

УДК 621.43.016.4

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В КОРПУСЕ АППАРАТА С РУБАШКАМИ ОХЛАЖДЕНИЯ

Д.А. Ильичев, В.А. Богуш, Е.Н. Туголуков, А.Г. Ткачев

*ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»*

*Рецензент С.И. Дворецкий*

**Ключевые слова и фразы:** каналы охлаждения; рубашки охлаждения; тепловизор; управление экспериментом.

**Аннотация:** Представлено описание экспериментальной установки для исследования тепловых процессов в корпусе аппарата с различными каналами охлаждения. Описываются особенности структуры управления экспериментом.

С целью экспериментальной проверки методики и аналитических зависимостей определения температуры корпусов аппаратов, имеющих различные рубашки охлаждения, была разработана экспериментальная установка, предназначенная для исследования процессов внутреннего и внешнего теплообмена в системе, включающей нагреваемый теплоносителем фрагмент корпуса аппарата.

Установка состояла из устройства размещения исследуемого фрагмента (модуля) корпуса аппарата, системы подготовки и распределения теплоносителя, тепловизионной системы и системы управления экспериментом (рис. 1).

Первый исследуемый образец был выполнен в виде плоского фрагмента корпуса аппарата с размером  $900 \times 900$  мм и толщиной 5 мм. На поверхности образца были выполнены каналы в виде приваренных профилей (штрипсов) с размерами  $128 \times 21,5 \times 2,5$  мм (рис. 2, а).

---

Ильичев Д.А. – аспирант кафедры «Техника и технологии машиностроительных производств» ТГТУ; Богуш В.А. – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника и технологии машиностроительных производств» ТГТУ, главный инженер ОАО «Тамбовский завод «Комсомолец» им. Н.С. Артемова»; Туголуков Е.Н. – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии машиностроительных производств» ТГТУ; Ткачев А.Г. – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техника и технологии машиностроительных производств» ТГТУ.

Второй образец представлял собой цилиндрическую обечайку (рис. 2, б) с внутренним диаметром  $D = 800$  мм, высотой  $H = 500$  мм и толщиной стенки  $s = 3$  мм, на поверхности которой приварена пуклеванная рубашка (толщина  $s = 1$  мм).

Опытные образцы были изготовлены из нержавеющей стали 08Х18Н10Т. Выбор материала основывался на обеспечении максимальной наглядности результатов, что возможно при его большом термическом сопротивлении.

Устройство размещения исследуемого объекта представляет собой рамную конструкцию, на которой закрепляется фрагмент исследуемого корпуса аппарата, устанавливается схема разводки теплоносителя, контактные и бесконтактные измерительные преобразователи температуры.

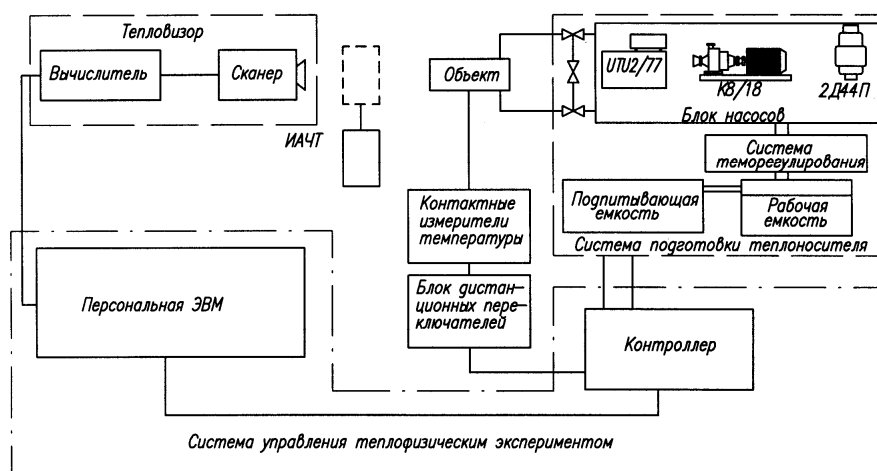


Рис. 1 Структурная схема экспериментальной установки

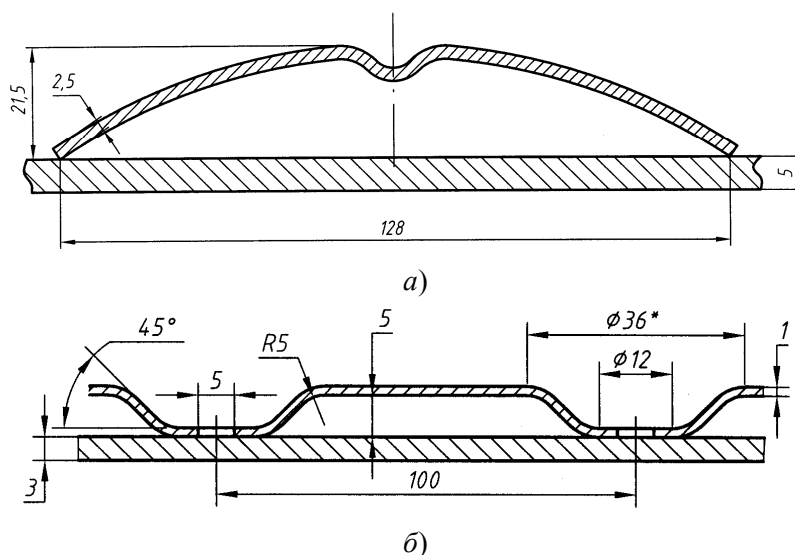


Рис. 2 Образцы рубашек:  
а – штрипсовая; б – пуклеванная

Система подготовки теплоносителя включает: рабочую емкость, заполненную теплоносителем (дистиллированная вода), с заданной в соответствии с программой эксперимента температурой систему терморегулирования. Для осуществления стабильной работы системы подготовки теплоносителя в нее введена подпитывающая емкость.

В связи с необходимостью обеспечения значительного диапазона объемных расходов 0,04...1,5 л/с установка была оснащена блоком насосов. Расход теплоносителя 0,01...0,04 л/с обеспечивал ультратермостат УТУ-2/77. В этом диапазоне были исследованы нестационарные процессы в плоской панели со штрипсовой рубашкой.

Для исследования теплообмена в образцах (плоская панель со штрипсовой рубашкой и цилиндрическая обечайка с пуклевой рубашкой) при рабочих значениях расходов 0,4...1,5 л/с (близких к расчетным для проектируемой системы охлаждения) применялся центробежный насос К8/18.

Для обеспечения расходов 0,04...0,25 л/с использовался насос 2Д44П.

Такая конструкция системы подготовки теплоносителя позволила обеспечить поддержание температуры рабочей емкости при температуре 20 °С с погрешностью  $\pm 0,05$  °С и в диапазоне 30...100 °С не более 0,25 %. В режиме работы с внешними устройствами в диапазоне температур 20...25 °С в установившемся режиме погрешность температуры в конкретной точке модуля не превышала  $\pm 0,2$  °С, а в диапазоне 30...80 °С  $\pm 0,8$  °С.

Два кольца циркуляции: малое (внутреннее), используемое при выходе на режим постоянной температуры носителя; внешнее, обеспечивающее движение теплоносителя через исследуемый объект, позволили исследовать как статические, так и динамические характеристики исследуемого объекта.

Задачу измерения температурных полей выполняла тепловизионная система ПВТ-4. Принцип действия системы основан на регистрации теплового излучения объекта и восстановления по полученной информации его температурного поля.

Тепловизор ПВТ-4 относится к оптико-электронным приборам пассивного типа, использующим для своей работы естественное инфракрасное излучение (ИК-излучение) объектов. В качестве чувствительного элемента в приборе применена телевизионная передающая трубка с пироэлектрической мишенью (пировидикон).

Применяемая тепловизионная система ПВТ-4 обеспечивает разрешение по температуре 0,2 °С во всем интервале температур 20...80 °С.

Анализ решаемой задачи и особенностей используемого оборудования приводит к следующей структуре системы управления экспериментом: выбору иерархической двухуровневой системы управления с персональной ЭВМ на верхнем уровне и микропроцессорной системой управления (МПСУ) на базе модулей устройства сопряжения с объектом (УСО) на нижнем уровне.

Данная система обеспечивает реализацию следующих функций: непосредственное цифровое управление тепловизионной системой; программно-логическое управление исполнительными механизмами, клапанами

управления потоков теплоносителя; контроль параметров задающих и управляющих сигналов в цифровом и квазианалоговом видах; регистрацию температур теплоносителя на входе и выходе, температуры поверхности образца в зоне тепловизионного контроля; измерение расхода теплоносителя, измерение температуры окружающей среды; организацию связи с ЭВМ первого уровня.

Подготовка комплекса осуществлялась в следующем порядке. Включается система управления экспериментом. Производится ее тестирование и контроль, как штатными средствами – тестами микропроцессорной системы и ПЭВМ, так и штатными программами контроля, фиксирующими состояние исполнительных органов в системе подготовки теплоносителя, значение температуры окружающей среды, теплоносителя в контрольных точках и опорных значений напряжений используемых источников питания.

Перепад температур на входе теплоносителя в исследуемый образец и выходе из него измерялась контактным погружным первичным преобразователем температуры КТПТР. В качестве вторичного прибора использовался цифровой вольтметр Щ 68000.

Поскольку рабочий диапазон температур носителя 20...85 °С, то в качестве носителя была выбрана дистиллированная вода, для которой выполняются условия доступности веществ и стабильности его свойств, наличие полной информации о физических свойствах (тепло- и теплопроводности, пределы теплоемкости, плотность).

Для обеспечения максимально возможной точности бесконтактных измерений температурных полей панели модуля было проведено чернение ее поверхности и коррекция матрицы изображения температурного поля, основанная на полиномиальной аппроксимации зависимости истинной температуры от регистрируемого локального значения. В результате, отличие значений относительно измеренной температуры  $\delta T = \frac{\Delta T}{T} \cdot 100 \%$

во всем диапазоне рабочих температур не превышало 1 %.

Следует отметить, что при исследовании процесса теплопереноса в модуле корпуса аппарата, с точки зрения организации измерений, можно выделить два случая: стационарные и нестационарные тепловые режимы. В первом случае достаточно зарегистрировать значения всех входных параметров: (температуру, расход, теплофизические свойства (ТФС)) теплоносителя; выходную матрицу температурного поля панели и температуру теплоносителя на выходе объекта. Измерения в этом случае несложно реализовать в связи с весьма ограниченным объемом информации и отсутствием существенных ограничений на промежуток времени измерений.

Однако заключение о стационарности процесса предполагает существование некоторого объективного критерия. Использование очевидного

критерия  $\frac{\delta T_s(p)}{\delta \tau} = 0$  ( $T_s(p)$  – температура объекта в окрестности точки

$P$ ;  $\tau$  – время) невозможно в связи с реально существующими помехами: вариацией температур теплоносителя и его расхода с одной стороны и ко-

нечной точностью измерений – с другой. То есть возникает задача формулировки оценки

$$J = \frac{1}{S_0} \iint_S \frac{\partial T}{\partial \tau} dS, \quad (1)$$

где  $S$  – некоторая область поверхности объекта;  $S_0$  – площадь области  $S$ , в которой при  $J \leq \varepsilon$  ( $\varepsilon$  – некоторая функция относительной погрешности измерения температуры;  $\varepsilon = f(\Delta T)$  – тепловой процесс является установившимся).

В работе для анализа процесса принято

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 < x \leq \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2} + \frac{a}{2}k, \quad 0 < k < 1 \\ 0 \leq y \leq \frac{y_{\max} - y_{\min}}{2} + \frac{b}{2}n, \quad 0 < n < 1 \end{array} \right\}, \quad (2)$$

где  $a, b$  – размеры контролируемого фрагмента ( $a$  – ширина,  $b$  – высота).

В виде, учитывающем реальное представление информации о температурных полях

$$J = \frac{1}{M_0 N_0} \sum_{p=1}^p \left[ \sum_{i=1}^{M_0} \sum_{j=1}^{N_0} (T_{i,j}^k - T_{i,j}^{k-p}) \right] \leq dT. \quad (3)$$

Данный критерий позволяет, вследствие накопления во времени разностного сигнала  $\Delta T$  (аппроксимирующего), увеличить чувствительность критерия. Кроме того, сформулированный критерий  $K$  целесообразно представить в виде, учитывающем специфические особенности объекта, т.е. трех сумм по областям, включающих каналы и исключаяющих их.

$$\begin{aligned} J_1 &= \sum_{p=1}^p \left[ \sum_{i=1}^{M_0} \sum_{j=1}^{n_1} (T_{i,j}^k - T_{i,j}^{k-p}) \right]; \\ J_2 &= \sum_{p=1}^p \left[ \sum_{i=1}^{M_0} \sum_{j=n_1}^{n_2} (T_{i,j}^k - T_{i,j}^{k-p}) \right]; \\ J_3 &= \sum_{p=1}^p \left[ \sum_{i=1}^{M_0} \sum_{j=n_2}^N (T_{i,j}^k - T_{i,j}^{k-p}) \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Во втором случае возникает задача обработки огромных массивов информации для интерпретации результатов. Даже для выделенной области объекта размером  $100 \times 100$  элементов за время перехода к стационарному режиму, не более получаса, объем массива данных, из которых основной – термоизображения, составляет  $10^8$  байт. Очевидно, в подобных ситуациях могут быть использованы только быстрые алгоритмы цифровой обработки изображений. Нами использованы двумерные алгоритмы

скользящего среднего и медианной фильтрации. Медианная фильтрация осуществляется посредством движения некоторой апертуры вдоль дискретизованных изображений и замены значения элемента изображения в центре апертуры медианой исходных значений отчетов внутри апертуры.

По результатам проведенной работы можно сделать следующие выводы.

1 Спроектирована и изготовлена экспериментальная установка, позволяющая получить данные о состоянии температурного поля экспериментального модуля в условиях имитации реальных параметров работы водоохлаждаемого корпуса аппарата.

2 Разработана оригинальная методика сбора и обработки экспериментальных данных, которая дала возможность получить наглядную (термограммы) и достоверную информацию о термокинетических процессах в корпусе исследуемого аппарата, как в статическом, так и в динамическом режимах работы.

Полученные результаты дают возможность скорректировать режимные параметры работы реального аппарата, дать рекомендации по формированию конструктивных параметров системы охлаждения аппаратов.

---

### **Experimental Research into Thermal Processes in the Tanks with Cooling Ducts**

**D.A. Plyichev, V.A. Bogush, E.N. Tugolukov, A.G. Tkachev**

*Tambov State Technical University*

**Key words and phrases:** cooling ducts; cooling jacket; thermal imager; experiment control.

**Abstract:** The paper presents the description of experimental device for research into thermal processes in the tank with various cooling ducts. The peculiarities of implementing the experiment are specified.

---

© Д.А. Ильичев, В.А. Богуш, Е.Н. Туголуков, А.Г. Ткачев, 2006

Ильичев Дмитрий Александрович  
Аспирант каф. ТТМП тел 793-574- раб.  
8-910-754-81-43 сот.  
48-68-35 дом.