

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ ВОДОВОЗДУШНЫХ ОХЛАДИТЕЛЕЙ НАДДУВОЧНОГО ВОЗДУХА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Ю. Л. Мошенцев, канд. техн. наук, проф. НУК;
А. А. Гогоренко, канд. техн. наук, доц. НУК;
Б. А. Тягнирядно, ассист.;
Д. С. Минчев, канд. техн. наук, доц. НУК;
А. В. Нагорный, асп.

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Аннотация. Представлены рекомендации по конструированию и результаты испытаний конструкции охладителя наддувочного воздуха нового поколения. Проведен подробный анализ причин разрушения конструкций пучков таких охладителей, изготовленных с использованием низкотемпературных оловянистых припоев.

Ключевые слова: низкотемпературный припой, охладитель наддувочного воздуха, поверхность теплообмена, тонкостенные трубки, трубная доска.

Анотація. Наведено рекомендації з конструювання і результати випробувань конструкції охолоджувача наддувочного повітря нового покоління. Проведено детальний аналіз причин руйнування конструкцій пучків таких охолоджувачів, виготовлених з використанням низкотемпературних олов'янистих припоїв.

Ключові слова: низкотемпературний припій, охолоджувач наддувочного повітря, поверхня теплообміну, тонкостінні трубки, трубна дошка.

Abstract. The design directives and the results of experimental testing for the new-generation charge air-cooler have been presented. The detailed analysis of the causes of damages of cooling coils of such coolers made with the usage of the low-temperature pewter solder technology is presented.

Keywords: low-temperature pewter solder, charge air-cooler, heat-exchange surface, light-wall tubing, tube plate.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Большая часть двигателей, использующих наддув и охлаждение наддувочного воздуха, на протяжении последних лет выпускалась универсального применения, предназначенного для использования на суше и на водном транспорте. Соответственно, охладители наддувочного воздуха (ОНВ) для таких двигателей до настоящего времени часто выполняются универсальными, пригодными для охлаждения пресной и морской водой. Изначально для охлаждения наддувочного воздуха применяли ОНВ, теплообменные элементы (пучки) которых изготавливались с использованием технологии пайки. Опыт их применения был ограниченным, они имели сравнительно низкую эффективность (около 80 %) и малый ресурс. В качестве холодного теплоносителя использовали как пресную, так и забортную воду. Именно из-за малого ресурса они были вытеснены трубчатыми охладителями, пучки которых изготавливались из толстостенных трубок с накатным орбрением. Трубки крепились в массивных трубных досках вальцовкой. При изготовлении подобных ОНВ пайка не применялась.

Универсальные ОНВ должны иметь толстостенные каналы для охлаждающей жидкости. Стенки каналов выполняются из дефицитных и дорогостоящих материалов (красная медь, латунь, нержавеющая сталь, мельхиор), способных противостоять морской воде. С учетом того, что число двигателей для наземных установок, выпускаемых заводами, намного больше числа судовых двигателей, универсальность в масштабах всего потребления обходится весьма дорого. В частности, масса поверхности теплообмена универсального пучка ОНВ из толстостенных красномедных труб для двигателя типа Д49 (16ЧН 26/26) мощностью 2950 кВт составляет 385 кг, а масса альтернативного пучка из тонкостенных труб, пригодного только для охлаждения пресной водой, – около 123 кг. К этому можно добавить применение тонких (1,5...5,0 мм) и легких трубных досок в ОНВ, предназначенных для наземного использования, вместо толстых и тяжелых толщиной 20...25 мм в ОНВ для двигателей морского исполнения. Кроме того, поверхности теплообмена (ПТ) на основе толстостенных водяных каналов со сравнительно большим сечением (предохраняющим от быстрого засорения), как правило, имеют весьма низкую компактность по

сравнению с ПТ, выполненными на базе тонкостенных водяных каналов.

Следует отметить, что в последнее время установилась тенденция к отказу от охлаждения наддувочного воздуха заборной водой даже на главных судовых двигателях. Для обеспечения надежности работы и возможности регулирования температуры наддувочного воздуха основные охлаждающие элементы охлаждают пресной водой и лишь специальные доохлаждающие секции ОНВ – иногда заборной водой. То же, и даже в большей степени, относится к вспомогательным судовым двигателям. В этом случае отпадает необходимость проектирования ОНВ всех выпускаемых двигателей с учетом возможности использования в них заборной воды. Тогда пучки для ОНВ могут конструироваться на базе иных соображений. Водяные каналы для таких ОНВ могут иметь минимально возможное сечение, стенки каналов – минимальную толщину, трубные доски могут быть существенно тоньше.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Для ОНВ предыдущего поколения преимущественной базой при изготовлении ПТ являлись трубные пучки из толстостенных труб с индивидуальным накатным оребрением [5, 6] и компактностью пучка около 600...650 м²/м³. При использовании ПТ с тонкостенными трубками базой для конструирования могут быть либо трубные пучки, либо пучки с плоскими каналами для прохода воды (полые пластины). Расширенный поиск наиболее компактных ПТ из области тонкостенных и высокоэффективных показал, что в качестве таковых подходят два вида [1–3]. Первый выполнен на основе плоских водяных каналов с вставкой-распределителем водяного потока. Со стороны воздуха каналы несут сдвинуто-рассеченное ленточное оребрение. Второй выполнен на базе коридорного пучка плоскоовальных труб с поперечным групповым оребрением плоскими ребрами, имеющими поперечные выступы, перпендикулярные движению воздуха (рис. 1).

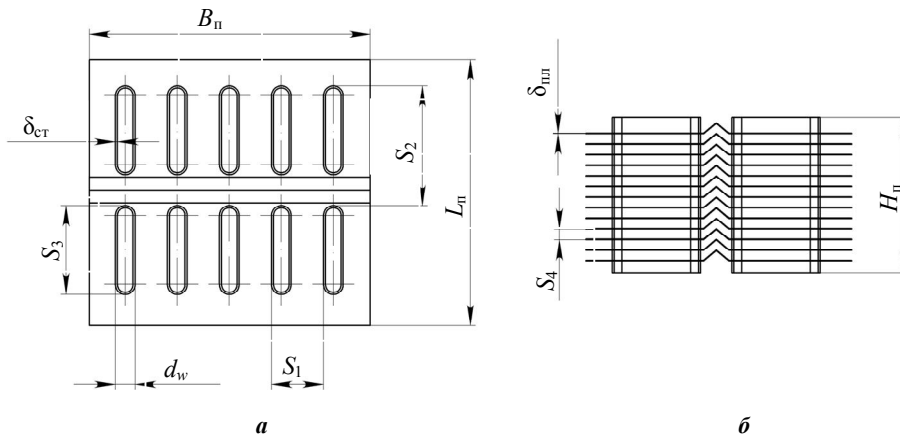


Рис. 1. Поверхность теплообмена для ОНВ нового поколения: d_w – высота поперечного сечения трубки; S_1 – расстояние между трубками в поперечном ряду; S_2 – шаг между поперечными рядами трубок; S_3 – наибольший габарит поперечного сечения трубки; S_4 – шаг между ребрами; $\delta_{ст}$, $\delta_{пл}$ – толщины стенки трубки и пластины оребрения соответственно; H_n , L_n и B_n – соответственно высота, длина и ширина пучка

Компактность таких ПТ может достигать 2000 м²/м³ и даже выше. Формирование пучков на основе подобных ПТ возможно пайкой или спеканием с использованием финской технологии *CirproBrazе* [7, 8] или подобных ей. Создание пучков ОНВ на основе пайки представляет собой определенный возврат к ранним вариантам конструкций, но такое решение позволяет получить ряд преимуществ перед применяемыми конструкциями, если исключить возможные негативные последствия от такого решения.

Применение пайки оловянистыми припоями сравнительно дешево, но конструкция будет обладать невысокой прочностью и температурной стойкостью. Использование высокотемпературных припоев усложняет производство и в разы удорожает конструкцию, поскольку требует покупки специаль-

ного оборудования, паяльной пасты и закупки прочих комплектующих для формирования ПТ со строго выдержанным составом металла. Пайка высокотемпературными припоями с использованием технологии *CirproBrazе* обеспечивает высокую температурную стойкость изделий и необходимую прочность.

ЦЕЛЬЮ СТАТЬИ является представление результатов разработки конструкции охладителя наддувочного воздуха нового поколения для ряда двигателей типа Д49, при изготовлении которого используется технология пайки теплообменного пучка оловянистыми припоями.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Первый вариант конструкции такого ОНВ для двигателя типа 16ЧН 26/26 был создан по расчетам

коллектива авторов. При разработке конструкции охладителя авторами проведен анализ [3] и выбор геометрии ПТ, а также определены теплотехнические параметры экспериментального ОНВ на расчетном режиме. При создании конструкции требовалось сохранение присоединительных и габаритных размеров корпуса, поскольку ОНВ должен быть взаимозаменяемым с предыдущими вариантами конструкции. В итоге на АО «Бериславский машиностроительный завод» (г. Берислав, Херсонская обл.) была создана конструкция ОНВ (рис. 2), в которой от прототипа сохранились неподвижные трубные доски и неразборность (невозможность выемки из корпуса после сборки) пучка. Пучок был выполнен паянным: оребрение соединялось с трубками спеканием, соединение трубок с латунными трубными досками толщиной 1,5 мм выполнялось пайкой погружением. Верхняя трубная доска отогнута по периметру вверх. Отгиб доски припаян (см. рис. 2, поз. А) к толстостенной стальной проставке 2, прижатой к корпусу 1 неразборным болтовым соединением.

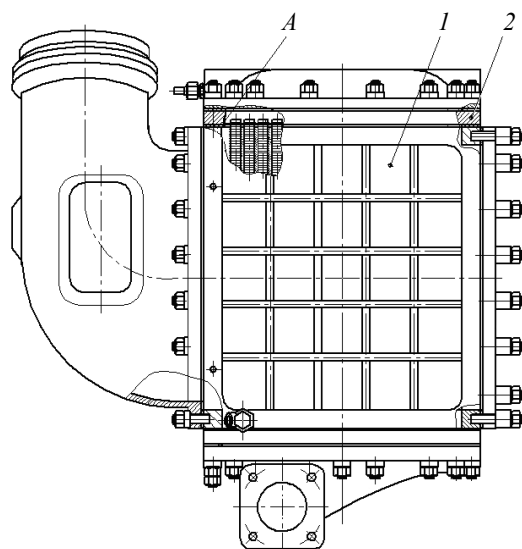


Рис. 2. Первый вариант конструкции ОНВ нового поколения с паянным тонкостенным пучком

Охладитель (см. рис. 2) подвергался теплотехническим и ресурсным испытаниям на двигателе, подтвердил расчетные (более высокие, чем у штатного ОНВ) теплотехнические параметры, проработал около 100 часов, а затем разрушился (появились неустраняемые течи в нескольких местах по периметру соединения пайкой верхней трубной доски и проставки). Предположительно разрушение конструкции связано с тем, что в этом соединении имели место напряжения сдвига, возникшие в результате сборки, а затем дополненные циклическими напряжениями из-за термических удлинений труб во время работы ОНВ на двигателе. Безусловно, разрушению могла способствовать и вибрация корпуса ОНВ, передававшаяся от двигателя. Следовало также учитывать снижение

прочности пайки из-за нагрева конструкции при работе.

Отработавший на двигателе первый вариант конструкции ОНВ был выполнен для полнопоточной системы охлаждения тепловоза ТЭП-70. В перспективе предстояло создать аналогичную конструкцию для более современной малорасходной системы охлаждения [4]. Оба ОНВ должны иметь почти одинаковую конструкцию пучков, но отличаться числом ходов по воде. Соответственно, они должны отличаться числом перегородок в крышках, а также числом и видом специально организованных опорных поверхностей на трубных досках, к которым должны примыкать водяные перегородки крышек.

По результатам анализа выполненной конструкции и испытаний были сформулированы следующие предпосылки к созданию перспективных конструкций ОНВ нового поколения.

1. Одна из трубных досок ОНВ должна быть подвижной. Объяснить этот тезис можно следующими причинами. Высота любого корпуса, в том числе разъемного, не может быть точно равна расстоянию между трубными досками. Под трубные доски нужно ставить прокладки, а при выжимке этих прокладок создадутся такие изменения межтрубного расстояния, которые намного превзойдут термические деформации (оценивались в *SolidWorks Simulation*). Соответственно, возникнут значительные напряжения в паянных соединениях, которые возрастут во время прогрева ОНВ, особенно при жестких трубных досках. Переменные режимы работы двигателя сделают эти напряжения циклическими. Подвижная верхняя трубная доска снимает все проблемы с допусками на межтрубное расстояние и с соответствующими напряжениями. Сделать одну доску подвижной и при этом свободно проходящей через корпус в принципе можно, это вопрос соотношений между соответствующими допусками и зазорами между подвижной доской и корпусом.

2. Обе трубные доски следует выполнить двойными. Между двумя пластинами по краям каждой доски должна вставляться латунная проставка толщиной 2 мм и шириной 15 мм. Все это окунается в расплав, в результате чего получается практически монолитная доска толщиной 5 мм. Трубки в такой доске пропаяваются на гораздо большей длине, чем в одинарной трубной доске. Отсюда снижение напряжений в паянных соединениях. Сама доска будет по краям практически жесткой. При подвижной верхней доске напряжений в ней практически не возникает.

Формовку отверстий в трубной доске рекомендуется производить продавливанием, в результате которого получаются ребра жесткости, увеличивающие площадь контакта трубки с трубной доской.

Реализация положений 1 и 2 показана на рис. 3. Обе трубные доски ОНВ выполнены двойными, верхняя трубная доска выполнена подвижной.

3. При подвижной верхней доске она может быть прижата к верхней крышке через прокладку болтами или шпильками М8 и фланцем толщиной до 15 мм (см. рис. 3, вид В). Болты могут иметь внутренний шестигранник для уменьшения габарита их установки. Чтобы разместились обычные болты с уменьшенной головкой, достаточно уменьшить число рядов труб по ширине от 70 до 67, что приведет к незначительному изменению КПД и сопротивления по воз-

ду (изменения в третьем знаке). Можно не уменьшать числа рядов, а уменьшить толщины брусков у корпуса или применить специальные болты и шайбы. Также можно прижимать верхнюю крышку к верхней доске болтами не снизу, а сверху. При этом отверстия в прижимном фланце должны иметь нарезку. Такое решение позволяет при монтаже крышки не деформировать оребрение инструментом при выжимке болтов и в меньшей мере закрывать фронт.

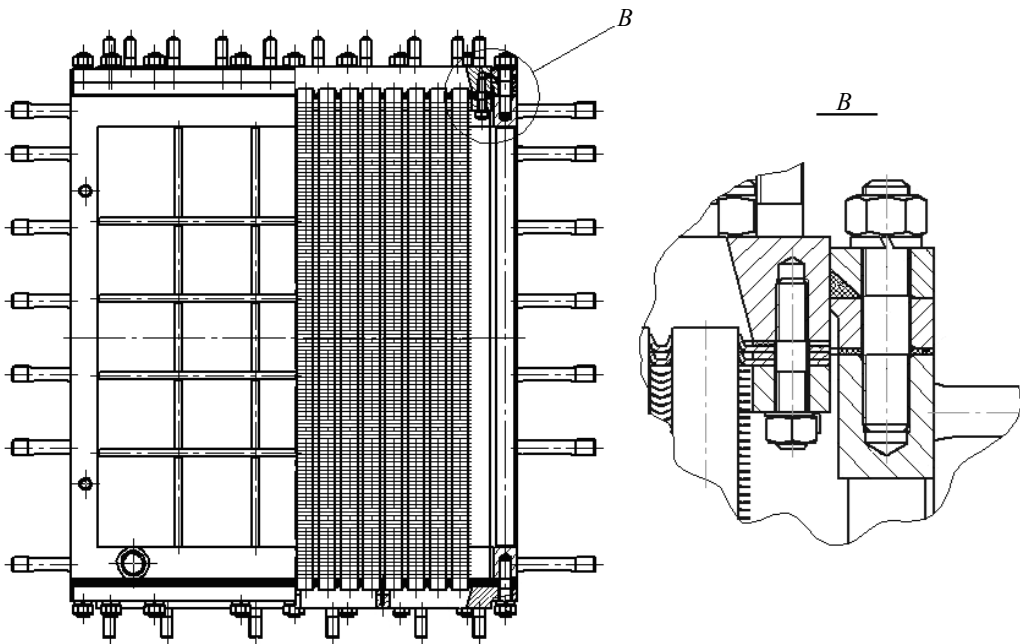


Рис. 3. Второй вариант теплообменного элемента ОНВ нового поколения с паянным тонкостенным пучком для полнопоточной системы охлаждения

4. Нижняя трубная доска должна опираться на ряд перегородок, которые повышали бы ее сопротивление прогибу от веса пучка и воды в нем. Для полнопоточного ОНВ кроме перегородки, выполняющей гидравлическую функцию (перегородка по центру доски), в полости нижней крышки необходимо поставить как минимум две дополнительные перегородки. Опорные перегородки должны быть более высокими в среднем сечении, чтобы получить необходимую жесткость. Концы перегородок следует закреплять сваркой за проставку, прижатую к трубной доске через прокладку. Передача усилия от доски к перегородкам не должна выполняться непосредственно через контакт перегородок с неровным слоем олова, покрывающего доску, который ни в коем случае нельзя зачищать после пайки (во избежание свищей). Передачу усилия следует организовать через герметик, нанесенный в щелевые полости перегородок, к упорным пластинам, которые следует соединить пайкой с трубной доской на площадках между трубками трубной доски. Для полнопоточного ОНВ средняя перегородка имеет контакт через прокладку с выступом нижней крышки, что обеспечивает ее гидравлическую функцию.

Прочие перегородки с нижней доской не контактируют, под ними возможен проток воды.

Крышки ОНВ для малорасходной системы должны быть изменены. В них должен быть установлен ряд дополнительных перегородок, которые изменят число ходов и одновременно увеличат жесткость трубных досок. Контакты между трубными досками и перегородками здесь также предлагается выполнять не непосредственно, а через герметик, наносимый в специальные полости. В верхней части ОНВ герметик следует наносить в полости специальных полутрубок. В качестве таковых можно использовать трубки для водяных каналов, разрезанные вдоль посередине длиной оси сечения, с последующим отгибом краев разреза в наружные стороны (рис. 4). Полутрубки следует соединить пайкой с трубными

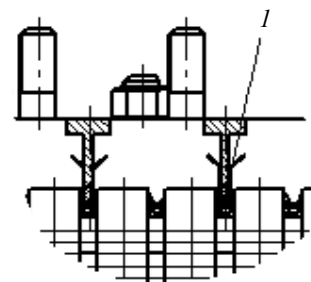


Рис. 4. Схема уплотнения трубных досок и водяных перегородок: 1 – полутрубка

досками напротив перегородок (см. рис. 4). Перегородки в нижней части ОНВ выполняются аналогично конструкции полнопоточных ОНВ, кроме крайних, которые выполняются аналогично перегородкам в верхней части.

5. Распределить нагрузку от веса пучка и воды в нем на обе доски и уменьшить инерционные нагрузки при вибрации ОНВ на его нижнюю доску возможно установкой компенсаторов нагрузки *1* (рис. 5).

Компенсатор нагрузки дает возможность верхней доске свободно перемещаться вверх под действием температурного расширения, но при этом позволяет частично снять нагрузку, направленную вниз.

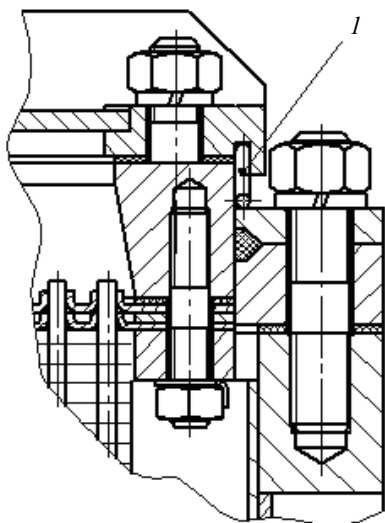


Рис. 5. Фрагмент конструкции ОНВ с компенсатором нагрузки на нижнюю доску в виде плоской пружины

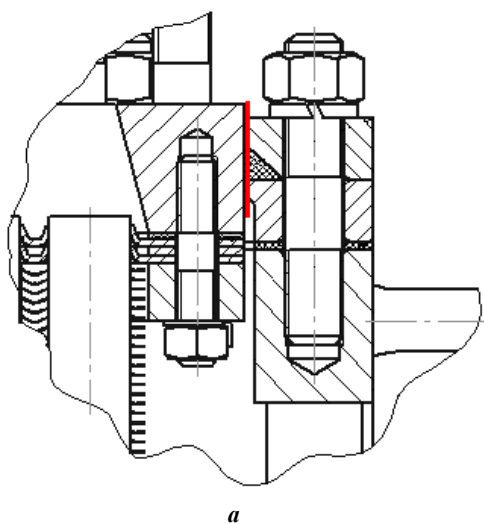
При испытаниях ОНВ нового поколения на гидравлическую плотность было установлено, что уплотнение подвижной верхней доски не выдерживает контрольного давления воздуха (0,4 МПа), подаваемого в воздушную полость. Прорыв возникал на ча-

сти периметра крышки, по красной линии (рис. 6,*а*), в результате деформации резинового кольца под давлением воздуха.

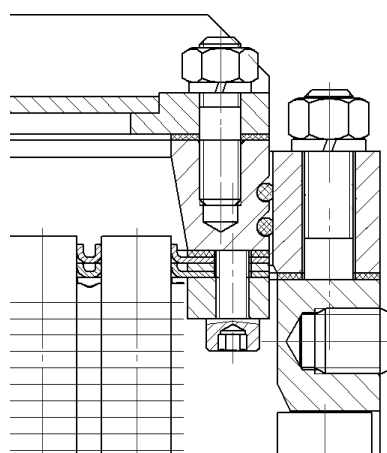
По всей видимости, обеспечить равномерное и достаточное прижатие круглого резинового кольца с помощью разъемных прижимных фланцев достаточно сложно, тем более при использовании одностороннего скоса на фланце. Кроме того, конструкция данного уплотнения не соответствует существующим рекомендациям в отношении их изготовления. Более удачной следует признать конструкцию на рис. 6,*б*. Такое уплотнение проще собирать, проще обеспечить необходимую выжимку колец. В косых канавках возникает «манжетный» эффект. Воздух своим давлением загоняет кольца в щель и способствует ее заpirанию. Два ряда колец дают гарантию плотности.

Для проверки стойкости разработанной конструкции к условиям эксплуатации ОНВ был подвергнут 250-часовым испытаниям на вибрационном стенде (рис. 7), где были созданы условия, близкие к условиям эксплуатации ОНВ на двигателе. Стол вибростенда установлен на четырех пружинах и имеет ограничения по перемещению по четырем взаимно перпендикулярным направлениям в горизонтальной плоскости. Под столом закреплен электродвигатель постоянного тока, вращающий диск с эксцентриками. Изменением массы и расположения эксцентриков подбирается нужная амплитуда вибрации, а изменением частоты вращения ротора – частота вибрационного воздействия.

Температура стенки поверхности теплообмена во время испытаний поддерживалась расчетной и равной 75...78 °С. Давление в водяной полости поддерживалось равным 0,15 МПа (расчетная разность давлений на трубные доски во время эксплуатации). Амплитуда вибрации на фланце крепления к двигателю 400 мкм, частота вибрации 16,7 Гц. Чтобы поддерживать постоянную температуру



а



б

Рис. 6. Уплотнение верхней трубной доски: *а* – применяемое; *б* – предлагаемое

в водяной полости использовался подогреватель 3 с терморегулятором 2 (рис. 8).

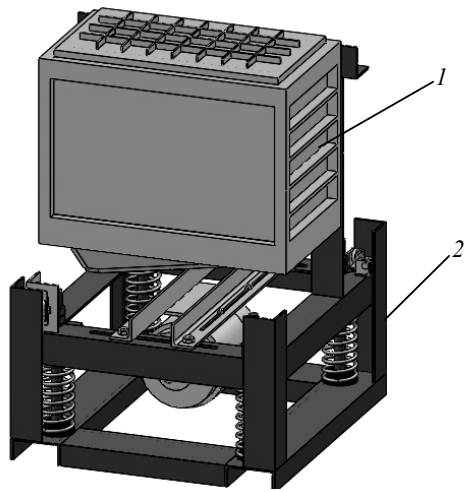


Рис. 7. Общий вид вибростенда для испытаний ОНВ: 1 – экспериментальный ОНВ; 2 – вибростенд

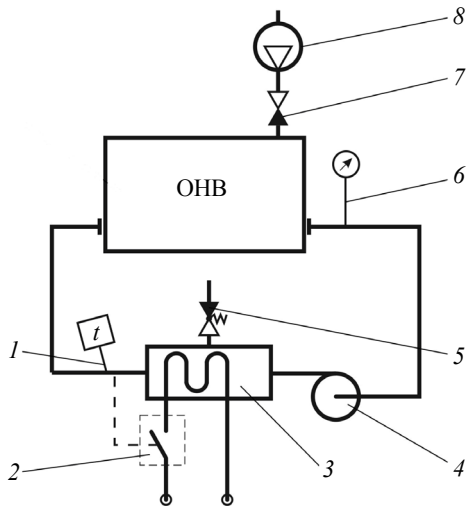


Рис. 8. Схема системы подогрева и поддержания давления теплоносителя на вибростенде

Насос 4 обеспечивал непрерывную прокачку воды для стабильности режима. Температура воды измерялась терморпарой 1. Давление поддерживалось за счет подачи небольшого количества сжатого воздуха компрессором 8 в верхнюю точку системы через невозвратный клапан 7. Давление в полости замерялось манометром 6. Для предотвращения от избыточного роста давления имелся предохранительный клапан 5. Вибрация ОНВ определялась с помощью измерителя вибрации ИВПА-07 с полосовым анализатором. Точки для установки датчика показаны на рис. 9.

При этом контрольные замеры фиксировались в точках 1, 2, 3, 12, 13, 15. По условиям проведения испытаний именно в этих точках (точки закрепления ОНВ к двигателю) должны были поддерживаться заданные параметры (амплитуда вибрации 400 мкм, частота 16,7 Гц). Прочие точки использовались для настройки и анализа полной виброграммы ОНВ, которую впоследствии предполагается сравнить с виброграммой ОНВ на двигателе.

В ходе длительных испытаний поддерживалась вибрационная скорость приблизительно $V = 29,62$ мм/с (соответствует амплитуде вибрации 400 мкм). Эта скорость контролировалась каждые 3 часа и при необходимости регулировалась с помощью изменения затяжки роликовых упоров.

Виброграммы ОНВ приведены на рис. 10, при этом амплитуда вибрации в главной контролируемой точке соответствует линии 2, выделенной красным цветом.

Прочие кривые дают вибрационные перемещения в различных точках ОНВ в соответствии с нумерацией точек на рис. 9. Эти данные не отвечают заданным параметрам воздействия и могут быть использованы в дальнейшем для сопоставления с действительной виброграммой ОНВ на двигателе. Из рис. 10 видно, что заданная амплитуда вибрации в области прикрепления ОНВ к двигателю колебалась в пределах от 347 до 466 мкм, что соответствует отклонению

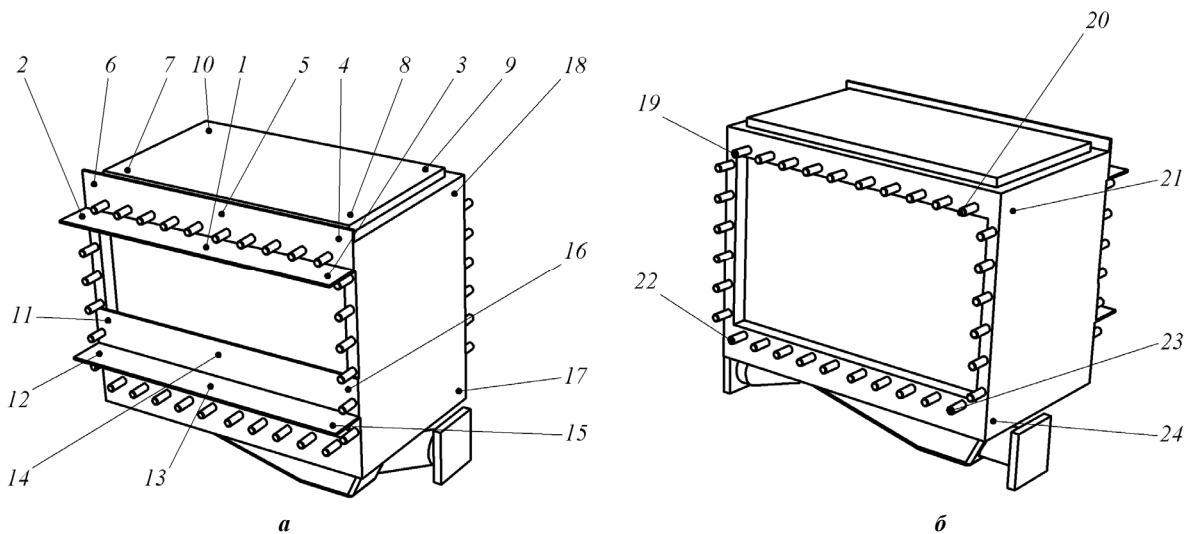


Рис. 9. Схема установки датчика вибрации

от заданной величины амплитуды вибрации не более чем на 13...16 %.

Вибрационные нагрузки в течение 250 часов ОНВ выдержал без конструктивных изменений и нарушения герметичности водяной полости. После вибрационных испытаний ОНВ был установлен на двигателе и работал на нем длительное время без разрушения. Таким образом, заложенные в конструкцию положения получили свое подтверждение. Наружные размеры пучка в этом ОНВ практически соответствовали таковым для первого образца. В связи с этим его те-

плотехнические параметры должны были оставаться примерно такими же, как и у первого образца. В то же время при изготовлении второго образца были допущены некоторые технологические нарушения. В результате поверхность теплообмена получила множественные дополнительные деформации и покрылась окалиной, которая после травления в кислоте и щелочи частично превратилась в шероховатое покрытие. Возможно, из-за этого экспериментальное значение воздушного сопротивления оказалось завышенным. Тепловой КПД соответствовал расчетному.

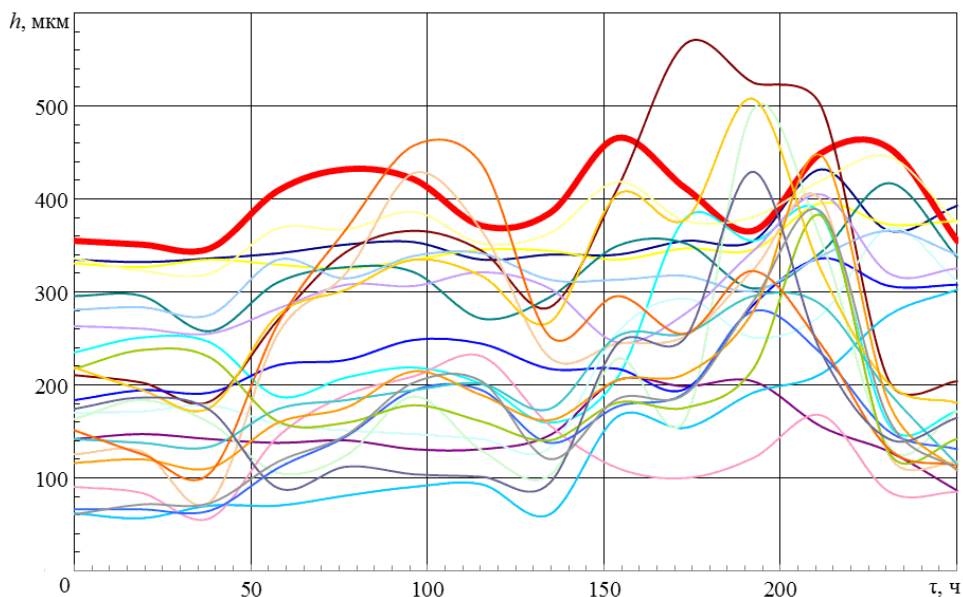


Рис. 10. Виброграммы экспериментального ОНВ: — 1; — 2; — 3; — 4; — 5; — 6; — 7; — 8; — 9; — 10; — 11; — 12; — 13; — 14; — 15; — 16; — 17; — 18; — 19; — 20; — 21; — 22; — 23; — 24

Созданные и испытанные образцы ОНВ свидетельствуют о возможности существенного снижения массы, повышения теплового КПД и уменьшения воздушного сопротивления ОНВ по сравнению с образцами, изготовленными на базе толстостенных труб с индивидуальным накатным оребрением. Особенности исследованных ОНВ в том, что они были созданы для двигателя сравнительно большой мощности и имеют достаточно большие габаритные размеры теплообменного элемента. Последнее усугубляет проблемы прочности, менее существенные для ОНВ двигателей малой мощности. Сравнительно большие размеры пучков также связаны и с современной тенденцией к увеличению эффективности ОНВ до 95...97 %, что отличает данные ОНВ от ранее применявшихся.

Известно, что паянные ОНВ, выпускавшиеся в период внедрения наддува и во многом подобные рассмотренным экспериментальным образцам, имели малый ресурс. Устранение заборной воды как

охлаждающего теплоносителя, безусловно, будет способствовать повышению предлагаемых ОНВ. В то же время на него будут негативно влиять высокие температуры воздуха (свойственные современному уровню наддува) и вибрация двигателя. В связи с последними обстоятельствами ресурс предлагаемых ОНВ, изготовленных с применением низкотемпературных оловянистых припоев, вряд ли превысит таковой для ОНВ, выпускавшихся в период внедрения наддува. Такой ресурс явно мал для современных двигателей. Очевидно, повышение ресурса может быть обеспечено использованием более стойких к вибрациям и температурам припоев и соответствующих технологий пайки.

Переход на рассмотренные выше теплообменники позволит производителю снизить затраты при их производстве, а в эксплуатации будет способствовать максимальному снижению температуры наддувочного воздуха в ресивере двигателя и воздушного сопротивления при прочих равных условиях.

ВЫВОДЫ

Опыт проектирования, изготовления и испытаний трубчато-пластинчатых ОНВ, выполненных на базе тонкостенных труб с высоким значением коэффициента объемной компактности ПТ, свидетельствует о возможности уменьшения их массы (на 76 %) и стоимости при повышении КПД (на 6,7 %) и снижении воздушно-го сопротивления (на 32 %) по сравнению с образцами, изготовленными на базе пучков толстостенных труб с индивидуальным накатным оребрением.

Для обеспечения значительных ресурсов паянных ОНВ из тонкостенных трубок необходимо

использовать современные технологии пайки, обеспечивающие повышенную прочность и температурную стойкость по сравнению с использованием обычных оловянистых припоев. Известно, что современный уровень паянных соединений обеспечивает температурную стойкость соответствующих конструкций до 500...600 °С при одновременном повышении их прочности. Сочетание таких технологий с предлагаемой конструкцией способно привести к максимально полезному эффекту при создании ОНВ нового поколения на основе предложенного подхода.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Бажан, П. И.** Расчет и конструирование охладителей дизелей [Текст] / П. И. Бажан. – М. : Машиностроение, 1981. – 168 с.
- [2] **Бурков, В. В.** Автотракторные радиаторы [Текст] / В. В. Бурков, А. И. Индейкин. – Л. : Машиностроение, 1978. – 216 с.
- [3] **Мошенцев, Ю. Л.** О целесообразности применения различных видов поверхностей теплообмена в охладителях наддувочного воздуха тепловозных двигателей [Текст] / Ю. Л. Мошенцев, А. В. Нагорный, А. А. Гогоренко // Междунар. информ.-техн. журн. «Локомотив-информ». – 2010. – № 4. – С. 14–17.
- [4] **Мошенцев, Ю. Л.** Система охлаждения для современных магистральных тепловозов [Текст] / Ю. Л. Мошенцев, А. А. Гогоренко, Д. С. Минчев // Науч.-техн. журн. «Двигатели внутреннего сгорания». – 2011. – № 2. – С. 90–94.
- [5] Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения : справочник [Текст] / А. Н. Бессонный, Г. А. Дрейцер, В. Г. Кунтыш [и др.] ; под общ. ред. В. Б. Кунтыша, А. Н. Бессонного. – СПб. : Недра, 1996. – 512 с.
- [6] Теплообменники энергетических установок [Текст] / Ю. М. Бродов, К. Э. Аронсон, С. Н. Блинков, В. И. Брезгин [и др.] ; под общ. ред. Ю. М. Бродова. – Екатеринбург : Сократ, 2003. – 968 с.
- [7] *CuproBrazе Technology* [Электронный ресурс] // *The CuproBrazе Alliance official site*. – Режим доступа: http://www.cuprobrazе.com/over_tech.asp.
- [8] **Gustafsson, В.** *CuproBrazе Mobile Heat Exchanger Technology* [Text] / В. Gustafsson, J. Scheel. – SAE Technical Paper Series, № 3456, 2000.

© Колектив авторів

Надійшла до редколегії 18.03.13

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК

д-р техн. наук, проф. *Б. Г. Тимошевський*

Статтю розміщено у Віснику НУК № 2, 2013