

- Механика жидкости и газа. Под общей ред. А.И.Леонтьева. Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1997, 671с. 3. Бойко А.В. Оптимальное проектирование проточной части осевых турбин. Харьков, "Вища школа", 1982, 151с. 4. Епифанов В.М., Мальшев Г.П. К расчету методами интегральных уравнений обтекания плоских решеток турбомашин. Изв. вузов, сер. Машиностроение, 1968, №8, с.88-95. 5. Жуковский М.И. Аэродинамический расчет потока в осевых турбомашинах. Л.: Машиностроение, 1967, 286с. 6. Исаков С.Н. Разработка программ расчета на ЭВМ поля скоростей и профильных потерь в решетках профилей компрессорных и турбинных лопаток. /Отчет №0285.0002946. Свердловск, Уральск. политехн. институт (УПИ), 1984, 84с. 7. Исаков С.Н., Пирогова И.Н., Тугушев Н.У. Комбинированный метод решения прямой задачи гидродинамики решеток профилей турбомашин. / Изв. вузов, сер. Энергетика, 1984, №8, с.65-72. 8. Пашаев А.М., Аскеров Д.Д., Садыхов Р.А., Самедов А.С. Эффективные методы расчета элементов авиационных газовых турбин. / Авиационно-космическая техника и технология. Посвящено 75-летию Национального Аэрокосмического Университета им. Н.Е. Жуковского «Харьковский Авиационный Институт». Харьков, ХАИ, №3/19, 2005, с.25-32. 9. Самедов А.С. Разработка эффективных систем охлаждения на основе моделирования элементов газовых турбин. Диссертация на соиск. канд. техн. наук. Баку. 2002 г. 10. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Корн Г., Корн Т. М.: Наука, 1984, 831 с. 11. Холцевников К.Е., Емин О.Н., Митрохин В.Т. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. М.: Машиностроение, 1986, 432 с.

УДК 621.431

В.А. Жуков, канд. техн. наук, А.Е. Ратнов, инж., Н.П. Жукова, инж.

КРИТЕРИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ТЕПЛООБМЕНА В СИСТЕМАХ ОХЛАЖДЕНИЯ ДВС ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРИСАДОК К ОХЛАЖДАЮЩИМ ЖИДКОСТЯМ

Введение

Экспериментальные исследования процессов теплообмена в системах охлаждения ДВС при использовании теплоносителей различного состава показали, что состав теплоносителя и его свойства существенно влияют на тепловое состояние деталей цилиндропоршневой группы, протекание рабочего цикла, экономические и экологические показатели работы двигателя [1].

Формулирование проблемы

Однако, все представленные ранее результаты были получены в процессе моторных испытаний на

двигателях определенных моделей (ЯМЗ-840, ВАЗ-2108) для обобщения результатов необходимо их представление в форме критериальных уравнений. Поставленная задача решается в настоящей работе.

Обобщенные критериальные уравнения

Для стационарных процессов конвективного теплообмена в однофазной несжимаемой жидкости с постоянными (кроме плотности) физическими свойствами характерны следующие безразмерные числа: Нуссельта, Стантона, Рейнольдса, Прандтля, Пекле, Грасгофа, Архимеда [4, 5].

Обобщённое уравнение конвективного теплообмена имеет вид [4, 5]:

$$Nu = f(No, Fo, Re, Pr, Gr, l/l_0)$$

l/l_0 – отношение определяющих размеров.

Число Нуссельта является безразмерным коэффициентом теплоотдачи:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda}$$

где α – коэффициент теплоотдачи, кДж/(м²·К·ч);

L – характерный размер;

λ – коэффициент теплопроводности охлаждающей жидкости, Вт/(м·К).

Число Нуссельта характеризует интенсивность теплообмена (на границе твёрдое тело – жидкость) за счёт конвекции по сравнению с чисто молекулярным переносом. Чем интенсивнее протекает процесс конвективного теплообмена, тем больше коэффициент теплоотдачи α , тем больше Nu .

При необходимости учёта влияния температуры на теплофизические свойства среды (в умеренном диапазоне их изменения), а также направления теплового потока (от жидкости к стенке или наоборот) в уравнение подобия, по рекомендации академика М.А. Михеева, вводится отношение чисел Прандтля для жидкости $(Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25}$, вычисленных соответственно при температуре потока и стенки. Для вынужденного турбулентного движения влиянием свободной конвекции пренебрегают, т.е. не учитывают число Gr . Тогда уравнение можно записать в виде:

$Nu = f(Re, Pr, Gr, Pr_{ж}/Pr_{ст}, l/l_0)$ или в виде степенной функции [4]:

$$Nu_{ж} = C \cdot Re^m \cdot Pr^n \cdot Gr^p \cdot (Pr_{ж}/Pr_{ст})^{0,25} \cdot (l/l_0)^q \quad (1)$$

Теория подобия устанавливает только общий вид критериального уравнения, действительная же зависимость критерия Nu от определяющих критериев находится экспериментально. Следовательно, коэффициент C и показатели степеней m , n , p и q в

уравнении (1) определяются из эксперимента для каждого конкретного случая.

В отдельных случаях теплообмена уравнение (1) упрощается. Существует несколько разновидностей критериальных уравнений для разных условий теплообмена, они рассмотрены в книге Р.М. Петриченко [3].

С целью расширения области применения полученных экспериментальных результатов, они должны быть представлены в виде критериальных уравнений.

Опыты, описанные в работе [2] проводились на установке, представляющей собой кольцевой канал. Для расчёта теплообмена в кольцевом канале удовлетворительные результаты даёт формула Нуссельта-Крауссоляда [3,4]:

$$Nu_p = 0,023 \cdot Pr^{0,4} \cdot Re^{0,8} \quad (2)$$

Эта формула близка к критериальной зависимости, предложенной академиком М.А. Михеевым [3, 4]:

$$Nu = 0,021 \cdot Re_f^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25} \quad (3)$$

Уравнение (3) является классическим в теории теплообмена, однако оно не учитывает присутствие в теплоносителе веществ, малые концентрации которых способны существенно влиять на теплообмен.

Решение проблемы

Введение поправочных коэффициентов

В приведенных уравнениях свойства теплоносителей учитываются, через числа Рейнольдса и Прандтля, однако такой подход является недостаточно объективным при использовании в качестве присадок к охлаждающим жидкостям водорастворимых высокополимеров и поверхностно-активных веществ, так как их присутствие в растворах оказывает существенное влияние на гидродинамику и теплопередачу в пристеночной области. Это влияние

следует учитывать при записи критериальных уравнений конвективного теплообмена.

Поправочные коэффициенты определялись на основании сравнения чисел Нуссельта, полученных в процессе лабораторных экспериментов и чисел Нуссельта определенных по критериальному уравнению (3) с использованием известных для заданных теплоносителей чисел Рейнольдса, и Прандтля.

Полученные экспериментально числа Нуссельта $Nu_{\text{э}}$ и расчетные числа Нуссельта Nu_p связаны равенством

$$Nu_{\text{э}} = Nu_p \cdot \varepsilon_N, \quad (4)$$

где ε_N – коэффициент учитывающий влияние присадки на процесс теплоотдачи.

Полученные ранее экспериментальные данные свидетельствуют, что коэффициент ε_N зависит от типа применяемой присадки, её концентрации и от температуры теплоносителя. Более значимое влияние на величину ε_N оказывают именно тип и концентрация присадки, менее значимое – температура.

Значение коэффициента ε_N представляет собой переменную величину, которую выразить в виде функции:

$$\varepsilon_N = f(t, N, \chi, \phi) \quad (5),$$

где t – температура жидкости;

N – концентрация присадки;

χ – тип применяемой присадки;

ϕ – тип теплоносителя (вода или антифриз).

Из уравнения (5) могут быть исключены аргументы χ и ϕ , так как они не могут быть заданы численно, а лишь качественно определяют совместимость теплоносителя и вводимой присадки.

Для фиксированной температуры теплоносителя зависимость поправочного коэффициента ε_N от концентрации присадки представляется в виде полиномиальной зависимости

$$\varepsilon_N = x_0 + x_1 \cdot N + x_2 \cdot N^2 \quad (6)$$

Для получения коэффициентов x_0 , x_1 , x_2 составляется система уравнений:

$$\begin{cases} x_0 \cdot n + x_1 \cdot \left(\sum_{i=1}^n N_i \right) + x_2 \cdot \left(\sum_{i=1}^n N_i^2 \right) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_{N_i} \\ x_0 \cdot \left(\sum_{i=1}^n N_i \right) + x_1 \cdot \left(\sum_{i=1}^n N_i^2 \right) + x_2 \cdot \left(\sum_{i=1}^n N_i^3 \right) = \sum_{i=1}^n (N_i \cdot \varepsilon_{N_i}) \\ x_0 \cdot \left(\sum_{i=1}^n N_i^2 \right) + x_1 \cdot \left(\sum_{i=1}^n N_i^3 \right) + x_2 \cdot \left(\sum_{i=1}^n N_i^4 \right) = \sum_{i=1}^n (N_i^2 \cdot \varepsilon_{N_i}) \end{cases}$$

где n – количество экспериментальных точек с координатами (N, ε_N) .

Для решения данной системы был составлен алгоритм и программа на языке Pascal в среде программирования TURBO PASCAL.

Решение систем уравнений для наиболее типичных теплоносителей систем охлаждения автотракторных двигателей, содержащих присадки в малых концентрациях, при различных температурах позволило получить семейство равенств, позволяющих определять поправочные коэффициенты, которые представлены в табл. 1, табл. 2. В качестве присадок использовались вещества, способные существенно влиять на теплообмен [1] и обладающие ингибирующими свойствами: ПАА – полиакриламид, ПВС – поливиниловый спирт, ПАВ – поверхностно-активное вещество и их комбинации.

Корректность полученных результатов проверялась сопоставлением экспериментальных коэффициентов теплоотдачи $\alpha_{\text{э}}$ и коэффициентов теплоотдачи, определенных и учетом поправочных коэффициентов.

Произведенные расчеты позволили определить погрешности для теплоносителей различного состава:

- для воды 1,18 – 1,46 %;
- для ТОСОЛа 1,24 – 1,37 %.

Полученные погрешности позволяют утверждать, что поправочные коэффициенты адекватно характеризуют изменения теплофизических свойств

воды и ТОСОЛА при введении в эти жидкости присадок.

Таблица 1. Поправочные коэффициенты для воды

$t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$
ПАА
$\varepsilon_N = 1 - 0,9944 \cdot N + 0,8573 \cdot N^2$
ПВС
$\varepsilon_N = 0,9953 - 1,0164 \cdot N + 0,7229 \cdot N^2$
ПАА + ПВС
$\varepsilon_N = 0,994 - 1,85506 \cdot N + 1,413 \cdot N^2$
ПАВ
$\varepsilon_N = 1,0139 - 0,5833 \cdot N + 2,7778 \cdot N^2$
$t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$
ПАА
$\varepsilon_N = 1,0005 - 0,854 \cdot N + 1,0845 \cdot N^2$
ПВС
$\varepsilon_N = 0,9956 - 0,9429 \cdot N + 0,1208 \cdot N^2$
ПАА + ПВС
$\varepsilon_N = 0,994 - 1,8506 \cdot N + 1,413 \cdot N^2$
ПАВ
$\varepsilon_N = 1,0278 - 1,1667 \cdot N + 5,5556 \cdot N^2$

Таблица 2. Поправочные коэффициенты для «Тосола»

$t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$
ПАА
$\varepsilon_N = 1,0032 - 1,0225 \cdot N + 1,2346 \cdot N^2$
ПВС
$\varepsilon_N = 0,9979 - 0,9746 \cdot N + 0,2117 \cdot N^2$
ПАА + ПВС
$\varepsilon_N = 1,0004 - 2,0229 \cdot N + 2,6331 \cdot N^2$
ПАВ
$\varepsilon_N = 1,0054 - 0,4428 \cdot N + 1,3278 \cdot N^2$
$t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$
ПАА
$\varepsilon_N = 1,0112 - 1,2957 \cdot N + 0,3444 \cdot N^2$
ПВС
$\varepsilon_N = 0,9991 - 0,9228 \cdot N + 2,0053 \cdot N^2$
ПАА + ПВС
$\varepsilon_N = 1,0006 - 2,0501 \cdot N + 3,0873 \cdot N^2$
ПАВ
$\varepsilon_N = 1,0141 - 0,52 \cdot N + 7,3333 \cdot N^2$

Заключение

Проведенные исследования свидетельствуют, что, для охлаждающих жидкостей ДВС с присадка-

ми водорастворимых полимеров и поверхностно-активных веществ процессы теплообмена в зарубашечном пространстве целесообразно описывать критериальными уравнениями вида:

$$Nu = 0,023 \cdot Pr^{0,4} \cdot Re^{0,8} \cdot \varepsilon_N,$$

где $\varepsilon_N = f(t, N, \chi, \phi)$ - поправочный коэффициент, зависящий, главным образом, от концентрации присадки. Значения коэффициента для наиболее перспективных присадок может быть определено по приведенным уравнениям.

Список литературы:

1. Безюков О.К., Жуков В.А., Ратнов А.Е. Способ оптимизации свойств охлаждающих жидкостей для ДВС. *Авиационно-космическая техника и технология: 38 сборник научных трудов. Харьков: «Харьковский авиационный институт», 2003. – Вып. 29. Двигатели и энергоустановки. с. 40 - 43.*
2. Жуков В.А., Ратнов А.Е. Исследование процессов теплообмена в зарубашечном пространстве. *Авиационно-космическая техника и технология: 37 сборник научных трудов. Харьков: «Харьковский авиационный институт», 2002. – Вып. 31. Двигатели и энергоустановки. с. 51 - 54.*
3. Петриченко Р.М. Системы жидкостного охлаждения быстроходных двигателей внутреннего сгорания. - Л.: Машиностроение, 1975.-224 с.
4. Теоретические основы теплотехники. *Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под общ. ред. чл.-корр. РАН А.В. Клименко и проф. В.М.Зорина. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – 564 с.: – (Теплоэнергетика и теплотехника; Кн. 2.).*
5. Теплотехника: Учеб. для вузов / В.Н.Луканин, М.Г.Шатров, Г.М.Камфер и др., Под ред. В.Н.Луканина. – М.: Высшая школа, 1999. – 761 с.