

Болдовський В.Н.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОХОДИМОСТИ ГРУЗОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ ПО ДОРОГАМ С НИЗКОЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ

В данной статье представлены результаты выполненных исследований изменения электрической проводимости грунта, под влиянием ходовых систем грузовых автомобилей. В общем виде представлены основные принципы способа определения возможности проходимости грузовых автомобилей по дорогам с низкой несущей способностью.

Boldovsky V.

DETERMINE ROAD TRUCKS ON ROADS WITH LOW BEARING CAPACITY

In this article presented the results of studies of the changes in the electrical conductivity of the soil under the influence of running systems in trucks. Generally, as represented by the basic principles of how to determine trucks on roads with low bearing capacity.

УДК 623.438.14

Возгрин Ю.В., Ковалев М.С., Крот С.Г., Кузьминский В.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА ПОДОГРЕВАТЕЛЯ И ТРАКТА ВЫПУСКА (СИСТЕМЫ ПРЕДПУСКОВОГО ПОДОГРЕВА ДВИГАТЕЛЯ)

Актуальность темы. Согласно классическим теоретическим основам, при проработке конструкции вновь проектируемой системы подогрева, необходимо достичь наиболее рациональных соотношений между такими параметрами, как расход топлива, теплопроизводительность и габаритный размер агрегата. В оборонной промышленности предъявляются повышенные требования к компактности конструкции, что продиктовано тактико-техническими задачами, выполняемыми боевой техникой. При столь жестких условиях плотности компоновки на фоне довольно больших теплопроизводительностей зачастую страдает геометрия конвективной части котла подогревателя и его выпускной магистрали. Снижение полезной площади теплообменника делает необходимым увеличение интенсивности теплообмена за счет повышения температуры горения топливовоздушной смеси и турбулизации потока, что приводит к тому, что материал теплообменника находится в предельных условиях по обеспечению прочностных характеристик конструкции.

Как правило, расчет ведется исходя из предполагаемого равномерного распределения плотности тока и температуры горения смеси по сечению теплообменника. Однако известно, что в реальных условиях всегда будет наблюдаться повышение температуры и плотности тока от периферии к центру сечения теплообменника, что повлечет за собой образование высокотемпературного ядра с повышенными значениями параметров теплообмена. Зачастую подобные нежелательные эффекты компенсируются запасами по термической прочности, заложенными в конструкцию, поэтому канонический расчет котла предпускового подогревателя не содержит зависимостей, учитывающих неравномерность распределения полей температур по сечению тока. В описанных выше случаях, когда конструкция работает на пределе несущей способности, подобные эффекты неизбежно приводят к разрушению конструкции, если только не будут приняты дополнительные меры по изменению геометрии проточной части и обеспечения равномерности потока.

Целью статьи является анализ конструктивных решений, принятых в штатном предпусковом подогревателе, используемом в изделиях бронированной транспортной техники разработки ХКБМ им. А.А. Морозова, после выявленных аварийных разрушений проточной части теплообменника котла в ходе испытаний опытных образцов боевых машин.

Основная часть. Проведенная в ХКБМ серия испытаний предпускового подогревателя силовой установки, применяемой на современных образцах боевой техники, выявила недостатки в конструкции конвективной части теплообменника. Испытания проводились с целью определения причины выхода из строя группы подогревателей, установленных на эксплуатируемых боевых машинах. На рис. 1 показан разрез конструкции теплообменника подогревателя, на которых зафиксированы отказы в работе. После препарирования данных подогревателей были выявлены нарушения сплошности пластин блока теплообменника (поз.1 на рис.1). Как показали исследования, «свищи» *a* на рис.2 были образованы воздействием избыточного давления, возникшего вследствие

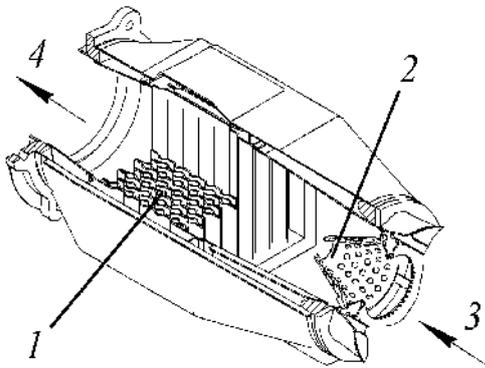


Рис. 1. Разрез теплообменника предпускового подогревателя:
1 – водотрубный пластинчатый блок;
2 – конус-рассекатель; 3 – направление движения продуктов сгорания;
4 – выход в маслобак

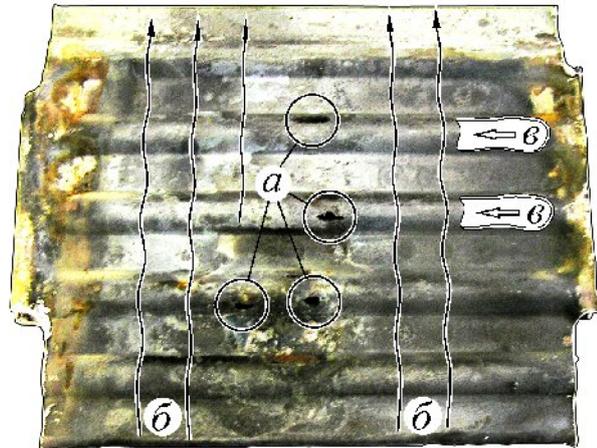


Рис. 2. Пластина блока теплообменника:
a – «свищи» (нарушения сплошности); *б* – линии тока продуктов сгорания; *в* – направление тока охлаждающей жидкости

вскипания охлаждающей жидкости, движущейся по направлению *в* на рис.2 в рубашке теплообменника, с одновременным снижением прочности материала теплообменника под действием высоких температур форса пламени, имеющего направление *б* на рис.2. Анализ распределения остатков продуктов сгорания по сечению теплообменника показал, что конус 2 на рис.1 создает направленный высокотемпературный форс пламени, который локально воздействует на сердцевину блока теплообменника 1, о чем и свидетельствует расположение прогаров на поверхности пластины (см. рис. 2). С целью перераспределения потока продуктов сгорания были предприняты конструктивные изменения проточной части предпускового подогревателя. Конус 2 на рис.3 был дополнен заглушкой 3 с целью исключить высокотемпературный направленный форс пламени, непосредственно действующий на блок теплообменника 4. Очевидно, что такое уменьшение полного проходного сечения конуса-рассекателя 2 создаст подпор в камере сгорания 1, что обеспечит более полное сгорание горючего, а также создаст более турбулизированное течение газов в объеме теплообменника, исключив высокотемпературный направленный форс. При этом распределение тепла по сечению теплообменника станет более равномерным, и, соответственно, улучшится качество теплообмена. Эксперимент показал целесообразность принятых конструктивных решений. Стоит упомянуть, что в

программу испытаний модифицированных образцов предпусковых подогревателей входила имитация выхода из строя уплотнения насоса охлаждающей жидкости, что влекло за собой прекращение прокачки охлаждающей жидкости и, как следствие, вскипание в рубашке охлаждения.

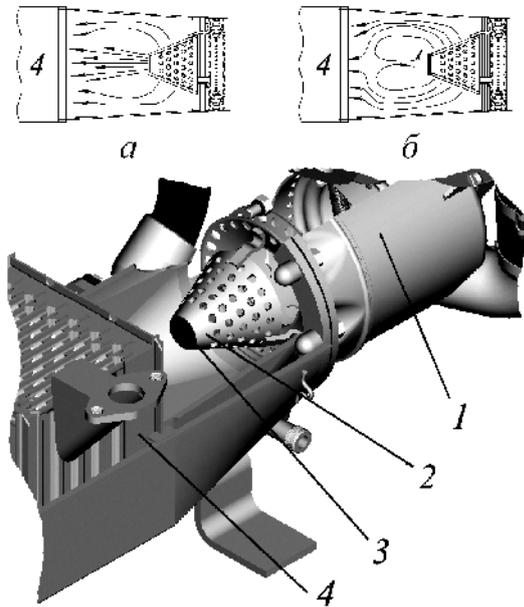


Рис. 3. Конструктивные изменения испытываемого образца предпускового подогревателя: 1 – камера сгорания; 2 – конус-рассекатель; 3 – заглушка; 4 – блок теплообменника; а – до модификации; б – после модификации

периферийной области, коксование почти полностью отсутствует, так как пластина тут омывается пристеночным вторичным воздухом завесы. Примечательно то, что прогар, как и в случае не модифицированного конуса-рассекателя, происходит на фронтальной части пластин блока теплообменника. Так как высокотемпературный форс был исключен модификацией конуса-рассекателя (см. рис.3), было принято решение произвести более подробное рассмотрение параметров течения продуктов сгорания после модификации подогревателя с целью выявления причин столь высокой неравномерности температурных полей по сечению фронта теплообменника.

Была разработана математическая модель, описывающая течение газа в каналах подогревателя. Численное решение уравнения Навье-Стокса для сжимаемой среды выполнялось с использованием ЭВМ и специализированного программного обеспечения, позволяю-

В таком аварийном режиме работы также произошло нарушение сплошности пластины блока теплообменника зона δ на рис.4. Однако прогар имел не столь интенсивный характер, как до модификации конуса-рассекателя, а «свищи» были не столь многочисленны. Как видно из рис.4, на поверхности пластины можно выделить три области: первая (а) – область повышенной температурной эрозии поверхности; в этом случае также происходило образование высокотемпературного ядра потока, однако оно имеет не столь сосредоточенный характер, как в случае не модифицированного подогревателя. Вторая (б) – область смещения вторичного воздуха (воздух завесы из контура охлаждения жаровой трубы камеры сгорания) и продуктов сгорания. Избыток кислорода в области б на рис.4 способствует догоранию горючего, содержащегося в продуктах сгорания, однако температура потока не достаточно велика, чтобы происходило обильное коксование поверхности пластины. В третьей,

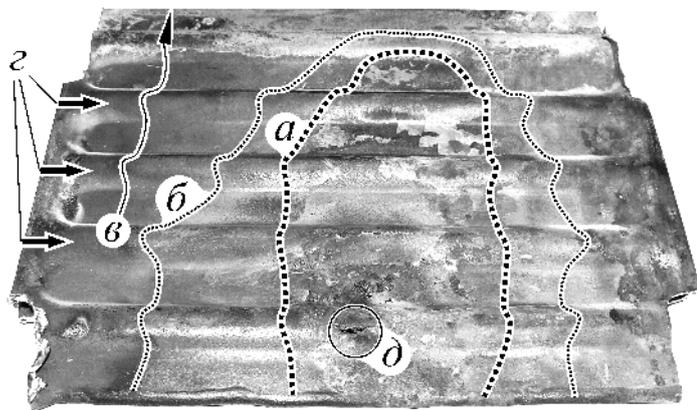


Рис. 4. Пластина блока теплообменника модифицированного подогревателя: а – область высоких температур; б – переходная область; в – направление тока продуктов сгорания; г – направление тока охлаждающей жидкости; д - «свищ» (нарушения сплошности)

шего задать начальные и граничные условия процесса. В общем виде векторная форма записи уравнения Навье-Стокса имеет вид:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f},$$

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0,$$
(1)

где: ∇ - оператор Набла (оператор Гамильтона), это векторный дифференциальный оператор в трёхмерном евклидовом пространстве в прямоугольных декартовых координатах оператор Набла определяется следующим образом:

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k},$$
(2)

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – единичные векторы по осям x, y, z . Используя оператор Набла естественным способом выражаются основные операции векторного анализа: *grad* (градиент), *div* (дивергенция), *rot* (ротор), а также Δ – оператор Лапласа. Оператор Лапласа (оператор Дельта) – дифференциальный оператор, действующий в линейном пространстве гладких функций. Функции F он ставит в соответствие функцию

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \dots + \frac{\partial^2}{\partial x_n^2} \right) \cdot F.$$

Очевидно, что в декартовой системе координат оператор Лапласа удобно выразить в виде скалярного произведения оператора Набла на себя:

$$\Delta = \nabla \cdot \nabla = \nabla^2.$$
(3)

Здесь t – время, ν – коэффициент кинематической вязкости, ρ – плотность, p – давление, $\vec{v} = (v^1, \dots, v^n)$ – векторное поле скоростей, \vec{f} – векторное поле массовых сил.

Неизвестные p и \vec{v} являются функциями времени t и координаты x принадлежащей плоской ($n=2$) или трехмерной ($n=3$) области течения.

Каноническими начальными условиями в таком случае обычно принимают:

$$\vec{v}|_{\partial\Omega} = 0,$$

$$\vec{v}|_{t=0} = \vec{v}_0.$$
(4)

В математической модели были приняты следующие допущения: среда течения – эквивалентный по физическим параметрам идеальный газ, теплообмен со стенками отсутствует, граничные условия – расчетные условия эксплуатации, описанные в ТУ изделия (рассматривается двухмерное течение по средней плоскости канала), уравнение течения сжимаемой вязкой турбулентной среды принималось в следующем виде:

$$\rho \left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_k \frac{\partial v_i}{\partial x_k} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left\{ \mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{i,k} \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \right) \right\} +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\zeta \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \delta_{i,k} \right).$$
(5)

Как видно, система уравнений не включает в себя уравнение теплопроводности, а уравнения состояния определены в начальных условиях. Данное уравнение учитывает как динамическую вязкость (μ - сдвиговая вязкость), так и объемную вязкость (ζ - «вторая вязкость»), что даст более полную и точную картину турбулизации потока. Символ Кронекера $\delta_{i,k} = 0$ для $i \neq k$ и $\delta_{i,k} = 1$ для $i = k$. «Вторая вязкость», или объемная вязкость ζ – внутреннее трение при переносе импульса в направлении движения. Если динамическая (μ) вязкость характеризует деформацию чистого сдвига, то «вторая вязкость» характеризует деформацию объемного сжатия.

Расчет велся, основываясь на классических постулатах газовой динамики, когда скорость на стенке равна нулю. В таком случае переход ламинарного режима в турбулентный определяется значением безразмерного комплекса, называемого числом Рейнольдса:

$$\mathbf{Re} = \frac{w \cdot l}{\nu}, \quad (6)$$

где w – скорость движения жидкости; ν – коэффициент кинематической вязкости; l – характерный размер канала или обтекаемой стенки.

Известны модели процессов течения более сложных типов. Кундт и Варбург открыли явление, названное впоследствии скольжением [1], изменив кинетическую теорию газов, ранее утверждавшую, что молекулы, падающие на поверхность твердого тела, всегда рассеивают свою энергию в тепловом равновесии с поверхностью. Они обнаружили, что вязкость газа начинает убывать с уменьшением давления в газе при постоянной температуре, как только достигается некоторое достаточно низкое давление. Поскольку вязкость, определяемая обычным образом, не зависит от давления, молекулы газа несколько «проскальзывают» на поверхности, т.е. имеют отличную от нуля скорость. Максвелл показал, что эффект скольжения можно включить в кинетическую теорию вязких течений, если допустить, что доля площади f поверхности адсорбирует все падающие молекулы и затем десорбирует их в тепловом равновесии с твердым телом, в то время как доля $1 - f$ рассеивает все падающие молекулы зеркально. При зеркальном отражении молекул не происходит никакого обмена энергией, и гипотеза Максвелла означает некий аналог скольжения, т. е. разрыв температуры на границе раздела между газом и твердым телом, имеющих различную температуру. Простейший эксперимент Смолуховского подтвердил существования такого температурного скачка или разрыва [1]. Следовательно, молекулы газа в среднем должны испытывать несколько столкновений с твердой поверхностью, чтобы достичь теплового равновесия с ней. Сегодня уже понятно, что как температурный скачок, так и скольжение имеют место при всех плотностях газа, но лишь при достаточно малой плотности они оказывают заметное влияние на объемное состояние газа. Эти эффекты становятся наиболее ощутимыми в условиях, когда природа процессов переноса теплоты определяется больше столкновениями молекул с поверхностью, чем межмолекулярными столкновениями. Таким образом, при течении газа около твердой поверхности можно наблюдать эффекты, которые объединяются под общим названием явлений «скольжения» и «скачка». Причина возникновения этих эффектов заключается в том, что с увеличением разреженности некоторые средние свойства газа на поверхности начинают отличаться от нуля средней тангенциальной скорости и температуры газа на поверхности от температуры самой поверхности. На поверхности средняя тангенциальная скорость и температура газа могут совершить «скачок» почти разрывным образом. Связь вязкости с тангенциальными скоростями на поверхности, является эмпирической, поскольку не учитывает истинное количество

атомов или молекул, которые адсорбируются на поверхности и при этом дают эффект «скольжения» и зеркально отраженных, не дающих вклада в этот эффект. Поэтому, для определения более точной связи между газом и твердой поверхностью, необходимо данный эффект перевести в количественную меру – построение тепловой модели, исследование геометрии потока т. д.

При обтекании конвективной части подогревателя потоком газа вблизи теплорассеивающей поверхности образуется тонкий слой, поведение которого определяет газодинамическое сопротивление [1,2].

При отрыве пограничного слоя от поверхности обтекаемого тела происходит резкое увеличение газодинамического сопротивления. Для уменьшения сопротивления необходимо затянуть отрыв, т.е. сместить линию отрыва пограничного слоя как можно дальше назад к задней критической точке. Этим сужается область застойного течения за телом (след за телом) что, как следствие, позволяет уменьшить газодинамическое сопротивление. Простейший пограничный слой образуется при обтекании твердой плоской стенки продольным потоком газа с малой плотностью. Вязкая неустойчивость играет важную роль во взаимодействии газа с поверхностью, в частности, абсорбции и рассеивании.

Молекулы газа, попадая на твердую поверхность, не рассеиваются, а проскальзывают на поверхности (т. е. имеют отличную от нуля среднюю скорость) [3]. Кроме того, эффект скольжения можно включить в кинетическую модель вязкого течения. Доля поверхности f адсорбирует все падающие молекулы и затем десорбирует их в тепловом равновесии с твердым телом, в то время как доля $1-f$ рассеивает все падающие молекулы зеркально.

Кроме молекулярной теплопроводности в пограничном слое необходимо учитывать, что перенос теплоты происходит за счет химических реакций, при рекомбинации. Одним из важных критериев является число Льюиса-Семенова. Физический смысл этого критерия – отношение интенсивности теплопередачи при массообмене в результате диффузии к интенсивности теплообмена путем теплопроводности [4]. В общем случае число Льюиса-Семенова больше единицы, а следовательно, теплопроводность менее интенсивна, чем передача теплоты диффузией. В практических случаях необходимо стремиться к гипотетическому равновесному пограничному слою, когда число Льюиса-Семенова стремится к единице, который характеризуется большой скоростью рекомбинации, поэтому в каждой точке пограничного слоя устанавливается термодинамическое равновесие. Это можно достичь за счет геометрии составных частей системы подогрева.

Расчет теплопередачи необходим в определении местного удельного теплового потока, а также полной теплопередачи в обтекаемой поверхности конвективной части за некоторый промежуток времени. Такой расчет позволяет правильно составить модель течения в конвективной части подогревателя, обеспечивающий предохранение поверхности от перегрева, а также дает возможность определить участки, где достигаются чрезмерные тепловые напряжения и возможно разрушение поверхности.

Тепловой поток от разогретого газа к обтекаемой стенке можно представить как конвективную теплоотдачу, определяемую согласно закону Ньютона-Рихмана, тепловой поток Q от стенки к жидкости пропорционален поверхности теплообмена f_c и разности температур между температурой твердой стенки t_c и температурой жидкости $t_{ж}$:

$$Q = \alpha_{ж-с} \cdot f_c \cdot (t_c - t_{ж}), \quad (4)$$

где $\alpha_{ж-с}$ – коэффициент теплоотдачи.

Основная задача при аэродинамическом теплообмене сводится к определению коэффициента теплопередачи $\alpha_{ж-с}$, который зависит от ряда факторов: скорости газа, формы, размера, положения (угла атаки) обтекаемого тела, структуры пограничного слоя (ламинарного и турбулентного), физических параметров среды (теплопроводности, вязкости, теплоемкости).

Термодинамическое равновесие напрямую связано с коэффициентом теплопередачи, которая зависит от величины коэффициента сопротивления. В изогнутых трубах вследствие искривления потока появляются центробежные силы, направленные от центра к внешней стенке трубы. Вследствие чего повышается давление у внешней стенки и понижение у внутренней при переходе потока из прямолинейного участка в изогнутый. Переход потока из изогнутой части в прямолинейную (после поворота) сопровождается обратными явлениями: диффузорным эффектом вблизи внутренней стенки и кондиффузионным вблизи внешней. Диффузорные явления приводят к отрыву потока от обеих стенок. При этом отрыв от внутренней стенки усиливается стремлением потока газа двигаться по инерции в изогнутом участке по направлению к внешней стенке. Образованная вследствие отрыва от внутренней стенки вихревая зона распространяется далеко вперед и в ширину, при этом происходит сокращение сечения основного потока. При такой геометрии трубы создается наибольшее сопротивление. При угле поворота трубы на 90^0 область отрыва потока от стенки за поворотом достигает $1/2$ диаметра трубы. Поэтому при проектировании выхлопных трактов является необходимым скруглять внешние и внутренние стенки и не оставлять острых кромок, так как из-за них уменьшается площадь поперечного сечения потока в месте поворота и при этом увеличиваются диффузорные потери, возникающие при переходе от колена к прямолинейному участку трубы.

Отсюда очевидно, что две составляющие – коэффициент теплопередачи и коэффициент сопротивления, играют существенную роль, влияющую на теплопроводность в потоке газа, обтекающего поверхности теплообменника. Большую роль в исследованиях вязкой неустойчивости играет закон взаимодействия газа со стенкой, в частности адсорбции и рассеивания, и определение связи вязкости газа со свойствами стенки.

Построение схемы движения продуктов сгорания в штатной системе предпускового подогрева боевой машины с учетом особенностей конструкции моторного маслобака и участков трассы, выполненное по результатам расчета, представлено на рис.5.

Как и предполагалось, присутствует высокотемпературная область a , окружающая зону обратных токов b , вытянутая и проходящая через решетку блока теплообменника (пунктирный контур), что полностью согласуется с результатами эксперимента и подтверждается зонами температурной эрозии и коксования (a и b рис.4). На рисунке 5 также представлены линии тока продуктов сгорания по тракту системы подогрева, что дает представление об общем характере течения. Стоит отметить наличие отсоединенных вихревых зон c на рис.5. Ядра таких зон имеют повышенную температуру за счет лучистого теплообмена и незначительного массообмена с основным потоком; как следствие на примыкающих поверхностях будет наблюдаться коксование и повышенные значения температуры.

Четко выделены зоны повышенной турбулентности потока (темные цвета эюпы). Наибольшая турбулизация потока имеет место при встрече радиально сходящихся потоков от конуса-рассекателя (область b на рис.5); число Рейнольдса здесь достигает 9000, что свидетельствует о высоком уровне теплообмена с пластинами блока теплообменника расположенными в этой области. Так как высокотурбулентная область b расположена в зоне высокотемпературного объема a на рис.5, температура в котором может достигать 800°C , это полностью объясняет образование «свищей» d (см. рис.4) на пластинах, расположенных в указанном объеме, так как конструкционный материал

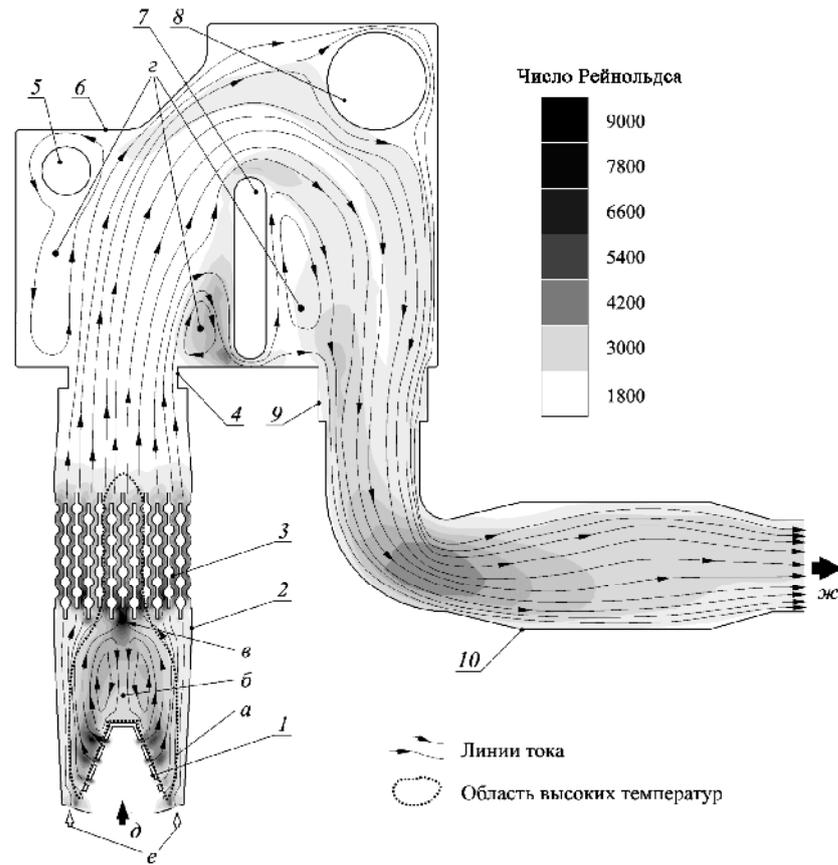


Рис. 5. Движение продуктов сгорания от выхода из камеры сгорания подогревателя до выхлопного фланца на борту боевой машины. Линии тока совмещены с полями уровня турбулизации потока: 1 – рассекающий конус камеры сгорания; 2 – входной кожух теплообменника; 3 – водотрубный теплообменник пластинчатого типа; 4 – фланец соединения подогревателя с жаровой трубой моторного маслобака; 5 – полость сливного устройства; 6 – корпус жаровой трубы маслобака; 7 – полость заборного устройства; 8 – полость устройства фильтрации; 9 – фланец соединения жаровой трубы маслобака с выпускной жаровой трубой; 10 – выпускная жаровая труба системы подогрева; а – наложение контура области высоких температур; б – зона обратных токов (ЗОТ); в – область максимальной турбулизации потока; г – вихревые зоны; д – вход продуктов сгорания из камеры сгорания подогревателя; е – вход вторичного воздуха на завесу; жс – выход выхлопных газов в атмосферу

пластин находится в критических условиях обеспечения прочности. Очевидно, что модификация конуса рассекателя 1 на рис.5 заглушкой не решила проблему влияния неравномерности тепловых нагрузок на конструкцию теплообменника в его поперечном сечении в достаточной мере, хотя и снизила их.

Также необходимо отметить возникновение повышенной турбулентности в колене поворота на 90° выпускной жаровой трубы 10 на рис.5. Совершенно ясно, что такая аномалия вызовет за собой срывное течение и приведет к зажатию основного потока выпускных газов.

Выводы. При повышенных температурах охлаждающей жидкости в подогревателе при его работе, либо при разгерметизации создаются условия, приводящие к срыву режима нормальной работы теплообменника и его поломке. Для анализа данных процессов была разработана математическая модель, описывающая тепловые процессы, происходящие в камере сгорания и приводящие к выходу из строя конвективной части подогревателя. Были выявлены теплонапряженные места штатной камеры сгорания и выпускной трассы.

С учетом произведенных расчетов, было принято решение о необходимости доработки конструкции теплообменника и каналов выхлопа отработанных газов. Исследования показывают, что конструктивные изменения геометрии выхлопа позволяют уменьшить чрезмерные тепловые напряжения и исключить разрушение конвективной поверхности теплообменника, однако геометрия проточной части потребует дополнительных изменений для уменьшения турбулизации потока в высокотемпературных зонах.

Рекомендацией по дальнейшему решению проблемы надежной работы подогревателя является использование более качественных материалов конвективной части и уменьшение размеров застойных зон движения выпускных газов.

Литература: 1. Гудман Ф. Динамика рассеяния газа поверхностью/ Ф. Гудман, Г. Вахман – М.: Мир, 1980. – 423с. 2. Пшеничников В.М. К расчету углового распределения неупруго рассеянных атомов газа на поверхности твердого тела / В.М. Пшеничников, Э.Е. Сон / Поверхность. Физика. Химия. Механика – М.: Механика, 1984. – №3. – 36с. 3. Пшеничников В.М. Обтекание каталитической поверхности разреженным газом с учетом влияния ее кристаллической структуры/ В.А. Лукин, В.М. Пшеничников – Ташкент: Механика, 1986. – 93с. 4. Краснов Н.Ф. Основы прикладной аэрогазодинамики. Кн. 2: Обтекание тел вязкой жидкостью. Рuledы устройства / под ред. Н.Ф. Краснова – М.: Высшая школа, 1991. – 358с.

Bibliography (transliterated): 1. Gudman F. Dinamika rassejanija gaza poverhnost'ju / F. Gudman, G. Vahman – M.: Mir, 1980. – 423s. 2. Pshenichnikov V.M. K raschetu uglovogo raspredelenija neuprugogo rassejannyh atomov gaza na poverhnosti tverdogo tela / V.M. Pshenichnikov, Je.E. Son / Poverhnost'. Fizika. Himija. Mehanika – M.: Mehanika, 1984. – №3. – 36s. 3. Pshenichnikov V.M. Obtekanie katalicheskoj poverhnosti razrezhennym gazom s uchetom vlijanija ee kristallicheskoj struktury / V.A. Lukin, V.M. Pshenichnikov – Tashkent: Mehanika, 1986. – 93s. 4. Krasnov N.F. Osnovy prikladnoj ajerogazodinamiki. Kn. 2: Obtekanie tel vjazkoj zhidkost'ju. Rulevye ustrojstva / pod red. N.F. Krasnova – M.: Vysshaja shkola, 1991. – 358s.

Возгрін Ю.В., Ковальов М.С., Крот С.Г., Кузьминский В.А.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ТЕПЛООБМІНУ КОТЛА ПІДГРІВАЧА І ТРАКТУ ВИХЛОПУ (СИСТЕМИ ПЕРЕДПУСКОВОГО ПІДГРІВУ ДВИГУНА)

В статті проведено дослідження теплових та газодинамічних процесів, що відбуваються в конвективній частині котла підгрівача та призводять до його виходу з ладу. Проведено випробування модифікованого зразка підгрівача. Розроблена математична модель процесу, на основі якої виявлені причини формування теплових неоднорідностей конструкції. Було дано рекомендації щодо зміни конструкції.

Vozgrin Yu.V., Kovalev M.S., Krot S.G., Kuzminsky V.A.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА ПОДОГРЕВАТЕЛЯ И ТРАКТА ВЫПУСКА (СИСТЕМЫ ПРЕДПУСКОВОГО ПОДОГРЕВА ДВИГАТЕЛЯ)

В статье проведено исследование тепловых и газодинамических процессов, которые происходят в конвективной части котла подогревателя и приводят к его выходу из строя. Разработана математическая модель процесса, на основе которой установлены причины формирования тепловых неоднородностей конструкции. Даны рекомендации по изменению конструкции.

Vozgrin Yu.V., Kovalev M.S., Krot S.G., Kuzminsky V.A.

INVESTIGATION OF THE PROCESS HEAT BOILER HEATER AND EXHAUST TRACT (PREHEATING OF THE ENGINE)

In this paper a study of thermal and dynamic processes that occur in the convective heating of the boiler and lead to its exit from the standing position. The tests of the modified sample heater. A mathematical model of the process on which the reasons of the formation of thermal irregularities of construction. Recommendations were made regarding changes in the structure.