

два различных материала, это фенопласт-03-010-02 ТВ и АГ-4В. Данные материалы обладают сходными свойствами и используются для изготовления корпусов и вспомогательных приспособлений для электроизмерительных приборов.

Данный материал утилизируется без дальнейшей переработки, так как является легким и занимает большой объем при захоронении. Материал, согласно классификатору отходов, образующихся в Республике Беларусь, имеет 3-й класс опасности и при сжигании подобного материала выделяется большое количество вредных веществ [3].

Следовательно, наиболее перспективным направлением утилизации этих отходов является их вторичная переработка. Однако для реактопластов переработка в данный момент затруднительна, так как пока не существует определенной технологии для переработки, это означает, что вопрос нуждается в детальном изучении, создании теории переработки и апробации ее на практике.

#### Список использованных источников

1. Вторичные материальные ресурсы [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://otherreferats.allbest.ru>. – Дата доступа: 20.03.2020.
2. Вторичные материальные ресурсы [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://studref.com/>. – Дата доступа: 20.03.2020.
3. Общегосударственный классификатор Республики Беларусь 2019: статистический сборник. – Минск, 2019. – 88 с.

УДК 678.5

## РАСЧЕТ КОНВЕКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА КОТЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ

*Кузьменков С.М., асс., Котов А.А., асс., Дрюков В.В., доц.,  
Мовсесян В.Ю., ст. пр., Шлыков В.Н., студ.*

*Витебский государственный технологический университет,  
г. Витебск, Республика Беларусь*

Реферат. В статье рассматриваются вопросы, связанные с определением конвективной поверхности нагрева водогрейных котлов на промышленных котельных. Предложена математическая модель для расчета передаваемого теплового потока через конвективную поверхность при использовании оребренных труб.

Ключевые слова: конвективная поверхность, водогрейные котлы, оребренные трубы.

В настоящее время в Республике Беларусь вопросы экономического развития страны и её энергетической безопасности тесно связаны с энергоэффективностью. При этом большое количество энергоресурсов потребляется котельными, оборудованными водогрейными котлами КВГМ, следовательно, их модернизация должна обеспечить существенный экономический эффект. Водогрейные стационарные котлы КВГМ-100 теплопроизводительностью 116,3 МВт предназначены для получения горячей воды с номинальной температурой 150 °С, используемой в системах отопления, вентиляции и горячего водоснабжения промышленного и бытового назначения, а также для технологических целей. Котлы имеют П-образную компоновку, топочную камеру ( $L = 6208$  мм) и конвективную шахту ( $L = 3200$  мм).

В настоящее время на основе практики эксплуатации признано, что конвективная поверхность нагрева из труб  $28 \times 3$  мм в водогрейных котлах КВГМ является их конструктивно наиболее слабым местом. Её модернизация позволит достичь существенной экономии топлива, а также увеличить эксплуатационную надежность и ресурс работы конвективной поверхности.

При установившемся режиме работы котла теплообмен через конвективные поверхности нагрева остается стабильным, поэтому при разработке математической модели можно считать процесс стационарным.

Интенсивность переноса тепла через стенку трубы может быть определена согласно уравнению теплопередачи

$$q_l = \pi \cdot k_l \cdot (t_{жк1} - t_{жк2}), \text{ Вт/м}, \quad (1)$$

где  $t_{жк1}$ ,  $t_{жк2}$  – температура соответственно горячей и холодной среды, °С;  $k_l$  – линейный коэффициент теплопередачи,  $\text{Вт/м}\cdot\text{град}$ :

$$k_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda_{cm}} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}}; \quad (2)$$

$\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – в общем случае суммарные коэффициенты теплоотдачи с внутренней и наружной стороны трубы,  $\text{Вт/м}^2\cdot\text{град}$ ;  $d_1$ ,  $d_2$  – внутренний и наружный диаметры трубы, м;  $\lambda_{cm}$  – коэффициент теплопроводности материала трубы, для стальных труб  $\lambda_{cm} = 45 \text{ Вт/м}\cdot\text{град}$ .

В процессе теплопереноса от дымовых газов к воде в конвективном пучке котла основную роль играет конвективный теплообмен, однако конвективные пучки получают теплоту не только путем конвективного теплообмена, но и посредством тепловосприятия прямого излучения топки. При расчете такой поверхности нагрева необходимо учитывать интенсивность теплоотдачи от газов к поверхности труб пучка как за счет конвективного теплообмена, так и за счет теплообмена излучением. В этом случае суммарный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \alpha_k + \alpha_l. \quad (3)$$

Для нахождения значения коэффициента теплоотдачи конвекцией  $\alpha_k$  необходимо использовать критериальные уравнения. При вынужденной конвекции критериальное уравнение в общем случае имеет вид

$$Nu = A \cdot Re^m \cdot Pr^n. \quad (4)$$

В этом уравнении:  $Nu$  – число Нуссельта,  $Re$  – критерий Рейнольдса,  $Pr$  – критерий Прандтля. При вынужденном движении среды в трубах для случая турбулентного режима движения, что будет иметь место при  $Re > 10^4$ , критериальное уравнение принимает вид

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43}. \quad (5)$$

В этом случае определяющим размером будет являться внутренний диаметр трубы ( $l = d_1$ ), а определяющей температурой – средняя температура воды в трубе  $t_{жк1}$ . При омывании поперечным потоком труб для случая турбулентного режима движения, что будет иметь место при  $Re > 10^3$ , критериальное уравнение принимает вид

$$Nu = 0,25 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,38}. \quad (6)$$

Здесь определяющим размером будет являться наружный диаметр трубы ( $l = d_2$ ), а определяющей температурой – средняя температура омывающих трубу дымовых газов  $t_{жк2}$ .

Как следует из расчетов, при шаге оребрения  $n = 0,7 \text{ мм}$  наружный диаметр оребрения составляет  $d_{2p} = 49,7 \text{ мм}$ , что превышает продольный шаг труб конвективного пучка  $h_x = 40 \text{ мм}$ . Для обеспечения возможности размещения оребренных труб предлагается увеличить продольный шаг в два раза, до  $80 \text{ мм}$ , а для сохранения при уменьшившемся количестве труб прежней суммарной площади проходного сечения трубы размером  $28 \times 3 \text{ мм}$  заменить трубами размером  $38 \times 4 \text{ мм}$ . Результаты расчета для исходного и предлагаемого варианта исполнения конвективного пучка труб котельного агрегата КВГМ-100 приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительные результаты расчетов исходного и предлагаемого вариантов исполнения конвективного пучка труб котельного агрегата КВГМ-100

Параметры	Исходный вариант исполнения	Предлагаемый вариант исполнения
Наружный диаметр труб $d_2$ , мм	28	38
Толщина стенки труб $\delta$ , мм	3	4
Внутренний диаметр труб $d_1$ , мм	22	30
Продольный шаг труб $h_x$ , мм	40	80
Поперечный шаг труб $h_y$ , мм	64	64
Коэффициент увеличения поверхности $\psi$	56,7	59,1
Коэффициент оребрения $\phi$	44,5	46,6
Наружный диаметр оребрения $d_{2p}$ , мм	49,7	62,1
Линейная плотность теплового потока до оребрения $q_l$ , Вт/м	3271,8	4034,2
Линейная плотность теплового потока после оребрения $q_l'$ , Вт/м	69325,5	100653,0

Таким образом, замена в конвективном пучке котельного агрегата КВГМ-100 гладких труб наружным диаметром 28 мм на оребренные трубы наружным диаметром 38 мм с коэффициентом оребрения  $\phi = 46,6$  позволяет повысить плотность передаваемого теплового потока в 30 раз, с 3271,8 Вт/м до 100653,0 Вт/м. Такая эффективность теплообмена в конвективном пучке обеспечит повышение КПД котла в целом и, следовательно, снижение потребления топлива котельной. Например, на котельной «Южная» (г.Витебск) котлы КВГМ-100 потребляют свыше 10 тыс. т.у.т. в год, поэтому мероприятия по модернизации этих котлов способны обеспечить экономию сотен т.у.т.

Список использованных источников

1. Нащокин, В. В. (2018), Техническая термодинамика и теплопередача / В. В. Нащокин. – Москва. – 469 с.
2. Лебедев, В. М. (2017), Тепловой расчет котельных агрегатов средней паропроизводительности / В. М. Лебедев. – Москва. – 208 с.

УДК 004.356.2

## СТЕНД ДЛЯ ПРОВЕРКИ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО АДДИТИВНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

**Ковчур А.С., к.т.н., доц., Марушко Е.И., студ., Михнов Т.В., студ., Щербатый А.О., студ.**

*Витебский государственный технологический университет,  
г. Витебск, Республика Беларусь*

Реферат. В статье рассмотрена методика проектирования лабораторного стенда с учетом оптимизации расхода материала, времени печати, анализа деталей и образцов для испытаний изделий с использованием современных программных продуктов. Описана адаптация возможностей лабораторного стенда под требования проведения стандартных испытаний на растяжение.

Ключевые слова: 3D-печать, материалы для аддитивного синтеза, оптимизация, прочностные характеристики, напряжения.

Задачи изучения дисциплины «Материалы аддитивного синтеза» – дать обучающимся студентам специальности 1-36 07 02 «Производство изделий на основе трехмерных технологий» систематические сведения о группах материалов (металлах, полимерах, композиционных материалах, керамике); общих закономерностях формирования структуры