

УДК 536.24

**В. Н. КАЧАН, А. В. ЛУКЬЯНОВ, Е. В. КОНОПАЦКИЙ**

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

**ТЕОРИЯ РАСЧЁТА ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА В ЖАРОТРУБНЫХ  
КОТЛОАГРЕГАТАХ С ТУПИКОВОЙ ТОПКОЙ**

**Аннотация.** Предложена оригинальная методика геометрического моделирования теплового баланса между топочной и конвективной частями жаротрубного котлоагрегата малой мощности, которая позволяет выполнять тепловой расчёт. Путём регулировки месторасположения горелки в топочной части котла можно достигать необходимую мощность и максимальный КПД при использовании топлива с разной степенью теплоты сгорания. В основу такого расчёта положено выделение четырех объёмов (зон) нахождения продуктов сгорания в топочной части котлоагрегата. В первой (основной) и второй (торцевой) зонах топки всегда аккумулируется половина суммарной теплоты сгорания топлива (геометрически это ловушка теплоты). За счёт третьей зоны обеспечивается оптимальный коэффициент интегрального теплопереноса (регулировка) в топочной части, а также заданная паспортная мощность и КПД котла. Четвёртая зона определяет остаточную мощность и КПД, достигаемую в конвективной части котлоагрегата.

**Ключевые слова:** коэффициент интегрального переноса, тепловой баланс, жаротрубный котлоагрегат, конвективная часть, топочная камера, ядро факела, теплота сгорания топлива, зоны теплопередачи.

**ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Среди котельных установок небольшой мощности широкое распространение получили жаротрубные котлоагрегаты. При их эксплуатации иногда возникает необходимость использования различных видов топлива, например газа с разной калорийностью. В таких условиях жаротрубный котлоагрегат требует дополнительной настройки для обеспечения необходимой мощности и максимального КПД, которых часто не удаётся достигнуть из-за изменения (перекоса) теплового баланса между топочной и конвективной частью котла. Т. е. возникает такая ситуация, при которой для достижения необходимой мощности требуется изменение конструктивных элементов конвективной части жаротрубного котлоагрегата (например, количества и диаметра конвективных труб). В некоторых случаях эта проблема может быть решена правильной настройкой горелки. Однако такая настройка может изменяться лишь в небольших пределах и потому подходит для тех видов топлива, которые имеют близкие значения по калорийности. Здесь следует отметить, что по данным [1] на постсоветском пространстве используется около 40 газопроводов различных месторождений с различным составом газа и, следовательно, с различной низшей теплотой сгорания, которая варьируется от 28,3 до 47,02 МДж/м<sup>3</sup>. Такие перепады низшей теплоты сгорания невозможно нивелировать с помощью настройки только горелки. Тем не менее, эта проблема может быть решена и без внесения изменений в конструкцию котла с помощью регулировки местоположения ядра факела внутри топочной части жаротрубного котлоагрегата.

**АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ**

Исследованиям способов моделирования и расчёта жаротрубных котлоагрегатов посвящено достаточное количество работ. Например, в работе [1] используется нормативный расчёт теплогенерирующих установок [2–3]. Эти исследования представляют собой комплексный подход к теплово-му, конструктивному, поверочному и другим расчётам жаротрубного котлоагрегата. В работе [4] был

предложен подход к повышению эффективности жаротрубного теплогенератора за счёт улучшения теплообмена в конвективной части. Численные исследования аэродинамики топочной среды жаротрубных котлоагрегатов были описаны в работах [5–7]. Также исследованию газовых горелок и соответствующих им факелов посвящены работы [8–10]. Однако все вышеперечисленные исследования подразумевают расчёт конкретного жаротрубного котлоагрегата под конкретный вид топлива с конкретной низшей теплотой сгорания и не дают никаких рекомендаций по эксплуатации котла в условиях отличных от расчётных (например, при использовании топлива с разной калорийностью).

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Основным показателем, характеризующим интенсивность теплообмена в топке котлоагрегата, является коэффициент интегрального теплопереноса. В соответствии с методикой поверочного расчёта теплообмена в поверхностях нагрева жаротрубных реверсивных котлоагрегатов, предложенной профессором А. В. Лукьяновым [1], коэффициент интегрального переноса вычисляется по следующим эмпирическим формулам:

$$K_T = \frac{1}{1 + 0,043 N^{0,55} l_T^{-1,3} \left( \frac{l_T}{d_T} \right)^{-0,11}}, \quad (1)$$

или

$$K_T = \frac{1}{1 + 0,086 \frac{\sigma}{\xi} \text{Re}^{0,55} \text{Bu}^{-0,86} \left( \frac{l_T}{d_T} \right)^{-0,75}}. \quad (2)$$

Причём формула (1) для определения  $K_T$  является более предпочтительной для реверсивных (тупиковых) топок, поскольку вместо критериев подобия (Рейнольдса  $\text{Re}$  и Бугера  $\text{Bu}$ ) используются натуральные значения мощности котлоагрегата  $N$ , длины  $l_T$  и внутреннего диаметра  $d_T$  топки. При этом формула (2) больше подходит для прямоточных котлоагрегатов. Кроме того, коэффициент интегрального переноса  $K_T$  можно определить по номограмме (рис. 4.1 [1]), полученной на основе формулы (1).

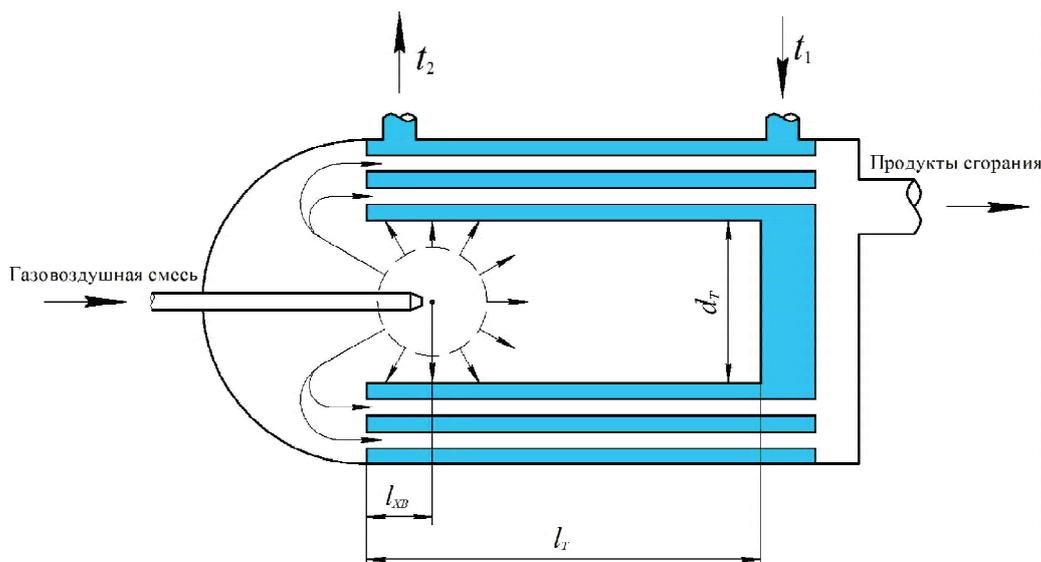
Как видно, формулы (1) и (2) являются эмпирическими, и потому область их применения ограничивается рамками натурных исследований, которые послужили исходными данными для создания эмпирических формул, и не могут быть эффективно использованы при проектировании других типоразмеров жаротрубных котлов.

В данной работе предлагается теоретический подход к определению коэффициента интегрального переноса  $K_T$ , основанный на изучении формы факела и места расположения горелки в топке котла.

По данным многих исследователей [5–10] предполагается, что форма факела близка к сфере или эллипсоиду в зависимости от скорости подачи газозооушной смеси на выходе её из горелки. На рисунке 1 показана форма факела и возможные траектории лучей переноса теплоты излучением по длине топки жаротрубного котлоагрегата.

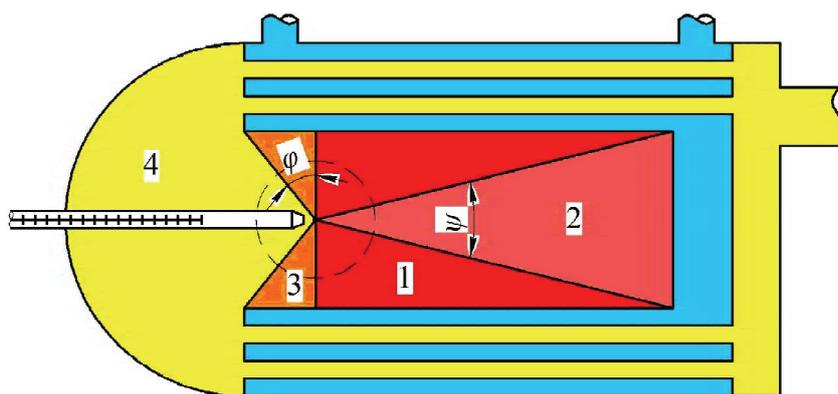
В ядре факела (т. е. на поверхности шара) на расстоянии 10...20 мм происходит взрывное горение метанозооушной среды. Это расстояние определяется периодом индукции взрыва, время которого 2...3 мс для природного газа (80...95 % которого составляет метан  $\text{CH}_4$ ), до 40 мс для жидкого топлива (мазут) и 50...240 мс для пылеугольной среды. При этом с поверхности шара происходит тепловое излучение. Причём в зависимости от вида топлива на поверхности шара достигается температура 1 600...2 100 °С.

Если же факел имеет форму эллипсоида, то эта форма формируется позднее за счёт разности скоростей (давлений) потоков продуктов сгорания на оси факела и пристенного реверсивного потока у стенки топки. Исходя из этого, в излучающем процессе форма факела практически никакой роли не играет. Важно то, что распространение тепла идёт от поверхности сферы во все стороны, т. е. на все 360 градусов ( $2\pi$ ) как в широтном, так и в долготном направлениях. Тогда для излучающей сферы радиуса  $R$  площадь  $S = 4\pi R^2$ . В данном случае ядро факела можно отождествить с Солнцем, которое со своей поверхности равномерно излучает тепло, но проходя через слои атмосферы разной структуры и плотности, а также разного угла достижения лучей поверхности Земли (периода года – зима, лето). В результате такого облучения наблюдается неравномерное распределение теплоты на поверхности Земли.



**Рисунок 1** – Форма ядра факела и траектории лучей теплопереноса излучением в топке тупикового жаротрубного котла, где  $l_T$  – длина и  $d_T$  – диаметр топки;  $t_1$  и  $t_2$  – входная и выходная температура теплоносителя – воды.

Выделим в топке 4 зоны (рис. 2):



**Рисунок 2** – Зоны теплопереноса в топке.

- 1 зона (показана красным цветом) – основная цилиндрическая;
- 2 зона (показана розовым цветом) – торцевая;
- 3 зона (показана оранжевым цветом) – хвостовая;
- 4 зона (показана жёлтым цветом) – зона входной дверцы.

На основную и торцевую зоны приходится половина площади поверхности излучающей сферы  $S_1 = 2\pi R^2$ . На зону входной дверцы приходится площадь сферического сегмента  $S_3 = 2\pi rh$ , где  $r = R \cos \varphi$ , а  $h = R(1 - \sin \varphi)$ . На хвостовую зону приходится остаток площади поверхности сферы факела в топке  $S_2 = 2\pi(R^2 - rh)$ .

Поскольку с поверхности сферы (ядра) равномерно излучается тепло, выдвинем гипотезу о том, что существует прямо пропорциональная зависимость между площадью поверхности сферы факела и количеством излучаемой теплоты. В соответствии с этой гипотезой определим доленое участие количества располагаемой теплоты сгорания топлива из расчёта доленого участия площадей поверхности сферы факела. В результате получим зависимость теплоты от углов  $\varphi$  и  $\psi$ . Причём углы  $\varphi$  и  $\psi$  связаны между собой через соотношение длины топки и хвостовой части:

$$\operatorname{tg} \psi = \operatorname{tg} \varphi \left( \frac{l_T}{l_{XB}} - 1 \right).$$

Большая топочная часть располагаемой теплоты в топочной части котлоагрегата передаётся через стенку непосредственно от топки к теплоносителю  $Q_T$ , а другая часть через переднюю поворотную камеру переходит в конвективную часть  $Q_K$ . Каждую часть теплоты геометрически можно описать как:

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_P^p (1 - 0,5 \cos \varphi (1 - \sin \varphi)).$$

$$Q_K = Q_4 = 0,5 Q_P^p (\cos \varphi - \sin \varphi \cos \varphi).$$
(3)

Определим угол  $\varphi$  из соотношений в хвостовом треугольнике:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2l_{XB}}{d_T}. \quad (4)$$

Далее определяем искомые значения тригонометрических функций угла  $\varphi$ :

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}} = \frac{d_T}{\sqrt{d_T^2 + 4l_{XB}^2}}.$$

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} = \frac{2l_{XB}}{\sqrt{d_T^2 + 4l_{XB}^2}}.$$
(5)

Принимая диаметр топки  $d_T$  для расчётного котлоагрегата величиной постоянной, получим зависимость теплоты от местоположения ядра факела в топке, которое определяется значением  $l_{XB}$ :

$$Q_T = Q_P^p \left( 1 - \frac{d_T (\sqrt{d_T^2 + 4l_{XB}^2} - 2l_{XB})}{2(d_T^2 + 4l_{XB}^2)} \right). \quad (6)$$

Поскольку теплота прямо пропорциональна своему коэффициенту интегрального переноса, справедливым можно считать следующее соотношение:

$$K_T = \frac{Q_T}{Q_P^p} = 1 - \frac{d_T (\sqrt{d_T^2 + 4l_{XB}^2} - 2l_{XB})}{2(d_T^2 + 4l_{XB}^2)}. \quad (7)$$

Таким образом, перемещая вдоль горизонтальной оси ядро факела внутри топочной камеры жаротрубного котлоагрегата, можно регулировать соотношение количества тепла между топкой и конвективной частью котла, что в свою очередь позволяет оптимизировать работу котлоагрегата по отношению к топливу с необходимой калорийностью. Для этого можно использовать шкалу теплоты сгорания, нанесенную на поверхность горелочной трубы, подающей газозвоздушную смесь в топку котлоагрегата.

Однако, несмотря на то, что в первых двух зонах концентрируется половина располагаемой теплоты сгорания котлоагрегата, распределение этой теплоты на поверхности топки имеет неравномерный характер. В соответствии с предложенной гипотезой распределение теплоты на поверхности топки будет зависеть от угла  $\psi$ . Тогда количество теплоты, которое аккумулируется торцевой частью котлоагрегата, можно определить следующей зависимостью:

$$Q_2 = Q_P^p \left( 0,5 \left( 1 - \cos \frac{\psi}{2} \right) \right) = Q_P^p \left( 0,5 - \frac{(l_T - l_{XB})}{\sqrt{d_T^2 + 4(l_T - l_{XB})^2}} \right). \quad (8)$$

Исходя из этого, определим остаток теплоты, который приходится на цилиндрическую поверхность топки котлоагрегата:

$$Q_1 = Q_P^p (0,5 - Q_2) = Q_P^p \left( \frac{(l_T - l_{XB})}{\sqrt{d_T^2 + 4(l_T - l_{XB})^2}} \right). \quad (9)$$

Как видно из формулы (9), распределение теплоты по поверхности топки носит нелинейный характер. Теперь, используя формулу (9), появляется возможность разбить цилиндрическую поверхность котлоагрегата на участки (примерно 10) и определить значение теплоты на каждом участке.

Учитывая прямо пропорциональную зависимость между теплотой и температурным напором, можно считать справедливыми следующие соотношения:

$$\Delta t_1 = \Delta t \left( \frac{(l_T - l_{XB})}{\sqrt{d_T^2 + 4(l_T - l_{XB})^2}} \right),$$

$$\Delta t_2 = \Delta t \left( 0,5 - \frac{(l_T - l_{XB})}{\sqrt{d_T^2 + 4(l_T - l_{XB})^2}} \right). \quad (10)$$

Полученные зависимости (10) можно использовать для более точного расчёта конвективной части котлоагрегата, поскольку в расчёт принимается среднеарифметическое значение температуры, а на самом деле, в соответствии с (8) и (9), распределение температуры по поверхности топки носит нелинейный характер. Кроме того, появляется дополнительная возможность оптимизации конструктивных размеров котлоагрегата за счёт неравномерного распределения труб конвективной части в зависимости от изменения температуры на поверхности топки.

### ВЫВОДЫ

В работе предложена методика оптимизации режима работы жаротрубного котлоагрегата при использовании топлива с разной калорийностью, полученная на основе геометрического моделирования теплового баланса между топочной камерой и конвективной частью котла, которая позволяет получить необходимую мощность и максимально возможный КПД котлоагрегата без внесения изменений в его конструкцию.

Перспективой дальнейших исследований является совершенствование расчёта конвективной части жаротрубных котлоагрегатов с учётом разнонаправленных потоков теплоносителей и технических устройств, повышающих турбулентность потоков как дымовых газов, так и нагреваемого теплоносителя.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лукьянов, А. В. Теплогенераторы для локальных систем теплоснабжения [Текст] / А. В. Лукьянов. – Макіївка : ДонДАБА, 2003. – 156 с.
2. Тепловой расчёт котельных агрегатов. Нормативный метод [Текст] / Под ред. Н. В. Кузнецова и др. – М. : Энергия, 1973. – 296 с.
3. Тепловой расчёт промышленных теплоагрегатов [Текст] / Под ред. В. И. Частухина. – К. : Вища школа, 1980. – 183 с.
4. Остапенко Д. В. Повышение эффективности жаротрубного теплогенератора за счёт улучшения конвективного теплообмена [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.03 / Остапенко Дмитрий Валерьевич. – Макеевка : [б. и.], 2015. – 235 с.
5. Хаустов, С. А. Компьютерное моделирование гидродинамики жаротрубного котла с использованием конечно-элементного анализа [Электронный ресурс] / С. А. Хаустов, П. А. Хаустов, Е. И. Максимова // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6. – С. 1–6. – Режим доступа : <http://www.science-education.ru/pdf/2014/6/1519.pdf>.
6. Хаустов, С. А. Численное исследование аэродинамики жаротрубной топки с реверсивным факелом [Текст] / С. А. Хаустов, А. С. Заворин // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 4. – С. 5–9.
7. Хаустов, С. А. Численное исследование аэродинамики топочной среды в жаротрубном котле типа «Турботерм» [Текст] / С. А. Хаустов, А. С. Заворин // Промышленная энергетика. – 2014. – № 1. – С. 11–14.
8. Исследование влияния на теплофизические характеристики факела в цилиндрической топке и его теплоотдачу геометрических и режимных параметров газогорелочных устройств [Текст] / В. Ф. Губарь, С. А. Губарь, А. В. Лукьянов, М. З. Флер // Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ : Видавництво ЛНАУ, 2004. – № 44(56). – С. 64–71.
9. Зависимость длины факела в топке жаротрубных теплогенераторов от условий работы горелки [Текст] / М. З. Флер, А. В. Лукьянов, С. А. Губарь, А. Г. Яценко // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури, 2002. – Вип. №4(35) Інженерні системи та техногенна безпека у будівництві. – С. 60–62.
10. Флер, М. З. Газовая горелка для жаротрубных теплогенераторов малой мощности [Текст] / М. З. Флер // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури, 2003. – Вип. № 4(41) Інженерні системи та техногенна безпека у будівництві. – С. 26–28.

Получено 10.10.2018

В. М. КАЧАН, О. В. ЛУК'ЯНОВ, Є. В. КОНОПАЦЬКИЙ  
ТЕОРІЯ РОЗРАХУНКУ ПРОЦЕСУ ТЕПЛООБМІНУ В ЖАРОТРУБНИХ  
КОТЛОАГРЕГАТАХ З ТУПІКОВОЮ ТОПКОЮ  
ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** Запропонована оригінальна методика геометричного моделювання теплового балансу між топковою та конвекційною частинами жаротрубного котлоагрегату малої потужності, яка дозволяє виконувати тепловий розрахунок. Шляхом регулювання розташування пальника в топковій частині котла можна для досягнутти необхідної потужності і максимального ККД при використанні палива з різним ступенем теплоти згоряння. В основу розрахунку покладено виділення чотирьох об'ємів (зон) знаходження продуктів згоряння в топковій частині котлоагрегату. В першій (основній) та другій (торцевій) зонах в самому глухому куті топки завжди акумулюється половина сумарної теплоти згоряння палива (геометрично це пастка теплоти). За рахунок третьої зони забезпечується оптимальний коефіцієнт інтегрального теплопереносу (регулювання) в топковій частині, а також потужність і ККД котла. Четверта зона визначає задану паспортну потужність і ККД, яка досягається в конвекційній частині котлоагрегату.

**Ключові слова:** коефіцієнт інтегрального перенесення, тепловий баланс, жаротрубний котлоагрегат, конвекційна частина, топка, ядро факела, теплота згоряння палива, зони теплопереносу.

VLADIMIR KACHAN, ALEXANDER LUKYANOV, EVGENIY KONOPATSKIY  
THEORY OF THE HEAT TRANSFER PROCESS CALCULATION IN FIRE-TUBE  
BOILERS WITH A STUB SUBSTRACT  
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** An original method the geometric modeling of the thermal balance between the combustion and convective parts of a low-power heat-tube unit is proposed, which allows to perform a thermal calculation by adjusting the location of the burner in the combustion part of the boiler to achieve the required power and maximum efficiency when using fuels with different degrees of heat combustion. The basis on this calculation is the allocation of 4-h volumes (zones) of the combustion products in the combustion part of the heat unit. In the first (main) and second (end) zones in the dead-end furnace is always accumulated half of the total heat of combustion (geometrically it is a heat trap). The third zone provides the optimal coefficient of integral transfer (adjustment) in the combustion part, as well as the power and efficiency of the heat unit. The fourth zone determines the residual power and efficiency achieved in the convective part of the heat unit.

**Key words:** the integrated transfer coefficient, thermal balance, fire-tube heat unit, convective portion, furnace, the core of the torch, the heat combustion of fuel, area of heat transfer.

**Качан Владимир Николаевич** – профессор кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: оптимизация технологических процессов.

**Лукьянов Александр Васильевич** – доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: автономные системы теплоснабжения, источники теплоты.

**Конопацкий Евгений Викторович** – кандидат технических наук, доцент кафедры специализированных информационных технологий и систем ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: разработка инструментов многомерной геометрии в БН-исчислении для геометрического моделирования объектов, процессов и явлений; геометрическое моделирование и оптимизация многофакторных процессов и явлений живой природы, техники, технологии, экономики, строительства и архитектуры.

**Качан Володимир Миколайович** – профессор кафедры теплотехники, теплогазопостачання та вентиляції ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: оптимізація технологічних процесів.

**Лук'янов Олександр Васильович** – доктор технічних наук, професор кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: автономні системи теплопостачання, джерела теплоти.

**Конопацкий Евгений Викторович** – кандидат технических наук, доцент кафедры специализованных информационных технологий и систем ДОНУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: разработка инструментов многомерной геометрии в BN-числении для геометрического моделирования объектов, процессов и явлений; геометрическое моделирование и оптимизация многофакторных процессов и явлений живой природы, техники, технологии, экономики, строительства и архитектуры.

**Kachan Vladimir** – Professor, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: optimization of technological processes.

**Lukyanov Alexander** – Sc. D. (Eng.), Professor, Head of Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: independent heat supply systems, heat sources.

**Konopatskiy Evgeniy** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Specialized Information Technology and Systems Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: development tools multidimensional geometry in BN-calculation for geometric modeling objects, processes and phenomena's; geometric modeling and optimization of multifactor processes and phenomena's of living nature, engineering, technology, economics, civil engineering and architecture.