждение фасада здания наружным воздухом.

Термоэкономический расчёт описанной выше отопительно-вентиляционной системы здания определил целесообразность её применения в климатических условиях Витебской области Республики Беларусь (соответствует 56° с.ш.). Климатические параметры выбраны согласно СНБ 2.04.05-2000 «Строительная климатология» и изменению №1 к СНБ 2.04.05 по данным метеорологической станции «Полоцк» для условий отопительного периода, характерных для рассматриваемой территории (рис.2, рис.3):

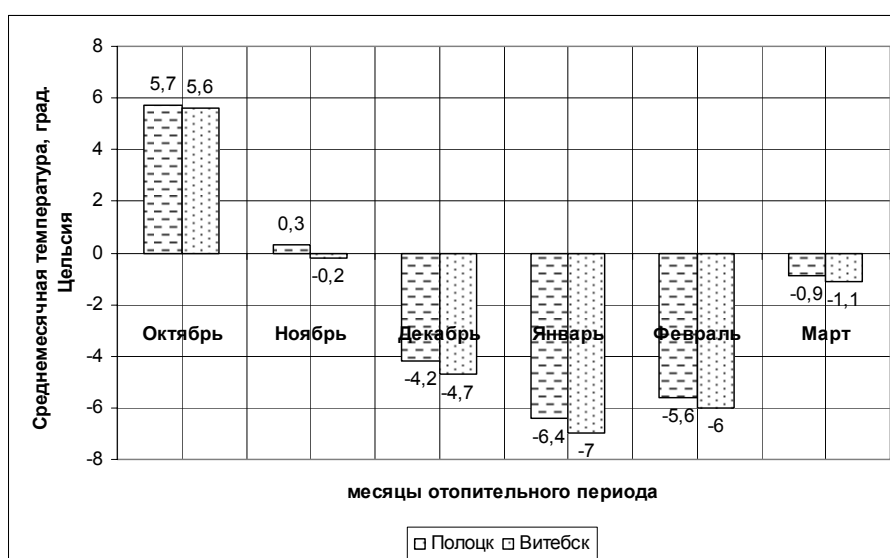


Рисунок 2 – Среднемесячная температура в отопительный период (с октября по март) для крупных городов Витебской области

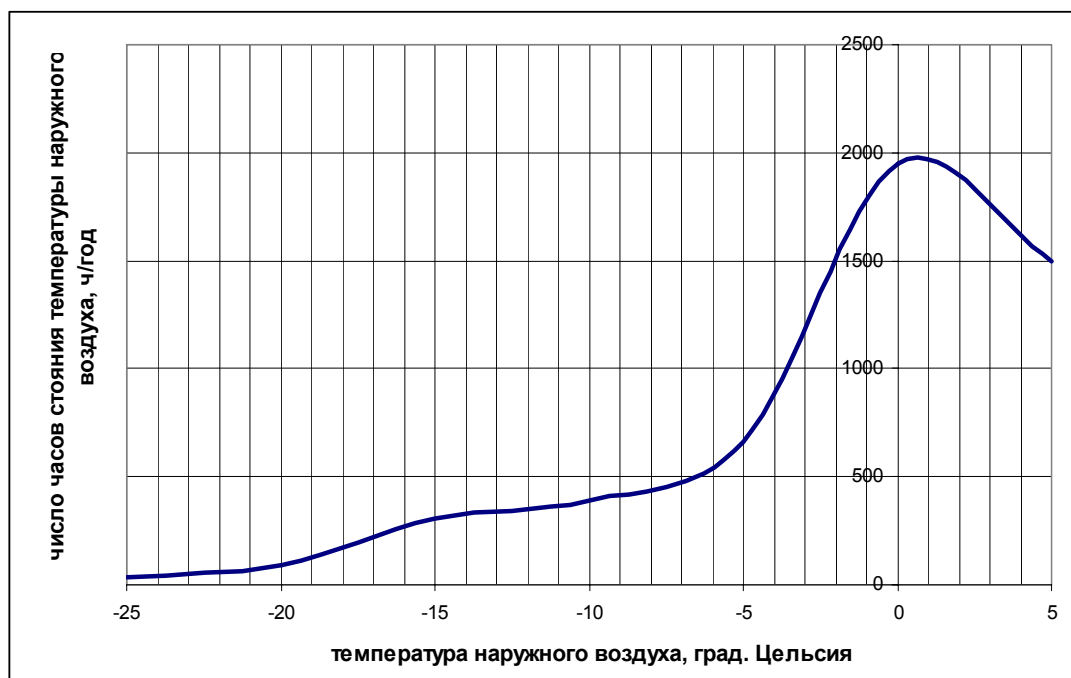


Рисунок 3 – Время стояния температур наружного воздуха в течение отопительного периода по Витебской области

В качестве расчётной температуры приточного воздуха, подаваемого в помещения, принята температура 18°C, которую необходимо обеспечить в помещениях жилых и общественных зданий с постоянным пребыванием людей согласно требованиям СНБ 3.02.04-03 «Жилые здания» и ТКП 45-2.04-43 «Строительная теплотехника». Температура удаляемого из помещений воздуха принята равной 24°C и соответствует нижнему уровню температурного градиента по высоте жилых помещений при нормируемых СНБ 4.02.01-03 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха» теплоизбытках в отопительный период.

Производительность отопительно-вентиляционной системы по воздуху (обеспечиваемый воздухообмен) принята исходя из нормируемого количества удаляемого воздуха на 1 м² жилой площади, принимаемого равным 3 м³/(ч·м²) согласно требованиям СНБ 4.02.01-03 и СНБ 3.02.04-03. Для домов блокированной планировочной структуры типовых серий, применяемых в Республике Беларусь [5], воздухообмен одной жилой ячейки с двумя квартирами нами оценён величиной в 500 м³/ч. Соответственно в девятиэтажном доме приточно-вытяжная шахта жилых ячеек должна обеспечивать воздухообмен 4500 м³/ч. Размеры поперечного сечения шахты подобраны из условия обеспечения скорости приточного и удаляемого воздуха не более 2 м/с для обеспечения требуемого согласно ТКП 45-3.02-154-2009 уровня шума в жилых, общественных и административных зданиях.

Задачами термоэкономического расчёта отопительно-вентиляционной системы здания является определение необходимости в использовании дополнительного подогрева приточного воздуха в калорифере за счёт использования первичной энергии для обеспечения нормируемой температуры воздуха в помещениях в зависимости от температуры наружного воздуха и времени её стояния в течение отопительного периода, проверка надёжности и безопасности эксплуатации рекуперативного пластинчатого теплообменника-утилизатора в условиях конденсации водяных паров в тракте удаляемого воздуха, а также определение возможного энергосберегающего эффекта при учёте в тепловом балансе отопительно-вентиляционной системы здания теплоты солнечной радиации и трансмиссионной теплоты, теряемой зданием.

При выборе критерия энергетической эффективности немаловажным является его итоговая «показательность», другими словами потребитель топливно-энергетических ресурсов должен видеть не только реальную экономию финансовых средств за счёт энергосберегающего мероприятия. Побочным стимулом к энергосбережению должно являться сохранение (а в идеале – повышение!) качества производимой продукции или оказываемой услуги. Например, при расчётах за горячую воду применяются преимущественно «физические» тарифы, ставки которых пропорциональны количеству теплоты, передаваемой энергоносителем. Тарифы на тепловую энергию должны быть пропорциональны количеству израсходованной эксергии, а не энергии [6]. Этим самым в основу формирования тарифа закладывается термодинамическая оценка энергетического «качества» теплоносителя, а также составляющая потеря эксергии первичного топлива, из которого получена горячая вода с соответствующей эксергией.

В работе [7] в качестве критерия энергетической эффективности приняты удельные приведенные затраты на единицу полезной эксергии, включающие две основные статьи затрат: переменную составляющую (зависит от требуемой мощности на прокачку теплоносителей, стоимости теплоносителя, тепловой энергии на его получение, отчислений от инвестиций и интенсивности теплопередачи), и постоянную составляющую (зависит от величины поверхности теплообмена (она же определяет величину закупочных цен на оборудование и затрат на строительные-монтажные работы, подключение к сетям и пусконаладку)). В общем виде эту функцию можно представить:

$$k_z = c_e / \eta_e + I \cdot z / (E_n \cdot n) , \quad (1)$$

где c_e – удельная цена эксергии, ВУН/ГДж; η_e – эксергетический КПД процесса; I – приведённые затраты, ВУН/год; z – нормативный коэффициент отчислений; E_n – эксергетический эффект процесса, кДж/ч; n – годовое число часов эксплуатации установки.

Поступление прямой теплоты солнечной радиации не поддаётся упорядочиванию по времени суток и фактически не зависит от колебания температуры наружного воздуха (рис. 4, рис. 5). Поэтому тепловой расчёт секций теплообменников-утилизаторов выполнен без учёта нагрева приточного воздуха в воздухозаборном канале за счёт теплоты солнечного излучения. Оценка вклада солнечной радиации в теплоснабжение здания представлена отдельно.

Поскольку наибольшее количество прямого солнечного излучения поступает на фасады зданий, ориентированные на юго-запад, юг и юго-восток, навесные панели отопительно-вентиляционной системы здания целесообразно размещать на этих стенах.

В зависимости от ширины навесной панели нагрев воздуха в воздухоприёмном канале по месяцам отопительного периода за счёт солнечной радиации нами оценён в 0,5-12,4°C (минимальные значения – в декабре, максимальные – в марте) – рис.6. Эта информация необходима для анализа режимов эксплуатации отопительно-вентиляционной системы здания и заключения о возможности снижения или полного отказа от использования дополнительного нагрева приточного воздуха в калорифере.

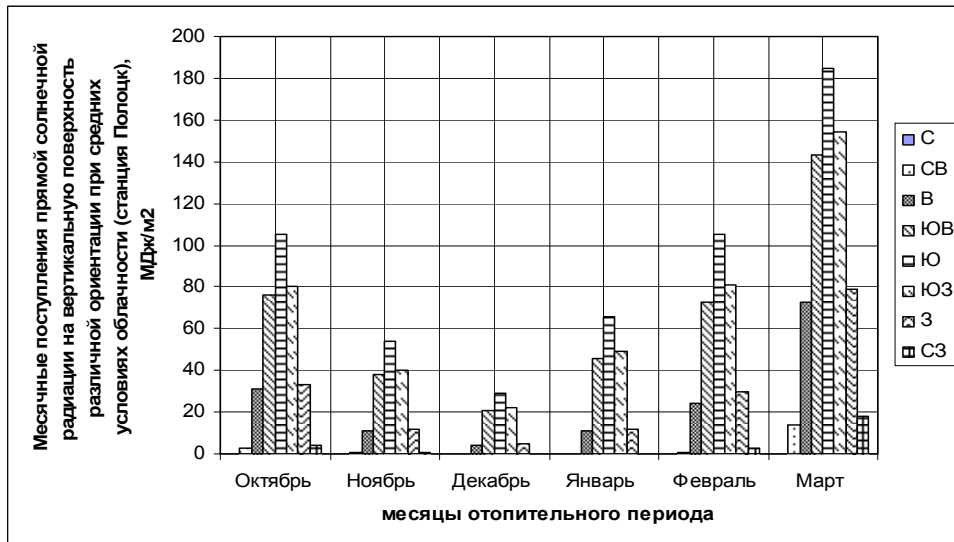


Рисунок 4 – Месячные поступления прямой солнечной радиации на вертикальную поверхность различной ориентации при средних условиях облачности в отопительный период, МДж/м² (по данным метеорологической станции «Полоцк»)

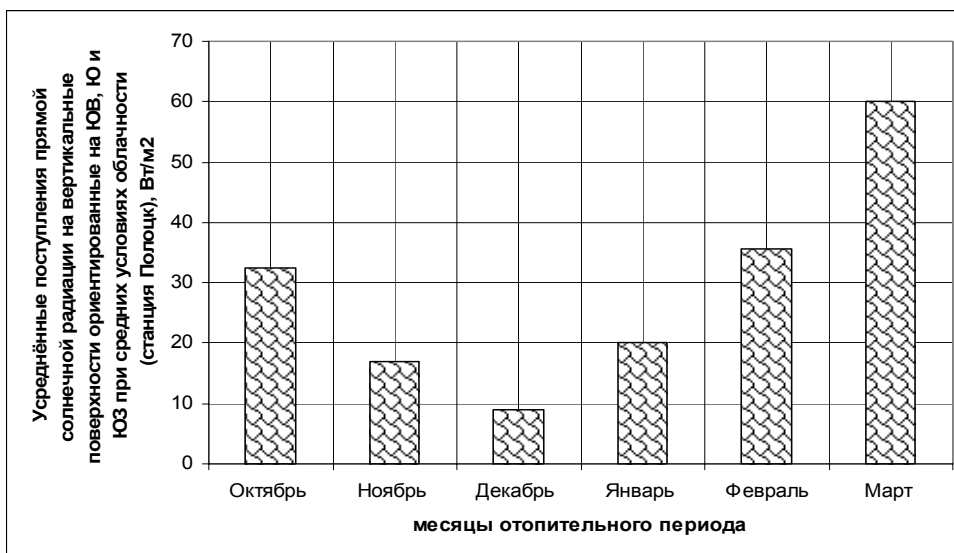


Рисунок 5 – Усреднённые мощности облучения прямой солнечной радиацией вертикальных поверхностей, ориентированных на юго-восток, юг и юго-запад при средних условиях облачности в отопительный период, Вт/м² (по данным метеостанции «Полоцк»)

Возможность утилизации трансмиссионных потерь теплоты зданием в отопительный период для нагрева приточного воздуха в воздухоприёмном канале ограничены величиной этих потерь и температурой наружной поверхности стен зданий. Так, жилые и общественные здания, у которых термическое сопротивление теплопередаче соответствует требованиям ТКП 45-2.04-43-2006 и составляет не менее 3,2 м²·°С/Вт, согласно накопленному нами опыту теплотехнических обследований, имеют удельные тепловые потери с 1 м² утеплённой конструкции стены не более 6-8 Вт/м² при условии качественного выполнения работ по утеплению или тепловой реабилитации, а температура наружной поверхности утеплённой стены выше температуры наружного воздуха не более чем на 2-3°С, т.е. не более чем на величину абсолютной погрешности метода тепловизионных измерений. Тем не менее, отклонение этих показателей в сторону увеличения возможно в местах образования так называемых тепловых мостиков (или мостиков холода). Оболочка здания должна быть по возможности непрерывной и монолитной (без пропусков).

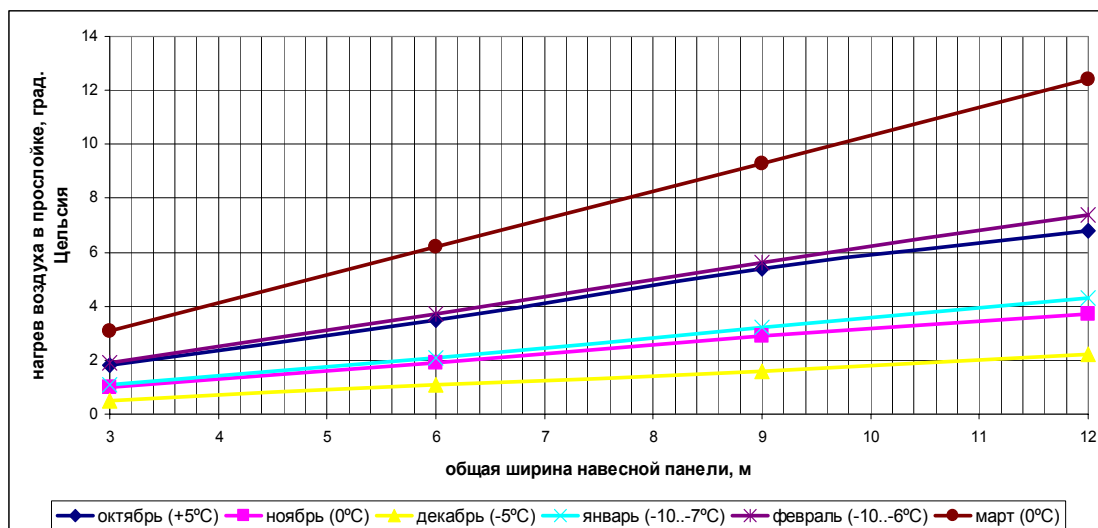


Рисунок 6 – Нагрев воздуха в воздухоприёмном канале за счёт солнечной радиации в зависимости от ширины навесной панели по месяцам отопительного периода

В местах, где происходит нарушение непрерывности теплоизоляционной оболочки, наблюдается повышенная теплопередача. Такие участки чаще всего образуются в местах контакта плит перекрытий с несущими стенами, в местах примыкания к наружным стенам внутренних стен и перегородок [8]. Если рассмотреть характер распределения теплопотерь через ограждающие конструкции зданий, то в среднем оно выглядит следующим образом: стены 42-49%; окна 32-36% (с учетом инфильтрации воздуха через неплотности притворов – до 40-50%); подвальные и чердачные перекрытия 11-18%; входная дверь 5-15% [8]. Поэтому размещение навесных панелей рассматриваемой отопительно-вентиляционной системы необходимо осуществлять в простенках между окнами помещений, разделённых внутренними стенами и перегородками. Такое размещение навесных панелей позволит утилизировать сверхнормативные тепловые потери здания в местах образования тепловых мостиков. Ширина панели должна приниматься кратной ширине простенка, высота – соответствовать высоте стеновой панели, а оптимальная толщина – находиться в пределах 0,05-0,1 м как для вентилируемых воздушных прослоек [9].

В зависимости от ширины навесной панели, исходя из условия качественного выполнения работ по утеплению стен здания и при отсутствии прямого солнечного облучения навесной панели, нагрев приточного воздуха в воздухоприёмном канале за счёт трансмиссионных потерь теплоты зданием нами оценен в 0,1-0,4°C. Расчёт теплообмена в воздухоприёмном канале произведён на основе модели теплообмена в щелевом канале, обогреваемом с одной стороны (при отсутствии прямого солнечного облучения) и обогреваемом с двух сторон (при прямом солнечном облучении навесной панели) (§ 4.2 [10], §§ 3.2-3.3 [11]).

Результаты теплового расчёта пластинчатого теплообменника-утилизатора и теплообменника-утилизатора типа «труба в трубе», входящих в состав отопительно-вентиляционной системы здания, представлены в таблице. Индексы, принятые в шапке таблицы: (1) – относятся к физическим параметрам удаляемого воздуха; (2) – относятся к физическим параметрам приточного воздуха; (') – относятся к параметрам на входе в теплообменники; (") – относятся к параметрам на выходе из теплообменников; t - температура.

Таблица – Результаты теплового расчёта теплообменников-утилизаторов отопительно-вентиляционной системы здания в зависимости от этажности здания

t_2' (целевой канал)	t_2'' (пластинчатый теплоутилизатор)	Необходимость в дополнительном подогреве	t_2' (теплоутилизатор "труба в трубе")	t_1'' (теплоутилизатор "труба в трубе")	t_1' (пластинчатый теплоутилизатор)	Характеристика теплообмена
Воздухообмен 500 м ³ /ч (одноэтажное здание)						
-25	-2,9	догрев в калорифере	15,3	21,2	-4,9	опасность замерзания
-20	0	догрев в калорифере	15,3	21,2	-1,9	опасность замерзания
-15	2,9	догрев в калорифере	15,3	21,2	1	опасность замерзания
-10	5,6	догрев в калорифере	15,3	21,2	3,9	конденсация водяных паров
-5	8,3	догрев в калорифере*	15,3	21,2	6,7	конденсация водяных паров
0	10,9	догрев в калорифере*	15,3	21,2	9,6	конденсация водяных паров
5	13,5	за счёт солнечной радиации	15,3	21,2	12,4	конденсация водяных паров
Воздухообмен 1500 м ³ /ч (трёхэтажное здание)						
-25	-3,2	догрев в калорифере	13,8	19,7	-5,8	опасность замерзания
-20	-0,3	догрев в калорифере	13,8	19,7	-2,8	опасность замерзания
-15	2,4	догрев в калорифере	13,8	19,7	0,1	опасность замерзания
-10	5,1	догрев в калорифере*	13,8	19,7	3	конденсация водяных паров
-5	7,8	догрев в калорифере*	13,8	19,7	5,9	конденсация водяных паров
0	10,3	за счёт солнечной радиации	13,8	19,7	8,8	конденсация водяных паров
5	12,8	за счёт солнечной радиации	13,8	19,7	11,6	конденсация водяных паров
Воздухообмен 2500 м ³ /ч (пятиэтажное здание)						
-25	-4,3	догрев в калорифере	12,7	18,6	-5,5	опасность замерзания
-20	-1,4	догрев в калорифере	12,7	18,6	-2,7	опасность замерзания
-15	1,5	догрев в калорифере	12,7	18,6	0,2	опасность замерзания
-10	4,2	догрев в калорифере	12,7	18,6	3	конденсация водяных паров

t_2' (целевой канал)	t_2'' (пластинчатый теплоутилизатор)	Необходимость в дополнительном подогреве	t_2' (теплоутилизатор "труба в трубе")	t_1'' (теплоутилизатор "труба в трубе")	t_1' (пластинчатый теплоутилизатор)	Характеристика теплообмена
-5	6,9	догрев в калорифере*	12,7	18,6	5,8	конденсация водяных паров
0	9,5	за счёт солнечной радиации	12,7	18,6	8,6	конденсация водяных паров
5	12,1	за счёт солнечной радиации	12,7	18,6	11,3	конденсация водяных паров
Воздухообмен 3500 м ³ /ч (семиэтажное здание)						
-25	-2,9	догрев в калорифере	11,7	17,6	-8	опасность замерзания
-20	-0,2	догрев в калорифере	11,7	17,6	-4,9	опасность замерзания
-15	2,4	догрев в калорифере	11,7	17,6	-1,8	опасность замерзания
-10	4,9	догрев в калорифере*	11,7	17,6	1,3	опасность замерзания
-5	7,4	догрев в калорифере*	11,7	17,6	4,3	конденсация водяных паров
0	9,8	за счёт солнечной радиации	11,7	17,6	7,3	конденсация водяных паров
5	12,1	без доп.нагрева	11,7	17,6	10,3	конденсация водяных паров
Воздухообмен 4500 м ³ /ч (девятиэтажное здание)						
-25	-3,2	догрев в калорифере	11	16,9	-8,3	опасность замерзания
-20	-0,6	догрев в калорифере	11	16,9	-5,2	опасность замерзания
-15	2,1	догрев в калорифере	11	16,9	-2,1	опасность замерзания
-10	4,6	догрев в калорифере*	11	16,9	1	опасность замерзания
-5	7	догрев в калорифере*	11	16,9	4	конденсация водяных паров
0	9,4	за счёт солнечной радиации	11	16,9	7	конденсация водяных паров
5	11,7	без доп.нагрева	11	16,9	10	конденсация водяных паров

Примечание:

(*) за счёт увеличения ширины навесной панели с 3 до 12 м необходимость в дополнительном нагреве приточного воздуха в калорифере в октябре, январе, феврале и марте отпадает.

Согласно результатам теплового расчёта, эксплуатация отопительно-вентиляционной системы здания при температурах наружного воздуха «минус» 10°C и ниже чревата образованием наледи и закупоркой проходного сечения пластинчатого перекрёстно-точного теплообменника-утилизатора с последующей деформацией и разрывом его алюминиевых пластин, образующих каналы. В эти периоды года удаляемый воздух следует пропускать по обводному каналу, минуя пластинчатый теплообменник-утилизатор, и использовать нагрев приточного воздуха в калорифере до температуры, соответствующей температуре входа приточного воздуха в теплообменник-утилизатор типа «труба в трубе». В этом режиме теплота удаляемого воздуха будет утилизироваться только в теплообменнике-утилизаторе типа «труба в трубе».

Во всех режимах эксплуатации системы при температуре наружного воздуха выше «минус» 10°C и до «плюс» 5°C в отопительный период в тракте удаляемого воздуха пластинчатого теплообменника-утилизатора происходит теплообмен с выпадением конденсата из потока удаляемого воздуха. Таким образом полезно используется скрытая теплота конденсации водяных паров, содержащихся в удаляемом воздухе. При этом коэффициент теплопередачи в пластинчатом теплоутилизаторе увеличивается в среднем в 1,8 раза по сравнению с сухим теплообменом, однако в силу стремления его значения к меньшему коэффициенту теплоотдачи (со стороны тракта приточного воздуха), теплопроизводительность пластинчатого теплообменника-утилизатора возрастает незначительно.

На рис. 7 показано соотношение затрат при использовании дополнительного нагрева приточного воздуха в калорифере и экономии за счёт замещения тепловой энергии при утилизации теплоты удаляемого воздуха в теплообменниках-утилизаторах типа «труба в трубе» и пластинчатом. Результаты расчётов на рис.7 приведены при отсутствии прямого солнечного излучения.

Согласно рис. 7 в зданиях с количеством этажей 6 и более из условий подачи в помещения здания приточного воздуха с температурой не ниже 18°C и при отсутствии прямого солнечного облучения, становится возможным отказ от применения дополнительного нагрева приточного воздуха в калорифере при температурах наружного воздуха выше «минус» 5°C. В зданиях меньшей этажности это возможно при температуре наружного воздуха выше «плюс» 2°C. Наибольшее количество замещаемой тепловой энергии за счёт утилизации имеют здания с этажностью 7 и более, что и определяет целесообразность применения рассматриваемой отопительно-вентиляционной системы в высотных зданиях. Это подтверждается величинами удельных затрат на единицу полезной эксергии (рис.8).

Согласно рис. 8 термoeкономически эффективны будут отопительно-вентиляционные системы в зданиях выше 7 этажей – удельные затраты на единицу использованной эксергии для них минимальны.

В зданиях в 3 этажа и более при наличии прямого солнечного облучения навесной панели становится возможным отказ от применения дополнительного нагрева приточного воздуха в калорифере при температурах наружного воздуха выше 0°C. Экономия удельных затрат на единицу полезной эксергии за счёт использования теплоты солнечной радиации в зависимости от ширины навесной панели показана на рис. 9.

На рис. 9 видно, что при малой ширине навесной панели (до 6 м) экономия затрат за счёт использования теплоты солнечной радиации незначительна, а для декабря и января близка к нулю. В октябре и марте рассматриваемая система обеспечения параметров микроклимата может работать не только в режиме вентиляции, но и в режиме воздушного отопления за счёт повышения температуры приточного воздуха, подаваемого в помещения, снижая и сводя к минимуму нагрузку централизованной системы отопления.

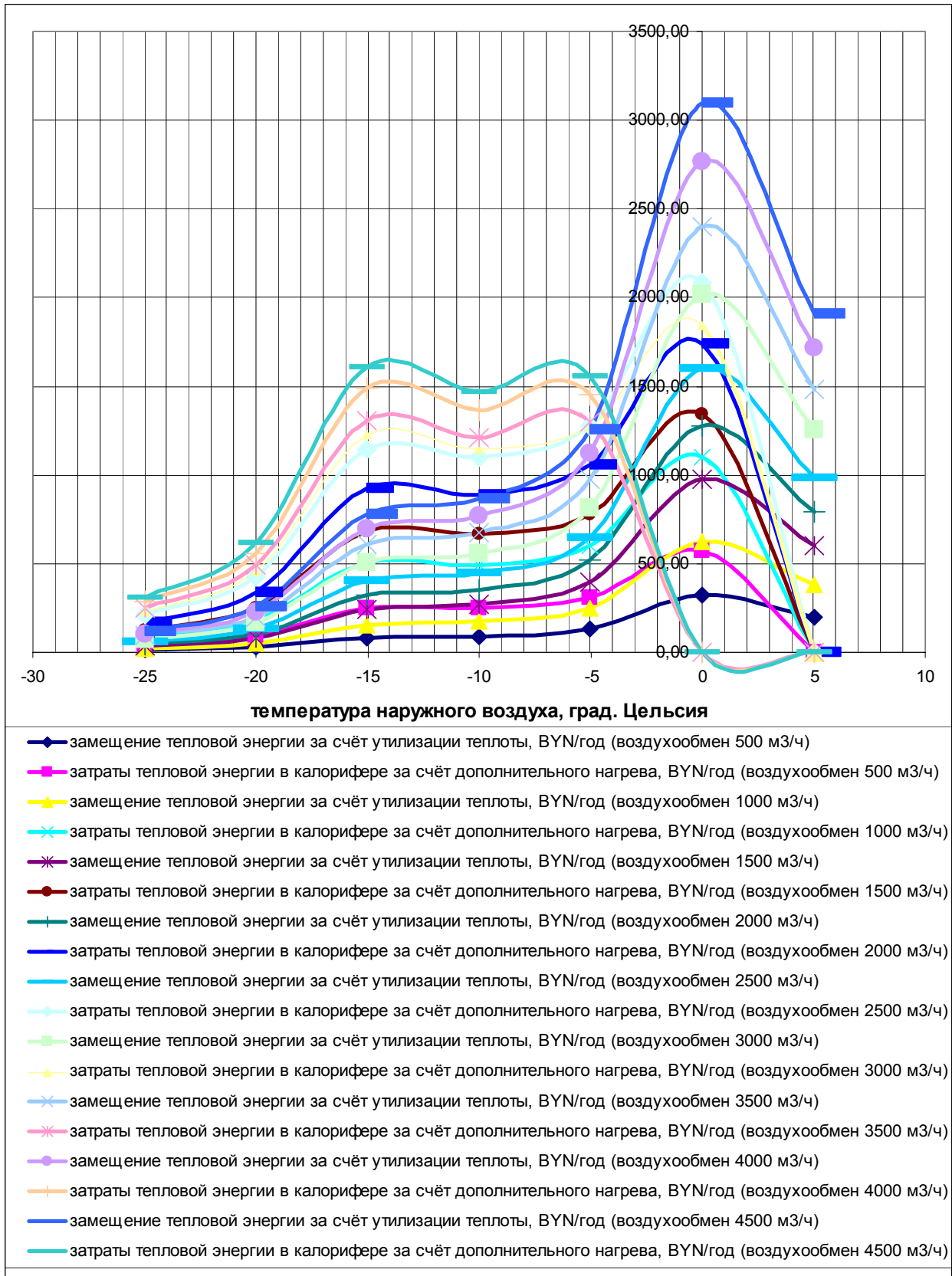


Рисунок 7 – Соотношение затрат (BYN/год) при использовании дополнительного нагрева приточного воздуха в калорифере и экономии за счёт замещения тепловой энергии (BYN/год) при утилизации теплоты удаляемого воздуха в отопительно-вентиляционной системе зданий различной этажности

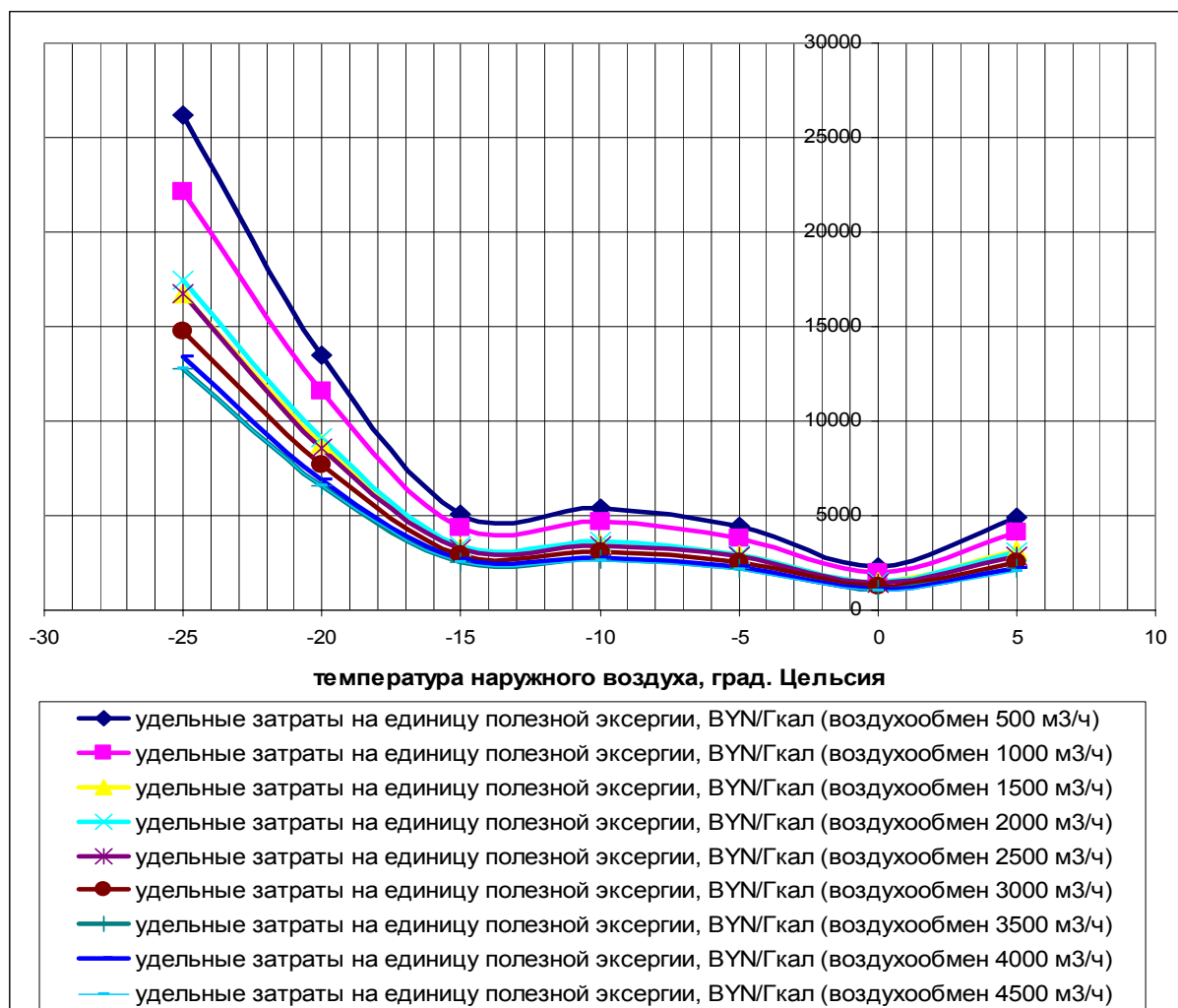


Рисунок 8 – Удельные затраты на единицу полезной эксергии, BYN/Gcal, по отопительно-вентиляционной системе зданий различной этажности

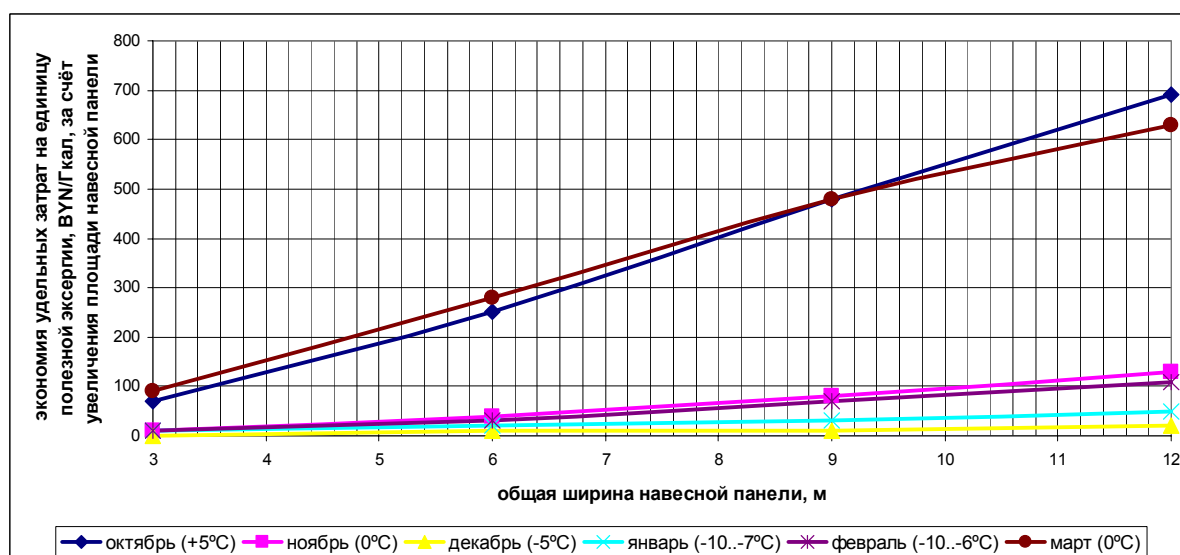


Рисунок 9 - Экономия удельных затрат на единицу полезной эксергии, BYN/Gcal, за счёт использования теплоты солнечной радиации в зависимости от ширины навесной панели по месяцам отопительного периода

Общие годовые приведённые затраты по эксергетическому полезному эффекту возрастают с увеличением этажности здания и температуры наружного воздуха (рис.10).

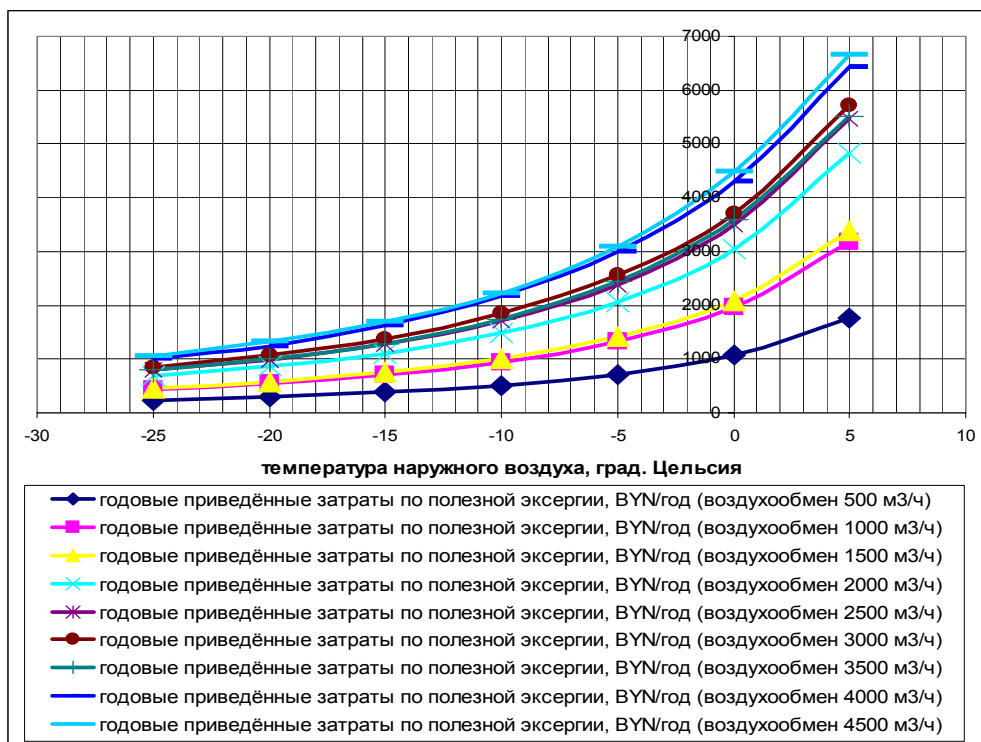


Рисунок 10 – Годовые приведённые затраты, BYN/год, по полезной эксергии для отопительно-вентиляционной системы зданий различной этажности

Первое обстоятельство объясняется возрастанием затрат на электрическую энергию в связи с ростом аэродинамического сопротивления при увеличении протяжённости приточно-вытяжной шахты (теплообменника-утилизатора типа «труба в трубе»), второе обстоятельство – уменьшением количества утилизируемой теплоты удаляемого воздуха при возрастании температуры наружного воздуха.

Таким образом, выполненные исследования могут служить руководством к совершенствованию отопительно-вентиляционных систем и оборудования зданий, поскольку настоящим доказана возможность применения утилизации теплоты удаляемого воздуха, использования теплоты солнечного излучения, а также низкопотенциальной трансмиссионной теплоты, теряемой зданием в окружающую среду. Однако следует помнить об ограниченности безопасной эксплуатации подобных систем в условиях аномально низких температур наружного воздуха, и о необходимости проведения детального технико-экономического расчёта при обосновании использования подобных систем в зданиях малой этажности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов Ю.В. Федорова С.В. Энергосберегающие технологии и мероприятия в системах энергосбережения. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 356 с.
2. Молодёжникова Л.И. Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях. Томск: из-во ТПУ, 2011. 205 с.
3. Беляев В.С., Хохлова Л.П. Проектирование энергоэкономичных и энергоактивных гражданских зданий. М.: Высш. шк., 1991. 255 с.
4. Патент РФ 9599 МПК F24 D7/00. Отопительно-вентиляционная система здания / В.И. Липко, В.А. Зафатаев, С.В. Липко. Опубл. 30.10.2013.

5. Серии домов и планировки [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://tipdoma.com/serii-domov-belarus/> (дата обращения 11.11.2017).
6. Шаргут Я., Петеля Р. Использование эксергии в экономике // Эксергетический метод и его приложения. Москва, 1967. С. 165-188.
7. Зафатаев В.А., Королёва Т.И. Thermo-economic optimization theory application to heat exchange process [Применение теории термоэкономической оптимизации к процессам теплообмена] // European and National dimension in research, Materials of the conference. P.3, Technology, Новополоцк, 2011. С. 66-69.
8. Ануфриев В.Н., Андреевко Н.А. Энергосбережение в зданиях / Пособие. Мн.: «Альтиора – живые краски», 2011. 76 с.
9. Ганжа В.Л. Основы эффективного использования энергоресурсов: теория и практика энегосбережения. Мн.: Белорус. наука, 2007. 451 с.
10. Бессонный А.Н., Дрейцер Г.А., Кунтыш В.Б. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения. Справочник. СПб.: Недра, 1996. 512 с.
11. Маньковский О.Н., Толчинский А.Р., Александров М.В. Теплообменная аппаратура химических производств. Л.: Химия, 1976. 369 с.

REFERENCES

1. Kuznecov Ju.V. Fedorova S.V. *Jenergoseberegajushhie tehnologii i meroprijatija v sistemah jenergoseberezhenija* [Energy-saving technologies and measures in energy-saving systems]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2008. 356 p.
2. Molodjozhnikova L.I. *Jenergoseberezhenie v teplojenergetike i teplotehnologijah* [Energy saving in heat power engineering and heat technologies]. Tomsk: iz-vo TPU, 2011. 205 p.
3. Beljaev V.S., Hohlova L.P. *Proektirovanie jenergojekonomichnyh i jenergoaktivnyh grazhdanskih zdanij* [The design of energy-efficient and energy-efficient civil buildings]. Moscow: High Sch., 1991. 255 p.
4. Patent RB 9599 MPK F24 D7/00. *Otopitel'no-ventiljacionnaja sistema zdanija* [Building heating and ventilation system] / V.I. Lipko, V.A. Zafataev, S.V. Lipko. Publ. 30.10.2013.
5. *Serii domov i planirovki* [Series of houses and layouts]. Available at: <http://tipdoma.com/serii-domov-belarus/> (date accessed: 11.11.2017).
6. Shargut Ja., Petelja R. *Ispol'zovanie jeksergii v jekonomike* [The use of exergy in economics] // *Jeksergeticheskij metod i ego prilozhenija*. Moscow, 1967. pp. 165-188.
7. Zafataev V.A., Koroljova T.I. Thermo-economic optimization theory application to heat exchange process [*Primenenie teorii termojekonomicheskoj optimizacii k processam teploobmena*]. European and National dimension in research, Materials of the conference. P.3, Technology, Novopolotsk, 2011. pp. 66-69.
8. Anufriev V.N., Andreenko N.A. *Jenergoseberezhenie v zdanijah* [Energy saving in buildings] / Posobie. Minsk: «Al'tiora – living colors», 2011. 76 p.
9. Ganzha V.L. *Osnovy jeffektivnogo ispol'zovanija jenergoresursov: teorija i praktika jenegoseberezhenija* [The bases of effective energy resources use: theory and practice of energy conservation]. Minsk: Belarus. science, 2007. 451 p.
10. Bessonnyj A.N., Drejcer G.A., Kuntysch V.B. *Osnovy rascheta i proektirovanija teploobmennikov vozdušnogo ohlzhdenija* [The basics of calculation and design of air-cooled heat exchangers]. Handbook. Saint Petersburg: Nedra Publ., 1996. 512 p.
11. Man'kovskij O.N., Tolchinskij A.R., Aleksandrov M.V. *Teploobmennaja apparatura himicheskikh proizvodstv* [Heat exchanging equipment of chemical manufactures]. Leningrad: Chemistry Publ., 1976. 369 p.



ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Зафатаев Виталий Анатольевич

Полоцкий государственный университет, г. Новополоцк, Беларусь, магистр технических наук, старший преподаватель кафедры теплогазоводоснабжения и вентиляции
E-mail: v.a.zafataev@pdu.by

Zafataev Vitali Anatol'evich

Polotsk state University, Novopolotsk, Belarus, Master of Technical Sciences, senior lecturer of department of heat, gas and water supply and ventilation
E-mail: v.a.zafataev@pdu.by.

Корреспондентский почтовый адрес и телефон для контактов с автором статьи:
211440, Беларусь, Витебская обл., г. Новополоцк, ул. Блохина, 29, каб.282., Зафатаев В.А.
+375 (214) 53-61-96