

# РАЗРАБОТКА МОДЕРНИЗИРОВАННОГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ С ИНТЕНСИФИКАЦИЕЙ В ПОЛЕ ИНЕРЦИОННЫХ СИЛ

В. В. Шалай, К. В. Щербань

Омский государственный технический университет,  
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

**В настоящее время актуален вопрос повышения теплоотдачи углеводородного топлива в системах каналов систем охлаждения жидкостных ракетных двигателей. В статье рассматривается устройство модернизированного экспериментального стенда для исследования систем охлаждения с интенсификацией в поле инерционных сил. Данный стенд позволит исследовать эффективность нагрева компонентов жидкого топлива углеводородного теплоносителя в поле инерционных сил и верифицировать результаты расчёта, полученные в среде ANSYS.**

**Ключевые слова:** жидкостные ракетные двигатели, турбулизация, теплоотдача, система охлаждения, теплообмен, экспериментальный стенд.

## Введение

В настоящее время в практике мирового двигателестроения ведётся интенсивная разработка прямоточных реактивных воздушных двигателей для гиперзвуковых летательных аппаратов [1–3]. Анализ проводимых теоретических и экспериментальных работ показывает, что одной из основных проблем при создании такого рода летательных аппаратов является разработка системы охлаждения камеры сгорания двигателя и его сопла. [4–7]. К этим системам предъявляются жёсткие требования, так как они должны обеспечить работу двигателя при тяжёлом температурном режиме. Одним из наиболее широко применяемых в качестве горючего для летательных аппаратов является такое углеводородное топливо, как керосин [8]. Полученные в данной области результаты [9–11] требуют экспериментальной верификации.

## Постановка задачи

Целью модернизации экспериментального стенда было приспособление стенда для экспериментального исследования эффективности нагрева углеводородного теплоносителя в поле инерционных сил, характерных для гиперзвуковых летательных аппаратов, и верификации результатов расчёта в среде ANSYS. Для реализации этих исследований исходный стенд, предназначенный для изучения процессов кипения и конденсации, был модернизирован.

Модернизация стенда с целью проведения верификации результатов расчёта в среде ANSYS состояла в создании на основе базового стенда двух контуров — циркуляционного пневмогидравлического (рис. 1) и электрического.

Стенд содержит следующие основные элементы: КВБ — камера вакуумирования и барбо-

тирования, НВ — вакуумный насос, НЦ — насос циркуляционный, КН — камера нагрева, НЭ — нагревательный элемент, К — конденсатор, РМ — регулятор мощности электрического нагревателя, V — вольтметр, А — амперметр, ПК — предохранительный клапан, В0, В1...В17 — вентили, Т1, Т2 и Т3 — термометры-термопары.

Ниже представлен экспериментальный стенд (рис. 2).

Пневмогидравлический контур составляют камера вакуумирования и барбатирования КВБ, вакуумный насос НВ, насос циркуляционный НЦ, баллон с азотом Б, камеры нагрева теплоносителя КН, конденсатор К, предохранительный клапан ПК и вентили В0...В17.

Функционирование пневмогидравлического контура осуществляется подачей теплоносителя из камеры КВБ посредством циркуляционного насоса НЦ в камеру КН, где к теплоносителю подводится тепловой поток от электрических ТЭНов. В камере КН жидкий теплоноситель нагревается до состояния насыщения и кипит. После нагревателя пары теплоносителя конденсируются в воздушном конденсаторе К и возвращаются в камеру КВБ. Стенд предусматривает измерение температуры теплоносителя перед нагревателем термометром Т1, сразу после нагревателя термометром Т2 и после конденсатора термометром Т3. Расход теплоносителя в контуре регулируется циркуляционным насосом НЦ, а также байпасной линией к циркуляционному насосу с вентилями В4, В5 и В6, и измеряется датчиком расхода ДР, расположенным после циркуляционного насоса.

В случае циркуляции теплоносителя, обладающего самовоспламенением при контакте с воздухом, как, например, керосин, из циркуляционного контура следует вывести воздух, вакуумируя контур и заполняя его азотом. Для этого в контуре предусмотрен вакуумный насос

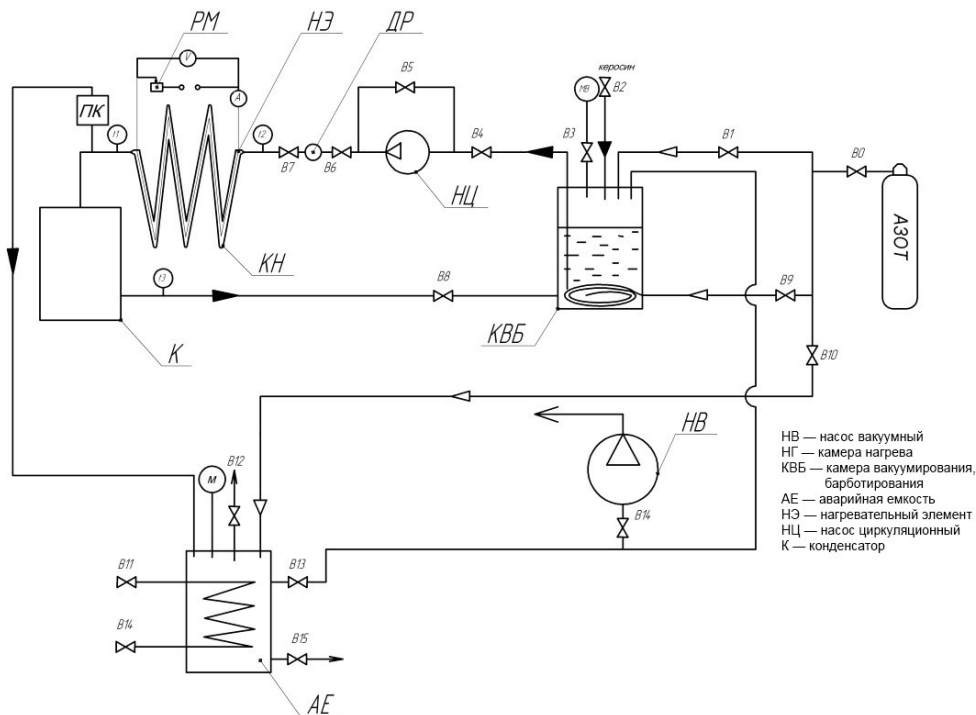


Рис. 1. Схема пневмогидравлического контура экспериментального стенда  
 Fig. 1. The test bench diagram of the pneumohydraulic circuit



Рис. 2. Общий вид экспериментального стенда  
 Fig. 2. General view of the test bench

и баллон с азотом. Для этих же целей в камеру вакуумирования и барботирования КВБ введена заглушенная с одного конца горизонтальная стальная спиральная трубка с рядом вертикально направленных отверстий, просверленных через определённый шаг. Эта спиральная трубка расположена на дне камеры КВБ и соединена патрубком через вентили В9 и В0 с азотным баллоном Б. Барботирование азота осуществляется через отверстия в спиральной трубке. Проходя через слой теплоносителя, газообразный азот вытесняет растворённый в теплоносителе воз-

дух и обогащает его собой, предохраняя тем самым от самовоспламенения. При этом воздух выводится из КВБ через вентиль В14 и вакуумный насос НВ. Для выведения воздуха из трубок и элементов циркуляционного контура он сначала вакуумируется вакуумным насосом НВ, а затем продувается газообразным азотом из баллона.

### Теория

Экспериментальное исследование влияния центробежных сил состояло в проведении двух

типов эксперимента. В эксперименте первого типа определялся средний коэффициент теплоотдачи при нагреве углеводородного теплоносителя до начала процесса кипения при его движении по прямому каналу круглого поперечного сечения. В эксперименте второго типа определялся средний коэффициент теплоотдачи при нагреве углеводородного теплоносителя до начала процесса кипения при его движении по спиральному змеевиковому каналу (далее — СЗК) также круглого поперечного сечения. Анализ эффективности использования СЗК состоял в сравнении этих средних коэффициентов теплоотдачи. Соответственно, экспериментальный стенд должен давать возможность определять средние коэффициенты теплоотдачи для двух типов движения углеводородного теплоносителя — по прямому каналу и по спиральному змеевиковому.

Средний коэффициент теплоотдачи определялся на основе значений локальных коэффициентов теплоотдачи как их среднее арифметическое [12]. В основу определения локального коэффициента теплоотдачи положено уравнение Ньютона — Рихмана

$$q = \alpha \cdot |T_{CT} - T_{Ж}|,$$

где  $q$  — плотность теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;  $\alpha$  — определяемый коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $T_{CT}$  — температура стенки канала движения жидкости, К;  $T_{Ж}$  — температура жидкости, К.

Зная значения  $q$ ,  $T_{Ж}$  и  $T_{CT}$  можно по уравнению Ньютона — Рихмана определить значение  $\alpha$ .

В случае движения нагреваемой жидкости по каналу круглого поперечного сечения уравнение Ньютона — Рихмана принимает вид [13]

$$q_l = \alpha \cdot |T_{CT} - T_{Ж}| \cdot \pi \cdot d_{ВН},$$

где  $q_l$  — линейная плотность теплового потока, Вт/м;  $d_{ВН}$  — диаметр канала (внутренний диаметр трубы), м.

Если температура стенки  $T_{CT}$  и температура жидкости  $T_{Ж}$  будут братья для конкретного сечения канала, то в этом случае коэффициент теплоотдачи будет локальным  $\alpha_{ЛОК}$ . Если температура стенки и температура жидкости будут братья как средние для канала, то в этом случае коэффициент теплоотдачи также будет средним для всего канала. При этом удобнее измерять температуру стенки не на внутренней, а на наружной поверхности. В этом случае выражение для линейной плотности теплового потока  $q_l$  принимает вид [14]:

$$q_l = \frac{\pi \cdot (T_{CT} - T_{Ж})}{\frac{1}{\alpha \cdot d_{ВН}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{d_H}{d_{ВН}}}.$$

В этом выражении:  $d_H$  — наружный диаметр стенки канала, м;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности материала стенки канала, Вт/(м·К).

С другой стороны, линейную плотность теплового потока можно представить в виде [14]:

$$q_l = \frac{Q}{L} = \frac{V_{Ж} \cdot \rho_{Ж} \cdot c_{Ж} \cdot (T_{Ж2} - T_{Ж1})}{L}.$$

В этом выражении:  $Q$  — тепловой поток, подводимый к теплоносителю, Вт;  $L$  — длина канала, м;  $V_{Ж}$  — объёмный расход теплоносителя, м<sup>3</sup>/с;  $\rho_{Ж}$  — средняя плотность теплоносителя, кг/м<sup>3</sup>;  $c_{Ж}$  — средняя удельная массовая теплоёмкость теплоносителя, Дж/(м·К);  $T_{Ж1}$  и  $T_{Ж2}$  — температуры теплоносителя на входе в канал нагрева и на выходе из него, К.

Приравнявая последние два выражения, получаем

$$\frac{\pi \cdot (T_{CT} - T_{Ж})}{\frac{1}{\alpha \cdot d_{ВН}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{d_H}{d_{ВН}}} = \frac{V_{Ж} \cdot \rho_{Ж} \cdot c_{Ж} \cdot (T_{Ж2} - T_{Ж1})}{L}.$$

Из этого уравнения выражаем коэффициент теплоотдачи  $\alpha$

$$\alpha = \frac{V_{Ж} \cdot \rho_{Ж} \cdot c_{Ж}}{d_{ВН}} \times \left[ \frac{(T_{Ж2} - T_{Ж1})}{\pi \cdot (T_{CT} - T_{Ж}) \cdot L - \frac{V_{Ж} \cdot \rho_{Ж} \cdot c_{Ж} \cdot (T_{Ж2} - T_{Ж1})}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{d_H}{d_{ВН}}} \right].$$

Из этого выражения следует, что для определения коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  необходимо произвести измерение температуры наружной поверхности стенки  $T_{CT}$ , температуры потока на входе в канал  $T_{Ж1}$  и на выходе из канала  $T_{Ж2}$ , а также нужно определить температуру жидкости  $T_{Ж}$  в том же сечении канала, в котором экспериментально измеряется  $T_{CT}$ .

Температура на наружной поверхности стенки измеряется термопарами, равномерно распределёнными с постоянным шагом по длине канала движения теплоносителя. Температуры теплоносителя на входе в канал  $T_{Ж1}$  и на выходе из него  $T_{Ж2}$  также измеряются термопарами. Температура теплоносителя  $T_{Ж}$  в сечении, в котором измеряется температура стенки, определяется на основе предположения линейного закона изменения температуры по длине канала. Это предположение справедливо, если тепловой поток равномерно подводится по длине канала, т. е. линейная плотность теплового потока  $q_l$  является постоянной величиной. В этом случае изменение температуры жидкости по длине канала описывается функцией [15]:

$$T_{Ж}(l) = T_{Ж1} + (T_{Ж2} - T_{Ж1}) \cdot \frac{l}{L}.$$

В этом выражении  $l$  — длина канала от начала нагрева до рассматриваемой точки крепления термопары для измерения температуры стенки.

## Результаты экспериментов

Основная функция по визуализации процессов нагрева жидкости, её выкипания и перегрева паров жидкости ложится на камеру нагрева КН.

Камера нагрева (рис. 3) состоит из стеклянного корпуса 1 и вставленных в корпус пяти электрических нагревательных элементов — ТЭНов 2. Герметичность установки и фиксирование нагре-

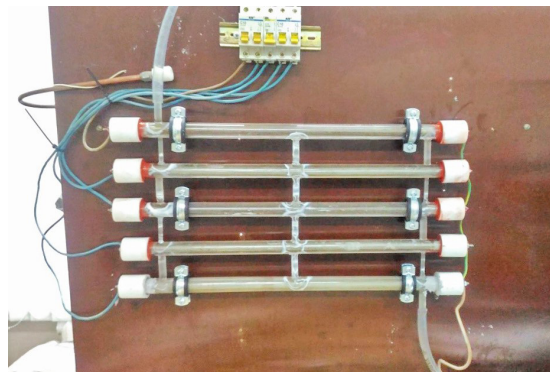


Рис. 3. Камера нагрева  
Fig. 3. Heating chamber



Рис. 4. Камера вакуумирования и барботирования  
Fig. 4. Vacuum and bubbling chamber

вательных элементов в трубках обеспечивается кольцами 3, втулками 4 и крышками 5. Жидкость движется в камере нагрева в кольцевом канале между стеклянными стенками камеры и поверхностями нагрева ТЭНов.

Нагревательные элементы НЭ (ТЭНы) подключаются к электрической сети через регуляторы мощности ВМ247. Регуляторов мощности три, и они подключаются к ТЭНам параллельно. Они необходимы для варьирования мощности нагрева потока теплоносителя.

Первый регулятор мощности подключён параллельно к ТЭНам первой и второй снизу трубок, второй регулятор — к ТЭНам третьей и четвертой трубок, третий регулятор подключён параллельно к ТЭНу верхней пятой трубки.

Стеклянный корпус камеры нагрева состоит из пяти открытых с обеих концов стеклянных трубок, которые соединены в единое целое стеклянными патрубками, позволяющими воде последовательно перетекать из одной трубки в другую. Для увеличения прочности конструкции трубки также соединены стеклянными пе-

ремычками. Трубки выполнены из кварцевого стекла К4, позволяющего выдерживать температуру до 300 °С.

Камера вакуумирования и барботирования КВБ (рис. 4) служит для заполнения стэнда теплоносителем и резервуаром для его хранения. Теплоноситель подаётся в контур через циркуляционный насос НЦ и возвращается в него после воздушного конденсатора К через вентиль В8. К камере подключен манометр МВ типа МВП-УУ2 и в неё введена барботажная спираль. Корпус камеры выполнен из стали 12Х18Н10Т. В корпусе камеры вставлено смотровое окно. Крышка и дно корпуса приварены к её стенкам.

На дне камеры вакуумирования и барботирования расположена барботажная спираль. После камеры нагрева пары теплоносителя поступают в воздушный конденсатор для конденсации паров теплоносителя и охлаждения его в жидком состоянии. Конденсатор (рис. 5) представляет собой последовательно соединенные витую медную трубку длиной пять метров, предназначенную для предварительного охлаждения паров



Рис. 5. Воздушный конденсатор  
 Fig. 5. Air condenser

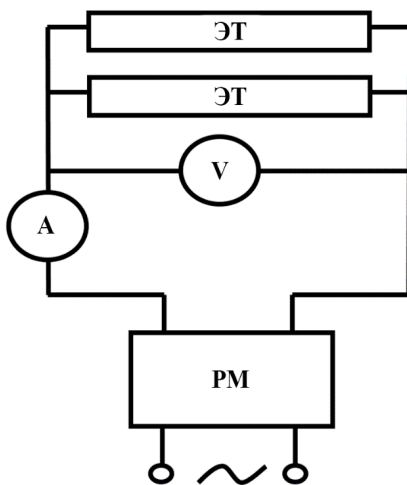


Рис. 6. Электрическая схема подключения нижних (1 и 2), а также средних (3 и 4) ТЭНов нагревательных элементов к сети через регулятор мощности:  
 ЭТ — электрический ТЭН; А — амперметр;  
 V — вольтметр; PM — регулятор мощности  
 Fig. 6. Electrical circuit connecting the lower (1 and 2) and medium (3 and 4) heating elements to the network via a power regulator:  
 ЭТ — electric heating element; A — ammeter;  
 V — voltmeter; PM — power regulator

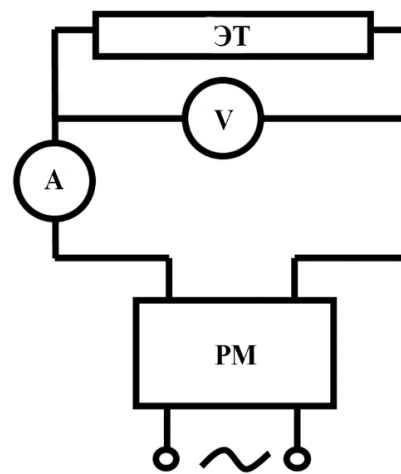


Рис. 7. Электрическая схема подключения верхнего пятого ТЭНа нагревательного элемента к сети через регулятор мощности:  
 ЭТ — электрический ТЭН; А — амперметр;  
 V — вольтметр; PM — регулятор мощности  
 Fig. 7. Electrical circuit connecting the top fifth of the heating element to the network via the power regulator:  
 ЭТ — electric heating element; A — ammeter;  
 V — voltmeter; PM — power regulator

теплоносителя, и четырех воздушных конденсаторов с принудительным обдувом воздухом с посредством вентиляторов.

Перекачка теплоносителя по циркуляционному контуру осуществляется циркуляционным насосом CN-25/4. Вакуумирование циркуляционного контура в случае использования теплоносителя с самовозгоранием в среде воздуха должно осуществляться вакуумным насосом НВМ-10 УХЛ 4.2.

Измерение температуры теплоносителя осуществлялось в трёх точках — перед камерой нагрева КН, после камеры нагрева и после конденсатора К. Измерения температуры проводилось с помощью термопар ТП.ХА(К).И с диапазоном измерения температуры от  $-40$  до  $+800$  °С. Показания ЭДС термопар регистрируются измери-

телем — регулятором микропроцессорным одноканальным ТРМ 1 производства фирмы «Овен». Класс точности преобразователя ТРМ 1 при использовании в качестве первичного датчика термомпары — 0,5.

Электрический контур (рис. 6, 7) служит для подачи напряжения на электрические ТЭНы, вставленные в стеклянный корпус камеры нагрева.

Для измерения электрической мощности, подаваемой на ТЭН в электрический контур, включены амперметры SE-80 и вольтметры SE-80 (рис. 1) с классом точности всех приборов 2,5. При этом первый и второй амперметры со шкалами от 0 до 20 ампер подключены к первому, второму, третьему и четвертому ТЭНам, а амперметр с диапазоном измерения от 0 до

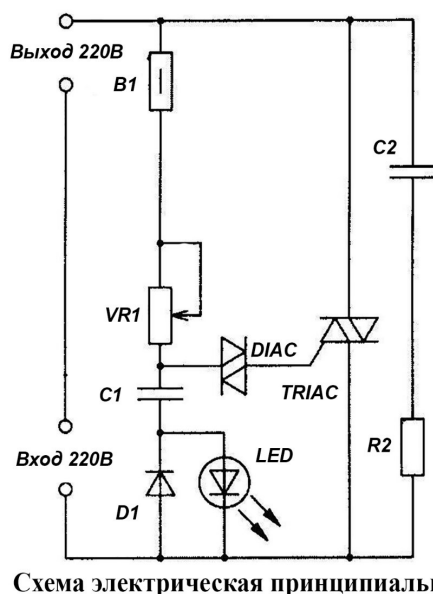


Рис. 8. Электрическая схема регулятора мощности  
Fig. 8. Electrical power control circuit

10 ампер — к пятому верхнему ТЭНу. Амперметры и вольтметры на стенд монтируются блоком.

Регулятор (рис. 8) мощности включает в себя резистивный делитель, состоящий из резистора B1, переменного резистора VR1 и конденсатора C1, конденсатора C2, резистора R2, диммера (симметричного диода) DIAC, симистора (симметричного тиристора) TRIAC, диода D1 и светодиода (индикатора работы) LED.

Регулятор мощности использует принцип фазового управления. Этот принцип основан на изменении момента включения симистора относительно перехода сетевого напряжения через ноль.

### Обсуждение результатов

Таким образом, модернизация стенда для проведения экспериментального исследования эффективности нагрева углеводородного теплоносителя в поле инерционных сил сводилась к разработке двух камер нагрева жидкости для прямолинейного и спирально-змеевикового каналов, которые позволяли бы проводить измерения температуры наружной поверхности канала в точках, равномерно распределённых по длине канала. В новых камерах осуществляется равномерный нагрев движущегося в канале теплоносителя. Камеры нагрева крепятся к пневмогидравлическому циркуляционному контуру описанного выше стенда для визуализации процессов нагрева жидкости и её выпаривания. Крепление осуществляется на месте крепления стеклянной камеры нагрева теплоносителя.

Тепловой поток подводится с помощью гибкого однофазного ленточного ТЭНа типа ЭНГЛУ-400-3/220-4,1ЕП производства «Сокол-Электро». Нагреватель представляет собой ленту из трех слоев стеклонити, пропитанную органосиликатным материалом, в основе которой находилось

восемь нагревательных проводов из нихрома. Соединение нагревательных проводов с основным электроконтуром осуществляется двумя медными выводами. Номинальная мощность ленточного ТЭНа составляет  $P_{\text{ЛЕНТ}} = 3000$  Вт.

Подключение ТЭНа к электросети напряжением 220В осуществляется через регулятор мощности BM247, описанный выше. Регулирование нагрузки осуществляется при помощи вольтметра типа SE-80 кл.т. 2,5 и амперметра типа SE-80 кл.т. 2,5 для каждого ТЭНа.

Измерения температур стенок каналов, а также входных и выходных значений жидкости исследуемой поверхности экспериментального узла производится хромель-копелевыми термопарами типа ТП.ХА(К).И (хромель-алюмель) с диапазоном измерения температуры от  $-40$  до  $+800$ °С. Показания ЭДС погружных и поверхностных термопар регистрируются измерителем — регулятором микропроцессорным одноканальным ТРМ 1 производства фирмы «Овен». Класс точности преобразователя ТРМ 1 при использовании в качестве первичного датчика термопары — 0,5.

Нагрев керосина осуществлялся посредством подачи на гибкий ТЭН напряжения через регулятор мощности BM247, подключённого к двухфазной сети. Напряжение фиксировалось вольтметром SE-80 (класс точности 2,5 и максимальным значением измерительной шкалы 300 В), величина электрического тока, проходящего через ТЭН, измерялась амперметром SE-80 (класс точности 2,5 и максимальным значением измерительной шкалы 20А). Метрологическое обеспечение стенда является удовлетворительным и позволяет осуществлять эксперимент с точностью, достаточной для подтверждения значений, полученных в ANSYS, и верификации методики.

### Выводы и заключение

Конструкция модернизированного стенда позволяет достаточно легко заменять исследуемые поверхности. Экспериментальное исследование будет проводиться с двумя типами теплообменных поверхностей: прямолинейный канал круглого сечения и спирально-змеевиковый канал круглого сечения. Целью экспериментального исследования будет сравнение коэффициента теплоотдачи в прямолинейных каналах круглого поперечного сечения с коэффициентом теплоотдачи в спирально-змеевиковых каналах круглого поперечного сечения при одних и тех же условиях.

### Список источников

1. Балмина Р. В., Губанов А. А., Иванькин М. А. [и др.]. Состояние и перспективы разработки гиперзвукового вооружения // Техническая информация. 2012. № 1-2 (1821 – 1822). С. 1 – 72.
2. Лаптев А. Г., Николаев Н. А., Башаров М. М. Методы интенсификации и моделирования теплообменных процессов. М.: Теплотехник, 2011. 288 с. ISBN 978-5-98457-104-3.
3. Сухов Е. В. Совершенствование конструкций и метода расчёта компактных спирально-змеевиковых узлов охлаждения компрессорных агрегатов: дис. ... канд. техн.

наук. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2012. 196 с.

4. Misra A. Composite materials for aerospace propulsion related to air and space transportation // *Lightweight Composite Structures in Transport* / Ed. J. Njuguna. Sawston, Cambridge: Woodhead Publishing, 2016. P. 305–327. ISBN 978-1-78242-325-6.

5. Hiroyasu H., Arai M. Structures of Fuel Spray in Diesel Engines // *SAE Technical Paper 900475*. 1990. 15 p. DOI: 10.4271/900475.

6. Chen Yu., Wang Yu., Bao Z. [et al.]. Numerical investigation of flow distribution and heat transfer of hydrocarbon fuel in regenerative cooling panel // *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 98. P. 628–635. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.12.088.

7. Moiseeva N. P., Pokhodun A. I. Investigation of the non-uniqueness and subrange in consistencies of ITS-90 using platinum resistance thermometers in the 0-961.78 °C range // *Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry*. 1992. Vol. 6. P. 187–191.

8. Михайлов А. М. Паровая конверсия углеводородов как метод химической регенерации тепла // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*. 2013. № 3 (178). С. 95–100.

9. Чернов Г. И., Щербань К. В. Математическая модель теплоотдачи при течении углеводородного топлива в каналах системы охлаждения ЖРД и обоснование возможности ее интенсификации // *Проблемы разработки, изготовления и эксплуатации ракетно-космической техники и подготовки инженерных кадров для авиакосмической отрасли: материалы XI Всерос. науч. конф., посвящ. памяти гл. конструктора ПО «Полет» А. С. Клинышкова, 30–31 мая 2017 г.* / ОмГТУ. Омск, 2017. С. 114–127.

10. Юша В. Л., Чернов Г. И., Щербань К. В. Влияние расхода и схемы движения углеводородного топлива в каналах системы охлаждения сопла и его расхода на температурные поля в различных элементах сопла // *Проблемы разработки, изготовления и эксплуатации ракетно-космической техники и подготовки инженерных кадров для авиакосмической отрасли: материалы XII Всерос. науч. конф., посвящ. памяти гл. конструктора ПО «Полет» А. С. Клинышкова, 29–30 мая 2018 г.* / ОмГТУ. Омск, 2018. С. 133–147.

11. Юша В. Л., Чернов Г. И., Щербань К. В. Конструкция системы интенсификации теплообмена углеводородного топлива в охлаждающих каналах жидкостного ракетного двигателя // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2018. № 8 (701). С. 86–91. DOI: 10.18698/0536-1044-2018-8-86-91.

12. Дорофеев А. А. Основы теории тепловых ракетных двигателей: теория, расчет и проектирование. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 571 с. ISBN 978-5-7038-3746-7.

13. Мякочин А. С., Яновский Л. С. Образование отложений в топливных системах силовых установок и методы их подавления. М.: Изд-во МАИ, 2001. 222 с. ISBN 5-7035-2279-X.

14. Куранов А. Л., Корабельников А. В., Михайлов А. М. Принципы управления и моделирования тепловой защиты гиперзвукового летательного аппарата. СПб.: Изд-во СПбПУ, 2014. 226 с. ISBN 978-5-7422-4272-7.

15. Петухов Б. С., Алексеев В. А., Зейгарник Ю. А. [и др.]. Проблемы теплообмена в охлаждаемых зеркалах технологических лазеров // *Теплофизика высоких температур*. 1985. Т. 23, № 6. С. 1200–1210.

**ШАЛАЙ Виктор Владимирович**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Нефтегазовое дело, стандартизация и метрология», президент ОмГТУ.

SPIN-код: 2322-6820

AuthorID (РИНЦ): 9913

ORCID: 0000-0003-0635-4849

AuthorID (SCOPUS): 35792469000

AuthorID (SCOPUS): 56755298300

AuthorID (SCOPUS): 57190972363

ResearcherID: P-8233-2015

**ЩЕРБАНЬ Кирилл Владимирович**, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Системы жизнеобеспечения обитаемых и необитаемых объектов».

SPIN-код: 1093-3377

AuthorID (РИНЦ): 883560

Адрес для переписки: sherban.kirill@gmail.com

#### Для цитирования

Шалай В. В., Щербань К. В. Разработка модернизированного экспериментального стенда для исследования систем охлаждения с интенсификацией в поле инерционных сил // *Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение*. 2019. Т. 3, № 1. С. 73–81. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-1-73-81.

Статья поступила в редакцию 13.03.2019 г.

© В. В. Шалай, К. В. Щербань

## DESIGN OF MODERNIZED TEST BENCH FOR ANALYSIS OF COOLING SYSTEMS WITH INTENSIFICATION UNDER INERTIAL FORCES FIELD

V. V. Shalay, K. V. Shcherban

Omsk State Technical University,  
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

**The article discusses the design of a modernized test bench for the study of cooling systems with intensification of inertial forces in the field. This bench will allow investigation the efficiency of heating the hydrocarbon coolant in the field of inertial forces and verification of the calculation results obtained in ANSYS environment.**

**Keywords: liquid rocket engines, turbulization, heat transfer, cooling system, heat exchange, test bench.**

### References

1. Balmina R. V., Gubanov A. A., Ivan'kin M. A. [et al.]. Sostoyaniye i perspektivy razrabotki giperzvukovogo vooruzheniya [The state and prospects for the development of hypersonic weapons] // *Tekhnicheskaya informatsiya. Tekhnicheskaya informatsiya*. 2012. No. 1-2 (1821–1822). P. 1–72. (In Russ.).

2. Laptev A. G., Nikolayev N. A., Basharov M. M. Metody intensivatsii i modelirovaniya teplomassoobmennyykh protsessov [Methods of intensification and modeling of heat and mass transfer processes]. Moscow: Teplotekhnik Publ., 2011. 288 p. ISBN 978-5-98457-104-3. (In Russ.).

3. Sukhov E. V. Sovershenstvovaniye konstruksiy i metoda rascheta kompaktnykh spiral'no-zmeyevikovykh uzlov okhlazhdeniya kompressornykh agregatov [Improvement of design and calculation method for compact spiral-serpentine cooling units of compressor units]. Omsk: OmSTU Publ., 2012. 196 p. (In Russ.).

4. Misra A. Composite materials for aerospace propulsion related to air and space transportation // *Lightweight Composite Structures in Transport* / Ed. J. Njuguna. Sawston, Cambridge: Woodhead Publishing, 2016. P. 305–327. ISBN 978-1-78242-325-6. (In Engl.).

5. Hiroyasu H., Arai M. Structures of Fuel Spray in Diesel Engines // *SAE Technical Paper 900475*. 1990. 15 p. DOI: 10.4271/900475. (In Engl.).

6. Chen Yu., Wang Yu., Bao Z. [et al.]. Numerical investigation of flow distribution and heat transfer of hydrocarbon fuel in regenerative cooling panel // *Applied Thermal Engineering*. 2016. Vol. 98. P. 628–635. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.12.088. (In Engl.).

7. Moiseeva N. P., Pokhodun A. I. Investigation of the non-uniqueness and subrange in consistencies of ITS-90 using platinum resistance thermometers in the 0-961.78 °C range // *Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry*. 1992. Vol. 6. P. 187–191. (In Engl.).

8. Mikhaylov A. M. Parovaya konversiya uglevodorodov kak metod khimicheskoy regeneratsii tepla [Steam reforming of hydrocarbons as a method of chemical heat recovery] // *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology*. 2013. No. 3 (178). P. 95–100. (In Russ.).

9. Chernov G. I., Shcherban K. V. Matematicheskaya model' teplootdachi pri techenii uglevodorodnogo topliva

v kanalakh sistemy okhlazhdeniya ZHRD i obosnovaniye vozmozhnosti eye intensivatsii [Mathematical model of heat transfer during the flow of hydrocarbon fuel in the channels of the cooling system of a liquid propellant rocket engine and the rationale for the possibility of its intensification] // *Problemy razrabotki, izgotovleniya i ekspluatatsii raketno-kosmicheskoy tekhniki i podgotovki inzhenernykh kadrov dlya aviakosmicheskoy otrasli. Problemy razrabotki, izgotovleniya i ekspluatatsii raketno-kosmicheskoy tekhniki i podgotovki inzhenernykh kadrov dlya aviakosmicheskoy otrasli*. Omsk: OmSTU Publ., 2017. P. 114–127. (In Russ.).

10. Yusha V. L., Chernov G. I., Shcherban K. V. Vliyaniye raskhoda i skhemy dvizheniya uglevodorodnogo topliva v kanalakh sistemy okhlazhdeniya sopla i ego raskhoda na temperaturnyye polya v razlichnykh elementakh sopla [Influence of consumption and flow patterns of hydrocarbon fuel in the channels of the nozzle cooling system and its consumption on temperature fields in various nozzle elements] // *Problemy razrabotki, izgotovleniya i ekspluatatsii raketno-kosmicheskoy tekhniki i podgotovki inzhenernykh kadrov dlya aviakosmicheskoy otrasli. Problemy razrabotki, izgotovleniya i ekspluatatsii raketno-kosmicheskoy tekhniki i podgotovki inzhenernykh kadrov dlya aviakosmicheskoy otrasli*. Omsk: OmSTU Publ., 2018. P. 133–147. (In Russ.).

11. Yusha V. L., Chernov G. I., Shcherban K. V. Konstruktsiya sistemy intensivatsii teploobmena uglevodorodnogo topliva v okhlazhdayushchikh kanalakh zhidkostnogo raketnogo dvigatelya [Design of a Heat Transfer Intensification System for Hydrocarbon Fuel in the Cooling Channels of the Liquid Rocket Engine] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye. Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*. 2018. No. 8 (701). P. 86–91. DOI: 10.18698/0536-1044-2018-8-86-91. (In Russ.).

12. Dorofeyev A. A. Osnovy teorii teplovykh raketnykh dvigateley: teoriya, raschet i proyektirovaniye [The fundamentals of the theory of thermal rocket engines: theory, calculation and design]. 3d ed. Moscow: BMSTU Publ., 2014. 571 p. ISBN 978-5-7038-3746-7. (In Russ.).

13. Myakochin A. S., Yanovskiy L. S. Obrazovaniye otlozheniy v toplivnykh sistemakh silovykh ustanovok i metody ikh podavleniya [Formation of deposits in fuel systems of power plants and methods for their suppression]. Moscow: MAI Publ., 2001. 222 p. ISBN 5-7035-2279-X. (In Russ.).

14. Kuranov A. L., Korabel'nikov A. V., Mikhaylov A. M. Printsipy upravleniya i modelirovaniya teplovoy zashchity giperzvukovogo letatel'nogo apparata [Principles of control



and simulation of the thermal protection of a hypersonic aircraft]. St. Petersburg: SPbPU Publ., 2014. 226 p. ISBN 978-5-7422-4272-7. (In Russ.).

15. Petukhov B. S., Alekseev V. A., Zeigarnik Yu. A. [et al.]. Problemy teploobmena v okhlazhdayemykh zerkalakh tekhnologicheskikh lazerov [Problems of heat-transfer in cooled mirrors in industrial lasers] // *Teplofizika vysokikh temperatur. Teplofizika vysokikh temperatur*. 1985. Vol. 23, Issue 6. P. 1200–1210. (In Russ.).

---

**SHALAY Viktor Vladimirovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Oil and Gas Engineering, Standardization and Metrology Department, President OmSTU.

SPIN-code: 2322-6820

AuthorID (RSCI): 9913

ORCID: 0000-0003-0635-4849

AuthorID (SCOPUS): 35792469000

AuthorID (SCOPUS): 56755298300

AuthorID (SCOPUS): 57190972363

ResearcherID: P-8233-2015

**SHCHERBAN Kirill Vladimirovich**, Researcher of Life Support Systems for Inhabited and Uninhabited Objects Laboratory.

Address for correspondence: sherban.kirill@gmail.com

#### For citations

Shalay V. V., Shcherban K. V. Design of modernized test bench for analysis of cooling systems with intensification under inertial forces field // *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2019. Vol. 3, no. 1. P. 73–81. DOI: 10.25206/2588-0373-2019-3-1-73-81.

Received 13 March 2019.

© V. V. Shalay, K. V. Shcherban