

**В. Э. Зинуров, Р. Я. Биккулов, А. В. Дмитриев,  
А. А. Абдуллина**

## **УЛАВЛИВАНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ МУЛЬТИВИХРЕВЫМ СЕПАРАТОРОМ В ОКРАСОЧНО-СУШИЛЬНОЙ КАМЕРЕ**

*Ключевые слова: окрасочно-сушильная камера, мультिवихревой сепаратор, мелкодисперсные частицы, сепарация частиц, улавливание частиц.*

*Окрасочно-сушильные камеры применяются во многих отраслях промышленности. При распылении лакокрасочных материалов внутри помещения окрасочно-сушильной камеры возникает большое количество загрязняющих веществ - частиц тумана краски. Важной задачей является их улавливание. Игнорирование данной задачи может привести к взрывоопасной ситуации, нарушению санитарных и экологических норм, дефектам окрашиваемых деталей и другим негативным последствиям. Для решения задачи применяются потолочные и напольные фильтры. Как правило, они импортируются из-за рубежа и их необходимо регулярно менять. В среднем их эксплуатационный срок службы составляет раз в месяц. Поэтому задача увеличения их срока службы является актуальной. Целью данной работы является разработка сепарационного устройства для увеличения эксплуатационного срока службы напольных и потолочных фильтров в окрасочно-сушильной камере и повышения общей эффективности улавливания мелкодисперсных частиц. В статье предложена конструкция мультिवихревого сепаратора. Представлен принцип действия сепарационного устройства. Показано непосредственное применение мультिवихревого сепаратора в окрасочно-сушильной камере на предприятии ООО «КАМАТЕК». Для увеличения срока службы фильтров предлагается устанавливать мультिवихревой сепаратор перед напольными или перед потолочными фильтрами. Рассчитана эффективность мультिवихревого сепаратора для предложенных двух его расположений в окрасочно-сушильной камере. На основе расчета его эффективности сделаны следующие выводы: при установке мультिवихревого сепаратора перед напольными фильтрами (скорость на входе в сепаратор принималась 0,3 м/с) его эффективность составляет в среднем 45 % для частиц размером от 1 до 10 мкм, при установке сепаратора перед потолочными фильтрами в узком сечении (скорость на входе в сепаратор принималась 5 м/с) его эффективность в среднем составляет 88 % для частиц от 1 до 10 мкм, с практической точки зрения мультिवихревой сепаратор эффективнее устанавливать перед потолочными фильтрами тонкой очистки. Достигается более высокая эффективность при наименьших капитальных вложениях.*

**V. E. Zinurov, R. Ya. Bikkulov, A. V. Dmitriev,  
A. A. Abdullina**

## **CAPTURING FINE PARTICLES WITH A MULTIVORTEX SEPARATOR IN THE PAINT DRYING CHAMBER**

*Keywords: paint spraying and drying chamber, multivortex separator, fine particles, particle separation, particle trapping.*

*Paint spraying and drying booths are used in many industries. When spraying paint and varnish materials, a large amount of pollutants - paint mist particles - is generated inside the paint spraying and drying booth. Their capture is an important task. Neglecting this task may lead to explosive situation, violation of sanitary and environmental standards, defects of painted parts and other negative consequences. Ceiling and floor filters are used for this task. As a rule, they are imported from abroad and have to be replaced regularly. On average, they are used once a month. Therefore, the task of increasing their service life is urgent. The purpose of this paper is to develop a separation device to increase service life of floor and ceiling filters in a paint-drying booth, and to improve the overall efficiency of trapping fine particles. Design of a multivortex separator is proposed in the article. The principle of operation of the separation device is presented. Direct application of the multivortex separator in a paint-spraying drying chamber at the enterprise Kamatek Ltd. For increase of the filters' lifetime it is suggested to install the multivortex separator before the floor or before the ceiling filters. Efficiency of the multi-vortex separator was calculated for its two proposed arrangements in the paint-drying booth. The following conclusions are drawn on the basis of efficiency calculation if multivortex separator is installed upstream floor filters (speed at the inlet to separator was taken as 0,3 m/s) its efficiency makes on average 45 % for particles sized 1 to 10 microns, when installing the separator in front of ceiling filters in narrow section (inlet velocity taken as 5 m/s) its efficiency is on the average 88 % for particles from 1 to 10 microns, in practical terms multivortex separator is more effective to install before the ceiling fine filters. It achieves higher efficiency with the lowest capital investment.*

В настоящее время широкое распространение в отраслях машиностроения, авиастроения, судостроения и др. получили окрасочно-сушильные камеры [1]. Главной задачей которых является обеспечение специальных условий, способствующих качественному нанесению красок и лаков с максимальным устранением возможности попадания на окрашиваемые поверхности частиц пыли, влаги и последующей их сушки при

определенных параметрах [2]. В ходе распыления лакокрасочных материалов внутри помещения окрасочно-сушильной камеры возникает большое количество загрязняющих веществ - частиц тумана краски, представляющих собой органические растворители, красители, пигменты, связующие и другие летучие органические соединения [3-5]. Актуальной задачей является улавливание частиц лакокрасочного ту-

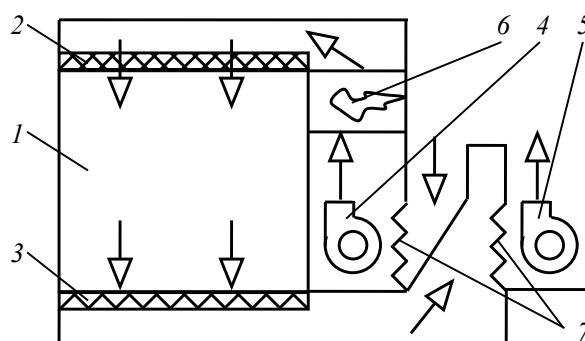
мана [6, 7]. В противном случае высокая концентрация частиц пыли от красящих веществ может привести к возникновению взрывоопасной смеси [8].

Схема работы камеры представлена на рисунке 1. В ходе работы окрасочно-сушильной камеры выделяют 2 режима: 1) режим распыления краски и 2) режим сушки краски. При первом режиме работы, воздух, поступающий из атмосферы, проходит через вентилятор 4 и установленный перед ним воздушный фильтр системы вентиляции 7, выполняющий роль грубой очистки. В случае, если температура воздуха недостаточная, то включается воздухонагреватель 6, который нагревает воздух до температуры примерно равной 20 °С. Далее нагретый воздух перемещается по специальным каналам в чердачное пространство и через потолочные фильтры тонкой очистки 2, осуществляющие очистку от мелкодисперсных частиц, попадает в камеру 1. Стоит отметить, что фильтры 2 располагаются по всей площади потолка. Кроме очистки воздушного потока они гасят турбулентность у воздуха, что позволяет ему плавно перемещаться внутри камеры, тем самым увеличивая эффективность процесса окраски деталей. Как указывалось ранее, при распылении красящих материалов и растворителей возникает лакокрасочный туман, который впоследствии удаляется из камеры 1 через напольные фильтры 3. Как правило, после окраски деталей осуществляется продувка камеры 1 в течение 3-5 минут. Далее работа окрасочно-сушильной камеры переходит во 2 режим. При переходе в режим сушки вытяжная вентиляция автоматически отключается, чему способствует открытие заслонки рециркуляции. Необходимо отметить, что в данном режиме происходит частичный забор воздуха из атмосферы, составляющий около 10-15 % от общего циркулируемого объема газа. Это необходимо для предотвращения перенасыщения окрасочной камеры 1 парами растворителя, при котором окрашиваемая поверхность детали может стать матовой. При работе окрасочно-сушильной камеры в режиме сушки краски воздух нагревается до 80 °С по средствам воздухонагревателя 6. После чего готовая деталь удаляется из камеры 1, воздух обновляется и 2 режима повторяются для окраски новых деталей. Стоит отметить, что при рециркуляции воздуха в ходе сушки краски затраты электроэнергии снижаются на 40 % относительно режима окрашивания (рис. 1).

Как видно из описания схемы работы окрасочно-сушильной камеры важной составляющей для эффективного функционирования всей данной системы является надежная работа по улавливанию мелкодисперсных частиц, из которых фактически состоит лакокрасочный туман, напольными 3 и потолочными 2 фильтрами. Как правило, основная часть мелкодисперсных частиц улавливается напольными фильтрами 3, далее конечная очистка осуществляется непосредственно потолочными фильтрами тонкой очистки 2. Важной проблемой применения фильтров является требование к их регулярной замене, которое составляет в среднем раз в месяц. В противном случае качество очистки воздуха существенно снижается, что может привести к взрывоопасной ситуации, нарушению санитарных и экологических норм и дефектам окрашиваемых деталей. При сильном загрязнении

фильтров увеличивается избыточное давление в камере, что также может привести к снижению качества окрашиваемых деталей и деформации покрасочной камеры. С другой стороны, окраска деталей происходит в непрерывной работе. Замена фильтров на новые приводит к остановке работы окрасочно-сушильной камеры, что приводит к дополнительным экономическим издержкам. Необходимо отметить, что фильтры для окрасочно-сушильных камер являются зарубежными. Помимо высокой стоимости, существуют политические риски. В результате которых может возникнуть невозможность покупки фильтров.

Целью данной работы является разработка сепарационного устройства для увеличения эксплуатационного срока службы напольных и потолочных фильтров в окрасочно-сушильной камере и повышения общей эффективности улавливания мелкодисперсных частиц.



**Рис. 1 – Схема работы окрасочно-сушильной камеры: 1 – окрасочная камера; 2 – потолочные фильтры тонкой очистки; 3 – напольные фильтры; 4 – вентилятор; 5 – вентилятор для вытяжной вентиляции; 6 – воздухонагреватель; 7 – воздушные фильтры системы вентиляции**

**Fig. 1 – Schematic diagram of the paint spraying and drying booth: 1 – paint-spraying chamber; 2 – fine ceiling filters; 3 – floor filters; 4 – fan; 5 – ventilator for exhaust ventilation; 6 – air heater; 7 – air filters of ventilation system**

Авторами работы для решения поставленной проблемы была разработана конструкция [9, 10] мультивихревого сепаратора (рис. 2). Его применение перед фильтрами позволит существенно увеличить их срок эксплуатации и увеличить общую эффективность улавливания частиц лакокрасочного тумана. Принцип действия мультивихревого сепаратора заключается в следующем [11, 12]. Поток воздуха с мелкодисперсными частицами входит в устройство через отверстия квадратного сечения, которые образуют элементы квадратной формы. В стенках элементов проделаны большие и малые круглые отверстия. При этом в соседних стенках чередуется количество рядов больших круглых отверстий от 1 до 2. В угловых зонах проделаны малые круглые отверстия. В свою очередь, элементы квадратной формы с обратной стороны мультивихревого сепаратора образуют сепарационные каналы. Таким образом, после того, как запыленный воздух вошел в квадратные элементы, он распределяется по круглым отверстиям. При прохождении через

круглые отверстия поток воздуха разделяется на 2 струйки, которые образуют два вихря в сепарационных каналах. В результате создается множество маленьких вихрей в сепарационных каналах мультивихревого сепаратора. Необходимо отметить, что геометрическое расположение круглых отверстий относительно друг друга позволяет создать вихревую структуру в сепарационных каналах таким образом, что вихри не пересекаются. При этом соседние вихри имеют общие точки контакта, в которых вектора скорости сонаправлены. Важным достоинством упорядоченной вихревой структуры является то, что радиус каждого вихря равен радиусу отверстия, т.е. радиус соответствует достаточно малому значению. В результате создается центробежное поле высоких значений. За счет которого осуществляется успешная сепарация мелкодисперсных частиц из запыленного воздуха. Частицы отлетают к стенкам и прилипают к ним. С течением времени мелкодисперсные частицы агломерируются и под действием силы тяжести падают вниз. По окончании определенного интервала работы мультивихревые сепараторы очищаются (восстанавливаются) и используются снова. Предлагается конструктивно подбирать мультивихревой сепаратор таким образом, чтобы их очистка осуществлялась в одно и то же время с заменой напольных и потолочных фильтров в окрасочно-сушильных камерах. Предложенный мультивихревой сепаратор проходил апробацию в окрасочно-сушильной камере на предприятии ООО «КАМАТЕК» в течение нескольких месяцев (рис. 2).



Рис. 2 – Мультивихревой сепаратор в окрасочно-сушильной камере

Fig. 2 – Multi-vortex separator in the spray drying chamber

Анализ работы окрасочно-сушильной камеры показал, что мультивихревой сепаратор можно установить в нескольких местах для увеличения эксплуатационного срока службы используемых фильтров и повышения общей эффективности улавливания мелкодисперсных частиц: перед напольными фильтрами по всей площади или перед потолочными фильтрами тонкой очистки. Необходимо отметить ключевые особенности. При установке мультивихревых сепарато-

ров по всей площади пола перед напольными фильтрами  $\delta$  скорость на входе будет составлять менее 0,5 м/с (рис. 3). Во втором варианте мультивихревые сепараторы будут располагаться перед потолочными фильтрами в специально отведенном месте относительно узкого сечения (рис. 3). Поэтому скорость на входе в сепарационные устройства возрастет относительно первого варианта и будет составлять около 2 - 9 м/с в зависимости от конкретных размеров сечения [13].

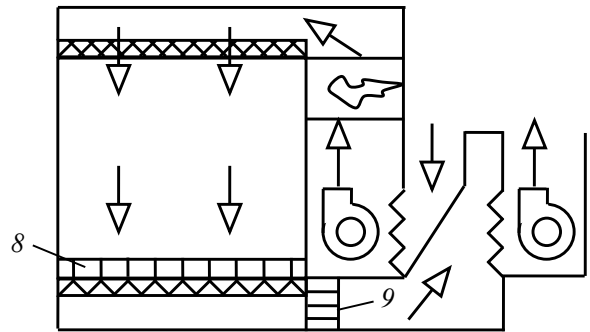


Рис. 3 – Местоположение установки мультивихревых сепараторов в окрасочно-сушильной камере:  $\delta$  – установка перед напольными фильтрами; 9 – установка перед потолочными фильтрами тонкой очистки

Fig. 3 – Installation location of multivortex separators in the paint drying chamber: 8 - installation in front of floor filters; 9 - installation in front of ceiling fine filters

На основе ранее проведенных исследований [14] была получена формула для расчета эффективности улавливания мелкодисперсных частиц в мультивихревом сепараторе:

$$E = \frac{8 W_{sl} a}{3 W_{bx} b} \sqrt{\frac{z \rho_a W_{bx}}{\mu_G}} \left( 1 - \frac{2 W_{sl} a}{3 W_{bx} b} \sqrt{\frac{z \rho_a W_{bx}}{\mu_G}} \right), \quad (1)$$

где  $a$  – диаметра частиц, м;  $W_{sl}$  – скорость воздуха в щелях, м/с;  $W_{bx}$  – скорость на входе в мультивихревой сепаратор, м/с;  $b$  – ширина стороны сепаратора, м;  $z$  – высота сепарационной зоны, м;  $\rho_a$  – плотность частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_G$  – динамическая вязкость воздуха, Па·с.

На основе формулы (1) была рассчитана эффективность мультивихревого сепаратора для 2 случаев: 1) сепарационное устройства устанавливается на позицию 8 перед напольными фильтрами; 2) сепарационное устройства устанавливается на позицию 9 перед потолочными фильтрами (рис. 3). В обоих случаях часть параметров оставалась неизменной: ширина сепаратора  $b$  – 80 мм, высота сепарационной зоны – 50 мм, плотность частиц  $\rho_a$  – 2000 кг/м<sup>3</sup>, динамическая вязкость воздуха  $\mu_G$  –  $17,8 \cdot 10^{-5}$  Па·с. Диаметр мелкодисперсных частиц изменялся от 1 до 10 мкм. Размер частиц устанавливался на основе анализа уловленных частиц в ходе промышленных испытаний (рис. 2). Скорость на входе в мультивихревой сепаратор  $W_{bx}$  принималась 0,3 м/с в случае при его установке перед напольными фильтрами и 5 м/с при его установке перед потолочными фильтрами.

Результаты расчетов показали, что при более высокой входной скорости воздуха эффективность улавливания мелкодисперсных частиц выше, т.к. центробежное поле сил создается больших значений. С увеличением размеров частиц эффективность также возрастает, т.к. частицы больших размеров легче поддаются сепарации из газа. При установке мультивихревого сепаратора перед напольными фильтрами ( $W_{bx} = 0,3$  м/с) его эффективность составляет в среднем 45 % для частиц размером от 1 до 10 мкм. При установке сепаратора перед потолочными фильтрами в узком сечении ( $W_{bx} = 5$  м/с) его эффективность в среднем составляет 88 % для частиц 1-10 мкм. Необходимо отметить, что при использовании сепаратора при входной скорости газа равной 5 м/с его расчетная эффективность для частиц размером более 5 мкм составляет 100 % (рис. 4).

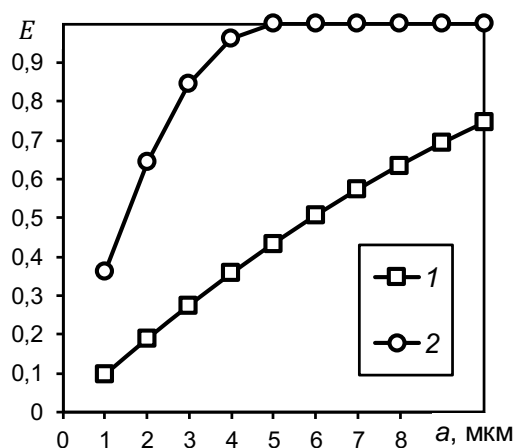


Рис. 4 – Зависимость эффективности мультивихревого сепаратора  $E$  от диаметра частиц  $a$ , мкм при различном размещении устройства в окрасочно-сушильной камере: 1 – установка перед напольными фильтрами; 2 – установка перед потолочными фильтрами тонкой очистки

Fig. 4 – Dependence of multivortex separator efficiency  $E$  on particle diameter  $a$ , microns, at different placement of the device in the paint drying chamber: 1 - installation in front of floor filters; 2 - installation in front of ceiling fine filters

Таким образом, с практической точки зрения мультивихревой сепаратор эффективнее устанавливать перед потолочными фильтрами тонкой очистки 9 (рис. 3), т.к. достигается сравнительно высокая эффективность из-за более высокой скорости газа на входе в устройство  $W_{bx}$ , для перекрытия проходного относительно узкого сечения необходимо ограниченное количество мультивихревых сепараторов и, соответственно, финансовые вложения будут не столь большие. Установка мультивихревых сепараторов перед напольными фильтрами 8 (рис. 3) тоже может быть рентабельным мероприятием, но с большими капитальными вложениями, т.к. необходимо перекрывать всю площадь пола. И необходимо учитывать, что в этом случае скорость на входе в мультивихревой сепаратора  $W_{bx}$  невысокая, соответственно, эффективность будет меньше относительно предыдущего вари-

анта расположения, поэтому для ее повышения необходимо, например, увеличить высоту сепарационной зоны сепаратора  $z$ . Как видно, по полученным результатам (рис. 4) при дальнейших исследованиях имеется перспектива заменить потолочные и напольные фильтры мультивихревыми сепараторами.

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Применение мультивихревого сепаратора позволяет увеличить эксплуатационный срок службы потолочных и напольных фильтров и увеличить общую эффективность улавливания мелкодисперсных частиц в окрасочно-сушильных камерах.

2. При установке мультивихревого сепаратора перед напольными фильтрами ( $W_{bx} = 0,3$  м/с) его эффективность составляет в среднем 45 % для частиц размером от 1 до 10 мкм.

3. При установке сепаратора перед потолочными фильтрами в узком сечении ( $W_{bx} = 5$  м/с) его эффективность в среднем составляет 88 % для частиц от 1 до 10 мкм.

4. С практической точки зрения мультивихревой сепаратор эффективнее устанавливать перед потолочными фильтрами тонкой очистки. Достигается более высокая эффективность при наименьших капитальных вложениях.

*Работа выполнена при финансовой поддержке стипендии Президента РФ СП – 3577.2022.1.*

*This work was supported by the scholarship of the President of the Russian Federation SP - 3577.2022.1.*

## Литература

1. А.В. Милюкова, В.А. Романов, *Экономика и эффективность организации производства*, 23, 69-72 (2015).
2. А.С. Семькина, А.В. Нажиганов, Д.Т. Омелянюк, Н.А. Загородний, *Вестник Донецкой академии автомобильного транспорта*, 1, 64-70 (2020).
3. Г.С. Мишнева, Ю.О. Папко, *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика*, 4, 24, 62-74 (2016)
4. Ю.О. Папко, *Современные технологии в строительстве. Теория и практика*, 2, 373-381 (2017).
5. L. Middendorf, *Metal Finishing*, 100, 10, 47-52 (2002).
6. N. Sheng, H.S. Weizhou, M.G. Chen, Y.M. Sun, X. Han, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 36, 4, 1434-1447 (2017).
7. Y. Zhan, J. Ji, H. Huang, M. He, D.Y.C. Leung, S. Liu, Y. Shu, Q. Feng, R. Xie, R. Fang, et al., *Chemical Engineering Journal*, 334, 1422-1429 (2018).
8. G.N. Carlton, M.R. Flynn, *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 12, 5, 375-382 (1997).
9. R.Y. Bikkulov, A.V. Dmitriev, V.E. Zinurov, G.R. Badretdinova, *MATEC Web of Conferences*, 346, 03070 (2021).
10. Р.Я. Биккулов, О.С. Дмитриева, А.В. Дмитриев, Г.Р. Бадретдинова, Д.Н. Латыпов, *Вестник технологического университета*, 25, 1, 32-35 (2022).
11. Р.Я. Биккулов, А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, Г.Р. Бадретдинова, *Вестник технологического университета*, 24, 11, 39-42 (2021).
12. И.Н. Мадьшев, А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, В.В. Харьков, В.Э. Зинуров, Патент 208304 Российская Федерация, № 2021120725; заявл. 14.07.2021; опубл. 13.12.2021, Бюл. № 35. – 6 с

13. В.Э. Зинуров, Р.Я. Биккулов, А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, А.Н. Николаев, *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*, **24**, 5, 3-12 (2022).
14. Р.Я. Биккулов, О.С. Дмитриева, А.В. Дмитриев, Г.Р. Бадретдинова, *Экология и промышленность России*, **25**, 12, 10-14 (2021).

### References

1. A.V. Milyukova, V.A. Romanov, *Economics and efficiency of production organization*, 23, 69-72 (2015).
2. A.S. Semykina, A.V. Najiganov, D.T. Omelianyuk, N.A. Zagorodny, *Bulletin of the Donetsk Academy of Motor Transport*, 1, 64-70 (2020).
3. G.S. Mishneva, Yu.O. Papko, *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Applied ecology. Urban studies*, **4**, 24, 62-74 (2016)
4. Yu.O. Papko, *Modern technologies in construction. Theory and practice*, **2**, 373-381 (2017).
5. L. Middendorf, *Metal Finishing*, 100, 10, 47-52 (2002).
6. N. Sheng, H.S. Weizhou, M.G. Chen, Y.M. Sun, X. Han, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, **36**, 4, 1434-1447 (2017).
7. Y. Zhan, J. Ji, H. Huang, M. He, D.Y.C. Leung, S. Liu, Y. Shu, Q. Feng, R. Xie, R. Fang, et al., *Chemical Engineering Journal*, **334**, 1422-1429 (2018).
8. G.N. Carlton, M.R. Flynn, *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, **12**, 5, 375-382 (1997).
9. R.Y. Bikkulov, A.V. Dmitriev, V.E. Zinurov, G.R. Badretdinova, *MATEC Web of Conferences*, **346**, 03070 (2021).
10. R.Ya. Bikkulov, O.S. Dmitrieva, A.V. Dmitriev, G.R. Badretdinova, D.N. Latypov, *Herald of the Technological University*, **25**, 1, 32-35 (2022).
11. R.Ya. Bikkulov, A.V. Dmitriev, O.S. Dmitrieva, G.R. Badretdinova, *Herald of the Technological University*, **24**, 11, 39-42 (2021).
12. I.N. Madyshev, A.V. Dmitriev, O.S. Dmitrieva, V.V. Kharkiv, V.E. Zinurov, Patent 208304 Russian Federation, No. 2021120725; application 14.07.2021; publ. 13.12.2021, Bul. No. 35. – 6 p.
13. V.E. Zinurov, R.Ya. Bikkulov, A.V. Dmitriev, O.S. Dmitrieva, A.N. Nikolaev, *Proceedings of higher educational institutions. Energy problems*, **24**, 5, 3-12 (2022).
14. R.Ya. Bikkulov, O.S. Dmitrieva, A.V. Dmitriev, G.R. Badretdinova, *Ecology and Industry of Russia*, **25**, 12, 10-14 (2021).

---

© **В. Э. Зинуров** – ассистент кафедры ТОТ ФГБОУ ВО «КГЭУ», vadd\_93@mail.ru, **Р. Я. Биккулов** – ассистент кафедры «Теоретические основы теплотехники» (ТОТ) ФГБОУ ВО «КГЭУ», bikkulov-ry@mail.ru, **А. В. Дмитриев** – д.т.н., зав. кафедрой ТОТ ФГБОУ ВО «КГЭУ», ieremiada@gmail.com, **А. А. Абдуллина** – студент кафедры «ЭОП» ФГБОУ ВО «КГЭУ», azalkaabdullina69826@gmail.com.

© **V. E. Zinurov** – Assistant, department of Theoretical Foundations of Heat Engineering (TFHE), Kazan State Power Engineering University (KSPEU), vadd\_93@mail.ru; **R. Ya. Bikkulov** – Assistant, the TFHE department, KSPEU, bikkulov-ry@mail.ru; **A. V. Dmitriev** – Doctor of Science (Technical Sci.), Head of the TFHE department, KSPEU, ieremiada@gmail.com; **A. A. Abdullina** – Student, department of Economics and Organization of Production, KSPEU, azalkaabdullina69826@gmail.com.