

УДК 697.92

Б. В. КЛЯУС, Д. В. ВЫБОРНОВ, А. В. ПЛУЖНИК

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИТОЧНЫХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СТРУЙ НА ПОКАЗАТЕЛИ МИКРОКЛИМАТА В ПОМЕЩЕНИИ

Аннотация. В данной статье рассмотрен математический аппарат, который описывает течение настилающей струи на твёрдую поверхность. Проанализированы теоретические и эмпирические исследования авторов в области применения эффекта Коанда. Рассмотрена зависимость возникновения эффекта Коанда от угла истечения струи на твёрдую поверхность и отношения геометрических параметров прямоугольного сопла, а также рассмотрен метод интенсификации при истечении потока через сопло. Рассмотрены различные отопительно-вентиляционные устройства, в которых применяется эффект Коанда. Необходимо исследовать различные воздухораспределяющие насадки для выбора наиболее целесообразных конструкций и экономии энергозатрат на обеспечение рабочей зоны приточным воздухом, а также добиваться достижения наиболее комфортных параметров микроклимата в рабочей зоне помещений, в том числе производственных помещений высотой шесть и более метров, что обуславливает мультизональность при нормировании параметров микроклимата.

Ключевые слова: воздушный поток, эффект Коанда, воздухораспределение, микроклимат.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Сложность обеспечения микроклимата в производственных помещениях с большой высотой, обусловленной технологическим процессом и перемещаемыми машинами и механизмами, заключается в первую очередь в том, что следует выделять рабочую зону в помещении, где нормируются параметры микроклимата, и оставшуюся часть, где возможны отклонения от допустимых параметров. При этом зачастую требуемая температура в рабочей зоне обеспечивается системами воздушного отопления и параметры приточных отопительно-вентиляционных струй должны иметь важное значение как с точки зрения энергозатрат на обеспечение работы систем, так и с учетом выбора наиболее рациональной схемы воздухораспределения и воздухообмена в рабочей зоне производственных помещений.

Исследованиями в области воздухораспределения занимались такие ученые как Я. А. Гусенцова, Ю. А. Аникин, И. С. Ануфриев, Д. В. Красинский, В. В. Саломатов, О. В. Шарыпов, Х. Энхжаргал, S. Dasa Shyam, M. Abdollahzadeha, Jose C. Pascoa, A. Dumasb, M. Trancossib, Valeriu Dragan, Michele Trancossi, Antonio Dumas, Shyam Sumantha Das, Jose Pascoa, A. Dumitrache, F. Frunzulia, T. C. Ionescu, S. Cutbill.

ЦЕЛЬ

Анализ влияния параметров формирования приточных вентиляционных струй на показатели микроклимата в помещении.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

В 1932 году румынский учёный Анри Коанда обнаружил, что струя жидкости, вытекающая из сопла, стремится отклониться по направлению к стенке и при определенных условиях настиляется вдоль неё, данное явление было названо эффектом Коанда, также в литературе можно столкнуться с

такими названиями как: настилающая струя, пристеночная струя и пристеночные струйные течения, которые и характеризуют это явление [1].

Эффект Коанда объясняется тем, что боковая стенка, ограничивая струю, создаёт вихрь в зоне пониженного давления и препятствует свободному поступлению воздуха к одной из сторон струи. Данное явление распространяется и на поведение струи газообразного тела.

В аэродинамике используется модель, которая основывается на слоях воздуха, имеющих одинаковую скорость движения. Данная модель демонстрирует, что трение между твёрдой поверхностью и настилающимися на неё слоями потока воздуха меньше, чем между слоями потока воздуха, не ограниченными твёрдой поверхностью. На достаточно большом расстоянии от поверхности обязательно появится слой с почти нулевой скоростью течения относительно рассматриваемой твёрдой поверхности. Данное явление указывает на то, что скорость настилающихся слоёв потока на твёрдую поверхность выше, чем на некотором удалении от поверхности. А согласно закону Бернулли, более медленные слои воздуха оказывают большее поперечное давление, чем слои, которые движутся быстрее. Воздушный поток испытывает поперечное давление со стороны более медленных в сторону более быстрых слоёв. Ввиду чего весь поток отклоняется в сторону твёрдой поверхности, которая его ограничивает.

Истечение струи на стенку часто осуществляется в области, где толщина пограничного слоя близка к толщине нагнетающего воздухораспределительного устройства или намного превосходит её. Наличие пограничного слоя на кромке воздухораспределительного устройства может оказать заметное влияние на развитие течения.

По мере удаления от начального сечения струя начинает смешиваться с турбулентным потоком, вследствие чего на стенке, вдоль которой распространяется струя, нарастает пограничный слой.

В сечении, где осуществляется смыкание струйного пограничного слоя с пограничным слоем на стенке, заканчивается начальный участок течения. При дальнейшем увеличении расстояния от воздухораспределительного устройства скорость на внешней границе пограничного слоя изменяется, стремясь достичь величины скорости турбулентного потока.

Основными параметрами, от которых зависит развитие пристеночной струи, являются: отношение скоростей, отношение плотностей, число Рейнольдса, число Маха турбулентного потока, относительная толщина пограничного слоя на кромке воздухораспределительного устройства, градиент давления во внешнем потоке dp/dx .

Область практического использования пристеночных струй очень широка. Однако наиболее часто пристеночные струи используются для создания пленочного заградительного охлаждения стенки.

На данный момент эффект Коанда в промышленности используют в основном в двух случаях (рис. 1) с внешне формируемой струей (а) и с внутренне формируемой струей (б).

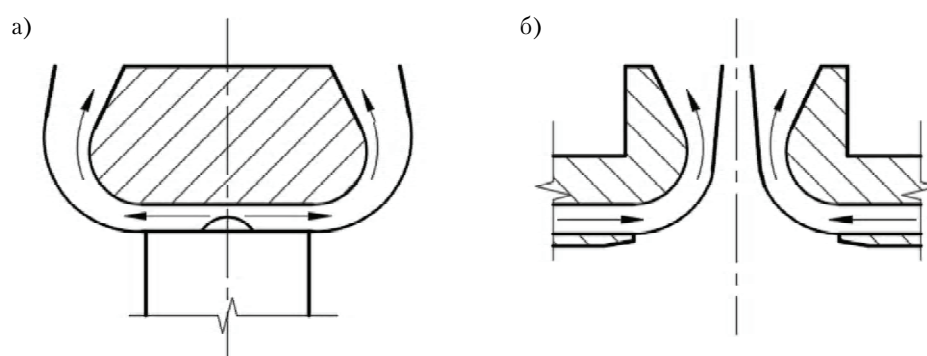


Рисунок 1 – Формирование струй вблизи обтекаемых тел вследствие эффекта Коанда [2]: а) с наружно формируемой струей; б) с внутренне формируемой струей.

Обеспечение необходимого и постоянного качества микроклимата в рабочих зонах всех помещений требует нового подхода к воздухораспределению. Правильный выбор достижения поставленных целей позволит решить множество важных как локальных, так и глобальных задач и проблем, к которым относятся: проблемы энергосбережения, рассматриваемые в работах [3, 4], а также влияние изменений параметров микроклимата рабочей зоны помещений на организм человека, описанные в работе [5].

Основным математическим аппаратом, применяемым при описании подобных моделей, является система уравнений Навье-Стокса, уравнение сохранения массы, внутренней энергии, а также уравнение состояния [2]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho U) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho U U) = \frac{\partial P}{\partial x} + \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} U) + S'_{Mx}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho V U) = \frac{\partial P}{\partial x} + \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} V) + S'_{My}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho W)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho W U) = \frac{\partial P}{\partial x} + \operatorname{div}(\mu \operatorname{grad} W) + S'_{Mz}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho e U) = -P \operatorname{div} U + \operatorname{div}(k \operatorname{grad} T) + \Phi + S'_e, \quad (5)$$

$$P = \rho RT, \quad y = C_v T, \quad (6)$$

где U, V, W – компоненты мгновенной скорости в системах координат x, y, z ;
 U – вектор скорости, м/с;
 S'_i – характеристика выбросов;
 ρ – плотность, кг/м³;
 t – время, с;
 μ – динамическая вязкость, (Н·с)/м²;
 e – внутренняя энергия на единицу массы, Дж/кг;
 P – статическое давление, Па;
 k – турбулентная кинетическая энергия, Дж/кг;
 Φ – функция рассеивания, с⁻²;
 T – термодинамическая температура, К;
 R – универсальная газовая постоянная, кДж/(кг·К);
 C_v – удельная теплоёмкость при постоянном объёме, кДж/(кг·К).

В отдельных работах [6] авторами были рассмотрены характерные особенности организации систем отопления и вентиляции в общественных помещениях. Был произведен анализ существующих требований к параметрам микроклимата помещений физкультурно-оздоровительных комплексов различного назначения. Рассмотрены основные принципы математического моделирования, основанные на решении уравнения Навье-Стокса и методе конформных отображений. Выявлены основные достоинства и недостатки данных методов. Рассмотрены водяные и электрические плинтусные радиаторы. Затронуты вопросы выбора того или иного материала при изготовлении плинтусных систем. Выявлены основные достоинства и недостатки данной системы отопления.

Методы достижения требуемой эффективности воздухораспределения и выбора воздухораспределителей хорошо известны. Однако существует проблема достижения комфорта на рабочих местах. Данный вопрос можно решить, правильно распределяя потоки воздуха. Наиболее эффективно это можно сделать благодаря эффекту Коанда. Было установлено, что эффект Коанда повышает дальность приточных струй примерно на 20 %. Для осуществления эффекта Коанда необходимо, чтобы фактическая скорость воздушной струи на выходе из диффузора была выше 2 м/с [7].

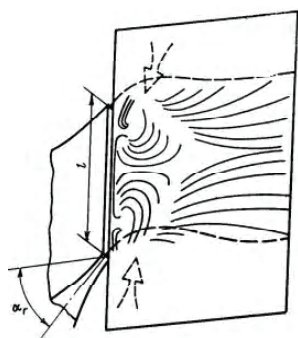


Рисунок 2 – Схема обтекания пластины.

Авторы [8] приводят результаты экспериментов, в процессе которых для струй из прямоугольных сопел изучалась зависимость степени проявления эффекта Коанда от геометрических параметров сопел и от угла выдува струй к плоской поверхности. Согласно экспериментальным данным степень проявления эффекта Коанда увеличивается с уменьшением угла выдува α_r и ростом удлинения выходного сечения сопла l/δ (рис. 2). При $\alpha_r = 20, 30$ и 40° при достижении определенных значений l/δ струя прилипает к поверхности. При $\alpha_r = 50^\circ$ струя при увеличении l/δ отклоняется в сторону пластины, но не прилипает к ней. При $\alpha_r = 70^\circ$ струя не отклоняется для всего исследованного диапазона изменения l/δ .

Интенсификацию эффекта Коанда с помощью вводимых в струю продольных вихрей описали авторы работы [9], которые рассматривают способ истечения пристеночных струй из осесимметричных сопел. Сущность способа заключается в том, что на кромках сопла располагаются вихреобразователи – источники сходящих в струю продольных вихрей [10]. Эти вихри деформируют поперечное сечение струи, придавая ей форму, близкую к прямоугольной или эллиптической, при которой и реализуется эффект Коанда. Исследуется не только возможность предложенного способа, но и изучается эффективность одновременного использования вихреобразователей и деформации струи при натекании ее на препятствие [9].

Компания REOL делится опытом использования эффекта Коанда в устройстве вихревого диффузора. Принцип работы заключается в формировании закрученной струи воздушного потока. В данном случае распределение воздуха происходит в виде струи, которая закручивается подобно вихрю. Такая особенность способствует увеличению коэффициента эжекции рабочей воздушной массы в обслуживаемой зоне относительно приточного воздушного потока. Использование вихревых диффузоров направлено на повышение интенсивности уменьшения скорости и стабилизацию температуры воздушной струи относительно температуры помещения. Вихревая подача приводит к тому, что температура струи стабилизируется через короткий промежуток времени после выхода из распределителя воздуха. Вихревые распределители воздуха имеют направляющие лопатки, благодаря которым образуются радиальные струи воздуха. При сборе в выпускной части воздухораспределителя струи оказываются в горизонтальном направлении. Центральная часть струи является зоной разрежения, в которую попадает находящаяся внизу помещения воздушная масса. В случае расположения воздухораспределителя прямо под потолочной поверхностью создается эффект Коанда, сопровождающийся концентрацией воздушных струй в самой верхней области. Находящиеся в распределителях воздуха лопатки фиксируются или же регулируются независимым образом. Если регулировка происходит независимо, появляется возможность разнонаправленной регулировки и изменения конфигурации струи воздушной массы в нужную сторону [11].

В работе [12] авторы произвели анализ устройства и принципов функционирования плинтусных систем отопления. Были рассмотрены водяные и электрические плинтусные радиаторы. Затронуты вопросы выбора того или иного материала при изготовлении плинтусных систем. Выявлены основные достоинства и недостатки данной системы отопления.

Автор статьи [14] предлагает использование принципа рециркуляции эжектируемого воздуха для снижения требуемой производительности систем аспирации с использованием эффекта Коанда (рис. 3).

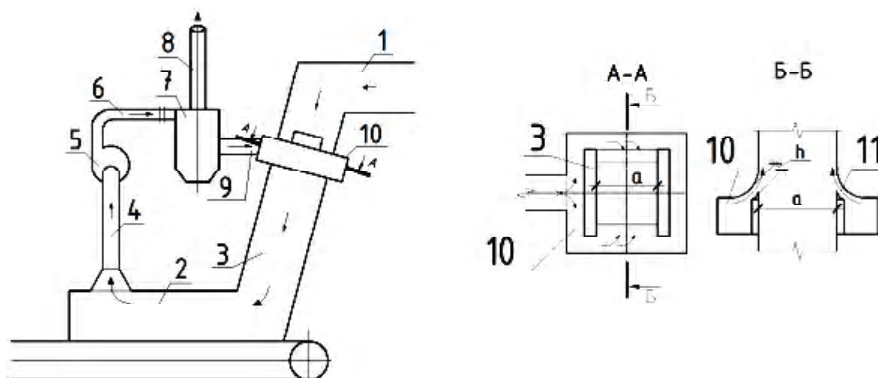


Рисунок 3 – Принципиальная схема аспирационной системы с принудительной рециркуляцией: 1 – верхнее аспирационное укрытие; 2 – нижнее укрытие; 3 – перегрузочный желоб; 4 – аспирационный патрубок; 5 – вентилятор; 6 – напорный патрубок; 7 – аппарат пылеочистки (циклон-пылеканцентратор); 8 – отвод очищенного воздуха; 9 – обводная труба; 10 – распределитель воздушно-пылевого концентрата; 11 – коандовские воздушные каналы.

В ходе проведения эксперимента были выявлены факторы, влияющие на работу рассматриваемой конструкции: радиус закругления Коандовского канала; скорость подаваемого воздуха в сечении Коандовского канала; высота Коандовского канала; ширина перегрузочного желоба [14].

Эжекционные доводчики компании «Technoheat» являются климатическими приборами, назначение которых – децентрализованный обогрев или охлаждение воздуха в помещении посредством

наружного приточного воздуха без применения вентиляторов. Это многофункциональный климатический агрегат без вентилятора. Первичный приточный наружный воздух от центрального или локального приточного агрегата через входной патрубок поступает в камеру первичного воздуха. Затем через отверстия в блоке эжектирующих сопел попадает в смесительную камеру, создавая в ней эффект эжекции. В результате эжектирующего действия воздух из помещения засасывается в смесительную камеру через теплообменник, нагревается или охлаждается в зависимости от заданного режима работы [13].

Остановимся теперь на результатах теоретического исследования пристеночных струй, распространяющихся в турбулентном потоке. Неавтомодельность течения, а также большое количество параметров, влияющих на него, затрудняет возможности получения аналитического решения, описывающего течение во всей полноте. Суть различных подходов к расчету распространения пристеночной струи интегральными методами заключается в выделении из сложного неавтомодельного поля течения областей, для которых течение можно считать условно автомодельным, рассматривать эти области отдельно, а потом соединять решения.

В [15] при расчете пристеночной струи, истекающей в затопленное пространство, предполагается, что одно и то же автомодельное решение не может описывать все поле течения. Поле течения делится на струйный слой и пристеночный слой и исследование этих областей производится раздельно.

Наиболее перспективным методом для расчета пристеночной струи, распространяющейся в турбулентном потоке, представляется метод численного интегрирования системы газодинамических уравнений, записанных в приближении пограничного слоя, и использование для замыкания этой системы какой-либо модели турбулентности, из которой можно определить входящую в систему газодинамических уравнений турбулентную вязкость.

ВЫВОД

Исходя из приведенного выше материала можно сделать вывод о необходимости экспериментального исследования различных конструкций воздухораспределителей для выбора наиболее целесообразных решений отопительно-вентиляционных систем промышленных зданий с учетом энергосбережения путем сокращения энергозатрат на комфортное воздухораспределение в рабочей зоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теория турбулентных струй [Текст] / Г. Н. Абрамович, Т. А. Гиршович, С. Ю. Крашенинников, А. Н. Секундов и др. – М.: «НАУКА», 1984. – 718 с.
2. Cutbill, S. A study of the turbulent flow of a high speed Coanda jet [Text] : a thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy Durham theses / S. Cutbill. – [N. c.] : Durham University, 1998. – 272 p.
3. Выборнов, Д. В. Проблемы энергосбережения промышленных зданий [Текст] / Д. В. Выборнов, Б. В. Кляус // Научный журнал «Вестник академии гражданской защиты», АГЗ МЧС ДНР, 2018. – Вып. 4(16). – С. 96–102.
4. Анализ потенциала энергосбережения в зданиях промышленного назначения [Текст] / Б. В. Кляус, Д. В. Выборнов, А. В. Плужник // Научно-теоретический журнал «Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова»: сб. докл. III Международ. научно-техн. конф. (29-30 ноября 2018 г., Белгород); секция «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры» Энергосбережение и энергоэффективность, экология энергетики». – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2018. – С. 141–149.
5. Влияние изменений параметров микроклимата рабочей зоны помещений на организм человека [Текст] / Б. В. Кляус, Д. В. Выборнов, А. В. Плужник // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2018. – Вып. 2018-5(133) Инженерные системы и техногенная безопасность. – С. 26–30.
6. Характерные особенности организации систем отопления и вентиляции в общественных помещениях [Текст] / Е. В. Плаксина, Е. О. Кшевская, Е. А. Лавлинская // Научный журнал «Инженерные системы и сооружения». – 2015. – № 3(20). – С. 77–83.
7. Афанасьев, С. М. Эффект Коанда для задач воздухораспределения [Текст] / С. М. Афанасьев, А. Б. Сулин // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке: Материалы VIII Международной научно-технической конференции (15–17 ноября 2017 г., Санкт-Петербург). – СПб.: Издательство: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2017. – С. 177–179.
8. Эффект Коанда при выдуве струй из прямоугольных сопел под углом к плоской поверхности [Текст] / Г. А. Ганич, Н. А. Гущина, Ю. Г. Жулев // Ученые записки ЦАГИ. – 1994. – Т XXV, № 3–4. – С. 121–125.
9. Интенсификация эффекта Коанда с помощью вводимых в струю продольных вихрей [Текст] / Ю. Г. Жулев, В. А. Макаров, А. Г. Наливайко // Ученые записки ЦАГИ. – 1994. – Том XXVII, № 1–2. – С. 100–104.

10. Наливайко, А. Г. Способ воздействия на форму и размываемость затопленной струи, истекающей из осесимметричного сопла [Текст] / А. Г. Наливайко. – М. : ЦАГИ, 1991. – 14 с.
11. Распределение воздушных потоков при помощи вихревых диффузоров [Электронный ресурс] // REOL. – Режим доступа : <http://www.reol.com.ua/gaspredelenie-vozdushnykh-potokov-pri-pomosshhi-vixrevykh-diffuzorov/>.
12. Плаксина, Е. В. Анализ особенностей плитусных систем отопления [Текст] / Е. В. Плаксина, Т. Л. Борисова // Научный журнал «Инженерные системы и сооружения». – 2014. – № 3(16). – С. 8–14.
13. Рециркуляционные энергоэффективные системы аспирации с использованием эффекта Коанда [Текст] / В. М. Киреев, В. А. Минко, А. Б. Гольцов, А. И. Болгов // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова : сборник докладов III Международной научно-технической конференции ; секция «Энергосбережение и энергоэффективность, экология энергетики». – Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 2018. – С. 141–149.
14. Доводчики эжекционные [Электронный ресурс] // TechnoHeat. – [2012–2018]. – Режим доступа : <http://technoheat.ru/ezheksionnye-dovodchiki/dovodchiki-ezheksionnye.html>.
15. Glauert, H. E. Thewalljet [Text] / H. E. Glauert // J. FluidMech. – 1956. – V. 1. – P. 625–643.

Получено 09.10.2019

Б. В. КЛЯУС, Д. В. ВИБОРНОВ, А. В. ПЛУЖНИК
ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ФОРМУВАННЯ ПРИПЛИВНИХ ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ
СТРУМЕНІВ НА ПОКАЗНИКИ МІКРОКЛІМАТУ В ПРИМІЩЕННІ
ДОО ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

Анотація. У даній статті розглянуто математичний апарат, який описує течію струменя на тверду поверхню. Проаналізовано теоретичні та емпіричні дослідження авторів в області застосування ефекту Коанда. Розглянуто залежність виникнення ефекту Коанда від кута закінчення струменя на тверду поверхню і відношення геометричних параметрів прямокутного сопла, а також розглянуто метод інтенсифікації при закінченні потоку через сопло. Розглянуто різні опалювально-вентиляційні пристрої, в яких застосовується ефект Коанда. Необхідно досліджувати різні повітродозподільні насадки для вибору найбільш доцільних конструкцій і економії енерговитрат на забезпечення робочої зони припливним повітрям, а також домагатися досягнення найбільш комфортних параметрів мікроклімату в робочій зоні приміщень, у тому числі виробничих приміщень висотою шість і більше метрів, що обумовлює мультизональність при нормуванні параметрів мікроклімату.

Ключові слова: повітряний потік, ефект Коанда, розподіл повітря, мікроклімат.

BOGDAN KLYAUS, DMITRY VYBORNOV, ANASTASIA PLUZHNIK
THE INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF THE FORMATION OF SUPPLY
VENTILATION JETS ON THE INDOOR CLIMATE
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. This article discusses a mathematical apparatus that describes the flow of a jet stream on a hard surface. The theoretical and empirical studies of the authors in the field of application of the Coanda effect are analyzed. The dependence of the occurrence of the Coanda effect on the angle of the jet on a solid surface and the ratio of the geometric parameters of a rectangular nozzle are considered, and the method of intensification when the stream flows through the nozzle is considered. Various heating and ventilation devices that use the Coanda effect are considered. It is necessary to study various air distribution nozzles to select the most appropriate designs and save energy on providing the working area with supply air, as well as to achieve the most comfortable microclimate in the working area of the premises, including production rooms with a height of six or more meters, which leads to multizonality when setting parameters microclimate.

Key words: air flow, Coanda effect, air distribution, microclimate.

Кляус Богдан Валентинович – ассистент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергоресурсосбережение в системах теплогазоснабжения.

Выборнов Дмитрий Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергосбережение в системах теплоснабжения, использование теплонасосных технологий.

Плужник Анастасия Вадимовна – ассистент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергоресурсосбережение в системах теплогазоснабжения.

Кляус Богдан Валентинович – ассистент кафедры теплотехники, теплогазопостачання та вентиляції ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергоресурсозбереження в системах теплогазопостачання.

Выборнов Дмитро Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергозбереження в системах теплопостачання, використання теплонасосних технологій.

Плужник Анастасія Вадимівна – ассистент кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергоресурсозбереження в системах теплогазопостачання.

Klyaus Bogdan – Assistant, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: energy and resource saving in heat and gas supply systems.

Vybornov Dmitry – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: heat saving in systems of a heat supply with usage of heat pumps technologies.

Pluzhnik Anastasia – Assistant, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: energy and resource saving in heat and gas supply systems.