

<http://dx.doi.org/10.15589/jnn20140610>

УДК 621.43.016

М 87

ANALYSIS OF POSSIBILITY OF USE OF COMPACT LIGHTWEIGHT AND NOT DISSECTED HEAT-EXCHANGE SURFACE OF AIR COOLERS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТРУБЧАТО-ПЛАСТИНЧАТОЙ НЕРАСРЕЩЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА ДЛЯ ОХЛАДИТЕЛЕЙ НАДДУВОЧНОГО ВОЗДУХА ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Yuri L. Moshentsev

yuri.moshentsev@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-1377-7498

Oleksiy A. Gogorenko

oleksii.gogorenko@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-9157-6659

Ю. Л. Мошенцев,

канд. техн. наук, проф.;

А. А. Гогоренко,

канд. техн. наук, доц. НУК

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolayiv

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев

Abstract. The use of the compact lightweight and not dissected heat-exchange surface for the air coolers of internal combustion engines has been discussed. The aim of the studies is the presentation of the developed technique of processing the results obtained in the tests of the experimental air coolers. The technique is convenient for the precise analysis of the consequences of the use of the selected heat-exchange surface for the air coolers of the internal combustion engines varying in their capacity and purpose. The experimental data processing is performed. The criterial equation constants for the heat exchange and resistance of the selected heat exchange surface is obtained. The results of the studies can be used for designing the air coolers of the internal combustion engines. The obtained criterial equations allow determining the effectiveness of the designed heat exchangers and the air pressure drop.

Keywords: charge air cooler; flat-oval tube; heat exchange surface; heat transfer; heat dissipation.

Аннотация. Выполнен анализ результатов экспериментального исследования компактной и легкой трубчато-пластинчатой нерасщепленной поверхности теплообмена для охладителей наддувочного воздуха двигателей внутреннего сгорания. На основании анализа сделан вывод о нецелесообразности использования такой поверхности теплообмена для тепловозного двигателя типа Д49.

Ключевые слова: охладитель наддувочного воздуха; плоскоовальная трубка; поверхность теплообмена; теплообмен; теплоотдача.

Анотація. Виконано аналіз результатів експериментального дослідження компактної і легкої трубчато-пластинчастої нерозсіченої поверхні теплообміну для охолоджувачів наддувочного повітря двигунів внутрішнього згоряння. На підставі аналізу зроблено висновок про недоцільність використання такої поверхні теплообміну для тепловозного двигуна типу Д49.

Ключові слова: охолоджувач наддувочного повітря; плоскоовальна трубка; поверхня теплообміну; теплообмін; тепловіддача.

REFERENCES

- [1] Bazhan P.I. *Raschet i konstruirovaniye okhladiteley dizeley* [Calculation and design of the coolers of the diesel engines]. Moscow, Transport Publ., 1981. 168 p.
- [2] Burkov V.V., Indeykin A.I. *Avtotraktornye radiatory* [Automotive radiators]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1978. 216 p.
- [3] Gogorenko A.A. Sozdanie perspektivnykh konstruksiy okhladiteley nadduvochnogo vozdukha teplovoznykh dvigateley (Development of the advanced constructions of the air coolers of the locomotive diesel engines). *Visnik NUK – NUS Journal. Electronic Edition*, 2011, issue 1. Available at: <http://ev.nuos.edu.ua>.
- [4] Moshentsev Yu.L., Nagornyy A.V., Gogorenko A.A. O tselesoobraznosti primeneniya razlichnykh vidov poverkhnostey teploobmena v okhladitelyakh nadduvochnogo vozdukha teplovoznykh dvigateley [On the expediency of the use of various types of the heat exchange surfaces in the air coolers of the railway diesels]. *Lokomotiv-inform – Locomotive-inform*, 2010, issue 4. pp. 14–17.

- [5] Moshentsev Yu.L., Gogorenko A.A., Tyagniryadno B.A., Minchev D.S., Nagornyy A.V. Opyt razrabotki vodo-vozdushnykh okhladiteley nadduvochnogo vozdukha novogo pokoleniya (Experience in the development of the water-air coolers of the new generation). *Visnik NUK–NUS Journal. Electronic Edition*, 2013, issue 2. Available at: <http://ev.nuos.edu.ua>.
- [6] Aurubis company. *The aurubis company official site*. Available at: <http://www.aurubis.com>. (Accessed 25 November 2014).
- [7] CuproBrazе Technology. *The CuproBrazе Alliance official site*. – Available at: http://www.cuprobrazе.com/over_tech.asp. (Accessed 25 November 2014).
- [8] Gustafsson B., Scheel J. *CuproBrazе Mobile Heat Exchanger Technology*. SAE Technical Paper Series, 2000, issue 3456.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Для охладителей наддувочного воздуха двигателей внутреннего сгорания в настоящее время применяют компактные и легкие поверхности теплообмена (ПТ). Такие ПТ в свое время выполнялись с применением пайки оловянистыми припоями, что отрицательно сказывалось на ресурсе теплообменников, особенно в связи с ростом давления наддува. Был период, когда охладители наддувочного воздуха (ОНВ) выполнялись на базе ПТ из труб с накатным оребрением, что позволяло исключить пайку и увеличить их ресурс. Эти ПТ отличались высокой надежностью и хорошо работали как на пресной, так и на забортной воде. В то же время масса ОНВ, выполненных на базе таких ПТ, была существенно выше, чем изготовленных с применением пайки. Паяные ПТ имели тонкостенные трубки и более удачные параметры оребрения. Их стоимость, как и масса, были намного ниже трубчатых. В настоящее время практически все ОНВ охлаждаются теплоносителем внутреннего контура (обычно пресная вода или низкотемпературные жидкости). Это снимает проблему использования тонкостенных трубок. Неудачная пайка оловянистыми припоями в настоящее время заменяется технологией спекания с применением материалов, стойких к высоким температурам и вибрациям. В частности, широкое применение получила технология CuproBrazе [7, 8], которая позволяет выполнять ПТ, нормально рабо-

тающие при температурах, значительно превышающих температуры наддувочного воздуха за компрессором при высоком давлении наддува двигателей.

В настоящее время Бериславский машиностроительный завод (БерМЗ) занимается поиском современной трубчато-пластинчатой поверхности теплообмена для ОНВ вместо накатной круглотрубчатой, традиционно применявшейся им для производства ОНВ. Новая ПТ позволит существенно снизить массу теплообменной поверхности в охладителях наддувочного воздуха и обеспечит рост эффективности при сохранении их габаритов.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Альтернативные ПТ, обладающие меньшей массой и обеспечивающие значительное снижение стоимости ОНВ, могут быть получены на основе применения трубчато-пластинчатых поверхностей теплообмена различных конфигураций [1, 2]. В частности, авторами была выбрана и испытана такая ПТ [3, 4] сначала на модели, а затем на натурном образце ОНВ. Исследованная трубчато-пластинчатая поверхность теплообмена, выполненная на основе коридорного пучка плоскоовальных труб с групповым поперечным оребрением плоскими пластинами, имеющими поперечные выштамповки в виде треугольного выступа, показана на рис. 1. Обозначение поверхности теплообмена – ТПК_{нв}.

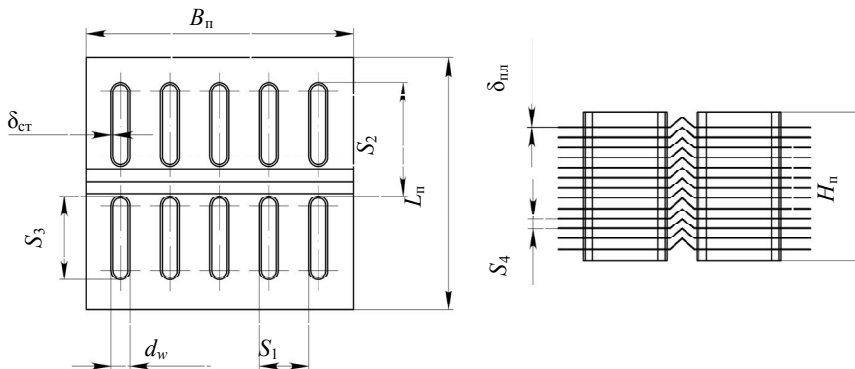


Рис. 1. Поверхность теплообмена: d_w – высота поперечного сечения трубки; S_1 – расстояние между трубками в поперечном ряду; S_2 – шаг между поперечными рядами трубок; S_3 – наибольший размер поперечного сечения трубки; S_4 – шаг между ребрами; $\delta_{ст}$ – толщина стенки трубки; $\delta_{пл}$ – толщина пластины оребрения; H_n – высота пучка; L_n – длина пучка; B_n – ширина пучка

Эта ПТ обеспечила хорошие параметры ОНВ для двигателя типа Д49 (16ЧН 26/26 мощностью 2950 кВт). Эффективность ОНВ после длительной эксплуатации – $\eta = 0,96$ при воздушном сопротивлении $\Delta p = 260$ мм вод. ст. Опытный образец натурального ОНВ с такой ПТ удовлетворительно прошел стендовые вибрационные испытания [5] и испытания на двигателе. В то же время вследствие использования оловянистых припоев и устаревшей технологии изготовления обнаружился ряд негативных явлений, таких, как нестабильность теплотехнических свойств ПТ в условиях предложенной технологии изготовления, чрезмерная сложность конструкции изделия при условии обеспечения заданной прочности, предположительно низкий ресурс изделия и некоторые другие.

В результате БерМЗ отказался от попыток изготовления ОНВ с альтернативным видом ПТ на базе собственных технологий и обратился к производителям, готовым предоставить необходимые технологии или готовые комплектующие для производства новых ОНВ на базе альтернативных ПТ. Одной из таких организаций, готовых к сотрудничеству, оказалось дочернее предприятие компании Augubis в Швеции [6]. Предприятие владеет технологией CuproBrazе и современными технологиями изготовления легких и компактных трубчато-пластинчатых ПТ. По просьбе БерМЗ предприятие Augubis начало подбор подходящей ПТ для изготовления ОНВ с параметрами, заявленными БерМЗ. В результате была выбрана трубчато-пластинчатая коридорная поверхность теплообмена с продольным оребрением труб пластинами, несущими волнообразное нерасsectенное оребрение П-образного поперечного сечения (рис. 2).

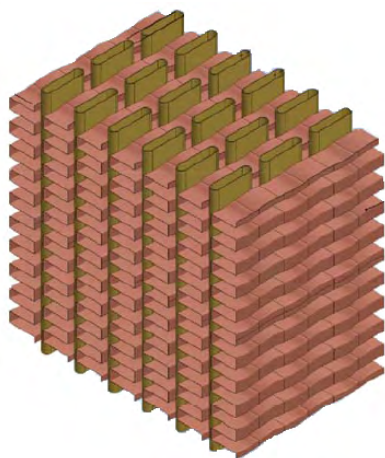


Рис. 2. Фрагмент теплообменного элемента экспериментальной модели охладителя наддувочного воздуха

Геометрические параметры поверхности теплообмена, изображенной на рис. 2, приведены в табл. 1.

На ее основе изготовлен экспериментальный образец модели ОНВ (рис. 3) и выполнены первые экспериментальные исследования. Результаты были представлены Бериславскому машиностроительному

заводу. В то же время результаты не были представлены таким образом, чтобы заказчик смог количественно оценить те параметры (как минимум, η и Δp), которые имел бы натуральный ОНВ на двигателе, если бы он был выполнен с этой ПТ.

Таблица 1. Геометрические параметры трубчато-пластинчатой поверхности теплообмена

Параметр	Обозначение	Значение, мм
Высота поперечного сечения трубки в воздухе	d_w	3,40
Расстояние между трубками в поперечном ряду	S_1	11,20
Шаг между поперечными рядами плоскоовальных трубок	S_2	21,60
Наибольший наружный размер поперечного сечения плоскоовальной трубки	S_3	18,45
Шаг между ребрами	S_4	3,73
Толщина стенки плоскоовальной трубки	$\delta_{ст}$	0,40
Толщина пластины оребрения	$\delta_{пл}$	0,05

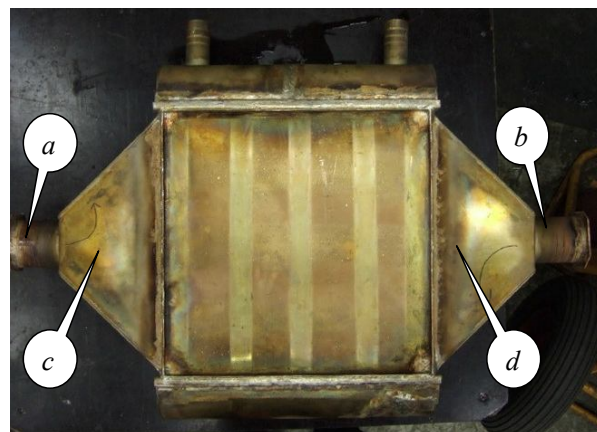


Рис. 3. Модель экспериментального ОНВ

ЦЕЛЬЮ СТАТЬИ является представление разработанной методики обработки результатов испытаний, удобной для точного анализа вследствие применения выбранной поверхности теплообмена для охладителей наддувочного воздуха двигателей внутреннего сгорания.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Предприятие Augubis заявило, что не удовлетворено результатами испытаний и собирается подобрать новую ПТ, а также провести новые испытания. Поскольку для завода-заказчика осталось, в определенной степени, непонятным такое заключение Augubis, он обратился к авторам статьи с просьбой провести анализ результатов испытаний на понятной ему основе, чтобы результаты были однозначными и информативными.

Основные результаты испытаний (представлены Augubis) даны на рис. 4 и 5.

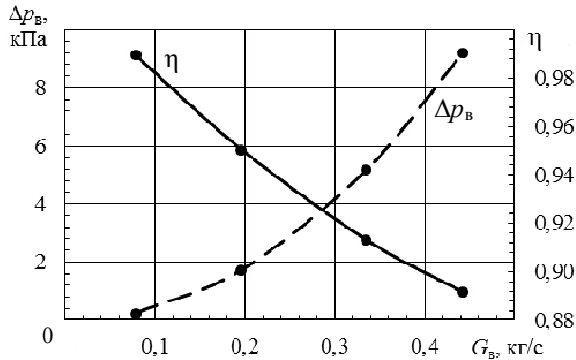


Рис. 4. Зависимость воздушного сопротивления и эффективности ОНВ от расхода наддувочного воздуха

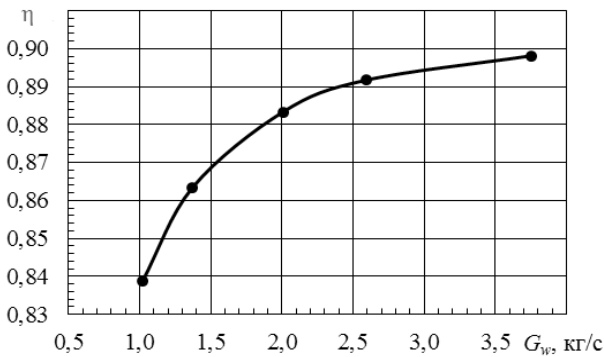


Рис. 5. Зависимость эффективности ОНВ от расхода охлаждающей жидкости

Из рис. 4 видно, что теплообменный элемент экспериментального ОНВ обладает сопротивлением движению наддувочного воздуха, значительно превышающим привычные значения. Предположительно (более точно установить оказалось невозможным) воздушное сопротивление образца измерялось между точками *a* и *b* (патрубки подвода и отвода наддувочного воздуха), что должно было увеличить действительное сопротивление пучка на сопротивление присоединенных к нему диффузора *c* и конфузора *d* (см. рис. 3). Сопротивление этих участков было установлено расчетным путем и вычтено из сопротивления, установленного в эксперименте. В результате зависимость воздушного сопротивления ОНВ от расхода наддувочного воздуха получила вид, показанный на рис. 6.

Следует отметить, что подобные испытания, проводившиеся ранее авторами, проходили на стенде, где площади сечений воздушных труб на входе в пучок и на выходе из него были равны площадям фронтов пучка [3]. Это исключало погрешности при определении воздушного сопротивления.

Методика обработки экспериментальных данных, предложенная авторами, основана на получении коэффициента теплоотдачи от воздуха расчетным путем через определение коэффициента теплопереда-

чи как функции КПД теплообменника, для которого известна схема взаимного течения теплоносителей и особенность перемешивания воздушного потока в каждом поперечном сечении по его ходу. При анализе принималось отсутствие загрязнений с обеих сторон поверхности.

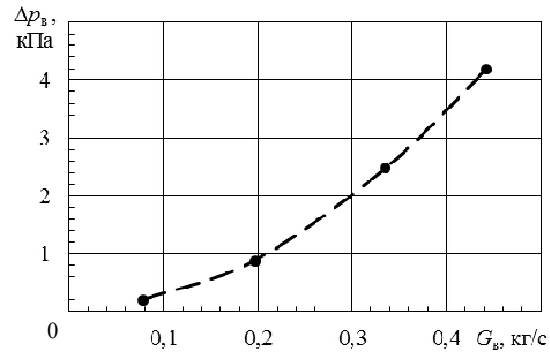


Рис. 6. Зависимость воздушного сопротивления теплообменного элемента ОНВ от расхода наддувочного воздуха

Ход вычислений в примененной методике следующий.

1-й шаг. Вычисляется тепловой КПД теплообменника

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_{w1}} \frac{W}{W_{\min}}$$

где T_1, T_2 – температура воздуха на входе и выходе из ОНВ соответственно, °С; T_{w1} – температура охлаждающей воды на входе в ОНВ, °С; W, W_{\min} – энергоемкость потока воздуха и меньшая из двух энергоемкостей потоков воздуха либо воды, Вт/К.

2-й шаг. С учетом известной схемы взаимного течения теплоносителей и конструкции теплообменника определяется число единиц переноса теплоты (NTU) N для всего теплообменника. В нашем случае для ОНВ с многократным перекрестным током при общем противотоке

$$N = -b_w \ln \left[\frac{1}{S} \ln(1 - S\eta_x) + 1 \right],$$

где b_w – количество ходов по воде; S – отношение минимальной энергоемкости теплоносителей к максимальной; η_x – КПД хода.

3-й шаг. При известном значении N определяется коэффициент теплопередачи

$$k = \frac{NW_{\min}}{F},$$

где F – площадь поверхности со стороны оребрения, m^2 .

4-й шаг. При известном коэффициенте теплопередачи находится приведенный коэффициент теплоотдачи со стороны воздуха на основании расчетного определения коэффициента теплоотдачи со стороны воды α_w по [2]:

$$\alpha_{np} = \frac{1}{\frac{F_w \delta_{ст}}{\sigma} \frac{E_H}{k} - \frac{F_o \lambda_m}{E_H} - \frac{E_H \sigma}{\alpha_w}},$$

где E_n – коэффициент эффективности наружной поверхности; σ – коэффициент оребрения, равный отношению оребренной и внутренней площадей поверхностей трубки; F_w и F_o – площади поверхности теплообмена со стороны охлаждающей жидкости и со стороны воздуха, м²; λ_m – коэффициент теплопроводности материала трубок и ребер, Вт/(м·К).

При проведении экспериментов скорость воды в трубках составляла около 1,0 м/с, что позволяло определять α_w с достаточной точностью и обеспечить минимальное влияние составляющей $\sigma \frac{1}{\alpha_w}$ на результаты расчетов (ввиду высоких значений α_w).

Уравнения, традиционно используемые для описания частных граничных условий (ГУ) по теплообмену и сопротивлению ПТ, работающих в воздушных потоках ОНВ, имеют вид

$$Nu = \theta Re^n; \quad (1)$$

$$EuRe^2 = \Phi Re^m \frac{L}{d_s}. \quad (2)$$

Сохраняя эту форму уравнений для описания ГУ, первичные зависимости для обработки экспериментального материала представим в виде

$$\lg Nu = f(\lg Re),$$

$$\lg(EuRe^2) = f(\lg Re).$$

Графический вид экспериментально полученных зависимостей описанного вида представлен на рис. 7 и 8, где

$$Nu = \frac{\alpha_n d_s}{\lambda_{bf}}; \quad Re = \frac{w_b d_s}{\mu} \rho; \quad Eu = \frac{\Delta p_{тр}}{\rho w_b^2},$$

d_s – эквивалентный диаметр поверхности теплообмена по воздуху, м; λ_{bf} – теплопроводность воздуха, Вт/(м·К); w_b – скорость воздуха в сжатом сечении, м/с; μ – динамическая вязкость воздуха, Па·с; ρ – средняя плотность воздуха в ОНВ, кг/м³; $\Delta p_{тр} = \Delta p + \Delta p_y$ – потеря давления, связанная с трением и отрывом пограничного слоя, Па; Δp_y – изменение давление, связанное с ускорением воздушного потока из-за изменения его плотности, Па.

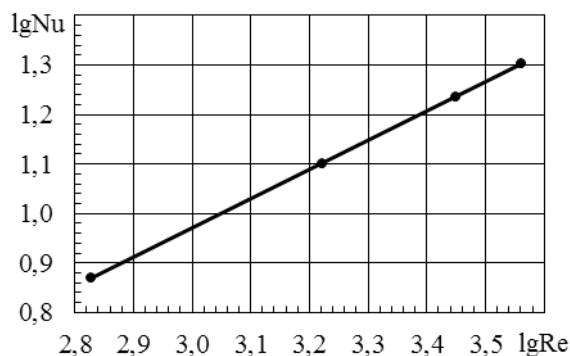


Рис. 7. Зависимость вида $\lg Nu = f(\lg Re)$

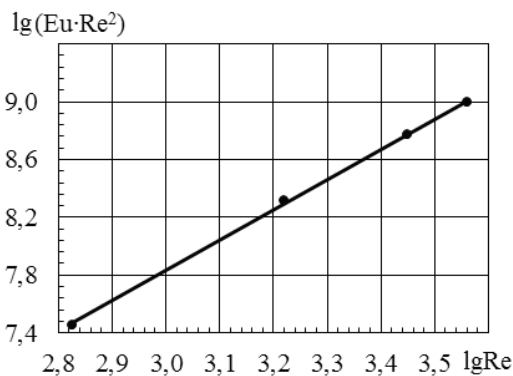


Рис. 8. Зависимость вида $\lg(Eu \cdot Re^2) = f(\lg Re)$

Применительно к уравнениям (1) и (2) и представленным на рис. 7 и 8 соответствующим экспериментальным зависимостям получаем такие значения эмпирических констант критериальных уравнений по теплообмену и сопротивлению:

$$\theta = 0,1612; \quad n = 0,5879.$$

$$\Phi = 0,4143; \quad m = 2,0958.$$

Для установления целесообразности применения новой ПТ при создании перспективных конструкций ОНВ тепловозных двигателей выполнены сравнительные расчеты для тепловозного двигателя типа Д49. Сравнивались ОНВ с ПТ, представленной на рис. 1, с ПТ, предложенной предприятием Augubis и рассмотренной в данной работе (см. рис. 2). Расчеты обоих ОНВ выполнялись при одинаковых параметрах теплоносителей на входе и одинаковых габаритных размерах теплообменного элемента ОНВ, для чистой поверхности теплообмена. В результате получены значения всех параметров теплоносителей за сравниваемыми ОНВ, а также КПД теплообменников и их сопротивления по воздуху и воде (табл. 2).

Как видно из табл. 2, наилучшей совокупностью теплотехнических параметров, бесспорно, обладает ОНВ, выполненный на базе поверхности теплообмена ТПК_{нв}. Следует отметить, что в настоящее время двигатели типа Д49 комплектуются ОНВ, изготавливаемыми на ООО «Завод «АЛПАС»» (г. Волгодонск, РФ). Эти ОНВ имеют параметры, несколько худшие, чем охладители из ТПК_{нв}, но близкие к ним (эффективность составляет 0,93, а теплоотдача в режиме максимальной мощности 430 кВт). Очевидно, что на базе ПТ, испытанной фирмой Augubis, невозможно выполнить в тех же габаритах ОНВ, способный конкурировать с выпускаемым ООО «Завод «АЛПАС»» (что хотел бы обеспечить для себя БерМЗ).

Таблица 2. Результаты расчета ОНВ для двигателя типа Д49

Параметр	Единица измерения	Наименование параметра	Значение	
			ТПК _{пв}	Aurubis
G_b	кг/с	Расход наддувочного воздуха	5,2	
G_w	кг/с	Расход воды	18,1	
$t_{в1}$	°С	Температура воздуха на входе в ОНВ	137,6	
$t_{в2}$	°С	Температура воздуха на выходе из ОНВ	48,5	58,3
t_{w1}	°С	Температура воды на входе в ОНВ	46,3	
t_{w2}	°С	Температура воды на выходе из ОНВ	52,4	51,8
η		КПД ОНВ	0,9763	0,8687
P_1	Па	Давление воздуха перед ОНВ	270660,0	
ΔP	мм вод. ст.	Сопротивление ОНВ по воздуху	141,9	604,9
ΔP_w	кПа	Сопротивление ОНВ по воде	6,1	13,1
w_w	м/с	Скорость воды в трубках	0,71	0,80
$R_{ст}$	м ² ·К/Вт	Термическое сопротивление стенки	$1,28 \cdot 10^{-06}$	$4,11 \cdot 10^{-06}$
Q	кВт	Тепловая мощность ОНВ	465,8	414,5
L_n	м	Длина пучка	0,37	0,37
B_n	м	Ширина пучка	0,68	0,68
H_n	м	Высота пучка	0,52	0,52
$b_{вт}$	–	Количество термодинамических ходов по воде в ОНВ	2	2
b_w	–	Количество гидравлических ходов по воде в ОНВ	1	1
$\bar{\rho}$	–	Степень повышения плотности воздуха	1,271	1,210

ВЫВОДЫ

1. Предложена методика обработки результатов экспериментальных исследований поверхности теплообмена для охладителей наддувочного воздуха ДВС.

2. На основе использования результатов предложенной методики выполнен расчет теплотехнических

параметров полноразмерного ОНВ к двигателю типа Д49, изготовленного на базе ПТ, исследованной фирмой Aurubis.

3. Расчет показал, что исследованная ПТ не обеспечит требуемые параметры ОНВ к двигателю типа Д49 и должна быть заменена более удачной.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

[1] **Бажан, П. И.** Расчет и конструирование охладителей дизелей [Текст] / П. И. Бажан. – М. : Машиностроение, 1981. – 168 с.

[2] **Бурков, В. В.** Автотракторные радиаторы [Текст] / В. В. Бурков, А. И. Индейкин. – Л. : Машиностроение, 1978. – 216 с.

[3] **Гогоренко, А. А.** Создание перспективных конструкций охладителей наддувочного воздуха тепловозных двигателей [Электронный ресурс] / А. А. Гогоренко // Электронне видання «Вісник НУК». – 2011. – № 1. – Режим доступа: <http://www.ev@nuos.edu.ua>.

[4] **Мошенцев, Ю. Л.** О целесообразности применения различных видов поверхностей теплообмена в охладителях наддувочного воздуха тепловозных двигателей [Текст] / Ю. Л. Мошенцев, А. В. Нагорный, А. А. Гогоренко // Локомотив-информ : междунар. информ.-техн. журнал. – 2010. – № 4. – С. 14–17.

[5] Опыт разработки водовоздушных охладителей наддувочного воздуха нового поколения [Электронный ресурс] / Ю. Л. Мошенцев, А. А. Гогоренко, Б. А. Тягнирядно, Д. С. Минчев, А. В. Нагорный // Электронне видання «Вісник НУК». – 2013 – № 2. – Режим доступа: <http://www.ev@nuos.edu.ua>.

[6] Aurubis company [Электронный ресурс] // The Aurubis company official site. – Режим доступа: <http://www.aurubis.com>.

- [7] CuproBrazе Technology [Электронный ресурс] // The CuproBrazе Alliance official site. – Режим доступа: http://www.cuprobrazе.com/over_tech.asp.
- [8] **Gustafsson, B.** CuproBrazе Mobile Heat Exchanger Technology [Text] / B. Gustafsson, J. Scheel // SAE Technical Paper Series. – 2000. – № 3456.

© Ю. Л. Мошенцев, О. А. Гогоренко

Надійшла до редколегії 11.09.2014

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. *Б. Г. Тимошевський*