

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛООБМЕНА В СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ВАРЬИРОВАНИИ ВХОДНЫХ ВЕЛИЧИН В ШИРОКОМ РАБОЧЕМ ДИАПАЗОНЕ МЕТОДАМИ КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Актуальность темы. За последнее десятилетие в ГП «ХКБМ» им. А.А. Морозова были спроектированы и изготовлены опытные образцы колесных бронетранспортеров (БТР), оснащенные современными системами вооружения отечественного производства, а также двигателями и автоматическими коробками передач (АП) как зарубежного, так и украинского изготовления. При проведении конструкторских разработок силовых установок БТР особое внимание уделялось возможности выполнения ими боевых задач в условиях жаркого климата, характерного для государств – потенциальных заказчиков, в особенности при температурах окружающего воздуха до + 55°С в тени.

Для реализации поставленной цели конструировались системы охлаждения (СО) двух типов: традиционные для ГП «ХКБМ» эжекционные системы охлаждения, примененные на БТР-60М, БТР-70М, БТР-3Е, БТР-4Е и обеспечивающие охлаждение радиаторов эжектированием окружающего воздуха за счет использования энергии выпускных газов двигателя на выходе из сопел ресивера; и вентиляторные системы охлаждения, в которых радиаторы охлаждаются потоком воздуха, создаваемым вентиляторами (на БТР-3ДА, БТР-3Е1, БТР-4А, БТР-4В и БТР-4Е-2). Но если в конкретных приведенных эжекционных системах охлаждения радиаторы охлаждаются воздухом из атмосферы, а моторно-трансмиссионная установка (МТУ) отделена от проникновения воздушных потоков, проходящих через радиаторы, то в разработанных вентиляторных системах охлаждения потоки воздуха проходят через моторно-трансмиссионное отделение (МТО), при этом существует два вида конструктива, имеющих преимущества и недостатки.

В первом варианте вентиляторы засасывают холодный атмосферный воздух в радиаторы, после них он нагревается, обдувает МТУ и выбрасывается через выходные жалюзи (БТР-4А, БТР-4В и БТР-4Е-2). Положительный момент – радиаторы охлаждаются воздухом из атмосферы, отрицательный – значительный нагрев воздуха внутри МТО, что снижает работоспособность расположенных там гидравлических систем и увеличивает температуру в обитаемых отделениях, создавая некомфортные условия для членов экипажа.

Во втором варианте вентиляторы забирают уже подогретый двигателем и силовыми агрегатами воздух из отсека МТУ и направляют его в радиаторы системы охлаждения, после чего он выходит наружу (БТР-3ДА и БТР-3Е1). При этом положительным является то, что, двигатель, трансмиссия, топливные и масляные баки, гидравлические системы, расположенные в МТО, не нагреваются дополнительно горячим воздухом и сохраняются комфортные условия для экипажа, а отрицательным – снижается эффективность системы охлаждения, т.к. на вход в радиаторы поступает уже подогретый в МТО воздух.

Цель статьи. Оценка применяемых в настоящее время конструкций МТО в плане определения оптимальной схемы компоновки вентиляторной системы охлаждения для её работы с большей эффективностью при одинаковых энергозатратах, что в дальнейшем необходимо для проектирования перспективных БТР.

© Ю.В. Возгрин, 2017

Основная часть. В данной статье проанализируем существующие конструкции с помощью использования методов конечноэлементного моделирования физических процессов, в частности, процессов теплообмена в системе охлаждения современных образцов военной техники отечественного производства БТР-4А, БТР-4В и БТР-4Е-2. На основании данного анализа можно также оценить эффективность функционирования наиболее перспективной схемы компоновки вентиляторной системы охлаждения, когда по отдельному воздуховоду атмосферный воздух с помощью вентиляторов просасывается через радиаторы и выбрасывается обратно в атмосферу, не попадая в отсек МТУ. Такое моделирование позволит правильно оценить и выбрать систему охлаждения двигателя.

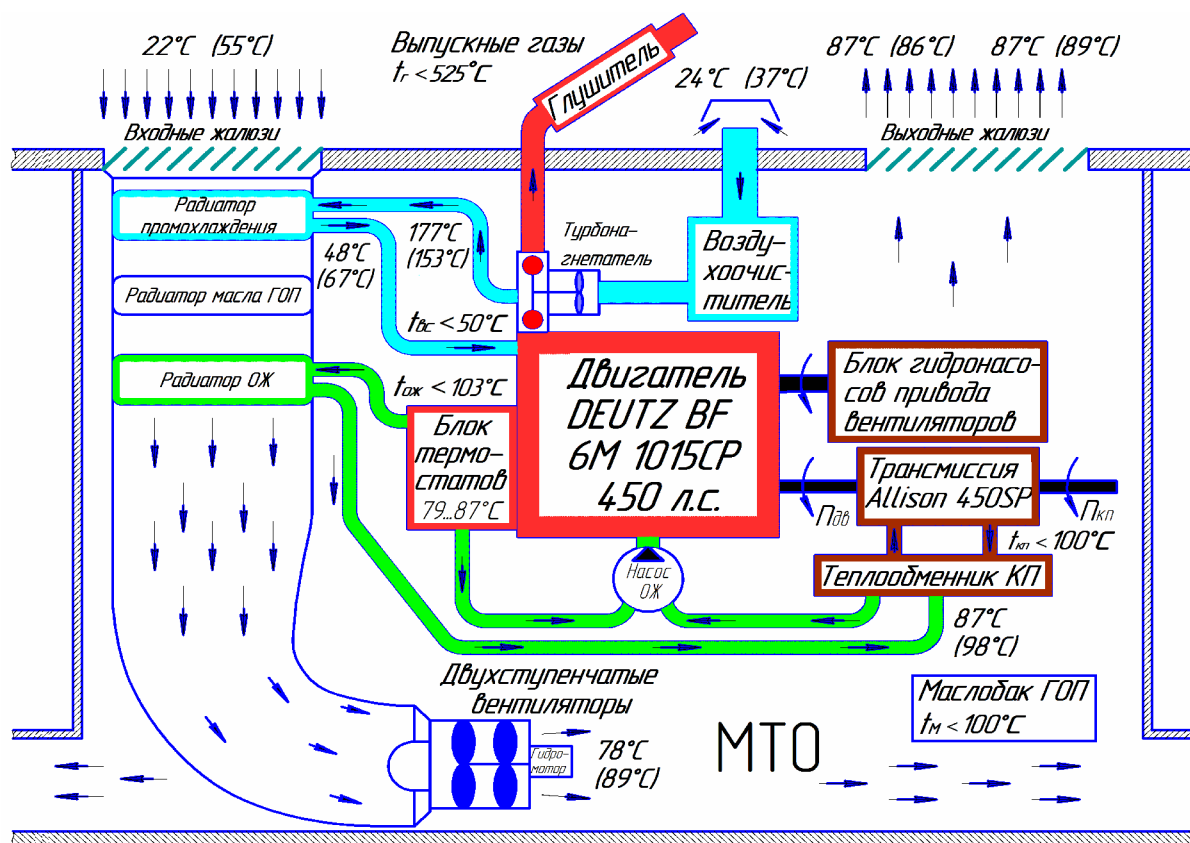


Рис. 1. Принципиальная схема вентиляторной системы охлаждения БТР-4В, систем воздухопитания и газоудаления силовой установки с двигателем DEUTZ (в скобках приведены значения температур воздуха и охлаждающей жидкости при подаче на радиаторы нагретого до +55°C воздуха)

На рис. 1 в качестве примера конструкция, при которой холодный воздух из атмосферы просасывается вентиляторами через радиаторы и поступает уже нагретым в МТО, приведена упрощенная принципиальная схема вентиляторной системы охлаждения БТР-4В. На данной схеме стрелками показано движение потоков воздуха и охлаждающей жидкости (ОЖ), а также приведены значения их температур, полученные при испытаниях. Так, например, при температуре воздуха на входе в радиаторы 22°C на выходе из вентиляторов (после радиаторов) он поступает в МТО нагретым до 78°C, после чего нагревается ещё и на выходе из отсека его температура уже составляет 87°C.

При температуре окружающего воздуха 55°C из вентиляторов в МТО поступает воздух, нагретый уже до 89°C (значения в скобках), а на выходе из выходных жалюзи его температура составляет 86...89°C. Таким образом, нагрев воздуха внутри МТО БТР-4В до температуры 80...90°C отрицательно влияет на работу гидравлических сис-

тем, а в случае негерметичности МТО создают не комфортные условия работы членам экипажа.

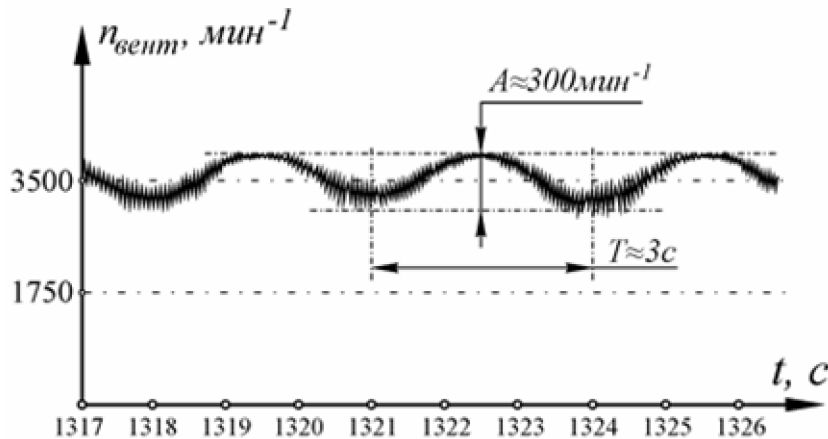


Рис. 2. Характеристика колебаний значения скорости вращения ротора вентилятора типовой системы охлаждения

Исходя из экспериментальных данных, при обдуве вентиляторами поверхности радиаторов турбулентный поток воздуха имеет волновой пульсационный характер (см. рис. 2). Поэтому при испытаниях различных конструкций кожуха, по которому движется воздушный турбулентный поток, пульсации скорости сосредотачивались в одном направлении. Имея экспериментальные данные по пульсационным характеристикам турбулентного потока, можно смоделировать движение воздуха в каждой точке области течения от выхода с вентилятора до фронтальной поверхности радиатора, если вентилятор работает на обдув, и наоборот, при работе на всасывание – от фронтальной поверхности до входа в вентилятор [1].

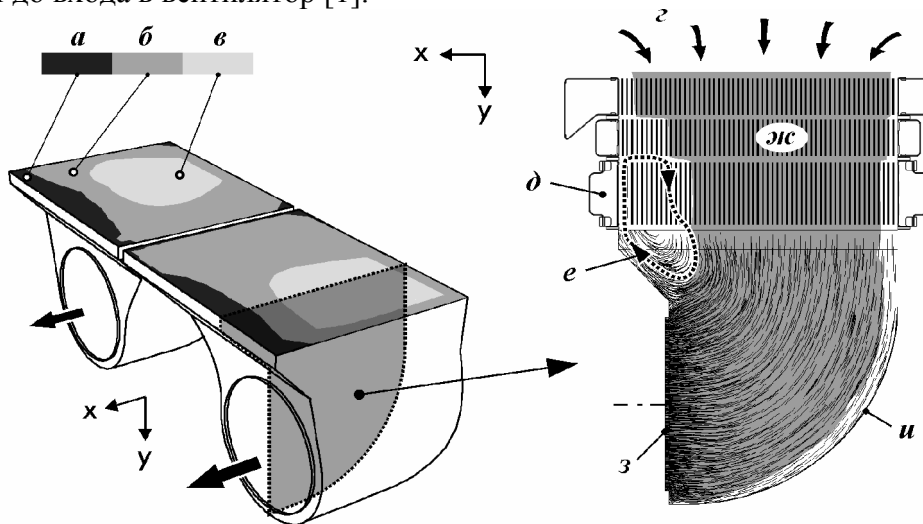


Рис. 3. Схема движения потока охлаждающего воздуха в системе охлаждения бронетранспортера БТР-4В на участке от входа до вентиляторного блока

Атмосферный воздух $г$ просасывается через блок радиаторов $д$ под действием разрежения, создаваемого вентилятором, установленным на фланец $з$ за блоком радиаторов, и спрямляется кожухом перед входом в вентилятор; таким образом производится обдув радиаторов (см. рис. 3).

Расчет показал, что распределение поля скоростей, как и ожидалось, носит далеко не равномерный характер. Воздушный поток имеет ядро \mathbf{v} (см. рис. 3), скорость течения в котором превышает расчетную, что связано с пониженной средней скоростью течения в зоне \mathbf{b} при постоянном исходном расходе атмосферного воздуха [1]. Также неизбежно присутствует застойная зона \mathbf{a} , состоящая из присоединённых вихрей [3], например, вихрь \mathbf{e} . Очевидно, что такая картина достаточно отличается от расчетной, при которой поле скоростей по сечению сердцевины радиатора имеет равномерное распределение, а сужения реального эквивалентного диаметра течения не учитывается. Очевидно введение коэффициента, учитывающего снижение коэффициента теплоотдачи при неполном отмывании теплоотдающих поверхностей радиатора δ , как это и предлагается в [2, 3].

Как видно из экспериментальных данных, появляются образования групп в переходных и турбулентных режимах течения, что приводит к новой кинетической теории по обобщению определения энтропии для неравномерных и неоднородных потоков. Это обобщение показывает, что при образовании в потоке газа групп молекул энтропия увеличивается, а это свидетельствует о более вероятном состоянии газа с турбулентными молями.

Исходя из этого анализа, необходима теория для построения турбулентности в более строгом приближении, рассматривая ламинарные течения стабилизированными и выявляя ряд других явлений.

При построении модели турбулентности необходимо гидродинамические характеристики турбулентного течения усреднять параметрами потока, учитывая, что в ламинарном потоке процесс выравнивая полей скорости u , температуры T , плотности потока ρ осуществляется за счет хаотического движения молекул со средней скоростью $u_{\text{сред}}$ и средней длиной пробега λ .

При турбулентном обтекании в процессе выравнивания параметров потока участвуют не только отдельные молекулы, а целые группы молекул – моли, которые имеют одинаковые скорости и температуры, после чего смешиваются с основным потоком, изменяя при этом скорость.

Появление молекул молей в переходных и турбулентных потоках подтверждено в работах Филиппова [4].

Кроме того, исходя из принципов механики и теории вероятности, в работах Струминского [5, 6] показано, что при больших числах Рейнольдса появляются устойчивые группы молекул.

Если посмотреть на рис. 2, то видно, что неустойчивая область $c_i > 0$, а также, что две соседние амплитуды имеют противоположные направления скорости пульсаций u , образуя группы с противоположными направлениями скоростей потока. В таких потоках процесс перемешивания будет протекать гораздо интенсивнее, чем при ламинарных режимов течения. Поэтому при определении границ устойчивости ламинарных режимов течения, где малые значения числах Рейнольдса, необходимо определять начало пульсаций турбулентности, где происходит появление устойчивой группы молекул.

В работе Струминского [5], показано, что групповые функции удовлетворяют системе кинетических уравнений:

$$\frac{df_s}{dt} = \sum_{\tau=1}^M \iiint (f_s' - f_{\tau}' - f_s f_{\tau}) g_{\rho\tau} bdbd \quad d\epsilon \quad dU_{\tau}, \quad (1)$$

где M – число групп в системе; f_s – функция распределения групп молекул системы, f_{τ} – функция распределения напряжения трения турбулентного потока системы, $g_{\rho\tau}$ – функция восстановления системы, зависящая от плотности и напряжения трения;

$b d$ – зоны ограничения системы, dU_τ – дифференциал пульсирующей скорости турбулентных напряжений, $d\epsilon$ – суммарная турбулентность потока системы.

Решение этой системы методом Струминского привело к системе гидродинамических уравнений, отличных от уравнений Навье-Стокса [6].

В связи с этим, при обобщении кинетической теории в силу значительных неоднородных неравновесных процессов вызванных пульсациями температурного потока, скачка уплотнения с пограничным слоем, разгонного движения в потоке, где присутствует достаточно большое количество групп молекул, энергия может меняться с изменением режимов течения. Эта кинетическая теория имеет большие возможности в аналитической форме решить задачи изменения структуры по движению турбулентного потока методом моделирования, применяя экспериментальные значения коэффициента теплоотдачи стенки, и дает возможность изучать тепловые процессы не только на всей поверхности обтекаемого тела, но и на исследующей части.

В любом равновесном изотермическом процессе с нулевой работой энергия расходуется на увеличение энтропии системы и выделяется при уменьшении энтропии. Данные состояния являются числом возможных микросостояний (способов), с помощью которых можно составить общее макроскопическое состояние. Этот постулат, названный Альбертом Эйнштейном принципом Больцмана, положил начало статистической механике, которая описывает термодинамические системы, используя статистическое поведение составляющих их компонентов. Принцип Больцмана связывает микроскопические свойства системы с одним из её термодинамических свойств. Согласно определению, энтропия является функцией состояния, то есть не зависит от способа достижения его, а определяется параметрами этого состояния.

С появлением групп в переходной области в системе изменяется энтропия и изменяется во времени. Рассмотрим группы, по теории Больцмана,

$$S_s = -kH_s, \quad (2)$$

где S_s – энтропия системы, k – постоянная Больцмана, H_s – функция распределения, введенная Больцманом.

$$H = \iiint f_1 \ln f_1 dV \quad (3)$$

Дифференцируем уравнение (2) по времени и получаем:

$$\frac{\partial S_s}{\partial t} = -k \iiint 1 + \ln F_s \frac{\partial F_s}{\partial t} dV_s, \quad (4)$$

или

$$\frac{\partial S_s}{\partial t} = -k \sum_{\tau=1}^M \iiint 1 + \ln F_s J(F_s F_\tau) dV_s, \quad (5)$$

где

$J(F_s F_\tau)$ – функция распределения турбулентного потока, проходящего через область V_s поверхности в единицу времени.

Выполняя интегрирование по области V_S определяем состояние всего вещества, заключенного в данном объеме при этом учитывая, что:

- область V_S параллельна оси Oz и не лежит на границе области S ;
- вся область V_S проектируется на Oxy области S ;
- всякая часть области V_S параллельна любой из плоскостей (Oxy , Oxz , Oyz).

$$\frac{\partial S_S}{\partial t} = \frac{8k}{m} \sum_{\tau=1}^M \frac{\rho_{\tau} \rho_s \Omega_{s\tau}^{1,1}}{T_s} \left[(T_{\tau} - T_s) + \frac{2mT_s}{T_{\tau} + T_s} (u_{\tau} - u_s)^2 \right], \quad (6)$$

где $\Omega_{s\tau}^{1,1}$ – параметр микросостояний коэффициента трения турбулентного пограничного слоя; m – постоянная пограничного слоя.

Из полученного выражения (6) видно, что энтропия групп молекул возрастает, и к этому приводит квадратичный член пульсации скоростей $(u_{\tau} - u_s)^2$, линейный член $(T_{\tau} - T_s)$ при $T_{\tau} > T_s$ энтропия $\partial S_S / \partial t > 0$, группы молекул положительные и охлаждают область S ; а при $T_{\tau} < T_s$ энтропия $\partial S_S / \partial t < 0$, группы молекул отрицательные и нагревают область S .

Данное выражение описывает внутреннюю энтропию, скорость изменение внешней энтропии и температуру обменивающейся между собой энергией групп молекул с разными входящими в систему и исходящими параметрами как правило отличающихся друг от друга.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что образование молекулярных групп в турбулентном потоке приводит к увеличению его энтропии, и характеризует структуру системы, как способную к появлению более вероятных состояний.

Энтропию можно определить с помощью двух эквивалентных подходов – статистического и термодинамического. Статистическое определение основано на идее о том, что необратимые процессы в термодинамике вызваны переходом в более вероятное состояние, поэтому энтропию можно связать с вероятностью событий.

При росте энтропии имеет место явление, когда энтропия системы изменяется за счёт поступления теплоты при нагревании. В этом случае система всё более удаляется от прежнего состояния равновесия. Это видно из выражения (6) для статистического определения энтропии, когда рост энтропии сопровождается увеличением термодинамической вероятности макроскопического состояния системы. Однако при наличии значительной энергии полей в выражение (6) следует вводить поправки для энтропии полей. В настоящий момент экспериментальным исследованиям, подтверждённым результатами расчета, следует уделять большое внимание, и это приобретает ясное научное объяснение.

В то же время, составляя новые гидродинамические уравнения, можно с большой точностью предсказать начало появления неустойчивости системы, связанное с огромным числом групп молекул, некоторые из которых отклоняются от равномерного распределения. Параметры состояния не остаются строго постоянными, а испытывают большие колебания внутри своих равновесных состояний.

Поэтому мы можем подчеркнуть, что в рамках теории при учете появления групп молекул и различных возмущений в системе, создаваемых ими внутри пограничного слоя (как видно на рисунках 3 и 5), небольшие уступы приводит к дополнительным изменениям функции переменных, в которую входят большое количество допол-

нительных компонентов, создающих дополнительные возмущения в самой системе, что приводит к увеличению критического числа Рейнольдса.

Как видно, в неустойчивой области, где появляются группы молекул турбулентного режима течения, можно вычислить с помощью формул кинематику всей системы.

В плане улучшения конструктива компоновки МТО, направленного на изменение направления потоков воздуха внутри отсека, рассмотрим принципиальную схему усовершенствованной вентиляторной системы охлаждения БТР-4В, приведенную на рис.4. В данном случае атмосферный воздух, имеющий например, температуру 36°C , поступает в МТО, где в результате существующих тепловыделений двигателя, элементов трансмиссии и других работающих агрегатов происходит его нагрев до 52°C . С такой температурой воздух нагнетается вентиляторами в радиаторы системы охлаждения и выходит из них в атмосферу нагретым до температуры $93\dots 98^{\circ}\text{C}$. В данном случае поступающий в МТО воздух способствует охлаждению наружных поверхностей работающих агрегатов МТО, но на вход в радиаторы он поступает уже нагретым с температурой на 16°C большей по сравнению с его температурой на входных жалюзи, что в общем снижает эффективность функционирования системы охлаждения при данной компоновке МТО. Следует отметить, что приведенные на рис. 4 значения температур были получены в ходе теплотехнических испытаний силовой установки БТР-4А с двигателем IVECO Cursor 10C10ENTC мощностью 430 л.с. с аналогичной компоновкой МТО и с вентиляторами той же производительности.

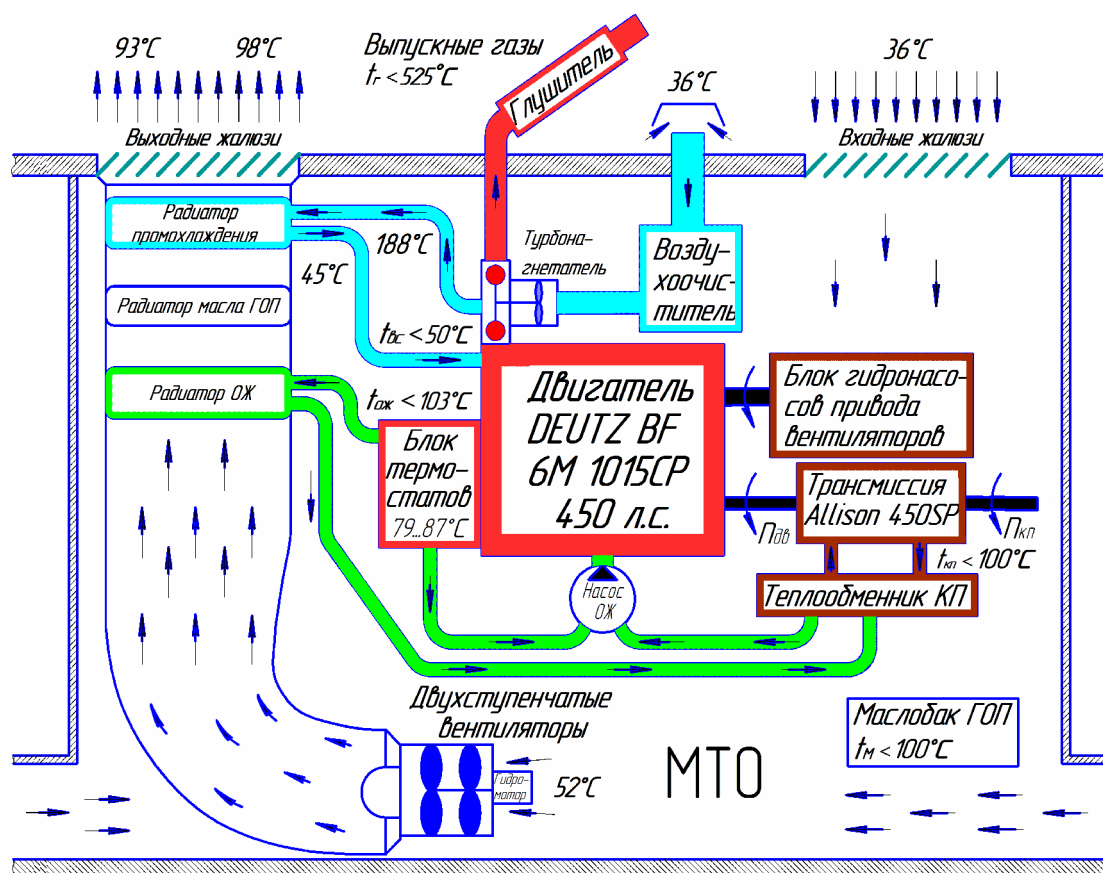


Рис. 4. Принципиальная схема усовершенствованной вентиляторной системы охлаждения БТР-4В и систем воздухопитания и газоотведения силовой установки с двигателем DEUTZ

Выводы: Рассмотренные два существующих варианта компоновки МТО с вентиляторной системой охлаждения силовой установки БТР не являются достаточно приемлемыми для обеспечения всех требований, предъявляемых к температурным условиям размещения гидросистем, других узлов и агрегатов внутри МТО, эффективности функционирования системы охлаждения силовой установки и обитаемости отделений. Проведенный анализ результатов измерений позволяет утверждать, что наиболее перспективен в плане минимизации существующих проблем рассмотренных компоновок МТО третий вариант – когда вентиляторный отсек с радиаторами герметичен и отделен от объема МТО, то есть воздух забирается вентиляторами из атмосферы, охлаждает радиаторы и нагретый выбрасывается снова в атмосферу, а вентиляция МТО обеспечивается другими устройствами.

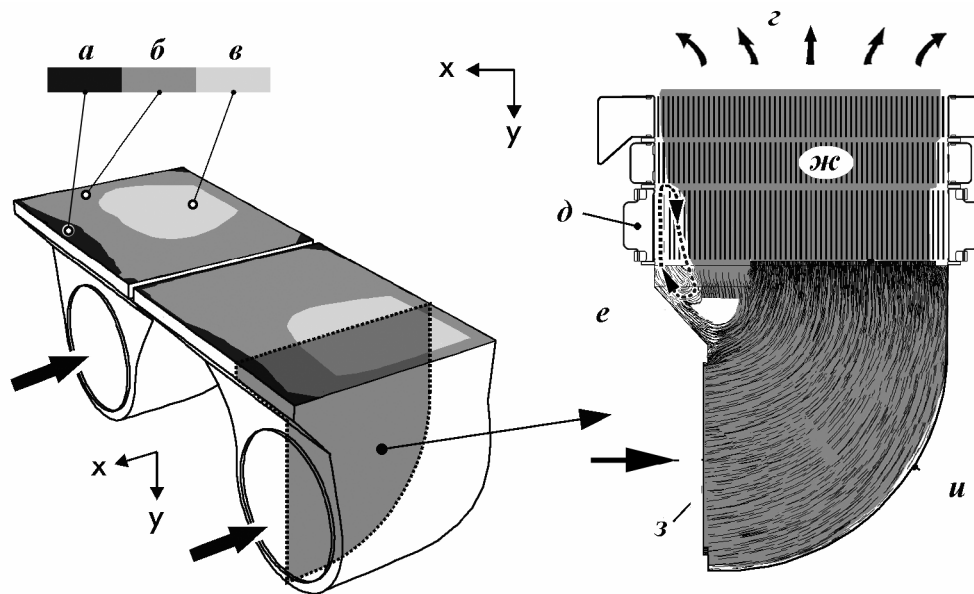


Рис. 5. Схема движения потока охлаждающего воздуха в усовершенствованной вентиляторной системе охлаждения бронетранспортера БТР-4В на участке от входа до вентиляторного блока

При расчетной оценке данного варианта компоновки МТО с вентиляторной системой охлаждения силовой установки однозначно созданная математическая модель тепловых потоков позволит с достаточной точностью определить эффективность предлагаемых мероприятий.

Литература: 1. Возгрин Ю.В., Ковалев М.С., Кузьминский В.А., Лазурко А.В., Мормило Я.М. «Комплексное исследование зависимости эффективности теплообмена в системе охлаждения от варьирования входных величин в широком рабочем диапазоне методами конечноэлементного моделирования» *Научно – техничний журнал «МЕХАНІКА ТА МАШИНОБУДУВАННЯ»*, №1, 2015, стор. 13-24. 2. Калинин Э.К. Интенсификация теплообмена в каналах / Э.К. Калинин, Г.А. Дрейцер, С. А. Ярко. – М.: Машиностроение, 1990. – 208с. 3. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг. – М.: Наука, 1969. -411с. 4. Филипов Б.В., Струминский В.В. Экспериментальные исследования возникновения и раз-

вития турбулентности в трубах / Турбулентные течения. М.: Наука, 1970.
5. Струминский В.В. Кинетическая теория турбулентности: Предпр. СМНС АН СССР. М., 64с. 6. Струминский В.В. Кинетическая теория турбулентных течений / Проблемы турбулентных течений. М.:1987.с.14-32.

Bibliography (transliterated): 1. Vozgrin YU.V., Kovalev M.S., Kuz'minskij V.A., Lazurko A.V., Mormilo YA.M. «Kompleksnoe issledovanie zavisimosti ehffektivnosti teploobmena v sisteme ohlazhdeniya ot var'irovaniya vhodnyh velichin v shirokom rabochem diapazone metodami konechnoelementnogo modelirovaniya» *Naukovo – tekhnichnij zhurnal «МЕХАНИКА ТА МАШИНОБУДУВАННЯ»*, №1, 2015, stor. 13-24. 2. Kalinin EH.K. Intensifikaciya teploobmena v kanalah / EH.K. Kalinin, G.A. Drejcer, S. A. YArko. – М.: Mashinostroenie, 1990. – 208s. 3. SHlihting G. Teoriya pograničnogo sloya / G. SHlihting. – М.: Nauka, 1969. -411s. 4. Filipov B.V., Struminskij V.V. EHksperimental'nye issledovaniya vozni-knoveniya i razvitiya turbulentnosti v trubkah / Turbulentnye techeniya. М.: Nauka, 1970. 5. Struminskij V.V. Kineticheskaya teoriya turbulentnosti: Predpr. SMNS AN SSSR.М., 64s. 6. Struminskij V.V. Kineticheskaya teoriya turbulentnyh techenij / Problemy turbulentnyh techenij. М.:1987.s.14-32.

Возгрін Ю.В., Жадан В.А., Зарянов В.А., Крот С.Г., Кузьмінський В.А., Лазурко О.В.

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛООБМІНУ У СИСТЕМІ ОХОЛОДЖЕННЯ ПРИ ВАРІУВАННІ ВХІДНИХ ВЕЛИЧИН У ШИРОКОМУ РОБОЧОМУ ДІАПАЗОНІ МЕТОДАМИ СКІНЧЕНОЕЛЕМЕНТНОГО МОДЕ- ЛЮВАННЯ

В статті на основі математичних розрахунків та отриманих експериментальним шляхом даних проведено дослідження компоновочних рішень моторно-трансмійного відділення (МТВ) бронетранспортера з вентиляторною системою охолодження. Дані матеріали мають практичну цінність і повинні використовуватися на початкових етапах проектування систем охолодження бронетранспортера з метою їх оптимізації та поліпшення характеристик.

Yu. Vozgrin, V. Zhadan, V. Zaryanov, S. Krot, V. Kuzminsky, O. Lazurko

COMPARATIVE EVALUATION OF HEAT EXCHANGE EFFICIENCY IN THE COOLING SYSTEM WITH VARIATION OF INPUT VALUES IN A WIDE OPERATING RANGE BY PROCEDURES OF FINITE ELEMENT MODELING METHODS

On the basis of mathematical calculations and experimental data the article studies the layout solutions for the power pack compartment (PPC) of armoured personnel carrier with fan cooling system. These materials serve a useful purpose and shall be used at the initial stages of APC cooling system design for the purpose of their optimization and improvement of characteristics.