

Сторчеус Ю.В., Данилейченко А.А., Портнов А.С.

РАЗВИТИЕ ТРАНСПОРТНЫХ ОТОПИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ С КАСКАДНЫМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ ЭНЕРГИИ

В статье рассмотрены перспективные схемы отопительно-вентиляционных систем для транспортных установок, работающие на принципах каскадно-теплового сжатия. Выявлены и проанализированы физические особенности рабочего процесса генератора каскадно-теплового сжатия, предложены концепции совершенствования его свойств. Раскрыты пути повышения эффективности работы отопительно-вентиляционных систем и предложены различные схемные решения, обеспечивающие их максимальную производительность в условиях эксплуатации.

Ключевые слова: каскадно-тепловое сжатие, генератор газов, транспортная отопительная система, эффективность, ротор.

Актуальность исследования. В общем объеме потребления энергии пассажирским поездом значительную долю составляют затраты на обеспечение микроклимата в вагонах и кабине машиниста локомотива. В условиях возрастающей конкуренции на рынке транспортных услуг требование по поддержанию комфортных санитарно-гигиенических параметров в помещениях подвижного состава при одновременном снижении энергии, потребляемой системами отопления, воздухообеспечения и кондиционирования приобретает особое значение.

Значительный резерв повышения конкурентоспособности железнодорожного транспорта в пассажирских перевозках связан с повышением уровня комфортности в помещениях подвижного состава. Уровень комфортности поездки на железнодорожном транспорте во многом зависит от микроклимата в салонах подвижного состава, параметры которого, и, прежде всего температура, влажность, запыленность и химический состав воздуха, непосредственно влияют на самочувствие пассажиров и субъективное восприятие длительности проезда.

Постановка проблемы. Необходимость повышения эффективности систем отопления и вентиляции, поиск решений, обладающих более высокой экономичностью, предопределяет создание новых классов, схем и принципов действия отопительных систем. Значительный прогресс в этом направлении может быть достигнут при использовании в качестве основного элемента отопительно-вентиляционных систем одной из разновидностей каскадных трансформаторов энергии, а именно – генераторов каскадно-теплового сжатия с эжекторной ступенью.

Теоретический анализ исследования. Анализ систем отопления и вентиляции пассажирских вагонов показывает, что наилучшие микроклиматические условия обеспечивает многоточечный подвод подогретого воздуха в салоны [1, 2]. Однако типовые схемы электрокалориферного отопления имеют крайне неудовлетворительную энергетическую эффективность.

Функционально наибольшей способностью обеспечивать санитарно-гигиенические требования к микроклимату в помещениях подвижного состава обладает воздушная (калориферия) система отопления. К ее достоинствам относятся: простота регулирования температуры воздуха в салоне вагона; надежность питания нагревателей, размещаемых в одном месте; высокий уровень безопасности для пассажиров; возможность комбинирования электрической системы с паровой; постоянный приток в салон свежего воздуха [2, 3]. Вместе с тем, воздушное (электрокалориферное) отопление характеризуется весьма малым коэффициентом полезного действия.

Следует заметить, что энергетическое несовершенство, в целом, типично для всех систем электрического отопления. Основная причина заключается в нерациональности обратного преобразования рафинированной электрической энергии в тепловую. Действительно, тепло по существу является диссипативной энергией, и может служить показателем несовершенства или необратимости преобразовательных процессов в трансформирующих агрегатах и силовых машинах.

Особенно очевидная нецелесообразность использования электроэнергии в качестве источника теплоты проявляется в поездах с дизельной тягой, где с одной стороны электроэнергия является продуктом двойного преобразования (с тепловой в механическую – в дизеле; и механической в электрическую – в генераторе), а с другой стороны – отвод теплоты в силовом агрегате тепловоза является необходимым условием организации рабочего процесса дизельного цикла. При этом отметим, что теплота, отводимая в систему охлаждения дизеля и с отработавшими газами, почти вдвое превышает теплоту, преобразованную в полезную механическую энергию на валу двигателя [2, 4].

Еще более низкое значение КПД воздушных систем отопления обусловлено большими затратами энергии на транспортирование тепла воздушным потоком. Сжатый воздух является продуктом высокотехнологической переработки, получение которого в условиях подвижного состава предполагает использование 3-х или 4-х агрегатов со своими ограничениями по эффективности преобразовательных процессов (циклов). Например, в случае тепловозной тяги производство сжатого воздуха осуществляется по схеме:

- преобразование теплоты сгорания топлива в механическую энергию (дизель, $\eta_e = 0,32..0,34$);
- преобразование электрической энергии в электрическую (генератор $\eta_z = 0,84..0,85$);
- преобразование электрической энергии в механическую привода компрессора (электродвигатель $\eta_{эд} = 0,8..0,85$);
- преобразование механической энергии в располагаемую работу сжатого воздуха (компрессор $\eta_k = 0,7..0,72$).

Таким образом, общий КПД преобразования тепловой энергии в потенциал сжатого воздуха при условии номинальных режимов работы всех агрегатов составляет $\eta_n = \eta_e \eta_z \eta_{эд} \eta_k = 0,15..0,18$.

В виду высокой затратности процесса нагнетания воздуха очевидна энергетическая целесообразность снижения общего уровня давления в магистрали воздуховода отопительной системы, что может быть достигнуто использованием индивидуальных вентиляторов, размещаемых в непосредственной близости от сопел подачи нагретого воздуха в обогреваемые зоны. Такое решение сопряжено с неоправданным увеличением количества нагревательных элементов и мотор-вентиляторов, усложняющих устройство отопительной системы и снижающей ее надежность. При этом весьма не просто подавить шум, создаваемый работой вентиляторов.

Анализ систем отопления и вентиляции пассажирских вагонов показывает, что наилучшие микроклиматические условия обеспечивает многоточечный подвод подогретого воздуха в салоны. Однако типовые схемы электрокалориферного отопления имеют крайне неудовлетворительную энергетическую эффективность.

Затраты мощности на обеспечение комфорта составляют значительную часть мощности потребляемой поездом. На рис.1 показано среднегодовое распределение потребляемой энергии стандартизированного междугородним поездом Федеральных железных дорог Швейцарии (SBB) массой 600т при ускорении 0,1 м/с² на подъеме 10%.

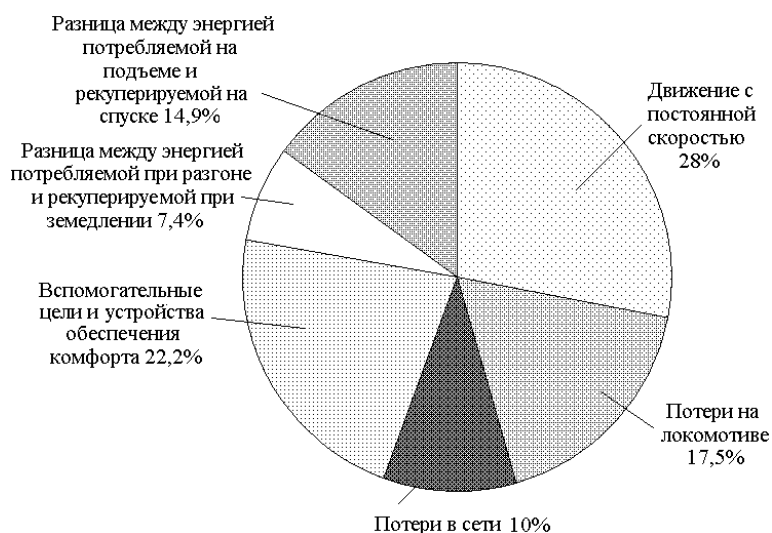


Рис..1. Расчетное распределение годового энергопотребления для стандартизированного поезда

При движении поезда без ускорения на горизонтальных участках дороги, а также во время остановок удельные затраты на вспомогательные цели и обеспечение комфорта возрастают.

Цель статьи. Целью статьи является выявление основных факторов, определяющих эффективность применения принципов каскадного энергообмена в системах отопления транспортных установок.

Задачи исследования. Основными задачами исследования являлась разработка высокоэффективных схем систем отопления на основе каскадных трансформаторов энергии.

Результаты исследования. Перспективное направление развития отопления и вентиляции связано с созданием генераторов горячего воздуха, основанных на использовании эффекта каскадно-теплового сжатия (КТС). Сущность рабочего цикла КТС, разработанного под руководством профессора Крайнюка А.И., заключается в прямом преобразовании тепла в энергию сжатого воздуха. Термодинамический цикл КТС может быть положен в основу целого ряда устройств: компрессора КТС, генератора газа, каскадного обменника давления, камеры сгорания газотурбинной установки, обогревателя каскадно-теплового сжатия (ОКТ), разнообразных систем наддува ДВС и др. [5, 6, 7, 8, 9].

Помимо простоты и высокой надежности конструкции, в виду отсутствия механических вытеснителей и подвижных дискретно управляемых газораспределительных органов, агрегаты КТС характеризуются достаточно высоким КПД даже при использовании источников теплоты с относительно невысоким температурным потенциалом, что обуславливает привлекательность их применения, в том числе, в качестве

утилизационных систем в составе традиционных теплосиловых установок. Принцип действия и описание первых устройств КТС раскрыты в работах [2, 4, 8, 9].

В настоящее время на кафедре ДВС и машиноведение Восточноукраинского университета им.В.Даля созданы работоспособные опытные образцы агрегата КТС, схема которого показана на рис.2.

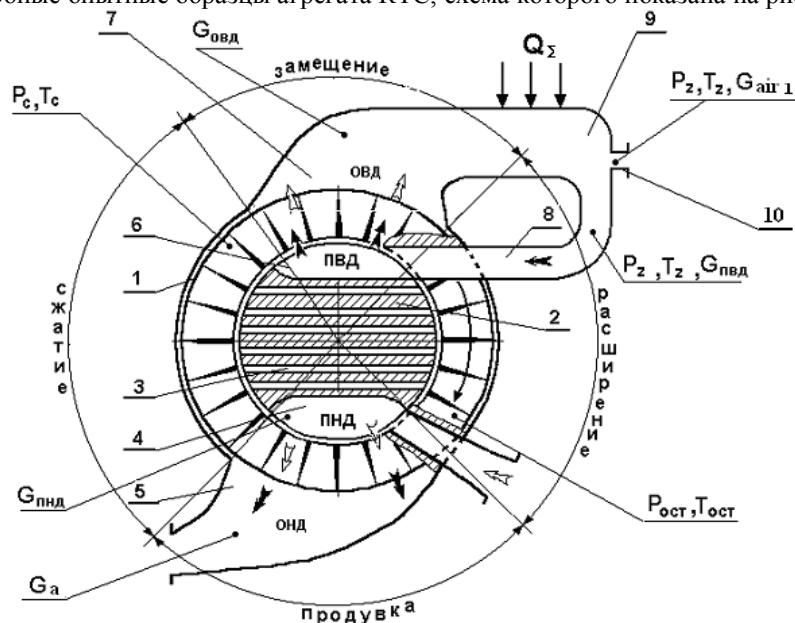


Рис.2. Принципиальная схема генератора каскадно-теплового сжатия

Агрегат КТС содержит ротор 1, охватывающий статор 2, содержащий напорнообменные каналы 3, попарно соединяющие смежные ячейки ротора 1 и оппозитно расположенные окно 4 подвода низкого давления (ПНД) и окно 6 подвода высокого давления (ПВД). Наружная поверхность ротора 1 охвачена кожухом, включающим окно 5 отвода низкого давления (ОНД) и окно 7 отвода высокого давления (ОВД), а окно 6 ПВД и окно 7 ОВД соединены вытеснительным трактом 8 с теплообменником 9 утилизационного контура. На участке вытеснительного тракта 8 соединяющем теплообменник 9 и окно ОВД 7, расположен патрубок 10 отвода сжатого рабочего тела к потребителю.

В процессе вращения ротора 1 (по часовой стрелке) каждая из ячеек ротора 1 последовательно сообщается с напорнообменными каналами 3 статора 2, через которые в нее поступает рабочее тело из смежных ячеек участка расширения. В результате каскадного сжатия давление в ячейке постепенно повышается до определенного значения, зависящего от термодинамических параметров рабочего тела в начале процесса расширения.

При сообщении рассматриваемых ячеек с окнами высокого давления (6 ПВД и 7 ОВД) вытеснительного тракта под действием центробежных сил или принудительной циркуляции осуществляется замещение предварительно сжатого в ячейке воздушного заряда подогретым источником теплоты воздухом или газами (в случае использования камеры внутреннего сгорания).

Вследствие этого в вытеснительном тракте 8 и сообщенных с ним ячейках устанавливается максимальное давление цикла, превышающее давление каскадного сжатия. Часть сжатого воздуха из вытеснительного тракта 8 отводится к потребителю через патрубок 10, размещенный непосредственно перед источником теплоты.

В период последующего сообщения ячеек с напорнообменными каналами 3 часть рабочего тела отводится к смежным ячейкам участка сжатия, что сопровождается падением давления в рассматриваемых ячейках. Таким образом, работа расширения расходуется на сжатие воздушного заряда в процессе каскадного массообмена.

Остаточное давление в конце процесса расширения, как косвенный показатель совершенства рабочего процесса, зависит от количества напорнообменных каналов, стремясь к атмосферному с увеличением последних.

И, наконец, продувка ячеек воздушным зарядом, осуществляемая в период подключения ячеек к окнам низкого давления ПНД и ОНД, замыкает рабочий цикл агрегата КТС.

Несмотря на уникальность устройства, рабочий процесс агрегата КТС не противоречит классическим принципам организации рабочего процесса теплосиловых машин. Действительно, рабочий цикл в ячейке ротора можно условно разделить на следующие процессы:

- процесс сжатия при движении ячейки от окна ПНД до момента ее совмещения с окном ПВД, сопровождающийся ступенчатым повышением давления в ячейке, вследствие подвода части рабочего тела от смежных ячеек ротора через каналы статора;
- процесс замещения, включающий этапы повышения давления в ячейке с предварительно сжатым рабочим телом до максимального давления цикла, в период ее подключения к окнам ПВД и ОВД с

одновременным вытеснением из ячейки и проталкиванием рабочего тела через теплообменник, где и осуществляется его подогрев, а также отвод из вытеснительной магистрали части сжатого рабочего тела к потребителю с максимальным давлением цикла КТС;

- процесс расширения, в результате отвода части рабочего тела через каналы статора в смежные ячейки ротора;

- процесс продувки ячейки свежим воздухом в период ее сообщения с продувочными окнами ПНД и ОНД.

Применительно к железнодорожному транспорту интерес представляет, например, использование генератора горячего воздуха в отопительных системах подвижного состава. Очевидным достоинством обогревателя КТС, наряду с низкой стоимостью обслуживания, является автономность ввиду сохранения работоспособности при обесточивании силовой электросети, также возможности эксплуатации на различных видах топлива и от любого источника теплоты. Благодаря нагнетанию горячего воздуха непосредственно агрегатом КТС транспортировка теплоносителя в локальные зоны обогреваемого объекта осуществляется без использования приводного компрессора или вентилятора.

Другое направление развития устройств каскадного сжатия связано с созданием обменников давления, например, используемых для наддува ДВС.

В каскадном обменнике давления (КОД) сжатие воздуха подобно волновому обменнику давления (ВОД) осуществляется в результате непосредственного контакта со сжимающим газом, однако в процессе с существенно отличным распределением энергетических субстанций. Принцип действия КОД раскрыт в работах [8, 9].

Преимущества рабочего цикла КОД относительно ВОД обусловлены следующим.

Волновой характер обмена энергией и нагнетание сжатого воздуха предопределяет высокую чувствительность рабочего процесса ВОД к картине взаимодействия первичных волн с передними кромками газораспределительных окон, легко разрушаемую при отклонении частоты вращения ротора или параметров сжимающего газа от расчетных значений. Однако и на расчетном режиме импульсное сжатие заряда сопровождается потерями, связанными с рассеиванием энергии формируемых волн в результате их встречного взаимодействия и отражения в граничных сечениях ячейки.

Еще более заметное влияние на КПД ВОД оказывает полнота вытеснения сжатого воздуха через окно ВВД. Увеличение доли сжатого воздуха, оставшегося в ячейке (после ее разобщения с окнами высокого давления) вызывает почти пропорциональное снижение КПД, аналогично негативному влиянию так называемого «мертвого» объема в поршневом компрессоре.

Учитывая наличие в ячейке зоны перемешивания сжимающего и сжимаемого газов осуществить полное вытеснение сжатого заряда воздуха, исключив заброс сжимающего газа в окно ВВД, достаточно проблематично. Особенно заметно отмеченные факторы проявляются при увеличении напорности обменника с изменением частоты вращения ротора.

На расчетном режиме работы генератор каскадного теплового сжатия нагнетает горячий воздух с высокой температурой и давлением в зависимости от максимальной температуры цикла и относительного расхода, отводимого к потребителю воздуха составляющим от 0,2 до 0,6 МПа. Отмеченные термодинамические параметры генерируемого воздуха, позволяют осуществить транспортирование тепла в удаленные зоны вагоны посредством воздуховода с относительно небольшим проходным сечением с последующим разбавлением горячего воздуха холодным в эжекционных камерах смешения, размещаемых в разветвлениях коммуникационной сети. Использование эжекционных сопел, отличающихся высокой надежностью и простотой, позволяет не только снизить температуру поступающего в салон воздуха до комфортных значений, но и значительно увеличить его расход.

Несмотря на невысокий КПД струйных насосов их применение в составе обогревателей КТС является оправданным, поскольку диссипативная составляющая обмена энергий преобразуется в тепло, используемое по прямому назначению в отопительной системе.

Принципиальная схема простейшей системы отопления с генератором КТС показана на рис.3.

Нагнетаемый генератором КТС 1 горячий воздух подводится к активному соплу эжектора 2, пассивное сопло которого сообщено с продувочным трактом 4 ГКТС. В результате смешения в камере эжектора 5, горячий воздух разбавляется продувочным потоком, состоящим из смеси наружного продувочного воздуха и остаточного горячего воздуха, вытесняемого из ячеек ротора 6.

Здесь теплота остаточного воздуха, вытесняемого из ячеек ротора, сохраняется в контуре отопительной системы. При этом подключение продувочного тракта 4 к эжектору 5 решает проблему очистки ячеек 6, что способствует повышению эффективности работы ГКТС и упрощению его устройства.

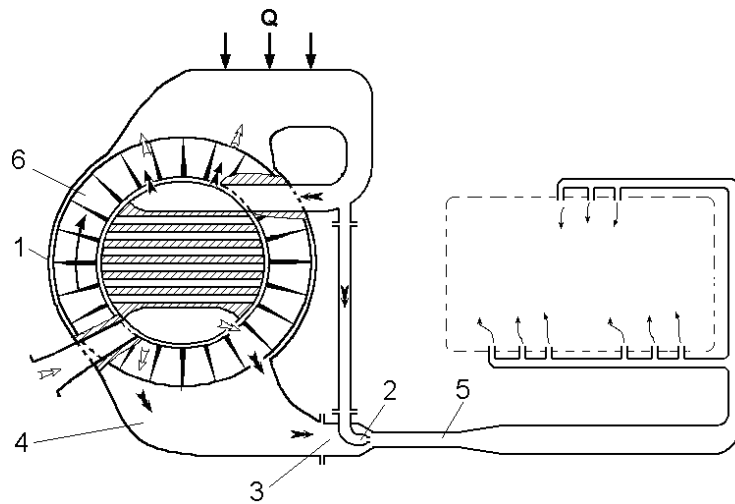


Рис.3. Отопительная система с одноступенчатым эжектированием воздуха

Средняя температура продувочного потока в пассивном сопле 3 зависит от коэффициента продувочного воздуха φ_n и в ряде случаев, с учетом ограниченных значений коэффициента эжекции $n_{э}$ одной ступени, является высокой с точки зрения необходимого комфортного охлаждения обогревающего воздуха в выходных сечениях отопительной сети. В случае чрезмерной температуры обогревающего воздуха комфортные параметры микроклимата в салоне могут быть достигнуты путем дополнительного разбавления калориферного воздуха во второй ступени эжектора.

В схеме, показанной на рис.4 приемлемая температура поступающего в салон воздуха, обеспечивается соответствующим выбором суммарного коэффициента эжекции $n_{э2} = (n_{э1} + 1) \cdot (n_{эII} + 1) - 1$ в двух ступенях эжектора.

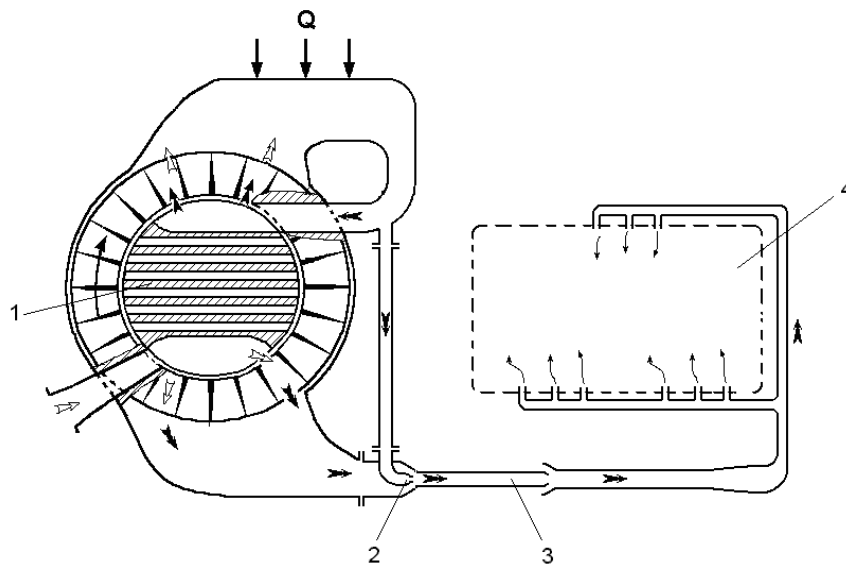


Рис.4. Отопительная система с двухступенчатым эжектированием воздуха

При изменении условий окружающей среды регулирование температурного режима в салоне вагона осуществляется изменением мощности источника подвода теплоты в вытеснительном контуре ГКТС. Вместе с тем, для поддержания необходимого давления в напорной магистрали калориферной сети максимальное давление P_z рабочего цикла ГКТС на частичных режимах работы системы на должно изменяться значительно.

Отмеченное условие реализуется в регулируемых системах отопления (рис.5) с разделенными камерами смешения первой эжекционной ступени. При повышении температуры окружающей среды и соответствующем уменьшении теплового потока в вытеснительном тракте ГКТС необходимый уровень максимального давления P_z обеспечивается благодаря уменьшению расхода активной среды, отводимой из вытеснительного контура ГКТС, путем перекрытия одного или нескольких активных сопел 1-й эжекторной ступени специально предусмотренными для этой цели заслонками 1.

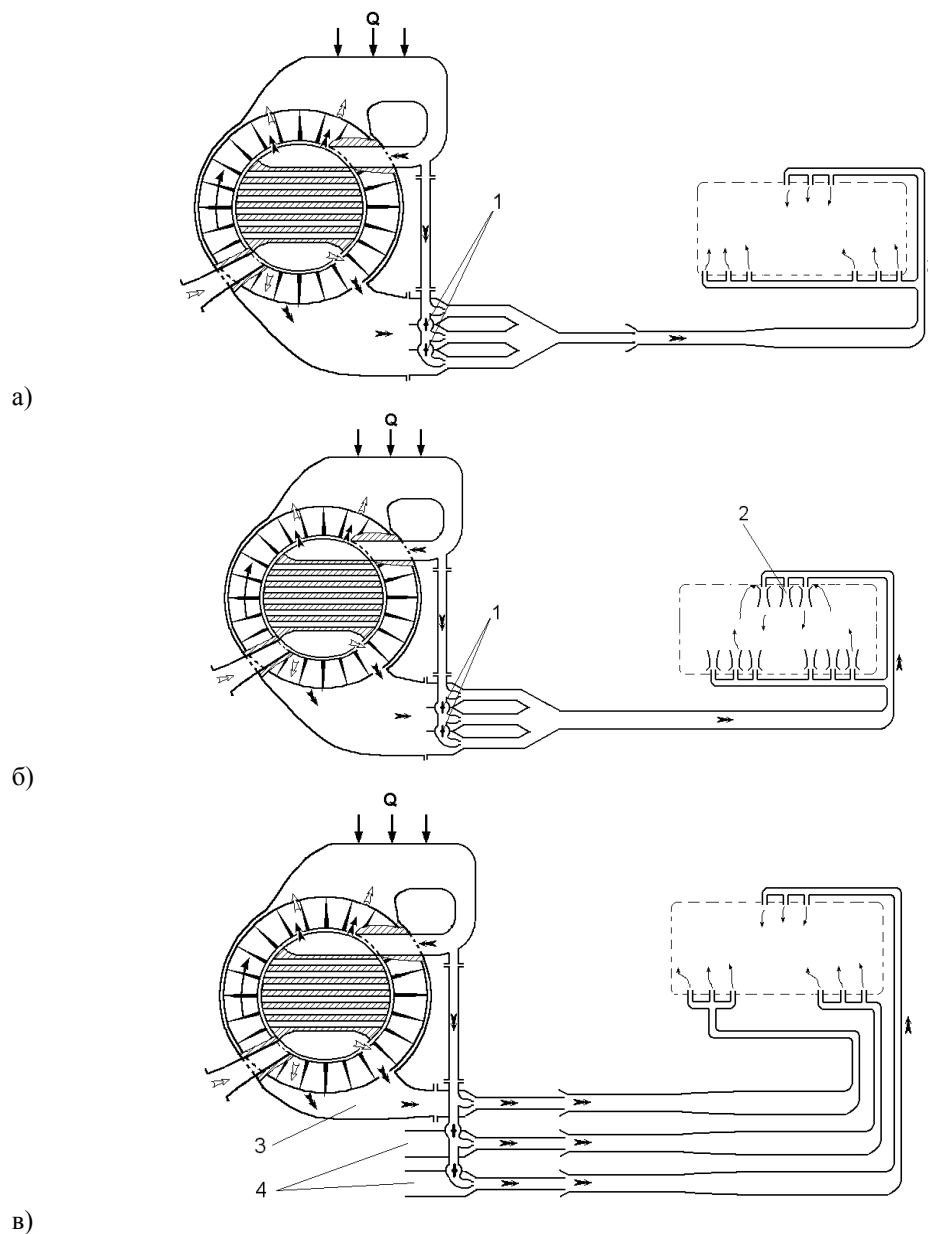


Рис.5. Регулируемые системы отопления

Основные отличия показанных на рис.5 вариантов регулируемых систем отопления связаны со схемным выполнением 2-й эжекторной ступени.

При выполнении второй ступени эжектора в виде эжекционных насадок 2, размещаемых непосредственно в выходных сечениях воздухораспределительной сети (см. рис.5б), вторичное разбавление горячего воздуха внутренним рециркуляционным воздухом способствует наиболее быстрому прогреву отапливаемого помещения.

Недостатками такого решения является ограниченная сменяемость воздуха в пассажирском салоне притоком наружного воздуха. В варианте исполнения отопительной системы с автономными контурами продувочной и приточной магистралей, содержащими последовательно размещенные ступени эжектора (рис.5в) достигается разделение воздушных потоков с различной температурой. Целесообразность генерирования воздушных потоков с различной температурой обусловлена расширением универсальности отопительной системы в случаях одновременного обогрева отдельных помещений, локальных поверхностей и агрегатов подвижного состава с различными теплофизическими характеристиками.

При использовании в качестве источника теплоты рабочего цикла ГКТС топочных камер или отработавших газов дизеля температура газового потока, покидающего теплообменник вытеснительного контура ГКТС, сохраняется достаточно высокой, поскольку не опускается ниже температуры рабочего тела в ячейках ротора в конце процесса каскадного сжатия. Более полное использование теплового потенциала источника теплоты возможно в схемах (рис.6), предусматривающих вторичную утилизацию газового потока на выходе из теплообменника 1 вытеснительного контура для подогрева наружного воздуха в пассивном сопле 2 первой или второй ступени эжектора.

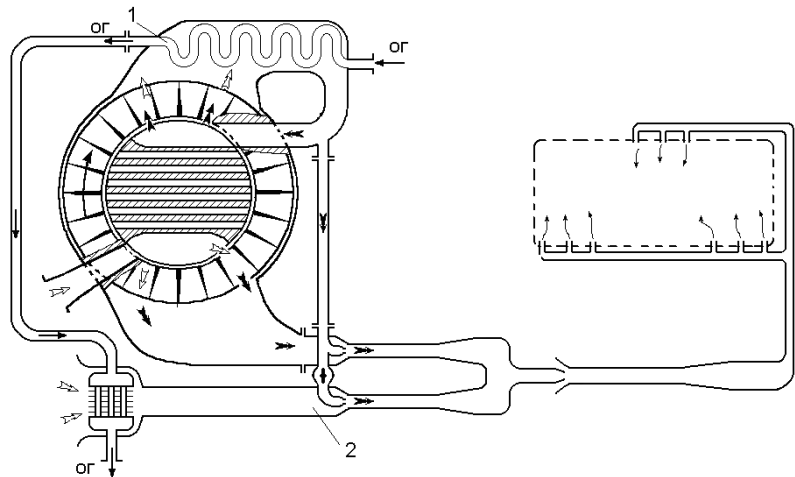


Рис.6. Отопительная система с утилизацией остаточной теплоты газового потока, покидающего теплообменник вытеснительного контура ГКТС

Проблемным аспектом такого способа утилизации «сбросной» теплоты является необходимость разбавления горячего потока значительным количеством наружным воздухом, что затруднительно при ограниченном числе ступеней эжектора.

Наиболее универсальной является представленная на рис.7 система смешанного отопления, в которой остаточное тепло газов отводится в контур водяного отопления вагона.

Дополнение ОВС КТС водяным контуром позволяет заметно повысить КПД системы, за счет наиболее полного использования потоков сбросной теплоты, а также решает проблему снижения температуры поступающего в салон воздуха до комфортных значений путем промежуточного охлаждения потока после первой ступени эжектора.

Жидкость водяного контура, подогреваемая в начале в теплообменнике 1 эжекторной ступени и затем в теплообменнике 2 утилизации «сбросной» теплоты отработавших газов, поводится в радиаторы 3, размещенные внутри обогреваемого салона. Дополнительное охлаждение воздуха, подаваемого в салон до комфортных значений, осуществляется на участке воздушной магистрали, снабженной ребрами охлаждения. Оребренный участок 7 воздушной магистрали размещается непосредственно в обогреваемом салоне и таким образом, выполняет функции дополнительного радиатора конвективного отопления.

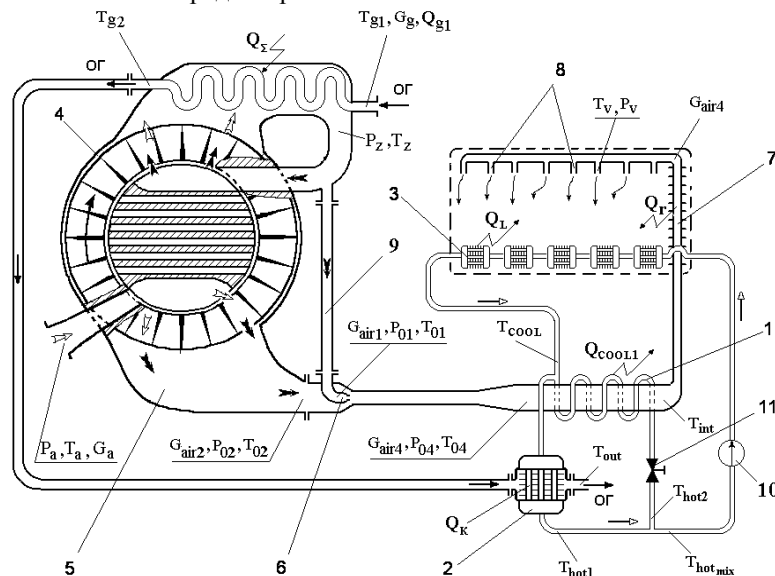


Рис.7. Система смешанного отопления с утилизацией остаточной теплоты газового потока в водяном контуре

Выводы. Разработаны рабочий цикл, схемные решения и конструкция принципиально нового устройства отопительно-вентиляционной системы каскадно-теплого сжатия, защищенный патентами Украины и России.

Обоснована целесообразность использования в качестве источника энергии отопительно-вентиляционных систем генераторов каскадно-теплого сжатия, реализующих прямое преобразование теплоты в энергию сжатого воздуха в устройствах, не содержащих объемных вытеснителей и дискретно управляемых газораспределительных органов.

Установлено, что наиболее полное использование теплового потенциала источника теплоты возможно в схемах, предусматривающих вторичную утилизацию газового потока на выходе из теплообменника вытеснительного контура для подогрева наружного воздуха в пассивном сопле эжектора.

Литература

1. Крайнюк А.И. Системы газодинамического наддува/ А.И.Крайнюк, Ю.В.Сторчеус; Монография. – Луганск: Изд-во Восточноукр.гос.ун-та, 2000. –224с.
2. Отопительно-вентиляционные системы для подвижного состава на основе каскадных энергообменников: монография / [Ю. В. Сторчеус, А. А. Данилейченко, В. П. Левчук, и др.]; под ред. Ю. В. Сторчеуса. – Луганск : изд-во «Ноулидж», 2013. – 106 с.
3. Крайнюк А. И. Исследования физической сущности процессов трансформации энергии на принципах каскадно-теплого сжатия: монография / А. И. Крайнюк, Ю. В. Сторчеус ; [отв. ред. Ю. В. Сторчеус]. – Луганск : изд-во «Ноулидж», 2012. – 118 с.
4. Крайнюк А. И. Применение эффекта теплового сжатия для улучшения энергоиспользования в теплосиловых установках / А. И. Крайнюк, Ю. В. Сторчеус, А. А. Данилейченко // Baltic association of mechanical engineering experts: col. of res. pap. – Kaliningrad, 2001. – №1.– p. 232 - 241.
5. Компрессор теплового сжатия: Патент РФ №2189497, МПК7 F04B19/24/ Крайнюк А.И., Богославский А.Е., Сторчеус Ю.В., Данилейченко А.А., Васильев И.П., Крайнюк А.А. - №2000106844; Заявл. 20.03.2000; Оpubл.20.09.2002, Бюл. №26. – 18 с.
6. Компрессор теплового сжатия: Патент Украины №37772А, МПК7 F04D25/00/ Крайнюк О.И., Богославский О.С., Сторчеус Ю.В., Данилейченко А.А., Гогуля А.М., Васильев И.П., Крайнюк А.О. -№200042132; Заявл. 14.04.2000; Оpubл. 15.05.2001, Бюл. №4. –5 с.
7. Обігрівач салону транспортного засоба :Патент України №69934, МПК7 F 15 D 1/00. / Крайнюк О. І., Гогуля А. М., Крайнюк А. О.; Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (UA).- № 20031211690; Заявлено 16.12.03; Оpubл.15.09.04. Бюл. №9.
8. Сторчеус Ю. В. Каскадные трансформаторы энергии: монография / Ю. В. Сторчеус . – Луганск : изд-во «Ноулидж», 2013. – 200 с.
9. Сторчеус Ю. В. Научная деятельность кафедры ДВС ВНУ им. В. Даля / Ю. В. Сторчеус // Двигатели внутреннего сгорания: сб. науч. тр. / НТУ «ХПИ». – Х., 2011.- № 1. – С. 68 - 72.

References

1. Krajnjuk A.I. Sistemy gazodinamicheskogo nadduva/ A.I.Krajnjuk, Ju.V.Storcheus; Monografija. –Lugansk: Izd-vo Vostochnoukr.gos.un-ta, 2000. –224s.
2. Otopitel'no-ventiljacionnye sistemy dlja podvizhnoho sostava na osnove kaskadnyh jenergoobmennikov: monografija / [Ju. V. Storcheus, A. A. Danilejchenko, V. P. Levchuk, i dr.] ; pod red. Ju. V. Storcheusa. – Lugansk : izd-vo «Noulidzh», 2013. – 106 s.
3. Krajnjuk A. I. Issledovanija fizicheskoi sushhnosti processov transformacii jenerгии na principah kaskadno-teplovogo szhatija: monografija / A. I. Krajnjuk, Ju. V. Storcheus ; [otv. red. Ju. V. Storcheus]. – Lugansk : izd-vo «Noulidzh», 2012. – 118 s.
4. Krajnjuk A. I. Primenenie jeffekta teplovogo szhatija dlja uluchshenija jenergoispol'zovanija v teplosilovyh ustanovkah / A. I. Krajnjuk, Ju. V. Storcheus, A. A. Danilejchenko // Baltic association of mechanical engineering experts: sol. of res. pap. – Kaliningrad, 2001. – №1.– p. 232 - 241.
5. Kompessor teplovogo szhatija: Patent RF №2189497, МПК7 F04B19/24/ Krajnjuk A.I., Bogoslavskij A.E., Storcheus Ju.V., Danilejchenko A.A., Vasil'ev I.P., Krajnjuk A.A. - №2000106844; Zajavl. 20.03.2000; Opubl.20.09.2002, Bjul. №26. – 18 s.
6. Kompresor teplovogo stisku: Patent Ukraini №37772A, МПК7 F04D25/00/ Krajnjuk O.I., Bogoslavskij O.C., Storcheus Ju.V., Danilejchenko A.A., Gogulja A.M., Vasil'ev I.P., Krajnjuk A.O. -№200042132; Zajavl. 14.04.2000; Opubl. 15.05.2001, Bjul. №4. –5 s.
7. Obigrivach salonu transportnogo zasoba :Patent Ukraini №69934, МПК7 F 15 D 1/00. / Krajnjuk O. І., Gogulja A. М., Krajnjuk А. О.; Shidnoukraїns'kij nacional'nij universitet imeni Volodimira Dalja (UA).- № 20031211690; Zajavleno 16.12.03; Opubl.15.09.04. Bjul. №9.
8. Storcheus Ju. V. Kaskadnye transformatory jenerгии: monografija / Ju. V. Storcheus . – Lugansk : izd-vo «Noulidzh», 2013. – 200 s.
9. Storcheus Ju. V. Nauchnaja dejatel'nost' kafedry DVS VNU im. V. Dalja / Ju. V. Storcheus // Dvigateli vnutrennego sgoranija: sb. nauch. tr. / NTU «HPI». – H., 2011.- № 1. – S. 68 - 72.

У статті розглянуті перспективні схеми опалювально-вентиляційних систем для транспортних установок, що працюють на принципах каскадно-теплового стиску. Виявлені й проаналізовані фізичні особливості робочого процесу генератора каскадно-теплового стиску, запропоновані концепції вдосконалювання його властивостей. Розкриті шляхи підвищення ефективності роботи опалювально-вентиляційних систем і запропоновані різні схемні розв'язки, що забезпечують їхню максимальну продуктивність в умовах експлуатації.

Ключові слова: каскадно-тепловий стиск, генератор газів, транспортна опалювальна система, ефективність, ротор.

In article perspective schemes of heating and ventilating systems for the transport units, working at the principles of cascade and thermal compression are considered. Physical features of working process of the generator of cascade and thermal compression are revealed and analyzed, concepts of improvement of its properties are offered. Ways of increase of overall performance of heating and ventilating systems are opened and the various circuit solutions providing their maximum productivity under operating conditions are proposed.

Keywords: cascade-heating pressure, generator of gases, transports heating system, efficiency, rotor.

Сторчеус Ю.В. – канд. техн. наук, доцент кафедри ДВС и машиноведение ВНУ им.В.Даля

Данилейченко А.А. – канд. техн. наук, доцент кафедри ДВС и машиноведение ВНУ им.В.Даля

Портнов А.С. – аспирант кафедры ДВС и машиноведение ВНУ им.В.Даля

Рецензент: Куликов Ю.А. докт.техн.наук, профессор ВНУ им.В.Даля

Starcheous Yu.V., Danileychenko A.A., Portnov A.S.

DEVELOPMENT OF TRANSPORT HEATING SYSTEMS WITH CASCADE TRANSFORMERS OF ENERGY

In article perspective schemes of heating and ventilating systems for the transport units, working at the principles of cascade and thermal compression are considered. Physical features of working process of the generator of cascade and thermal compression are revealed and analyzed, concepts of improvement of its properties are offered. Ways of increase of overall performance of heating and ventilating systems are opened and the various circuit solutions providing their maximum productivity under operating conditions are proposed.

Keywords: cascade-heating pressure, generator of gases, transports heating system, efficiency, rotor.

Relevance of research. In a total amount of consumption of energy by passenger train the considerable share is made by costs of providing a microclimate in cars and a cabin of the driver of the locomotive. In the conditions of the increasing competition in the market of transport services the requirement for maintenance of comfortable sanitary and hygienic parameters in rooms of a rolling stock at simultaneous decrease in the energy consumed by systems of heating, air supply and conditioning are of particular importance.

The considerable reserve of increase of competitiveness of railway transport in passenger traffic is connected with increase of level of comfort in rooms of a rolling stock. Level of comfort of a trip on railway transport in many respects depends on a microclimate in salons of the rolling stock which parameters, and, first of all temperature, humidity, a dust content and a chemical composition of air, directly influence health of passengers and subjective perception of duration of journey.

Problem statement. Need of increase of efficiency of systems of heating and ventilation, search of the decisions possessing higher profitability, predetermines creation of new classes, schemes and the principles of action of heating systems. Significant progress in this direction can be made when using as a basic element of heating and ventilating systems of one of versions of cascade transformers of energy, namely – generators of cascade and thermal compression with an ejector step.

Theoretical analysis of research. The analysis of systems of heating and ventilation of cars shows that the best microclimatic conditions are provided by a multipoint supply of the warmed-up air in salons [1, 2]. However standard schemes of electro calorific heating have the extremely unsatisfactory power efficiency.

Functionally the greatest ability to provide sanitary and hygienic requirements to a microclimate in rooms of a rolling stock air (calorific) heating system possesses. Its advantages treats: simplicity of regulation of air temperature in car salon; reliability of a food of the heaters placed in one place; high level of safety for passengers; possibility of a combination of electric system about the steam; continuous inflow to salon of fresh air [2, 3]. At the same time, air (electro calorific) heating is characterized by very small efficiency.

It is necessary to notice that power imperfection, as a whole, is typical for all systems of electric heating. The main reason consists in irrationality of the return transformation of the refined electric energy in the thermal. Really, warmly in essence is dissipative energy, and can serve as an indicator of imperfection or irreversibility of converting processes in transforming units and power machines.

Especially obvious inexpediency of use of the electric power as a source of warmth is shown in trains with diesel draft where on the one hand the electric power is a product of double transformation (with thermal in mechanical – in the diesel; and mechanical in the electric – in the generator), and on the other hand - branch of warmth in the power unit of a locomotive is a necessary condition of the organization of working process of a diesel cycle. Thus we will note that the warmth which is taken away in the cooling system of the diesel and with fulfilled gases, almost twice exceeds the warmth transformed to useful mechanical energy on a shaft of the engine [2, 4].

Lower value of efficiency of air systems of heating is caused by big costs of energy of heat transportation by an air stream. The compressed air is a product of the high-tech processing which receiving in the conditions of a rolling stock assumes use of the 3rd or 4th units with the restrictions by efficiency of converting processes (cycles). For example, in case of diesel draft production of the compressed air is carried out according to the scheme:

- transformation of warmth of combustion of fuel to mechanical energy (diesel, $\eta_a = 0,32 \dots 0,34$);
- transformation of electric energy in electric (the generator $\eta_g = 0,84 \dots 0,85$);
- transformation of electric energy in mechanical the compressor drive (the electric motor $\eta_{em} = 0,8 \dots 0,85$);
- transformation of mechanical energy to located work of the compressed air (the compressor $\eta_c = 0,7 \dots 0,72$).

Thus, the general efficiency of transformation of thermal energy in the potential of the compressed air on condition of nominal operating modes of all units makes $\eta_{general} = \eta_a \eta_g \eta_{em} \eta_c = 0,15 \dots 0,18$.

In a type of high cost intensity of process of forcing of air power expediency of decrease in the general level of pressure in the highway of an air duct of heating system that can be reached by use of the individual fans placed in close proximity to is obvious snuffed supply of heated air in warmed zones. Such decision is interfaced to unjustified increase in quantity of heating elements and the motor fans, complicating the structure of heating system and reducing its reliability. Thus very it isn't simple to suppress the noise created by operation of fans.

The analysis of systems of heating and ventilation of cars shows that the best microclimatic conditions are provided by a multipoint supply of the warmed-up air in salons. However standard schemes of electro calorific heating have the extremely unsatisfactory power efficiency.

Costs of power of ensuring comfort make considerable part of power consumed by train. In fig. 1 average annual distribution of consumed energy standardized by intercity train Federal iron expensively to Switzerland (SBB) by weight 600t is shown at acceleration of 0,1 m / c2 on lifting of 10%.

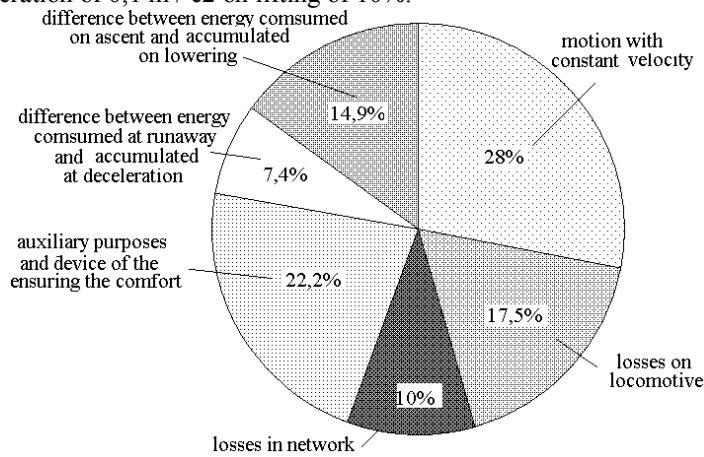


Fig.1. Settlement distribution of annual power consumption for the standardized train

At train movement without acceleration on horizontal sites of the road, and also during stops specific costs of the auxiliary purposes and ensuring comfort increase.

Article purpose. The purpose of article is identification of the major factors defining efficiency of application of the principles of cascade energy exchange in systems of heating of transport installations.

Research problems. The main objectives of research was development of highly effective schemes of systems of heating on the basis of cascade transformers of energy.

Results of research. The perspective direction of development of heating and ventilation is connected with creation of generators of the hot air based on use of effect of the cascade and thermal compression (CTC). Essence of a running cycle of CHP developed under the direction of professor Kraynyuk A.I. consists in direct transformation of heat to energy of the compressed air. Thermodynamic cycle CHP can be based on a number of devices: CHP compressor, generator of gas, cascade exchanger of pressure, combustion chamber of gas-turbine installation, heater of cascade and thermal compression (HCT), various systems of pressurization of ICE, etc. [5, 6, 7, 8, 9].

Besides simplicity and high reliability of a design, in a type of lack of mechanical displacers and mobile discretely operated gas-distributing bodies, CHP units are characterized by rather high efficiency even when using sources of warmth with rather low temperature potential that causes appeal of their application, including, as utilization systems as a part of traditional heat power plants. The principle of action and the description of the first CHP devices are opened in works [2, 4, 8, 9].

Now on ICE chair and engineering science of the East Ukrainian University of V. Dahl efficient prototypes of the CHP unit which scheme is shown in fig. 2 are created.

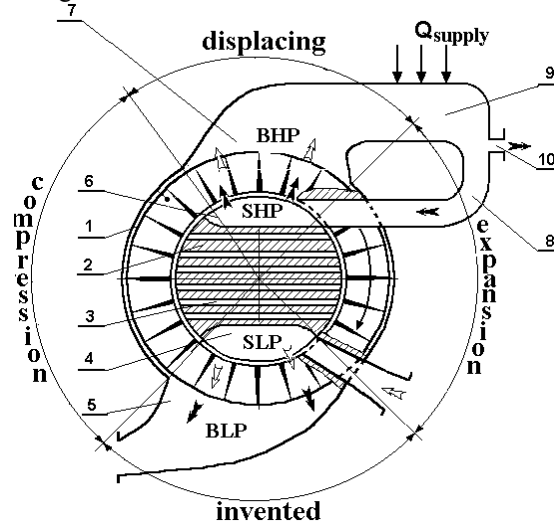


Fig. 2. Schematic diagram of the generator of cascade and thermal compression

The CHP unit contains a rotor 1 covering a stator 2, containing the pressure exchanged channels 3 which are in pairs connecting adjacent cells of a rotor of 1 and opposite 4 supply of low pressure (SLP) located a window and a

window 6 of the supply of a high pressure (SHP). The external surface of a rotor 1 is captured by a casing including a window 5 of the branch of low pressure (BLP) and a window 7 of the branch of a high pressure (BHP), and the window 6 PVD and a window 7 Department of Internal Affairs are connected by a displacement path 8 to the heat exchanger 9 of a utilization contour. On a site of a displacement path 8 connecting the heat exchanger 9 and a window of Department of Internal Affairs 7, the branch pipe of the 10th branch of the squeezed working body is located to the consumer.

In the course of rotation of a rotor 1 (clockwise) each of cells of a rotor 1 is consistently reported with pressure exchanged channels 3 stator 2 through which in it the working body from adjacent cells of a site of expansion arrives. As a result of cascade compression pressure in a cell gradually increases to the certain value depending on thermodynamic parameters of a working body at the beginning of process of expansion.

At the message of considered cells with windows of a high pressure (6 PVD and 7 Department of Internal Affairs) displacement path under the influence of centrifugal forces or compulsory circulation replacement previously the air charge squeezed in a cell by the warmed-up source of warmth air or gases (in case of use of the camera of internal combustion) is carried out.

Thereof in a displacement path 8 and reported with it cells the maximum pressure of a cycle exceeding pressure of cascade compression is established. The part of the compressed air from a displacement path 8 is taken away to the consumer through a branch pipe 10 placed just before a source of warmth.

In the period of the subsequent message of cells with pressure exchanged channels 3 the part of a working body is taken away to adjacent cells of a site of compression that is accompanied by pressure drop in considered cells. Thus, work of expansion is spent for compression of an air charge in the course of a cascade mass exchange. Residual pressure at the end of expansion process as the indirect indicator of perfection of working process, depends on number of pressure exchanged channels, aspiring to atmospheric with increase in the last.

And, at last, the purge of cells the air charge, carried out during connection of cells to windows of low pressure of PND and OND, closes a running cycle of the CHP unit.

Despite uniqueness of the device, working process of the CHP unit doesn't contradict the classical principles of the organization of working process of heat power machines. Really, the running cycle in a cell of a rotor can be divided into the following processes conditionally:

- compression process at cell movement from the PND window until its combination with the PVD window, being accompanied step increase of pressure in a cell, owing to a supply of part of a working body from adjacent cells of a rotor via stator channels;
- the process of the replacement including stages of increase of pressure in a cell with previously squeezed working body up to the maximum pressure of a cycle, during its connection to the PVD and Department of Internal Affairs windows with simultaneous replacement from a cell and pushing through of a working body via the heat exchanger where its heating, and also branch from the displacement highway of part of the squeezed working body to the consumer with the maximum pressure of cycle CHP is carried out;
- expansion process, as a result of branch of part of a working body via stator channels in adjacent cells of a rotor;
- process of a purge of a cell by fresh air in the period of its message with the PND and OND blowing-off windows.

In relation to railway transport interest represents, for example, use of the generator of hot air in heating systems of a rolling stock. The obvious advantage of a heater of CHP, along with the low cost of service, autonomy in view of working capacity preservation is at a de-energization of the power supply network, also possibilities of operation on different types of fuel and from any source of warmth. Thanks to forcing of hot air directly heat carrier transportation in local zones of warmed object is carried out by the CHP unit without use of the driving compressor or the fan.

Other direction of development of devices of cascade compression is connected with creation of exchangers of pressure, for example, ICE used for pressurization.

In the cascade exchanger of pressure (CEP) air compression like the wave exchanger of pressure (WEP) is carried out as a result of direct contact with squeezing gas, however in process with significantly excellent distribution of power substances. The principle of action the CEP is opened in works [8, 9].

Advantages of a running cycle the CEP concerning WATERS are caused by the following.

Wave character of an exchange of energy and forcing of the compressed air predetermines high sensitivity of working process of WATERS to a picture of interaction of primary waves with forward edges of the gas-distributing windows, easily destroyed at a deviation of frequency of rotation of a rotor or parameters of squeezing gas from calculated values. However and on a settlement mode pulse compression of a charge is accompanied by the losses connected with dispersion of energy of formed waves as a result of their counter interaction and reflection in boundary sections of a cell.

Completeness of replacement of the compressed air through the VVD window has even more noticeable impact on efficiency of WATERS. The increase in a share of the compressed air which has remained in a cell (after its dissociation with windows of a high pressure) causes almost proportional decrease in efficiency, to similarly negative influence of so-called "dead" volume in the piston compressor.

Considering existence in a cell of a zone of hashing of squeezing and compressed gases to carry out full replacement of the squeezed charge of air, having excluded exhaust squeezing gas in the VND window, it is rather

problematic. Especially much noted factors are shown at increase in a pressure of an exchanger with change of frequency of rotation of a rotor.

On a settlement operating mode the generator of cascade thermal compression forces hot air with high temperature and pressure depending on the maximum temperature of a cycle and the relative expense which is taken away to the consumer of air to components from 0,2 to 0,6 MPa. Noted thermodynamic parameters of generated air, allow to carry out transportation of heat to remote zones cars by means of an air duct with rather small section through passage with the subsequent dilution of hot air cold in the ejector cameras of mixture placed in branching of a communication network. Use of the ejector I snuffed, differing high reliability and simplicity, allows not only to reduce temperature of air arriving in salon to comfortable values, but also considerably to increase its expense.

Despite low efficiency of jet pumps their application as a part of heaters of CHP is justified as the dissipative component of an exchange of energy will be transformed to heat used directly in heating system.

The schematic diagram of the elementary system of heating with the CHP generator is shown in fig. 3.

1 hot air forced by the CHP generator is brought to an active nozzle of the ejector 2 which passive nozzle is reported with a blowing-off path 4 GCHP. As a result of mixture in the ejector 5 camera, hot air is diluted with the blowing-off stream consisting of a mix of external blowing-off air and residual hot air, a rotor forced out from cells 6.

Here warmth of the residual air which is forced out from cells of a rotor remains in a contour of heating system. Thus connection of a blowing-off path 4 to the ejector 5 solves a problem of cleaning of cells 6 that promotes increase of overall performance of GCHP and simplification of its device.

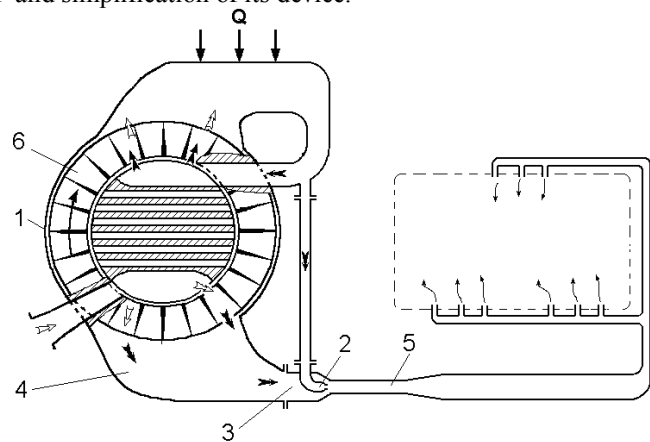


Fig. 3. Heating system with one-stage ejection of air

Average temperature of a blowing-off stream in a passive nozzle 3 depends on coefficient of blowing-off air and in some cases, taking into account limited values of coefficient of ejection of one step, is high from the point of view of necessary comfortable cooling of warming air in output sections of a heating network. In case of the excessive temperature of warming air comfortable parameters of a microclimate in salon can be reached by additional dilution of calorific air in the second step of the ejector.

In the scheme shown in fig. 4 acceptable temperature of air arriving in salon, it is provided with the corresponding choice of total coefficient of ejection in two steps of the ejector.

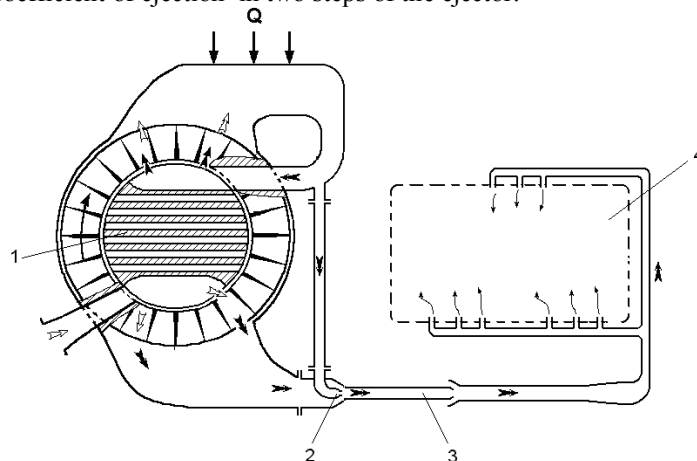


Fig. 4. Heating system with two-level ejection of air

At change of conditions of environment regulation of a temperature mode in salon of the car is carried out by change of power of a source of a supply of warmth in a displacement contour of GCHP. At the same time, for maintenance of necessary pressure in the pressure head highway of a calorific network the maximum pressure of P_z of a running cycle of GCHP on partial working hours of system on has to change considerably.

Noted condition is realized in adjustable systems of heating (fig. 5) with the divided cameras of mixture of the first ejector step. At temperature increase of environment and the corresponding reduction of a thermal stream in a displacement path of GCHP necessary level of the maximum pressure of P_z is provided thanks to reduction of an expense of the active environment which is taken away from a displacement contour of GCHP, a way of overlapping of one or several active snuffed the 1st ejector step gates 1 specially provided for this purpose.

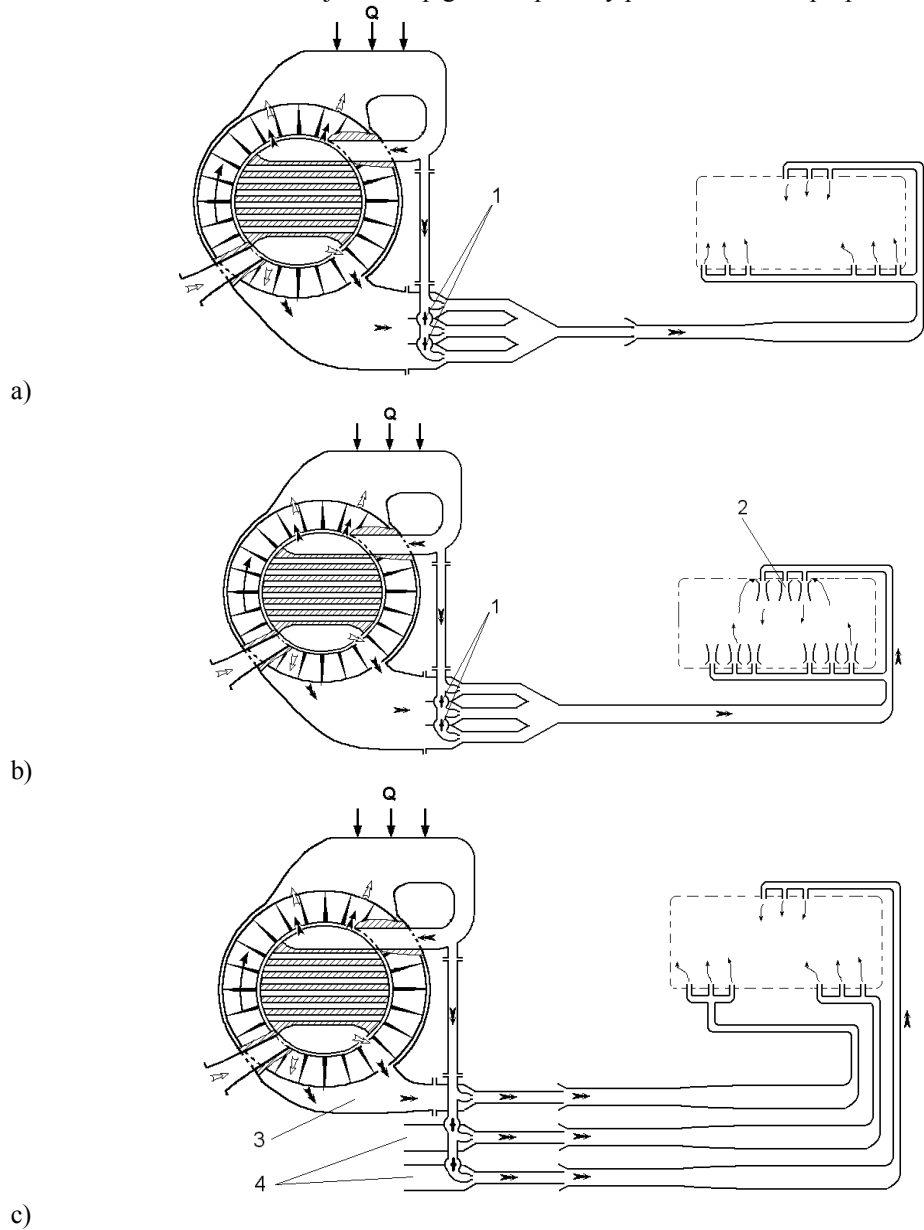


Fig. 5. Adjustable systems of heating

The main differences of 5 options of adjustable systems of heating shown in fig. are connected with circuit performance of the 2nd ejector step.

When performing the second step of the ejector in the form of the ejector nozzles 2 placed directly in output sections of an air distributing network (see fig. 5b), secondary dilution of hot air by internal recirculation air promotes the fastest warming up of the heated room.

Shortcomings of such decision is limited removability of air in passenger salon inflow of external air. In option of execution of heating system with the antimony contours of the blowing-off and stitched highways containing consistently placed steps of the ejector (fig. 5c) division of air streams with a various temperature is reached. Expediency of generating of air streams with a various temperature is caused by expansion of universality of heating system in cases of simultaneous heating of certain rooms, local surfaces and units of a rolling stock with various heatphysical characteristics.

When using as a source of warmth of a running cycle of GCHP of furnace cameras or the fulfilled gases of the diesel temperature of the gas stream leaving the heat exchanger of a displacement contour of GCHP, remains rather high as lower than temperature of a working body in rotor cells at the end of process of cascade compression doesn't fall. Fuller use of thermal potential of a source of warmth possibly in the schemes (fig. 6) providing secondary

utilization of a gas stream at the exit from the heat exchanger of 1 displacement contour for heating of external air in a passive nozzle of 2 first or second steps of the ejector.

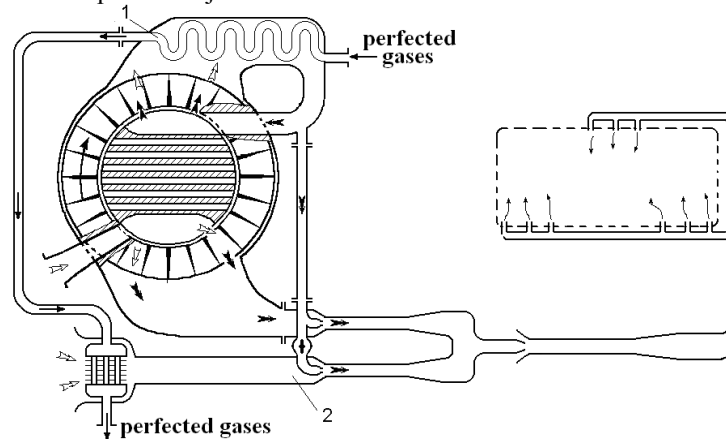


Fig. 6. Heating system with utilization of residual warmth of the gas stream leaving the heat exchanger of a displacement contour of GCHP

Problem aspect of such way of utilization of "waste" warmth is need of dilution of a hot stream a significant amount external air that is difficult at limited number of steps of the ejector.

The most universal is the system of the mixed heating presented in fig. 7 in which residual heat of gases is taken away in a contour of water heating of the car.

HVS CHP addition with a water contour allows to increase considerably system efficiency, at the expense of the fullest use of streams of waste warmth, and also solves a problem of decrease in temperature of air arriving in salon to comfortable values by intermediate cooling of a stream after the first step of the ejector.

The liquid of the water contour which is warmed up at the beginning in the heat exchanger of 1 ejector step and then in the heat exchanger of 2 utilization of "waste" warmth of fulfilled gases, are moved in the radiators 3 placed in warmed salon. Additional cooling of the air given to salon to comfortable values, is carried out on a site of the air route supplied with edges of cooling. The ridges of the fig.7 air route takes place directly in warmed salon and thus, carries out functions of an additional radiator of convective heating.

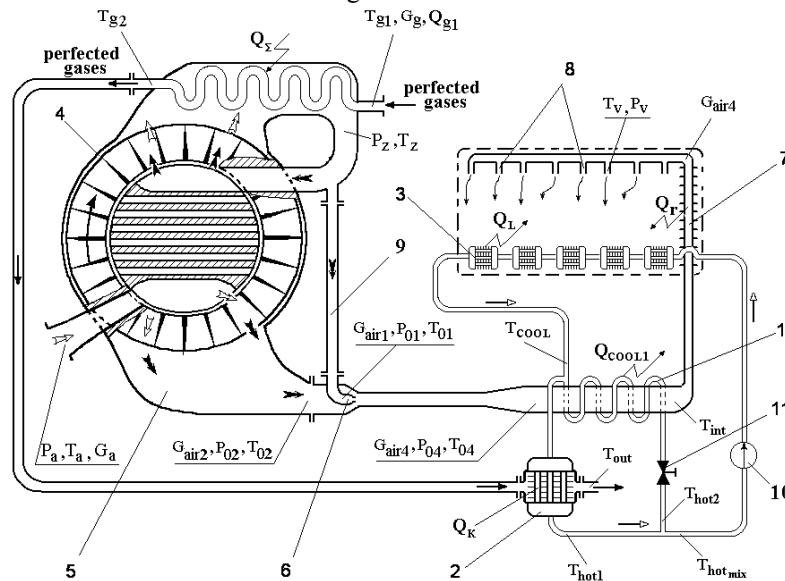


Fig. 7. System of the mixed heating with utilization of residual warmth of a gas stream in a water contour

Conclusions. The running cycle, circuit decisions and design of essentially new structure of heating and ventilating system of the cascade and thermal compression, protected by patents of Ukraine and Russia are developed.

Expediency of use as a power source of heating and ventilating systems of generators cascade and thermal pressure, realizing direct transformation of warmth to energy of the compressed air in the devices which aren't containing volume displacers and discretely operated gas-distributing bodies is proved.

It is established that the fullest use of thermal potential of a source of warmth possibly in the schemes providing secondary utilization of a gas stream at the exit from the heat exchanger of a displacement contour for heating of external air in a passive nozzle of the ejector.

References

10. Krajnjuk A.I. Sistemy gazodinamicheskogo nadduva/ A.I.Krajnjuk, Ju.V.Storcheus; Monografija. –Lugansk: Izd-vo Vostochnoukr.gos.un-ta, 2000. –224s.
11. Otopitel'no-ventiljacionnye sistemy dlja podvizhnogo sostava na osnove kaskadnyh jenergoobmennikov: monografija / [Ju. V. Storcheus, A. A. Danilejchenko, V. P. Levchuk, i dr.] ; pod red. Ju. V. Storcheusa. – Lugansk : izd-vo «Noulidzh», 2013. – 106 s.
12. Krajnjuk A. I. Issledovanija fizicheskoj sushhnosti processov transformacii jenerгии na principah kaskadno-teplovogo szhatija: monografija / A. I. Krajnjuk, Ju. V. Storcheus ; [otv. red. Ju. V. Storcheus]. – Lugansk : izd-vo «Noulidzh», 2012. – 118 s.
13. Krajnjuk A. I. Primenenie jeffekta teplovogo szhatija dlja uluchshenija jenergoispol'zovanija v teplosilovyh ustanovkah / A. I. Krajnjuk, Ju. V. Storcheus, A. A. Danilejchenko // Baltic association of mechanical engineering experts: sol. of res. pap. – Kaliningrad, 2001. – №1.– p. 232 - 241.
14. Kompresor teplovogo szhatija: Patent RF №2189497, MPK7 F04B19/24/ Krajnjuk A.I., Bogoslavskij A.E., Storcheus Ju.V., Danilejchenko A.A., Vasil'ev I.P., Krajnjuk A.A. - №2000106844; Zajavl. 20.03.2000; Opubl.20.09.2002, Bjul. №26. – 18 s.
15. Kompresor teplovogo stisku: Patent Ukraïni №37772A, MPK7 F04D25/00/ Krajnjuk O.I., Bogoslavskij O.E., Storcheus Ju.V., Danilejchenko A., Gogulja A.M., Vasil'ev I.P., Krajnjuk A.O. -№200042132; Zajavl. 14.04.2000; Opubl. 15.05.2001, Bjul. №4. –5 s.
16. Obigrivach salonu transportnogo zasoba :Patent Ukraïni №69934, MPK7 F 15 D 1/00. / Krajnjuk O. I., Gogulja A. M., Krajnjuk A. O.; Shidnoukraïns'kij nacional'nij universitet imeni Volodimira Dalja (UA).- № 20031211690; Zajavleno 16.12.03; Opubl.15.09.04. Bjul. №9.
17. Storcheus Ju. V. Kaskadnye transformatory jenerгии: monografija / Ju. V. Storcheus . – Lugansk : izd-vo «Noulidzh», 2013. – 200 s.
18. Storcheus Ju. V. Nauchnaja dejatel'nost' kafedry DVS VNU im. V. Dalja / Ju. V. Storcheus // Dvigateli vnutrennego sgoranija: sb. nauch. tr. / NTU «HPI». – H., 2011.- № 1. – S. 68 - 72.