

**Р. В. Якимушкин,**

*адъютант, майор*

**В. Ю. Усиков,**

*доц., канд. техн. наук, подполковник*

*Филиал Военной академии материально-технического обеспечения*

*им. генерала армии А. В. Хрулёва,*

*Министерства обороны Российской Федерации,*

*Омск*

**С. В. Лукашов,**

*подполковник*

*Военный учебный центр при Уральском федеральном университете,*

*Екатеринбург*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОХЛАДИТЕЛЯ НАДДУВОЧНОГО ВОЗДУХА ОБРАЗЦОВ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ**

В статье предложена оригинальная методика расчета степени охлаждения, теплорассеивающей способности поверхности теплообменного оборудования и температуры охлаждаемого воздуха на выходе из охладителя наддувочного воздуха. По результатам многочисленных натурных испытаний получен и применен в методике переменный коэффициент, зависящий от числа Рейнольдса. Преимуществом предложенной методики является простота расчета и точность полученных характеристик теплообменного оборудования.

*Ключевые слова:* охладитель наддувочного воздуха, дизель, турбонаддув, энергетические характеристики.

## **EVALUATING THERMAL PHYSICS PARAMETERS OF CHARGE AIR COOLER FOR SPECIMEN OF ARMS AND MILITARY EQUIP-MENT**

The article proposes a unique calculating method for determining a degree of cooling, heat dissipation ability of cooler surface and temperature of cooled air at the output of a charge air cooler. As a result of extensive verification nature tests, a variable coefficient dependent on the Reynolds number was found and used in the method. Simplicity of calculation and precision of obtained cooling equipment characteristics provide significant advantages when the introduced method is applied.

*Keywords:* charge air cooler, diesel engine, turbocharging, energy characteristics.

Высокие энергетические показатели силовых установок современных и перспективных образцов вооружения и военной техники требуют постоянного совершенствования систем охлаждения моторно-трансмиссионных установок [1].

При форсировании дизелей высоким наддувом  $P_k$  больше 0,3 МПа появляется необходимость в охлаждении наддувочного воздуха (ОНВ), так как рост плотности в этом случае существенно отстает от увеличения  $P_k$  [2; 3].

Эффективность ОНВ турбопоршневых двигателей оценивается не только термодинамическим эффектом от использования охладителей, но и возможностью снижения тепловой напряженности двигателя, затратами мощности на функционирование системы питания воздухом с ОНВ и увеличением габаритов силовой установки (СУ), связанным с применением охладителей [3; 4].

В настоящее время в системах охлаждения широко используются алюминиевые радиаторы с теплообменными пакетами пластинчато-ребристой конструкции. Важным элементом повышения их тепло-рассеивающей способности является выбор наиболее приемлемых геометрических размеров и форм теплопередающих поверхностей пакетов, при которых теплофизические характеристики радиаторов системы охлаждения обеспечивали бы установленные требования по теплосъему.

Существующие в настоящее время большое разнообразие методик расчета теплофизических параметров ОНВ не в полной мере соответствуют требованиям по точности расчетным данным и данным полученным в ходе натурных испытаний изготовленного теплообменного оборудования. По результатам таких испытаний, различных по конструкциям и применяемым материалам

теплообменного оборудования, на предприятии АО «НИИД» получен массив данных, анализ которых с подвиг к обобщению и реализации их в методике.

Для определения основных параметров теплообменного оборудования при различных геометрических размерах и формах теплопередающей поверхности разработана методика расчета пластинчато-ребристых ОНВ [5].

Определение показателей ОНВ целесообразно рассматривать как частную задачу поиском рационального сочетания параметров, обеспечивающего минимальный суммарный объем матрицы охладителя и других элементов ОНВ [6; 7]. Задача решается в условиях определения величин, степени охлаждения  $\eta_{\text{охл}}$ , теплорассеивающей способности и температуры охлаждаемого воздуха на выходе из ОНВ.

Определение теплопередачи от теплообменника прежде всего предполагает тщательный расчет общей поверхности охлаждения, так как именно от этого параметра во многом зависит протекание процесса теплоотдачи.

Исходными данными для проведения расчетов теплообменников являются вода и воздух (рис. 1).

— толщина материала, из которого изготовлены гофрированные пластины воздушной и жидкостной полостей  $\delta$ ;

— толщина материала, из которого изготовлены разделительные  $\delta_p$  и проставочные  $\delta_{\text{пр}}$  листы;

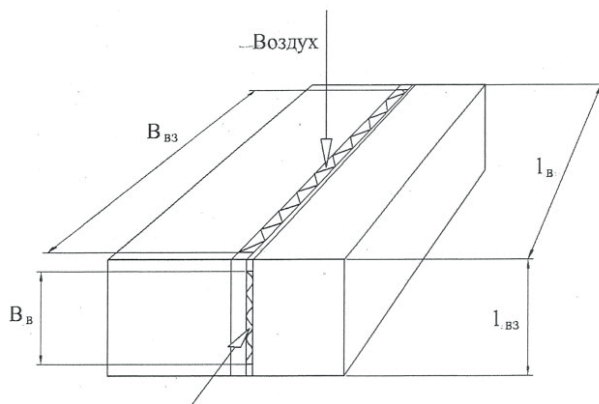


Рис. 1. Конструктивная схема матрицы образца теплообменника:

$l_{\text{вз}}$  — глубина каналов воздушной;  $l_{\text{в}}$  — водяной (масляной) полостей;  $В_{\text{вз}}$  — ширина гофрированных пластин воздушной полости;  $В_{\text{в}}$  — ширина гофрированных пластин воздушной (жидкостной) полости; число гофрированных пластин в обеих полостях  $n$ ; шаг  $t$  — высота  $h$  и внутренний радиус при вершине  $R$  гофрированной пластины

— коэффициент теплопроводности материала  $\lambda_m$ , из которого изготовлены плоские и гофрированные пластины;

— зависимости удельной теплоемкости  $C$ , плотности  $\rho$ , коэффициентов теплопроводности  $\lambda$ , вязкости  $\mu$  и числа Прандтля  $P_r$  рабочих тел от температуры;

— расход воздуха  $G_{\text{вз}}$  и прокачка жидкостей  $G_{\text{ж}}$  через радиаторы;

— температура  $t_{\text{вз}}$  и давление  $P_{\text{вз}}$  воздуха на входе в радиаторы;

— температуры жидкости  $t_{\text{ж}}$  на входе в радиаторы, температуры воздуха  $t_{\text{вз}}$  и жидкости  $t_{\text{ж}}$  на выходе из радиаторов (в первом приближении).

Расчеты на основании исходных данных проводятся в следующей последовательности с определением:

— величин теплофизических параметров рабочих тел, т.е.  $C_{\text{р вэ}}, C_{\text{в}}, \lambda_{\text{вз}}, \lambda_{\text{в}}, \mu_{\text{вз}}, \mu_{\text{в}}, \rho_{\text{в}}$ , которые определяются по справочной литературе;

— площадей теплопередающих поверхностей воздушной и жидкостной полостей:

$$F_{\text{тв, ж}} = (2B_{\text{в, ж}} + 2B_{\text{в, ж}} \alpha_{\text{в, ж}}) n_{\text{в, ж}} l_{\text{в, ж}} \quad (1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент сжатия заготовки (плоской ленты) при изготовлении гофрированной пластины;

— площадей «живого» сечения воздушной и жидкостной полостей:

$$F_{\text{жв, ж}} = (B_{\text{в, ж}} h_{\text{в, ж}} - \delta_{\text{в, ж}} B_{\text{в, ж}} \alpha_{\text{в, ж}}) n_{\text{в, ж}}; \quad (2)$$

— гидравлического диаметра канала, как воздушного, так и жидкостного:

$$d_r = \frac{4F_{\text{в, ж}} l_{\text{в, ж}}}{F_{\text{в, ж}}}; \quad (3)$$

— длины ребра одной ячейки как для воздуха, так и жидкости определяем из выражения:

$$l_p = 0,25 t_{\text{в, ж}} \alpha_{\text{в, ж}}; \quad (4)$$

— отношения площади ребер к суммарной площади теплопередающей поверхности как для воздуха, так и жидкости определяется следующим выражением:

$$\frac{F_p}{F_m} = \frac{4l_p}{(4l_p + t_b)}. \quad (5)$$

Средний удельный вес воздуха и жидкости по среднеарифметической температуре определяется из таблиц по справочной литературе.

Производится расчет скоростей воздуха и жидкости в полостях теплообменника:

$$\omega = \frac{G}{\gamma F}. \quad (6)$$

Определяется числа Рейнольдса и Нуссельта для воздуха и жидкости:

$$Re = \frac{W d_r \gamma}{9,81 \mu}. \quad (7)$$

$$Nu = e Re^{0,5} \quad (8)$$

где  $e$  коэффициент полученный в ходе натурных испытаний, который зависит от технологии изготовления теплопередающих элементов, таких как искривление кромок ребер, утолщение ребер в местах их соприкосновения с разделительными листами, возникающие при пайки и др.

Число Нуссельта в жидкостной полости определяется по графику в зависимости от числа Рейнольдса либо с помощью формулы:

$$Nu_{ж} = K_0 Pr^{0,43}, \quad (9)$$

где  $K_0$  — коэффициент определяемый из табл. 1.

Коэффициенты теплоотдачи в каналах воздушной и жидкостной полостей:

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{d}. \quad (10)$$

Коэффициент эффективности теплопередающих поверхностей воздушной и жидкостной полостей:

$$\eta_{эф} = 1 - \frac{F_{рв,ж}}{F_{тв,ж}} \cdot \left[ 1 - \frac{t_h \left( \sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda \delta}} l_{рв,ж} \right)}{\sqrt{\frac{2\alpha}{\lambda \delta}} \cdot l_{рв,ж}} \right]. \quad (11)$$

Коэффициент теплопередачи, отнесенный к площади теплопередающей поверхности воздушной полости:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha \eta} + \frac{F_{твз}}{F_{тв} \alpha \eta_{эф}}}. \quad (12)$$

Определяем эквиваленты воздуха и жидкости:

$$W_{в,ж} = C_{рв,ж} G_{в,ж} \cdot 3600. \quad (13)$$

Число единиц переноса тепла:

$$NTU = \frac{K_{вз} F_{Обз}}{W_{вз}}. \quad (14)$$

Эффективность радиатора:

$$\eta = \frac{1}{\frac{W_{\min}}{W_{\max}} NTU} \sum_{n=0}^{\infty} \left( \left[ 1 - e^{-NTU} \sum_{m=0}^n \frac{(NTU)^m}{m!} \right] \times \left[ 1 - e^{-\frac{W_{\min}}{W_{\max}} NTU} \sum_{m=0}^n \frac{\left( \frac{W_{\min}}{W_{\max}} NTU \right)^m}{m!} \right] \right). \quad (15)$$

Теплорассеивающая способность радиатора:

$$Q = \eta \cdot \Delta t_{\max} \cdot W_{\max}, \quad (16)$$

где  $\Delta t_{\max}$  — разность входных температур рабочих тел.

Вычисляются характеристики теплообменных аппаратов:

— аэродинамического сопротивления воздушной полости радиатора:

$$\Delta P_{вз} = \zeta \frac{\rho w^2}{19,62} \cdot \frac{l}{d_r}, \quad (17)$$

где  $\zeta$  — коэффициент аэродинамического сопротивления поверхности теплообмена, который зависит от числа  $Re$ ;

— гидравлического сопротивления жидкостной полости радиатора:

$$\Delta D = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \cdot \frac{\rho w^2}{19,62} \cdot \frac{l}{d_r}. \quad (18)$$

Разработанная методика с высокой степенью достоверности позволит на этапе проектирования системы питания дизеля воздухом определять величины теплофизических параметров ОНВ независимо от исполнения охлаждающих трубок в сердцевине.

Таблица 1

Зависимость коэффициента  $K_0$  от числа Рейнольдса

$Re \cdot 10^{-3}$	2,2	2,3	2,5	3,0	3,5	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10
$K_0$	2,2	3,6	4,9	7,5	10,0	12,2	16,5	20,0	24,0	27,0	30,0	33,0

Применение в методике поправочного коэффициента  $\epsilon$  позволяет на этапе расчета теплообменного оборудования двигателя получить

достоверные величины теплофизических характеристик.

#### Список литературы

1. *Межерицкий А. Д.* Турбокомпрессоры систем наддува судовых дизелей / А. Д. Межерицкий. — Ленинград : Судостроение, 1986. — 248 с.
2. Агрегаты наддува двигателей / Ю. П. Макушев, С. В. Корнеев, В. В. Рындин : учеб. пособие. — Омск : Изд-во СибАДИ, 2006. — 58 с.
3. *Костин А. К.* Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания / А. К. Костин, В. В. Ларионов, Л. И. Михайлов. — Ленинград : Машиностроение, 1979. — 221 с.
4. Проведение сравнительных стендовых испытаний изделия А85-3 и экспериментального воздухоохладителя : отчет о НИР № 3694 / ФГУП «Научно-исследовательский институт двигателей». — 54 с.
5. *Шабалин Д. В.* Повышение эффективности рабочего цикла дизеля оптимизацией температуры заряда воздуха / Д. В. Шабалин // Сб. науч. трудов ВА МТО им. Генерала армии А. В. Хрулёва. — Санкт-Петербург : ВУНЦ СВ «ВАМТО», 2017. — С. 34–40.
6. *Берестнев Г. А.* Обеспечение стабилизации температуры наддувочного воздуха в комбинированных двигателях путем применения теплового аккумулятора : дис. ... канд. техн. наук: 23.05.2007 / Геннадий Александрович Берестнев ; ЧВВАКИУ. — Челябинск, 2006. — 142 с.