

На практике расчет энергии разрушения полимерной плёнки может повысить производительность сортировочных комплексов, снизить энергозатраты и улучшить гранулометрический состав RDF-топлива, что, в свою очередь, расширит возможности его использования в качестве топлива.

### **Список использованных источников**

1. Как в Беларуси работают над улучшением системы обращения с твердыми коммунальными отходами – [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sb.by/articles/davayte-nachistotu-belarus-tko.html> (Дата обращения: 01.11.2025).
2. Селективное измельчение материалов в центробежной мельнице многократного ударного нагружения: автореф. дисс. канд. техн. наук: 05.17.08 / Гребенчук П.С. – Минск. 2011. – 23 с.
3. Душкевич Д.В. Гребенчук П.С.// Исследование и анализ технологических параметров центробежно-ударного оборудования по измельчению полимерных материалов для получения RDF-топлива. // НЕФТЕГАЗОХИМИЯ – 2024 : материалы VII Междунар. науч.-техн. форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке, Минск, 13–15 ноября 2024 г. – Минск БГТУ, 2024.

УДК 536.24

**Е.А. Колядин, С.В. Виноградов**  
Астраханский государственный технический университет  
Астрахань, Россия

## **СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУДОВЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С УТИЛИЗАЦИОННЫМИ КОТЛАМИ**

*Аннотация. В работе предложен к использованию и научно обоснован метод интенсификации теплообмена, получены новые аналитические зависимости для расчета теплообмена и аэродинамических характеристик в судовых газотрубных утилизационных котлах с винтовыми ленточными вставками.*

**E.A. Koliadin, S.V. Vinogradov**  
Astrakhan State Technical University  
Astrakhan, Russia

## WAYS TO INCREASE THE EFFICIENCY OF SHIP POWER PLANTS WITH WASTE HEAT BOILERS

*Abstract. The paper proposes and scientifically substantiates a method for intensifying heat exchange, and obtains new analytical dependencies for calculating heat exchange and aerodynamic characteristics in marine gas-tube waste heat boilers with screw ribbon inserts.*

Правильно организованная и эффективная работа утилизационных котлов (УК) в большей степени обеспечивает, во-первых, высокую эффективность всей судовой энергетической установки (СЭУ), включая главные двигатели и, во-вторых, что не менее важно, нормальную жизнедеятельность судового экипажа. Это может быть достигнуто используя методы интенсификации конвективного теплообмена в утилизационных котлах.

Методологической базой работы являются исследования таких ученых как М. А. Михеев, Г. А. Дрейцер, В. А. Осипова, В. К. Мигай, В. К. Щукин, А. К. Ильин, М.К. Овсянников, Л.П. Коршунов, В.М. Селиверстов и др. В работе использованы методы обработки статистических данных по использованию утилизационных котлов на судах. Объем выборок составил 608 судов с мощностью главных двигателей от 150 до 1000 кВт. Анализ СЭУ показал, что на 37% судов различного назначения с мощностью главных двигателей от 150 до 1000 кВт используются УК, причем на 64% этих судов установлены газотрубные утилизационные водогрейные котлы (УВК) серии КУВ и КАУ, 36% составляют утилизационные паровые котлы (УПК).

Газотрубные УВК по сравнению с водотрубными обладают большим водосодержанием, а, следовательно, более устойчивы к температуре воды на выходе, что особенно актуально в современных автоматизированных водогрейных котлах. Обзор газотрубных УК выпускаемых иностранными фирмами показал, что по конструкции они аналогичны котлам серии КУВ и КАУ.

Выполненный анализ литературных источников по способам повышения эффективности утилизации теплоты определил интенсификацию конвективного теплообмена как наиболее перспективный способ для модернизации существующих и создания современных высокоэффективных УК. Анализ работ В.К. Мигая, Э.К. Калинина, Г.А. Дрейцера, В.К. Ермолина, В.К. Щукина, В.П. Харитонова, В.М. Бузника, Г. Н. Делягина и др. в области интенсификации теплообмена позволил выбрать из всего многообразия предлагаемых методов интенсификации конвективного теплообмена

наиболее целесообразный для газотрубных УВК – закрутку потока газа в трубах при использовании винтовых ленточных вставок (Таблица 1).

**Таблица 1 - Методы интенсификации теплообмена**

Метод интенсификации	$Nu_{инт}/Nu_o$	$\xi_{инт}/\xi_o$
	$Re 5 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^4$	
Винтовая ленточная вставка	1,8 $\div$ 2,7	4 $\div$ 4,5
Кольцевые диафрагмы	2,0 $\div$ 2,4	3,5 $\div$ 4
Шнековая вставка	1,0 $\div$ 1,7	2,5 $\div$ 5,2
Сферические выступы и выемки на стенках канала	1,2 $\div$ 1,3	1,3 $\div$ 1,7
Каналы с пружинными вставками	1,7 $\div$ 2	3 $\div$ 7
Конфузор-диффузор	1,5	1,5
Витые трубы	1,2 $\div$ 1,4	1,3 $\div$ 1,7
Акустическое поле	1,5 $\div$ 2	-
Электромагнитное поле	2 $\div$ 2,5	-

$Nu$  – критерий Нуссельта;  $\xi$  - коэффициент аэродинамического сопротивления; индекс «инт» для интенсифицированных поверхностей; «о» для полой, гладкой трубы

Закрутка потока в трубах является эффективным методом интенсификации конвективного теплообмена. В этом случае увеличиваются местные пристеночные скорости, за счет добавления тангенциальной скорости  $v$ , и происходит общая перестройка течения, которые способствуют разрушению пограничного слоя и росту теплоотдачи.

К достоинствам данного метода следует также отнести: простоту изготовления и установки винтовых ленточных вставок; отсутствие значительных изменений конструкции существующих УК; возможность применения для сильнозагрязненных газовых потоков не нарушая технологические и механические свойства труб; наибольшее увеличение теплоотдачи ( $Nu_{инт}/Nu_o$ ) по сравнению с полыми трубами в диапазоне изменения  $Re 5 \cdot 10^3 \div 2 \cdot 10^4$ , характерных для газотрубных УК.

В соответствии с правилами моделирования и на основе теории подобия спроектирована и создана экспериментальная установка [1], позволяющая исследовать теплоотдачу и аэродинамику в трубе с изменяющимся расходом и геометрией канала посредством установки винтовых ленточных вставок с различными относительными шагами

(S/d). При проведении эксперимента поочередно применялись 5 винтовых ленточных вставок, выполненных из стального листа толщиной 2 мм. Полный шаг между соседними витками (S) вставок варьировался таким образом, чтобы получить относительные шаги (S/d) 6, 7, 8, 10, 12.

Методика обобщения экспериментальных данных производилась математической обработкой данных в виде безразмерных критериальных зависимостей вида:  $Nu = A \cdot Re^n$ ,  $Nu = C \cdot (S/d)^k$ ,  $\square = B \cdot Re^m$  и  $\square = E \cdot (S/d)^h$  для каждой винтовой ленточной вставки. Обработка показала, что для вставок с S/d 6, 7, 8, 10, 12 теплоотдача ( $Nu_{\text{инт}}/Nu_o$ ) увеличилась соответственно в 2,1; 1,9; 1,8; 1,7; 1,6 раза, аэродинамическое сопротивление ( $\square_{\text{инт}}/\square_{\square_o}$ ) соответственно в 3,6; 3,2; 2,9; 2,6; 2,4 раза.

Обработка данных по теплообмену показала, что теплоотдача в пределах изменения параметров, имевших место в эксперименте ( $6 < S/d < 12$ ;  $7,7 \cdot 10^3 < Re < 17,5 \cdot 10^3$ ), с доверительным интервалом  $\pm 3\%$  и вероятностью 97% описывается обобщающей аналитической зависимостью:

$$Nu = 0,2216 \cdot Re^{0,71} \cdot (S/d)^{-0,41}$$

Анализ данных по аэrodинамике показал, что коэффициент аэродинамического сопротивления в пределах изменения параметров, имевших место в экспериментах, с доверительным интервалом  $\pm 5\%$  и вероятностью 93 % описывается обобщающей аналитической зависимостью:

$$Nu = 18,9 \cdot Re^{-0,425} \cdot (S/d)^{-0,6}$$

Полученные зависимости позволяют достаточно просто оценить увеличение теплоотдачи и аэродинамического сопротивления газового потока при применении винтовых ленточных вставок с различными геометрическими характеристиками и на основе оценки подобрать наилучший вариант геометрии вставки для конкретной конструкции газотрубного УВК.

В работе по уточненным методикам теплового и аэродинамического расчетов УВК с винтовыми ленточными вставками и без них, с использованием полученных аналитических зависимостей, были проведены расчетно-теоретические исследования показателей работы УВК в составе СЭУ судов различного назначения. Выборка составила 32 проекта судов, 12 из которых имеют в своем составе УВК КУВ-100, 12 – КАУ-4,5 и 8 – КАУ-1,7.

Уточненная методика теплового расчета УВК основана на обобщенной математической модели УВК предложенной М.Н. Покусаевым и С.В. Виноградовым [2]. Обобщенная модель УВК

представляет собой синтез известных математических моделей, учитывает особенности конструкции, условия эксплуатации, теплопередачи, влияния отложений и пульсации давления в потоке газа на теплообмен в УВК. В основу модели положен принцип поинтервальной линеаризации (деления поверхности нагрева УВК на интервалы по ходу движения теплоносителей), позволяющий учитывать детальные изменения режима теплопередачи при движении теплоносителей от одной координаты поверхности к другой. Результаты расчета по предыдущему интервалу будут являться исходными данными для следующего.

Результаты исследования представлены в виде сравнительного анализа показателей работы УВК базовой конструкции и с установленными в трубах винтовыми ленточными вставками [3]. В качестве показателей принятых для сравнения выбраны: температуры теплоносителей на выходе из УВК (температура газов  $t_g''$  и температура воды  $t_w''$ ), тепловая мощность УВК  $P_k$ , коэффициент утилизации  $\eta$  и полное аэродинамическое сопротивление котла  $\Delta h_k$  (Рис. 1).

Результаты исследования показали. При установке винтовых ленточных вставок происходит снижение температуры газов на выходе из УВК, что является следствием более полного использования теплоты отработавших газов дизелей и приводит к повышению показателей эффективности  $P_k$  и  $\eta$  в среднем на 38%. Данное повышение происходит на фоне незначительного возрастания полного аэродинамического сопротивления котла  $\Delta h_k$  в среднем на 16%. Рост полного аэродинамического сопротивления котла при существующих конструкциях систем газовыххлопа дизелей СЭУ не оказывает существенного влияния на общее сопротивление системы.

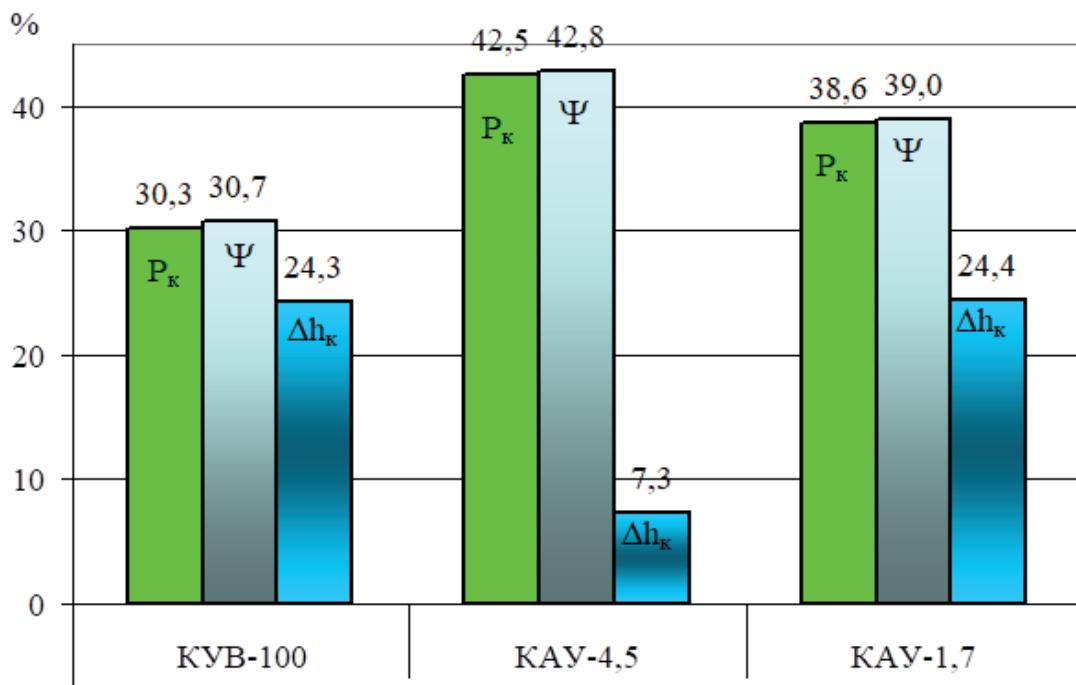


Рис. 1- Увеличение показателей УВК

Наилучшие показатели при установки винтовых ленточных вставок получены для утилизационных комплексов с УВК КАУ-4,5, что объясняется с конструкцией УВК серии КАУ. При установке в трубах УВК винтовых ленточных вставок температура газов на выходе снижается на 12%, что положительно влияет на уменьшение тепловых выбросов в атмосферу.

#### Список использованных источников

1. Виноградов С. В. Стенд для исследования теплообменных процессов в судовых утилизационных котлах / С. В. Виноградов, Е. А. Колядин, А. А. Толстов // Судовая техника. Причины отказов и их устранение. Совершенствование и развитие. – 2005. – М.:ООО «Корабел». – С. 3–4.
2. Виноградов С. В. Повышение эффективности судовых систем использования вторичных энергетических ресурсов с водогрейными утилизационными котлами: дис. ... канд. техн. наук. - Астрахань, 2001.
3. Колядин, Е. А. Расчетно-теоретическое исследование влияния установки винтовых ленточных вставок на работу утилизационных котлов в составе СЭУ / Е.А. Колядин, С. В. Виноградов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Морская техника и технология.-2008.- №5(46).-С.123-127.