

УДК 628.511

С. М. ОРЛОВ, Б. Р. РОМАНЕНКО, А. Я. ОРЛОВА

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ПЫЛИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИКЛОНОВ

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос электризации строительной пыли, находящейся в достаточно сильном вихревом потоке. Рассматривая такие явления, как торнадо, грозовые тучи, приходим к выводу, что в торнадо происходит сильнейшая электризация пыли, которая сопровождается мощными разрядами молний, особенно в основании хобота торнадо, где присутствует большое количество наэлектризованной пыли. При прохождении хобота торнадо могут загораться лампочки накаливания, что подтверждает теорию присутствия сильных электромагнитных процессов в вихревом потоке наэлектризованной пыли. Установлено, что электрический потенциал строительной пыли в циклоне может достигать единиц и даже десятков кВ. Таким образом, энергия, затраченная на создание в циклоне интенсивного вихревого потока, используется не полностью (используется только центробежная сила, создаваемая вихревым потоком). Сопутствующее явление, как электризация строительной пыли, не используется. Сделан вывод, что использование этого явления, может значительно повысить энергоэффективность циклонной очистки.

Ключевые слова: циклон, торнадо, статическое электричество, электромагнитное поле.

Защита атмосферы – социальная и экономическая проблема, неразрывно связанная с задачей создания комфортных условий для жизни и работы человека.

Большинство технологических процессов в промышленности строительных материалов сопровождается пылегазовыми выбросами, содержащими ценные полупродукты, которые безвозвратно теряются. Поэтому очистка и обезвреживание промышленных выбросов имеют санитарное и экономическое значение.

Циклоны являются наиболее характерными представителями сухих инерционных пылеуловителей, которые, как правило, имеют простую конструкцию, обладают большой пропускной способностью и несложны в эксплуатации. Ввиду этих преимуществ циклоны получили широкое распространение [1–4].

В циклонах наиболее совершенных конструкций можно достаточно полно улавливать частицы размером от 10 мкм и более, однако наблюдается проскок достаточно крупных частиц, поэтому зачастую циклоны используются в качестве первой ступени очистки перед аппаратами тонкого пылеулавливания.

В настоящее время имеется большое количество исследований по повышению эффективности циклонов, а также создано значительное количество видов циклонов, однако добиться, чтобы циклоны использовались, как самостоятельный аппарат очистки газа от пыли не удалось, поэтому циклоны, как правило, используются для предварительной очистки газа от пыли.

Для повышения эффективности циклонов ведутся работы по совмещению нескольких видов пылеулавливания в комбинированном аппарате.

Известно множество конструкций аппарата, представляющего комбинацию рукавного фильтра с трубчатым электрофильтром. Такое сочетание позволяет повысить скорость фильтрации и снизить гидравлическое сопротивление аппарата и др.

Известны также комбинированные аппараты, называемые центробежными электрофильтрами или электроциклонами. В общем корпусе размещен центробежный пылеуловитель – циклон и электрофильтр.

Различают два вида электроциклонов по месту расположения электрической части. В некоторых конструкциях коронирующие электроды размещены в цилиндрической части циклона, а в аппаратах второго типа коронирующие электроды размещены в выхлопной трубе.

Анализ работ, посвященных центробежным электрофильтрам, позволяет сделать вывод о том, что более предпочтительными являются электрофильтры второго типа [5].

В работе [6] получена формула радиальной скорости частицы при совместном действии центробежных и кулоновских сил для наиболее неблагоприятного момента вхождения частицы пыли равного $0,3R_2$:

$$\omega_p = \frac{id}{3\pi\mu K} \left[1 - \left(\frac{R_1}{0,3R_2} \right)^2 \right] + \frac{2\varepsilon_0 d}{3\mu} \left(E \frac{R_1}{0,3R_2} \right)^2 + \frac{d^2 \rho \omega^2 0,3R_2}{18\mu}, \quad (1)$$

где R_2 – внутренний радиус выхлопной трубы циклона.

Анализ формулы (1) [6] показывает, что при малом радиусе нахождения частицы в межэлектродном пространстве преобладает кулоновская сила, а по мере увеличения радиуса возрастает влияние центробежной силы. Это очень важно, поскольку в центре вихря полностью отсутствует центробежная сила, а разрежение максимальное, поэтому в циклонах наблюдается проскок даже очень крупных частиц пыли, попавших в центр вихря. Также роль кулоновской силы возрастает с уменьшением диаметра частицы. Так для частиц пыли менее 1 мкм кулоновская сила преобладает практически во всем межэлектродном пространстве.

Но, несмотря на существенные преимущества электроциклонов по сравнению с циклонами, электроциклоны широкого распространения не получили. Это объясняется значительным увеличением затрат на обслуживание и увеличение затрат энергоресурсов на создание электрического поля, что при росте цен на энергоресурсы в настоящее время недопустимо.

Настоящая работа посвящена поиску новых направлений повышения эффективности циклонов за счет более полного использования энергии закрученного потока. В настоящее время энергия, затраченная на закрутку газового потока, используется только в виде центробежных сил, действующих на частицу пыли в вихревом газовом потоке. Однако частицы пыли, попадая в циклоне в мощный вихревой поток и взаимодействуя с молекулами газа и стенок циклона, получают достаточно сильный статический заряд.

Основные причины появления статического электричества:

- контакт между двумя материалами и их отделение друг от друга (включая трение, намотку, размотку и пр.);
- быстрый температурный перепад (например, в момент помещения материала в нагревательный шкаф, такое природное явление как извержение вулканов, где происходят мощные грозовые разряды);
- радиация с высокими значениями энергии, ультрафиолетовое излучение, рентгеновские X-лучи, сильные электрические поля;
- резательные операции (например, на раскроечных станках или бумагорезальных машинах);
- поверхностный контакт и разделение материалов, возможно, являются наиболее распространенными причинами возникновения статического электричества.

Электризация пыли в основном происходит при размоле твердых веществ, транспортировании их по пылепроводам. При движении пыли с воздухом пылинки способны электризоваться. Так, заряды зерна в дробилках достигают 10–11 кВ, а на вальцах – 5–7 кВ. Знак заряда, приобретаемый пылью, зависит от диэлектрической постоянной пыли и того тела, о которое происходит трение. Величина заряда статического электричества зависит от скорости движения пыли (силы трения), степени дисперсности пыли, величины удельного электрического сопротивления и от влажности пыли и воздуха. Чем больше скорость движения пыли и больше степень дисперсности, тем больше величина заряда статического электричества. Например, потенциал заряда пыли каменного угля дисперсностью 200 мкм при скорости движения пылевоздушной смеси 2,25 м/с составляет 6 кВ. При увеличении скорости движения до 3,5 м/с потенциал заряда возрастает до 7,5 кВ. В циклоне скорость может достигать до 20 м/с и более, поэтому степень электризации пыли в циклоне достигает значительных величин, вплоть до 102 кВ.

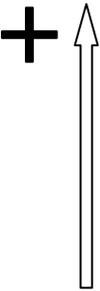
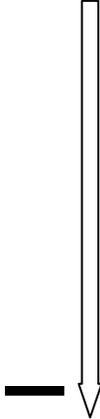
При транспортировании пыли по трубопроводу потенциал зарядов изменяется по его сечению. Наиболее низкий потенциал наблюдается вблизи стенок заземленного трубопровода, а наиболее

высокий – на расстоянии 2 см от стенок. По величине удельного электрического сопротивления можно судить об опасности электризации пыли. При удельном электрическом сопротивлении меньше 10^4 Ом·см пыль практически не опасна в отношении электризации.

Пыль, получаемая при производстве строительных материалов, относится ко второй группе по величине удельного электрического сопротивления от 10^4 до $2 \cdot 10^{10}$ Ом·см, которая хорошо электризуется.

Для того, чтобы ориентировочно узнать насколько будет электризоваться пыль, полученная при производстве строительных материалов, существует трибоэлектрическая шкала (табл.).

Таблица – Трибоэлектрическая шкала

	Атмосфера
	Кожа руки
	Кроличий мех
	Стекло
	Плексиглас
	Слюда
	Волосы
	Нейлон
	Овечий мех
	Свинец
	Шелк
Нейтральный ряд	Алюминий
	Бумага
	Хлопок
	Сталь
	Дерево
	Янтарь
	Эбонит
	Никель, медь
	Цинк
	Латунь, серебро
	Золото, платина
	Сера
	Ацетатный шелк
	Полиэфир
	Целлулоид
	Полиуретан
	Полистирол
	Полиэтилен
	Полипропилен
	Поливинилхлорид
Полиэтилентетрафталат, лавсан	
Кремний	
Политетрафторэтилен (тефлон), фторопласт	
Эбонит	

Чем выше располагается материал на шкале, тем сильнее он заряжается. В верхней части шкалы располагаются материалы с положительными зарядами, а в нижней – с отрицательными.

Действует и другая закономерность, чем больше разнесены между собой материалы, тем более мощным станет заряд. Так в верхней части шкалы располагается атмосфера и руки человека, а в нижней кремний, эбонит, т. е. максимально мощный заряд возникнет при контакте атмосферы и кремния. По электрическим характеристикам кремний наиболее близко стоит с материалами, применяемыми в строительстве. Таким образом, при взаимодействии пыли и атмосферы пыль строительных материалов получает мощный электрический заряд, который тем выше, чем выше скорость вихревого потока в циклоне.

Для примера рассмотрим обыкновенные грозовые облака. Эти природные электрические машины, как оказалось, способны накапливать потенциалы в миллиарды вольт, а общая мощность средней грозы вполне сравнима с взрывом нескольких термоядерных бомб. И все это – результат всего

лишь взаимодействия капелек и льдинок, которые держатся в воздухе на восходящих потоках. Часто грозовые облака сопровождаются торнадо. При прохождении торнадо зажигаются выключенные лампочки накаливания, что свидетельствует о наличии в нем сильного переменного магнитного поля, которое создают заряженные частицы пыли, находясь в вихревом потоке торнадо, особенно в основании торнадо. В основании торнадо наблюдаются также мощные разряды молний, которые объясняются тем же явлением.

Гидравлические процессы в циклоне и торнадо очень схожи [7]. Различие только в масштабах. Электрические процессы в торнадо также аналогичны электрическим процессам в циклонах. Различие состоит, как и в первом случае, в масштабах процесса и ограничением заряженных частиц пыли в вихревом потоке заземленными металлическими стенками циклона и отсутствием сильно электризованного материнского облака, поэтому электрические процессы в циклоне необходимо рассматривать как движение заряженных частиц в вихре.

В настоящее время отсутствует, какая-либо теория электромагнитного состояния пылевого коктейля внутри циклона. Имеется электромагнитная теория торнадо (смерча) [8–9]. При расчете магнитных полей учитывались не только токи проводимости, но и конвективный ток вращающихся капель. Это связано с отсутствием азимутального тока проводимости вследствие цилиндрической симметрии плазменного столба.

Уравнения для магнитных полей имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (rB_r) + \frac{dB_z}{dz} &= 0; \\ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dB_r}{dr} \right) - \frac{B_r}{r^2} + \frac{d^2 B_z}{dz^2} &= \frac{4\pi dj_\varphi}{cdz}, \\ j_r &= \sigma E_r, \quad j_z = \sigma E_z, \\ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dB_\varphi}{dr} \right) - \frac{B_\varphi}{r^2} + \frac{d^2 B_\varphi}{dz^2} &= \frac{4\pi}{c} \left(\frac{dj_z}{r} - \frac{dj_r}{dz} \right); \\ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dB_\varphi}{dr} \right) + \frac{d^2 B_z}{dz^2} &= \frac{4\pi}{c} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} (rj_\varphi). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь ρ_d и V_φ – объемная плотность и скорость вращения капель. Численное исследование показало, что для значений $h/a \geq 0,5$ радиальные градиенты токов существенно превышают осевые, что позволило упростить решение задачи. В итоге для магнитных полей получены следующие выражения: $B_r = 0$,

$$B_z(r, z) = \begin{cases} \frac{4\pi}{c} \int_{R_t}^{\infty} \rho_d V_\varphi dr, & 0 \leq r \leq R_t \\ \frac{4\pi}{c} \int_r^{\infty} \rho_d V_\varphi dr, & R_t \leq r \leq \infty \end{cases}, \quad 0 \leq z \leq h, \quad (3)$$

где R_t – внутренняя граница капельной стенки. Это есть магнитное поле соленоида, образованного вращающимися заряженными каплями (капельный соленоид). Азимутальная компонента магнитного поля определяется следующей формулой:

$$B_\varphi(r, z) = -\frac{4\pi}{cr} \begin{cases} \int_0^r x dx \int_x^{R_E} \left(\frac{dj_z}{dt} - \frac{dj_r}{dz} \right) dt, & 0 \leq r \leq R_E \\ \int_0^{R_E} x dx \int_x^{R_E} \left(\frac{dj_z}{dt} - \frac{dj_r}{dz} \right) dt, & R_E \leq r \leq \infty \end{cases}, \quad (4)$$

где R_E – граница разряда. Компоненты силы Лоренца, действующей на плазму, находились по формулам

$$F_r = -\frac{1}{c} j_z B_\varphi, \quad F_z = \frac{1}{c} j_r B_\varphi, \quad F_\varphi = -\frac{1}{c} j_r (B_0 + B_z), \quad (5)$$

где B_0 – вертикальная компонента геомагнитного поля.

В выражении для азимутальной (вращающей) силы учитывалось и магнитное поле капельного соленоида. По этим формулам проводился анализ радиальных и осевых зависимостей азимутального магнитного поля и сил в плазме вихря под облачными зарядами на различных относительных высотах (рис. 1–4).

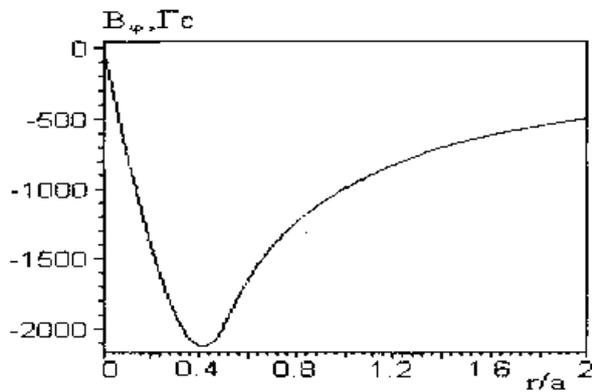


Рисунок 1 – Азимутальное магнитное поле на поверхности земли ($h/a = 0,5$; $Q = -64,2$ Кл; $a = 1$ км).

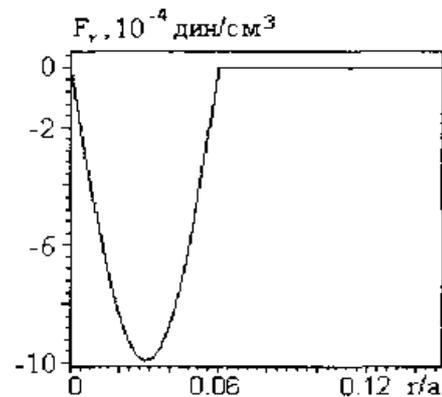


Рисунок 2 – Плотность радиальной силы в нижнем основании вихря ($h/a = 1,3$; $Q = -103,3$ Кл; $a = 1$ км).

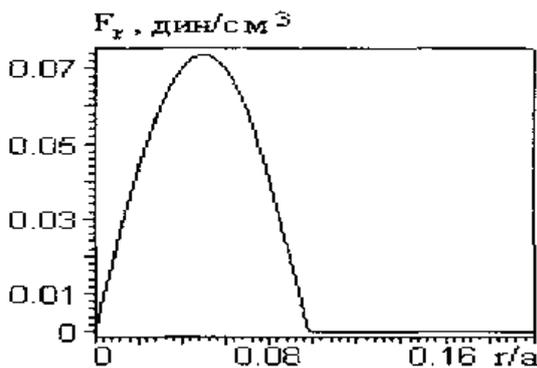


Рисунок 3 – Плотность радиальной силы в нижнем основании вихря ($h/a = 0,5$; $Q = -63,3$ Кл; $a = 1$ км).

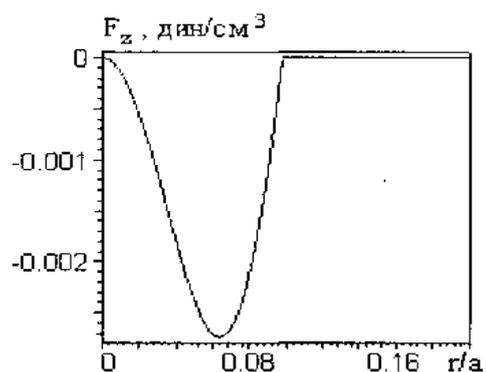


Рисунок 4 – Плотность осевой силы в нижнем основании вихря ($h/a = 0,5$; $Q = -63,3$ Кл; $a = 1$ км).

Видно, что радиальная сила здесь отрицательна, т.е. она сжимает плазму, как в z-пинче. Это говорит о том, что в генерации азимутального магнитного поля основную роль играет осевой ток. С уменьшением относительной высоты заряда становится существенной неоднородность радиального тока по высоте. Радиальная сила при этом может изменить свой знак и приводить не к сжатию плазмы, а к разрежению в ней (рис. 3).

Осевая сила направлена от облака к земле. Непосредственно под зарядом она многократно усилена и приводит к образованию воронки вихря.

Полученная теория [8–9] мало пригодна для описания электромагнитных процессов в циклоне. Помимо масштабов процесса, вихрь в циклоне ограничен металлическими стенками, отсутствует материнское облако с большим статическим зарядом, однако как методика вполне может пригодиться. В конечном итоге нам нужно установить уровень статического заряда по сечению циклона, направление и напряженность электромагнитного поля, создаваемого заряженными частицами пыли в циклоне. Используя выше перечисленные явления, необходимо изыскать способ повышения энергоэффективности циклона без применения дополнительных источников энергии.

ВЫВОДЫ

1. Сделано предположение, что пыль в циклоне, попадая в сильный вихревой поток подвержена электризации.

2. Наэлектризованная пыль, находящаяся в вихревом потоке, создает электромагнитное поле, которое при рациональном использовании может значительно снизить энергозатраты на очистку газов от пыли в циклонах.

3. Установлено, что работа по изучению электростатических и электромагнитных процессов, протекающих в циклоне, имеет большой практический интерес, так как позволит более полно использовать энергию, затраченную на закрутку газового потока, а, следовательно, повысить энергоэффективность циклонной очистки газов от пыли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пылеулавливание в металлургии [Текст] / Под ред. А. А. Гурвица. – М. : Металлургия, 1984. – 336 с.
2. Луговский, С. И. Совершенствование систем промышленной вентиляции [Текст] / С. И. Луговский, Г. К. Дымчук. – М. : Стройиздат, 1991. – 136 с.
3. Русанов, А. А. Справочник по пыле- и золоулавливанию [Текст] / Под ред. А. А. Русанова. – М. : Энергия, 1975. – 296 с.
4. Алиев, Г. М. Устройство и обслуживание газоочистных и пылеулавливающих установок [Текст] / Г. М. Алиев. – М. : Металлургия, 1988. – 368 с.
5. Куцев, Л. А. Интенсификация процессов улавливания твердой и жидкой фазы аэрозолей при использовании силовых полей [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Л. А. Куцев. – Белгород, 2004. – 41 с.
6. Орлов, С. М. Исследование усовершенствованного циклона как первой ступени очистки газа от пыли [Текст] / С. М. Орлов, Э. И. Дмитроченкова // Вісті автомобільно-дорожнього інституту. – Горлівка, 2011. – № 1. – С. 188–195.
7. Орлов, С. М. Исследование целесообразности применения циклонов «правого» и «левого» направления вращения в северном полушарии Земли [Текст] / С. М. Орлов, А. Я. Орлова // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2014. – Выпуск 2014-5(190). – С. 29–35.
8. Боев, А. Г. Электромагнитная теория смерча [Текст]. I ч. Электродинамика вихря / А. Г. Боев // Радиофизика и радиоастрономия. – 2009. – Т. 14, № 2. – С. 121–149.
9. Боев, А. Г. Плазменная теория смерча [Текст] / А. Г. Боев // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения». – 2008. – № 6. – С. 133–138.

Получено 02.09.2017

С. М. ОРЛОВ, Б. Р. РОМАНЕНКО, А. Я. ОРЛОВА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРИЗАЦІЇ ПИЛУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЦИКЛОНІВ ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

Анотація. У статті розглянуто питання електризації будівельного пилу, що знаходиться у досить сильному вихровому потоці. Розглядаючи такі явища, як торнадо, грозові хмари, приходимо до висновку, що в торнадо відбувається найсильніша електризація пилу, яка супроводжується потужними розрядами блискавок, особливо в основі хобота торнадо, де присутня велика кількість наелектризованого пилу. При проходженні хобота торнадо можуть засвічуватися лампочки розжарювання, що підтверджує теорію присутності сильних електромагнітних процесів у вихровому потоці наелектризованого пилу. Встановлено, що електричний потенціал будівельного пилу в циклоні може досягати одиниць і навіть десятків кВ. Таким чином, енергія, витрачена на створення в циклоні інтенсивного вихрового потоку, використовується не повністю (використовується тільки відцентрова сила, створювана вихровим потоком). Супутнє явище, як електризація будівельного пилу, не використовується. Зроблено висновок, що використання цього явища, може значно підвищити енергоефективність циклонічного очищення.

Ключові слова: циклон, торнадо, статична електрика, електромагнітне поле.

STANISLAV ORLOV, BORIS ROMANENKO, ALLA ORLOVA
PROSPECTS FOR THE USE OF ELECTRIFICATION OF DUST TO INCREASE
THE EFFICIENCY OF THE CYCLONES

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

Abstract. In the article the question of electrification of construction dust, which is in a sufficiently strong vortex flow has been considered. Considering such phenomena as tornadoes, storm clouds, we come to the conclusion that a tornado occurs the strongest electrification of dust, which is accompanied by a powerful lightning discharge, especially at the base of the trunk of the tornado, where there is a large number of electrified dust. When passing the trunk of the tornado, light bulb filament can light up that supports the theory of the presence of strong electromagnetic processes in the vortex flow of electrified dust. It is established that the electric potential of construction dust in the cyclone can reach units and even tens of kV. Thus, the energy expended on the creation of the cyclone is an intense vortex flow, is not fully used (only used the centrifugal force created by the vortex flow). A concomitant phenomenon of electrification construction dust, is unused. It is concluded that the use of this phenomenon, can greatly increase the energy efficiency of a cyclone cleaning.

Key words: cyclone, tornadoes, static electricity, electromagnetic field.

Орлов Станислав Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации и электроснабжения в строительстве ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: автоматизация процессов и аппаратов систем ТГВ.

Романенко Борис Романович – магистрант кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергоресурсосбережение в системах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха.

Орлова Алла Яковлевна – старший преподаватель кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: вентиляция и кондиционирование помещений жилых и общественных зданий.

Орлов Станіслав Михайлович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та електропостачання в будівництві ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: автоматизація процесів і апаратів систем ТГВ.

Романенко Борис Романович – магістрант кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергоресурсозбереження в системах опалення, вентиляції та кондиціонування повітря.

Орлова Алла Яківна – старший викладач кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: вентиляція і кондиціонування приміщень житлових і громадських будівель.

Orlov Stanislav – Ph. D. (Eng), Associate Professor, Electrical Technology and Automatics in Engineering Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: automation of processes and apparatus of DVT systems.

Romanenko Boris – master's student, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: energy and resource saving in heating, ventilation and air conditioning systems.

Orlova Alla – senior teacher, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: ventilation and air conditioning of residential and public buildings.