

DOI 10.22363/2313-2310-2021-29-4-371-380

УДК 66.074.2

Научная статья / Research article

Эффективность применения скрубберного метода очистки выбросных газов в промышленности

А.Н. Карев✉, М.П. Тюрин

*Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина
(Технологии. Дизайн. Искусство), Москва, Россия*

✉ alexcarew777@yandex.ru

Аннотация. На современном этапе развития технологий далеко не все виды промышленного производства оказывают благоприятное воздействие на окружающую среду и, как следствие, на человека. Так, производственные процессы химической и текстильной промышленности могут сопровождаться выделением целого ряда ядовитых и вредных газообразных соединений, пылевых взвесей и пара. Их выброс в атмосферу происходит наряду с отработанными газами, при этом суммарное отрицательное воздействие на общую экологическую обстановку значительно выше в силу возможных химических реакций в смесях с образованием непредсказуемых продуктов. Именно поэтому значение очистки выбрасываемых газов в процессе промышленной деятельности невозможно недооценить. Самым популярным и наиболее действенным методом очистки от выбросов пыли является скрубберный метод очистки воздуха, реализуемый именно в тот момент, когда удаляемая воздушная смесь обладает сравнительно высокой температурой. Особенно эффективным направлением по увеличению глубины утилизации теплоты влажного газа и газов парогенераторов, уходящих от теплотехнологических аппаратов, выступает применение теплоты конденсации водяных паров, которые входят в состав этих смесей. Исследуются стадии проектирования и модели, лежащие в основе проектирования и конструирования аппарата мокрой очистки газов, попадающих в атмосферу в результате производственной деятельности. Также рассмотрены системы утилизации вторичных ресурсов энергетики, применяемых в настоящее время.

Ключевые слова: выбросные газы, отходящие газы, парогенераторы, влажный газ, теплота конденсации, нагрев воды, утилизация теплоты, паровой котел, система утилизации, вторичные энергетические ресурсы, экономайзер, контактные теплообменники

Благодарности и финансирование. Исследование выполнено в рамках гранта РФФИ 20-38-90061 Аспиранты, Договор № 20-38-90061\20 от 31.08.2020 г.

Вклад авторов. А.Н. Карев – анализ полученных данных, написание текста. М.П. Тюрин – концепция исследования.

История статьи: поступила в редакцию 11.02.2021; принята к публикации 15.05.2021.

Для цитирования: Карев А.Н., Тюрин М.П. Эффективность применения скрубберного метода очистки выбросных газов в промышленности // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2021. Т. 29. № 4. С. 371–380. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2021-29-4-371-380>

The effectiveness of the scrubber method of cleaning exhaust gases in industry

Alexey N. Karev✉, Mikhail P. Tyurin

Kosygin Russian State University, Moscow, Russia

✉ alexcarew777@yandex.ru

Abstract. Unfortunately, not all types of industry have a positive impact on the environment and people, for example, the processes of the chemical and textile industries can be accompanied by the release of toxic and harmful gases, dust and steam. And already, along with the exhaust gases, they are released into the atmosphere, while the negative impact on the overall environmental situation only doubles. That is why the importance of cleaning the emitted gases in the process of industrial activity cannot be underestimated. The most popular and most effective method of cleaning from dust emissions can be designated as the scrubber method of air purification, precisely at the moment when the air being eliminated has a relatively high temperature level. In addition, the use of the heat of condensation of water vapors contained in them is a particularly effective direction for increasing the depth of heat recovery of wet gas and steam generator gases leaving heat technology devices. This article is devoted to the study of the stages and models of the process of designing and constructing a device for wet cleaning of gases that are released into the atmosphere as a result of certain production activities. The study of the systems of utilization of secondary energy resources used at the present time was also carried out.

Keywords: exhaust gases, waste gases, steam generators, wet gas, heat of condensation, water heating, heat recovery, water heating, steam boiler, system of utilization, secondary energy resources, economizer, contact heat exchangers

Acknowledgements and Funding. The study was carried out in the frame of RFBR Grant 20-38-90061 Graduate Students, Contract No. 20-38-90061\20 dated 31.08.2020.

Authors' contributions. A.N. Karev – analysis of the obtained data, writing of the text. M.P. Tyurin – the concept of the study.

Article history: received 11.02.2021; revised 15.05.2021.

For citation: Karev AN, Tyurin MP. The effectiveness of the scrubber method of cleaning exhaust gases in industry. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2021;29(4): 371–380. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2021-29-4-371-380>

Введение

Одним из приоритетных и перспективных стратегических направлений принятой программы научно-технологического развития России является энергосбережение. В статье представлены результаты исследования методов, обеспечивающих повышение продуктивности систем утилизации и очистки выбросных газов, на основании построения моделей и последующего их координирования. Кроме того, проанализирован ряд задач, затрагива-

ющих вопросы устройства оборудования, необходимого для достижения поставленной цели.

Разработка новых и модернизация имеющихся систем утилизации вторичных энергоресурсов на основании технологий энергосбережения представляет собой самый эффективный способ справиться с разрешением вопросов, стоящих перед энергетической отраслью [1]. Данное направление соответствует общим тенденциям развития и относится к одному из перспективных стратегических векторов экономики нашего государства.

Непосредственная утрата теплоты с отходящими продуктами горения образует наибольшее количество вторичных тепловых энергоресурсов парогенераторов. Энергетические потери – появляющиеся с выбросом влажного газа, который обладает неустойчивыми температурами в диапазоне 120–130 °С, в то время как парогенераторы с предельным уровнем мощности, меньшим чем 0,7 кВт, производят выброс дымовых газов с температурой более 200 °С – составляют наибольшее количество вторичных энергоресурсов теплотехнологических устройств.

Однако не во всех случаях при помощи имеющихся способов возможно уменьшить потерю теплоты при отделении продуктов сгорания.

Подчеркнем, что в случае сжигания непосредственно в самих парогенераторах особенно эффективным и продуктивным можно признать только газообразное топливо. Такой вывод обусловлен следующим: отсутствие соединений серы позволяет охлаждать продукты сгорания до предельно низкого уровня температуры.

Оценка потенциала вторичных энергетических ресурсов уходящих продуктов сгорания теплотехнологических установок

Достоинство применения скрытой теплоты парообразования дымовых газов состоит в возможности использовать полученный конденсат, что существенно экономит воду [2].

Итак, обозначим приблизительные условия для предварительной оценки продуктивности и перспективности ряда действий, направленных на увеличение экономичности, реализуемых в отношении парогенераторов (таблица).

Применение самого теплообменника является достаточно значимым и важным моментом, так как именно от его использования зависит, насколько продуктивным будет применение воды, нагрев которой, в свою очередь, можно выполнить только до конкретного температурного уровня (от 50 до 60 °С) [3].

Также выбор устройства системы по утилизации тепла, находящегося в дымовых газах котельных, и типа используемых утилизаторов необходимо осуществлять исходя из источников тепла, возможности применения ресурсов дымового газа, теплопотребителей, типов применяемого топлива, структуры дымового газа, определяющей его агрессивность в отношении устройства котельной.

В целом решение об установке тепловых утилизаторов должно приниматься в соответствии с запросами конечных пользователей.

Для того чтобы воплотить данное направление в реальность, следует выявить направления потоков воздуха и воды [4], их смесей, степень расходования, а также уровень температуры, до которого возможно нагреть носитель тепла в утилизаторах.

**Приблизительные условия продуктивности и перспективности действий
для увеличения экономичности паровых котлов**

№	Наименование действий	Сбережение	Условия
1	Сокращение присоса воздуха в газовом тракте на 0,1	0,5	–
2	Увеличение коэффициента излишка воздуха в топливнике на 0,1	–	0,7
3	Увеличение t питательной воды при входе в барабан котлоагрегата на 10 °С при $p = 1,3$ МПа и КПД котлоагрегата $\eta_{ка} = 0,8$	2,0	–
4	Увеличение t питательной воды при входе в экономайзер водяного типа на 10 °С при давлении $p = 1,3$ МПа и КПД котлоагрегата $\eta_{ка} = 0,8$	–	0,23–0,24
5	Нагрев питательной воды в экономайзере водяного типа на 6 °С	1,0	–
6	Сокращение t отходящих газов на 10 °С: – для сухого топлива – влажного топлива	0,6 0,7	–
7	Устройство поверхностного экономайзера водяного типа	4–7	–
8	Применение деаэратора вакуумного типа для котельных, использующих газообразный вид топлива	1–1,5	–
9	Изменяемость содержания углекислого газа, находящегося в дымовых газах, на основании оптимального количества на 1 %	–	0,6
10	Сокращение горючих веществ при уносе их дымовым газом на 1 %	0,3–0,7	–
11	Вторичное применение уноса в топливник	2–3	–
12	Применение острого типа дутья	2,1–2,7	–
13	Изменяемость нагрузки котлоагрегата по направлению сокращения от обозначенной на 10 % меняет потерю тепла в атмосферу (для котла с массовой скоростью потока $D = 10$ т/ч)	–	0,2
14	Изменяемость нагрузки котлоагрегата (по направлению повышения) от обозначенной на 10 % повышает потерю тепла с отходящими газами	–	0,5–0,6
15	Образование слоя накипи толщиной 1 мм на внутренней стороне нагревания	–	2
16	Применение парового распыления на мазут, находящийся в форсунках	–	2–4
17	Невозврат конденсата на 1 т	–	0,02 т. у. т.
18	Применение неизолированного парового провода при давлении пара 0,5 МПа	–	0,4 кг/ч усл. т.
19	Выделение пара через отверстие размером в 1 мм при $p = 0,7$ МПа	–	3,6 кг/ч усл. т.
20	Применение притока теплого воздуха, исходящего из верхней зоны котлового зала на каждые 10 000 м ³	0,013 т. у. т.	–
21	Уменьшение величины продува	0,3	–
22	Устройство оборудования по обдуву с целью очистки внешних поверхностей нагревания	2–3	–
23	Функционирование парового котла в режиме уменьшенного давления от 1,3 до 0,5 Мпа	–	6
24	Автоматизирование процессов сгорания и питания паровых котлов	1–4	–
25	Ремонт паровых котлов на основании контрольно-измерительных установок не меньше	3–5	–

**Approximate conditions of productivity and prospects of actions
in increasing the efficiency of steam boilers**

№	Name of events	Saving	Conditions
1	Reduction of air suction in the gas path by 0.1	0.5	–
2	Increase in the coefficient of excess air in the fuel tank by 0.1	–	0.7
3	Increase in the t of feed water at the entrance to the drum of the boiler unit by 10 °C at $p = 1.3$ MPa and $\eta_{ка} = 0.8$	2.0	–
4	The increase in feed water t at the entrance to the water-type economizer is 10 °C at $p = 1.3$ MPa and $\eta_{ка} = 0.8$	–	0.23–0.24
5	Heating of feed water in the water-type economizer at 6 °C	1.0	–
6	Reduction of exhaust gas t by 10 °C: – for dry fuel – wet fuel	0.6 0.7	–
7	Water-type surface economizer device	4–7	–
8	Application of a vacuum type deaerator for boiler houses using a gaseous type of fuel	1–1.5	–
9	Variability of the carbon dioxide content in the flue gases based on the optimal amount per 1%	–	0.6
10	Reduction of combustible substances when carried away by flue gas by 1%	0.3–0.7	–
11	Secondary use of entrainment in the fuel tank	2–3	–
12	Application of the sharp type of blast	2.1–2.7	–
13	The variability of the load of the boiler unit in the direction of reduction from the indicated one by 10% changes the damage to the atmosphere (for the boiler $D = 10$ t/h)	–	0.2
14	The variability of the boiler unit load in the direction of increase from the indicated one increases the heat damage with the exhaust gases by 10%	–	0.5–0.6
15	Scale formation on the inner side of the heating with a thickness of 1 mm	–	2
16	The use of steam atomization of the fuel oil in the injector	–	2–4
17	Non-return of condensate per 1 ton	–	0.02 t. c. f.
18	Application of uninsulated steam wire at a steam pressure of 0.5 MPa	–	0.4 kg/h c. f.
19	Steam is released through a 1 mm hole at $p = 0.7$ MPa	–	3.6 kg/h c. f.
20	Application of the inflow of warm air coming from the upper zone of the boiler room for every 10.000 m ³	0.013 t. c. f.	–
21	Reducing the amount of purge	0.3	–
22	Installation of blowing equipment for the purpose of cleaning the external heating surfaces	2–3	–
23	Operation of the steam boiler in the reduced pressure mode from 1.3 to 0.5 MPa	–	6
24	Automation of the combustion and power supply processes of steam boilers	1–4	–
25	Repair of steam boilers on the basis of control and measuring installations not less than	3–5	–

Основные типы контактных теплообменных аппаратов, их конструкции и принцип действия

С целью нагрева воды преимущественно низкотемпературным газом в основном применяются экономайзеры.

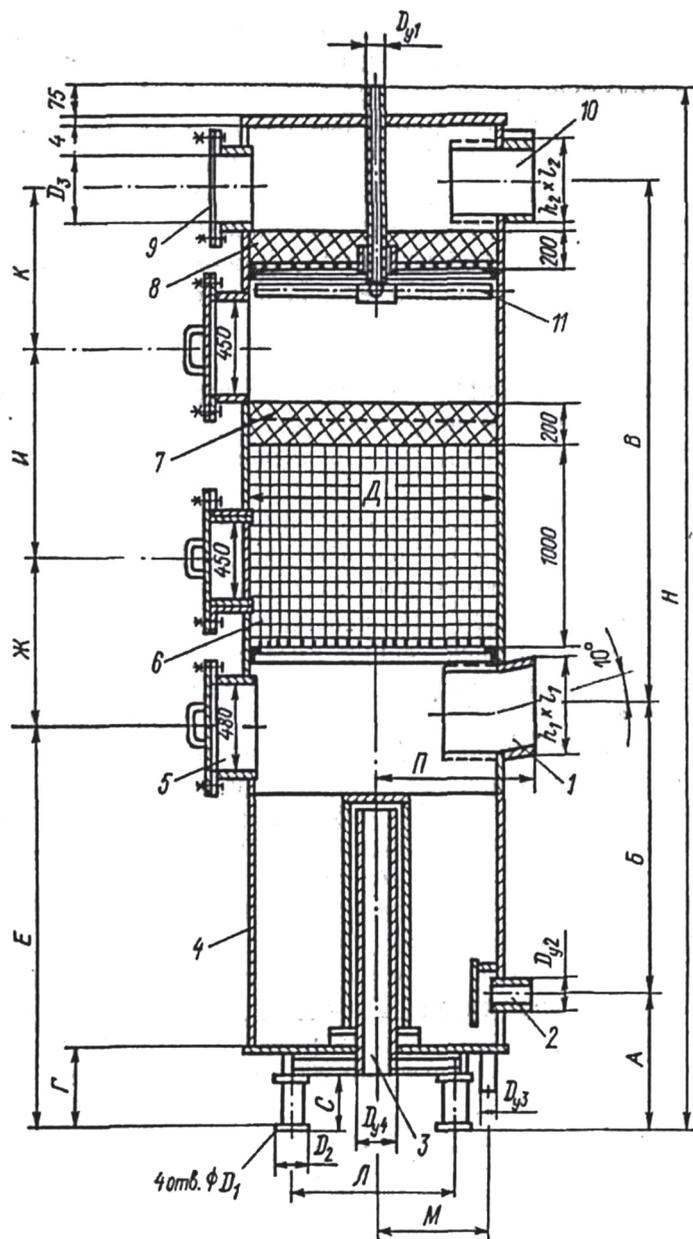


Рис. 1. Блочный контактный экономайзер модели ЭК-БМ1:

- 1 – входной патрубок горячих газов; 2 – штуцер отвода нагретой до необходимой температуры воды;
- 3 – переливной патрубок (переливная труба); 4 – корпус блочного контактного экономайзера; 5 – люк;
- 6 – рабочий ряд кольцевых насадок диаметром 50x50x5 мм, которые выложены слоями;
- 7 – ряд кольцевых насадок (выложены навалом); 8 – каплеулавливающий насадочный ряд;
- 9 – люк – взрывной клапан; 10 – патрубок для отведения охлажденных газов;
- 11 – водораспределитель устройства

Figure 1. Block contact economizer model EK-BM1:

- 1 – the inlet pipe of hot gases; 2 – the outlet of the water heated to the required temperature;
- 3 – the overflow pipe;
- 4 – the housing of the block contact economizer; 5 – the hatch;
- 6 – the working row of annular nozzles with a diameter of 50x50x5 mm, which are lined with layers;
- 7 – a row of annular nozzles (laid out in bulk); 8 – a drip-collecting nozzle row;
- 9 – a hatch – an explosive valve; 10 – a branch pipe for the discharge of cooled gases;
- 11 – a water distributor of the device

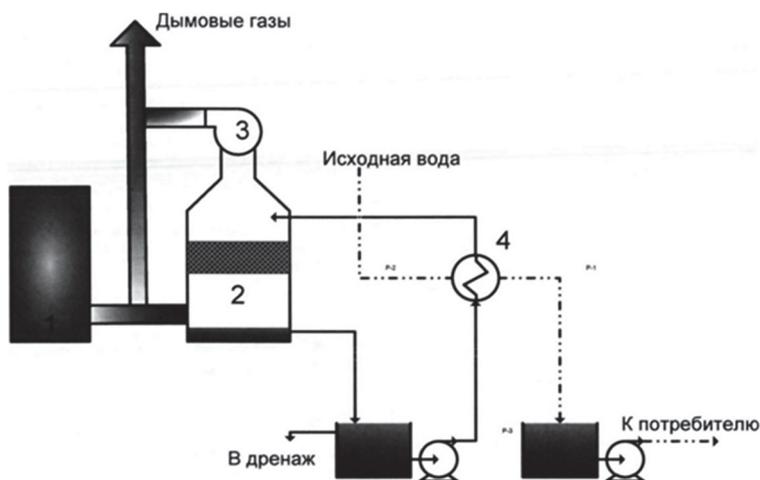


Рис. 2. Процесс утилизации дымовых газов парового котла:

1 – паровой котел; 2 – контактный экономайзер; 3 – вентилятор; 4 – теплообменник; 5 – бак с орошающей водой; 6 – бак для горячего водоснабжения; 7 – насос циркуляционный; 8 – насос для горячего водоснабжения

Figure 2. Process of utilization of flue gases of a steam boiler:

1 – steam boiler; 2 – contact economizer; 3 – fan; 4 – heat exchanger; 5 – tank with irrigation water; 6 – tank for hot water supply; 7 – circulation pump; 8 – pump for hot water supply

Для примера рассмотрим блочный контактный экономайзер, модели ЭК-БМ1 (рис. 1¹). Отметим, что в техническом плане экономайзер является простым смесительным теплообменником, имеющим вид охладительной башни.

Также важно выделить процесс утилизации дымовых газов парового котла, который представлен на рис. 2.

Оценка эффективности эксплуатации контактных теплообменных аппаратов

Продуктивность представленных контактных экономайзеров зависит от количества расходуемой воды. Следовательно, объем нагреваемой воды в данном виде экономайзера должен превосходить потребность в химически очищенной воды в котлах.

Разберем тепловой баланс котла, который функционирует на газе. Так, в случае суммирования баланса на основании высокой теплоты горения топлива баланс отражается следующим уравнением [5]:

$$qhw = q1 + q2 + q3 + q5, \quad (1)$$

где $q1$ – полезно воспринятое котлом тепло; $q2$ – потеря тепла с отходящими газами; $q3$ – потеря тепла, связанная с неполным химическим горением; $q5$ – потеря тепла в атмосферу, кДж/кг.

Рассматривая тепловой баланс котельных устройств, отметим, что его расчет выполняется на основании наименьшей теплоты горения топлива [6].

Наиболее значимым фактором, влияющим на эффективность теплового обмена и тип гидравлического режима, можно назвать такой параметр, как скорость теплообмена контактной камеры.

¹ Д 26-14-88. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Элементы теплообменных аппаратов. Министерство химического и нефтяного машиностроения, 1989.

Эффективность передачи тепла зависит от показателей нескольких потоков тепла:

- теплообмен в системе из дымовых газов и воды;
- испаряемость воды;
- процесс конденсации парообразования.

Однако достаточно тяжело выявить конкретные численные показатели теплового обмена относительно теплообменников и экономайзеров [7]. Для этого необходимы крупномасштабные исследования насадочных камер разного размера с применением в исследованиях экономайзеров, эксплуатация которых предполагается на разных этапах: начиная с этапа конструирования и заканчивая эксплуатацией контактных экономайзеров.

Отметим, что основным условием растекания воды, выравнивания колец, которые забрасываются навалом, и других факторов, от которых зависит данное состояние, выступает конечная продуктивность насадочных частей.

Показатель, от которого зависит массообмен в рассматриваемой системе: количество точек орошения в контактной камере составляет 500 шт на 1 м сечения, что обеспечивает полное орошение насадочного ряда.

Итоговое соотношение для точно выложенных колец (размером $50 \times 50 \times 50$ мм) уменьшается при сокращении числа струй от 1 (в случае количества струй не меньше 500) до 0,394 (в случае количества струй, равного 5).

Математическое моделирование взаимодействия парагазовой смеси с орошаемой водой насадкой

Рассмотрим развитие аддитивных особенностей различных технологических процессов при помощи теории цепей Маркова (рис. 3) [8]. В настоящее время эта теория является наиболее употребительной при разработке математических моделей физико-химических и теплофизических систем.

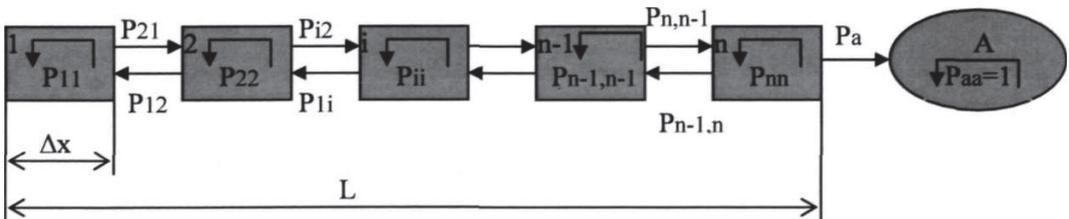


Рис. 3. Развитие процесса цепью Маркова
Figure 3. Development of the Markov chain process

В работах о стратегии системного анализа, разработанной А. Бертье [6], определено, что в рабочем устройстве можно выделить отдельные ячейки, точность степени дифференцирования ячеек зависит от развития теоретической и практической базы современной рассматриваемому устройству эпохи.

Итак, после того как ячейка дифференцирована из системы, ее поведение можно описать при помощи математической модели. Далее на основе данной математической модели предполагается определенный алгоритм, направленный на сбор математических моделей поведения одиночных ячеек в объединенную модель процесса. Данный процесс и был проанализирован.

Кроме того, можно выделить исследования, которые взаимосвязаны с классификацией моделей ячеек на основании системы цепи, переходной матрицы и преобразованием математических моделей.

Математический аппарат моделей ячеек универсален, к тому же их использование для обозначения определенных действий исходит из того, что выбор величины состояния и выявления сущности переходных возможностей может быть собран в матрицу.

Заключение

Модернизация методик и устройств с целью внедрения методов контактного теплового обмена в структуры утилизации тепла уходящего влажного газа теплоприменяющего оборудования предполагает разрешение следующих задач:

1) выделение параметров математической модели теплового массообмена применительно к контактному теплообменнику, используя экспериментальные показатели и выводы промышленных исследований;

2) выбор и доказательство условий оптимальности с целью определения алгоритма использования контактного теплообменника;

3) моделирование условий использования контактного теплообменника и определение воздействия конструктивных и режимных характеристик процесса в отношении его энергопродуктивности;

4) анализ нестационарных условий использования контактных теплообменников на основании вычислительного исследования на созданной компьютерной модели;

5) разработка компьютерного технического способа по расчету действий теплового массообмена для контактных теплообменников с насадкой, которая орошается водой, и определение подходящих эффективных и режимных величин;

6) разработка методов оценки продуктивности применения тепла уходящих влажных газов, которые потребляют тепло устройств с целью нагрева воды, применяемой в технологическом процессе контактных теплообменников.

Список литературы

- [1] Драгунов Ю.Г., Сметанников В.П., Габараев Б.А., Орлов А.Н., Беляков М.С., Дербенев Д.С. Аналитический обзор информации по теплофизическим свойствам гелиево-ксеноновой газовой смеси и рекомендации по их расчету. М., 2012. С. 15–17.
- [2] Куликова Т.Н., Марков П.В., Солонин В.И. Моделирование теплоотдачи к газовому теплоносителю с пониженным значением числа Прандтля // Машиностроение и компьютерные технологии. 2015. № 6. С. 420–437.
- [3] Марков П.В. К вопросу о численном расчете теплоотдачи от стержневых тепловыделяющих элементов ядерных реакторов ВВЭР // Машиностроение и компьютерные технологии. 2014. № 11. С. 790–799. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-chislennom-raschete-teplootdachi-ot-sterzhnevyyh-teplovydelayayuschih-elementov-yadernyh-reaktorov-vver> (дата обращения: 10.01.2021).
- [4] Cebeci T. Analysis of turbulent flows. Elsevier Science, 2004. 260 p.
- [5] Chen W., Lien F., Leschziner M. Non-linear eddy-viscosity modelling of transitional boundary layers pertinent to turbomachine aerodynamics // International Journal of Heat and Fluid Flow. 1998. Vol. 19. No. 4. Pp. 297–306. [http://doi.org/10.1016/S0142-727X\(97\)10012-1](http://doi.org/10.1016/S0142-727X(97)10012-1)
- [6] Weigand B., Ferguson J.R., Crawford M.E. An extended Kays and Crawford turbulent Prandtl number model // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1997. Vol. 40. No. 17. Pp. 4191–4196. [http://doi.org/10.1016/S0017-9310\(97\)00084-7](http://doi.org/10.1016/S0017-9310(97)00084-7)
- [7] Жуков А.В., Сорокин А.П., Кузина Ю.А. Теплообмен и температурные поля твэлов в активных зонах ВВЭР // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: материалы

5-й Международной научно-технической конференции (29 мая – 1 июня 2007 г.).
Подольск: ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2007. URL:
<http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2007/disc/autorun/article77-ru.htm>
(дата обращения: 10.01.2021).

- [8] Кириллов П.Л., Бобков В.П., Жуков А.В., Юрьев Ю.С. Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике: в 3 т. Т. 1. Теплогидравлические процессы в ядерных энергетических установках. М.: ИздАТ, 2010. 776 с.

References

- [1] Dragunov YuG, Smetannikov VP, Gabaraev BA, Orlov AN, Belyakov MS, Derbenev DS. *Analytical review of information on the thermophysical properties of a helium-xenon gas mixture and recommendations for their calculation*. Moscow; 2012. p. 15–17. (In Russ.)
- [2] Kulikova TN, Markov PV, Solonin VI. Modeling of heat transfer to a gas heat carrier with a reduced value of the Prandtl number. *Mashinostroenie i Kompyuternye Tekhnologii*. 2015;(6):420–437. (In Russ.)
- [3] Markov PV. On the issue of numerical calculation of heat transfer from core fuel elements of VVER nuclear reactors. *Mashinostroenie i Kompyuternye Tekhnologii*. 2014;(11):790–799. (In Russ.) Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-chislennom-raschete-teplootdachi-ot-sterzhnevyyh-teplovydelyayuschih-elementov-yadernyh-reaktorov-vver> (accessed: 10.01.2021).
- [4] Cebeci T. *Analysis of turbulent flows*. Elsevier Science; 2004.
- [5] Chen W, Lien F, Leschziner M. Non-linear eddy-viscosity modelling of transitional boundary layers pertinent to turbomachine aerodynamics. *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 1998;19(4):297–306. [http://doi.org/10.1016/S0142-727X\(97\)10012-1](http://doi.org/10.1016/S0142-727X(97)10012-1)
- [6] Weigand B, Ferguson JR, Crawford ME. An extended Kays and Crawford turbulent Prandtl number model. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1997;40(17):4191–4196. [http://doi.org/10.1016/S0017-9310\(97\)00084-7](http://doi.org/10.1016/S0017-9310(97)00084-7)
- [7] Zhukov AV, Sorokin AP, Kuzina YuA. Heat exchange and temperature fields of fuel elements in VVER active. *Ensuring the Safety of Nuclear Power Plants with VVER: Proceedings of the 5th International Scientific and Technical Conference (29 May – 1 June 2007)*. Podolsk: ОКБ “ГИДРОПРЕСС” Publ.; 2007. (In Russ.) Available from: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2007/disc/autorun/article77-ru.htm> (accessed: 10.01.2021).
- [8] Kirillov PL, Bobkov VP, Zhukov AV, Yurev YuS. *Reference book of thermohydraulic calculations in nuclear power engineering. Vol. 1. Thermal-hydraulic processes in nuclear power plants*. Moscow: IzdAt Publ.; 2010. (In Russ.)

Сведения об авторах:

Карев Алексей Николаевич, аспирант, Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Российская Федерация, 117997, Москва, ул. Садовническая, д. 33, стр. 1. E-mail: alexcarew777@yandex.ru

Тюрин Михаил Павлович, доктор технических наук, профессор, Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Российская Федерация, 117997, Москва, ул. Садовническая, д. 33, стр. 1. E-mail: tjurinmp@yandex.ru

Bio notes:

Alexey N. Karev, postgraduate student, Kosygin Russian State University, 33 Sadovnicheskaya St, bldg 1, Moscow, 117997, Russian Federation. E-mail: alexcarew777@yandex.ru

Mikhail P. Tyurin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kosygin Russian State University, 33 Sadovnicheskaya St, bldg 1, Moscow, 117997, Russian Federation. E-mail: tjurinmp@yandex.ru