

УДК 621.438.002 (075.8)

Мобильная энергоопреснительная установка с газотурбинным приводом

04, апрель 2012

Скибин Д.А.

*Студент,
кафедры «Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки»*

*Научный руководитель В.Л. Иванов
К.т.н., доцент кафедры «Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки»*

МГТУ им. Н.Э. Баумана
bauman@bmstu.ru

Страшные экологические катастрофы последних лет - землетрясения, цунами, опустошающие лесные и степные пожары, пожары на торфяниках приводят к большим человеческим жертвам не только от самой катастрофы, но и трагических ее последствий. Разрушена вся инфраструктура, нет электричества, нет питьевой воды, нет энергоисточников, на базе которых можно быстро начать спасательные работы, подавить очаги возгорания, дать питьевую воду, развернуть временный госпиталь, предотвратить эпидемии, др.

Катастрофические землетрясения и цунами на Гаити, в Индонезии, других регионах планеты показали, что службы МЧС стран мира не располагают мобильными энерго-технологическими устройствами, с помощью которых можно было бы предельно быстро приступить к ликвидации последствий стихийного бедствия. Но такое устройство- энергоопреснительная установка с дополнительными функциями производства товарной электроэнергии и горячего водоснабжения может быть создано на базе газотурбинных технологий.

Основные требования, которым должен удовлетворять подобный агрегат можно сформулировать так:

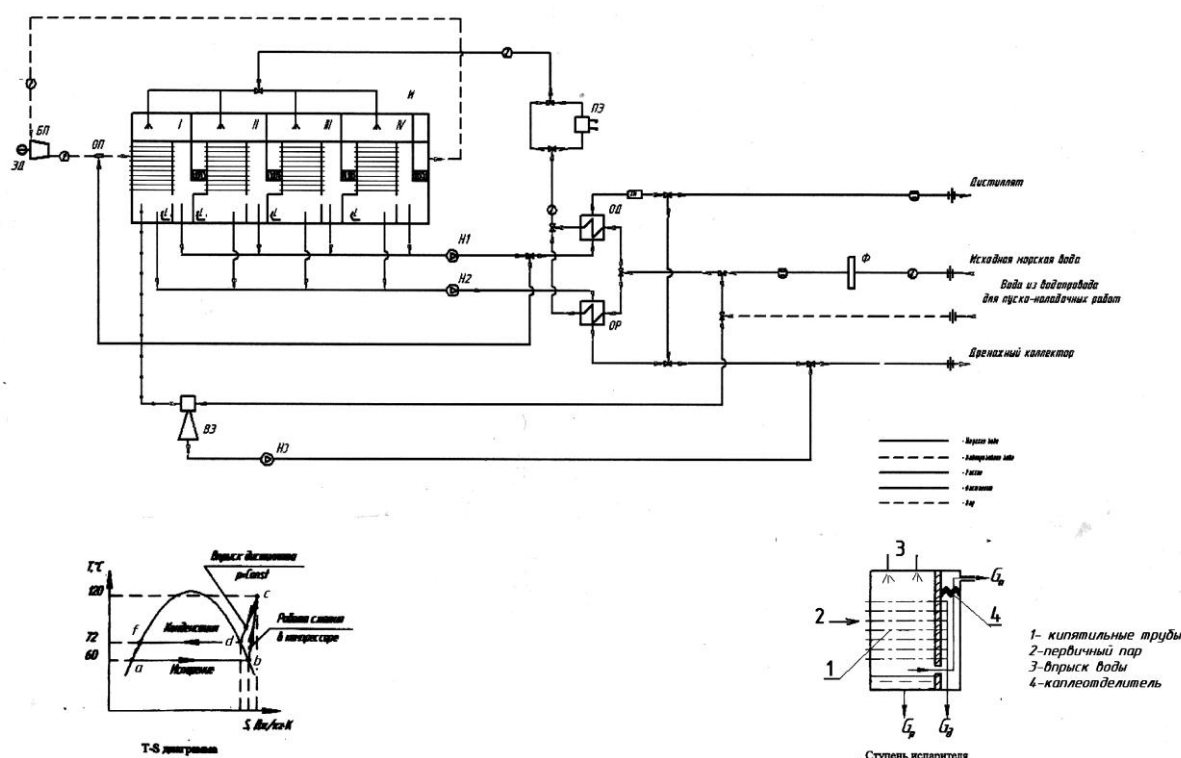
- полная независимость от внешних энергоисточников,
- высокая мобильность и быстрота развертывания в рабочее состояние,
- высокая работоспособность и надежность в сложных условиях эксплуатации (колебание почвы, высокая запыленность атмосферы, ударные нагрузки, др.)
- возможность быстрой доставки к месту использования и быстрая передислокации на местности,
- простота технического обслуживания,
- высокая топливная экономичность.
- возможность работы в следующих режимах:
 - электроснабжение плюс опресненная вода
 - электроснабжение плюс опресненная вода плюс горячее водоснабжение

Газотурбинная установка в наибольшей степени может удовлетворить таким требованиям в качестве энергоагрегата многофункциональной энергоопреснительной установки.

Мобильная энергоопреснительная установка может быть смонтирована в кузове полуприцепа большегрузного автомобиля по типу передвижной газотурбинной электростанции.

Опреснительный агрегат

При выборе опреснительного агрегата были рассмотрены различные варианты: на основе дистилляции, обратного осмоса, электродиализа и, наконец, вымораживания. В качестве наиболее производительного и отработанного десятилетиями, широко используемого в промышленных масштабах был выбран метод дистилляции. Рассматривались варианты с обогревом дистиллятора горячей водой или паром от внешнего источника (как это часто выполняется на судовых дистилляционных установках). Окончательный выбор был остановлен на пароконпрессорном опреснителе



«Каскад» разработки авиационного предприятия ФГУП ММП «Салют». Принципиальная тепловая схема опреснительной

установки представлена на рис. 1. Установка состоит из последовательно расположенных испарительных камер I, II, III, IV, в каждой из которых установлен блок кипяtilьных труб 3. В кипяtilьные трубы подается первичный пар; при этом первичным для первой камеры является пар от парового компрессора 1, а для камер II, III и IV первичным является вторичный пар предыдущей камеры. Кипяtilьные трубы орошаются идущей на опреснение морской водой по магистрали 4. Процесс дистилляции протекает в диапазоне температур от 72 до 60°C в условиях вакуумирования. Для этого в последней опреснительной камере, соединенной с паровым компрессором поддерживается вакуум (давление 20000 Па). Для поддержания вакуума в замкнутом контуре опреснительной установки первая испарительная камера соединена со струйным вакуум-насосом 12. Рабочим телом вакуум-насоса является рассол, забираемый из дренажной магистрали В и по магистрали 14 подводимый к вакуум-насосу. После

. Рис. 1. Принципиальная схема парокомпрессорной опреснительной установки:
а – термодинамический цикл процесса опреснения, в- схема испарительной камеры.

выполнения рабочих функций рассол отводится по магистрали 13 и поступает в магистраль Б морской воды для последующей повторной циркуляции в контуре опреснительной установки. Подаваемый в кипяtilьные трубы первичный пар конденсируется, дистиллят по магистрали 8 отводится в магистраль А на слив готовой продукции. Впрыскиваемая морская вода вскипает на поверхности кипяtilьных труб, образуя вторичный пар. Через каплеуловитель вторичный пар отводится в нижележащую испарительную камеру, выполняя там роль первичного пара. Неиспарившаяся часть морской воды в виде крепкого рассола по магистраль 9 отводится на дренаж. Для утилизации теплоты идущего на дренаж рассола и отводимого дистиллята в гидравлическую схему включены теплообменники 7 и 11, отбирающие теплоту на подогрев идущей на опреснение морской воды, подаваемой по магистрали Б. В режиме запуска нагрев осуществляется электронагревателем 6. Ведение процесса кипения при температуре ниже 80 °С практически не вызывает образования накипи, что приводит к длительной работе без очистки кипяtilьных труб. Вследствие процесса сжатия температура пара за паровым компрессором повышается до 120 °С. Для понижения температуры до уровня температуры первичного пара первой испарительной камеры пар охлаждают впрыском в него некоторого количества дистиллята, подаваемого в смесительный теплообменник 2 по магистрали 10. Одновременно за счет этого поддерживается постоянство циркуляционного расхода воды (пара) в замкнутом контуре опреснительной установки. В течение суток через установку проходит 53 т морской воды (кратность циркуляции 2,21). Для установки производительностью по дистилляту 24 т/сут (0,28 л/с) суммарная электрическая мощность на электропривод компрессора, магистральных насосов и вакуум-насоса не превышает 13 кВт.

Газотурбинный энергоагрегат.

Рассматривался ГТД класса мощности от 60 до 150 кВт, в пределах которого можно решить проблему энергообеспечения опреснительного агрегата, а также располагать свободной электрической мощностью для полевого госпиталя и команды МЧС (том числе для привода пожарного насоса).

В число анализируемых вошел ГТД 9И56 (и его модификации) производства Калужского предприятия КАДВИ. Первоначальный вариант ГТД был создан по заказу военных ведомств и использовался в ракетных войсках, военно-морском флоте и радиолокационных комплексах. По отзывам военных, представленных в ИНТЕРНЕТ, ГТД 9И56 показал высокую надежность в очень сложных условиях эксплуатации (пыль, грязь, динамические удары при транспортировке, др.) при простоте технического обслуживания в полевых условиях. ГТД выполнен по простой термодинамической схеме с относительно невысокой температурой перед турбиной, не требующий охлаждаемых лопаток турбины. Соответственно КПД ГТД не превышал 17..18%. Позднее на базе ГТД 9И56 было создано газотурбинное автономное средство энергоснабжения СЭС 60 мощностью 60 кВт в виде единого блока на общей подмоторной раме. Габариты, мм2500x1130x1400, сухая масса 1100 кг.

Также на базе ГТД 9И56 была создана МИНИ-ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ ТЭС-75/700 электрической мощностью 75 кВт и тепловой мощностью (утилизационный водонагреватель) 654 кВт, показанная на рис.2. Все агрегаты смонтированы в контейнере Габариты, мм ...3780x1130x3400 сухая масса 1550 кг.

Конструктивная схема ГТД 9И56 с полувыносной трубчатой камерой сгорания, а также низкая степень повышения давления, свойственная регенеративному циклу позволили рассмотреть возможность перевода ГТД на регенеративный цикл при сравнительно небольших конструктивных изменениях исходного ГТД. Был проанализирован наиболее простой вариант, в котором изменялась конструкция выходной части улитки компрессора и подвода воздуха к камере сгорания. Регенератор с пластинчато-ребристой матрицей встраивался на выходе турбины. Подвод воздуха от компрессора и отвод воздуха от регенератора к камере сгорания осуществлялся посредством внешних воздухопроводов.

Параллельно был рассмотрен вариант с регенератором высокого давления, который встраивался в газовый тракт между компрессорной и силовой турбинами. Вследствие более высокого уровня давления газа на входе в регенератор (давление за компрессорной турбиной) возрастает коэффициент теплоотдачи, уменьшается объемный расход газа через регенератор, а более высокая температура газа приводит к увеличению температурного напора в между воздухом и газом в регенераторе. Одновременно встраивание регенератора в газовый тракт между турбинами приводит к снижению удельной мощности цикла, что требует соответствующего увеличения расхода воздуха на входе в компрессор.

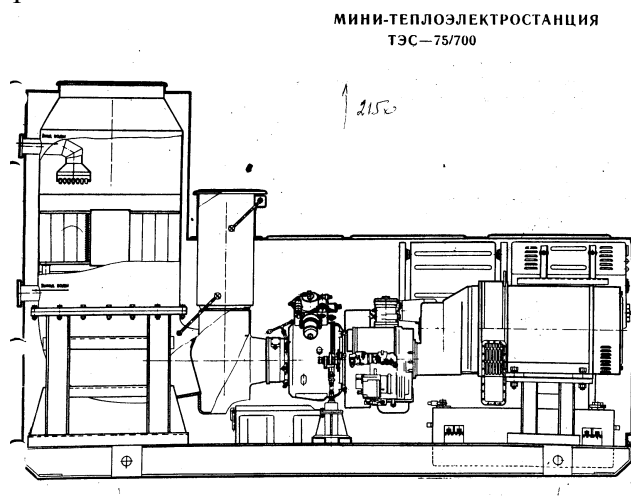


Рис. 2 Мини-теплоэлектростанция ТЭС -75/700 в контейнерном исполнении
входе в компрессор

Для малоразмерного ГТД увеличение расхода, сопровождаемое увеличением высоты лопаток и, в известной степени, является даже положительным фактором, т.к. приводит к некоторому увеличению КПД лопаточных машин. Сопоставление двух вариантов ГТД показало, что при практически одинаковых КПД газотурбинного двигателя (около 30%) масса и объем матрицы регенератора высокого давления примерно на 35% меньше соответствующих показателей регенератора ГТД с традиционным регенератором.

В качестве базового для возможного исполнения был рассмотрен конструктивный облик энергоустановки с регенератором высокого давления, представленный на рис. 3.

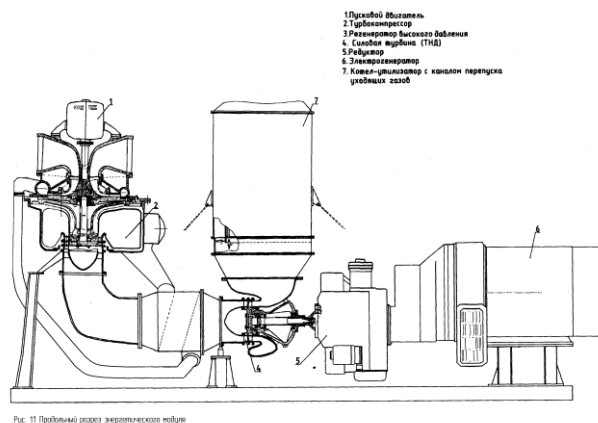


Рис. 11 Приблизный разрез энергетического модуля

Рис. 3. Газотурбинный энергоагрегат с регенератором высокого давления: 1- электростартер, 2-турбокомпрессор, 3- регенератор высокого давления, 4-турбина силовая, 5- понижающий редуктор, 6- электрогенератор, 7- утилизационный водонагреватель

Турбокомпрессорный блок с оговоренными выше изменениями повторяет конструкцию ГТД 9И56. В связи с двухвальным исполнением ГТД в турбокомпрессорный агрегат встроен пусковой стартер. Конструктивная схема силовой турбины идентична схеме компрессорной турбины. Понижающий редуктор и электрогенератор заимствованы от ТЭС-75/700. Для утилизационного водонагревателя принята перекрестная схема: одноходовая по газу и многоходовая по воде. Поверхность теплообмена трубчатая с поперечным оребрением, вода в трубах. Это позволило значительно уменьшить размер матрицы теплообменника и сократить его высоту (по ходу газа). Тем не менее энергоагрегат занимает сравнительно большой объем и характеризуется большой сухой массой, что в значительной степени является следствием применения выносного регенератора, а также тихоходного электрогенератора с приводом через понижающий редуктор. В целом такое конструктивное исполнение противоречит современным тенденциям развития малоразмерных ГТД.

Последние 10...15 лет отмечены интенсивным развитием малоразмерных высокооборотных ГТД одновальной схемы с ротором высокооборотного электрогенератора на валу турбокомпрессора и встроенным регенератором. За основу принят опыт разработки малоразмерных ГТД замкнутого цикла для космических летательных аппаратов, накопленный как в нашей стране, так и за рубежом. ГТД одновальная, компрессор центробежный, турбина центростремительная, ротор подвешен на газодинамических опорах. Разработка подобного газотурбинного энергоагрегата открытого цикла для наземной малой энергетики выполнена на ФГУП «Завод имени В.Я. Климova», Параметры энергоагрегата приведены в таблице 1.

Таблица 1 Параметры энергоагрегата ГТЭ-

0,1.

Параметр, размерность	Пок азатель	Параметр, размерность	Пок азатель
Электрическая мощность, кВт	100	Уровень шума, дБ	65
Термодинамический КПД, %	39,0	Температура на выходе, °С	260
Номинальная частота, Гц	50...60	Топливо	Керосин
Напряжение, В		Тип камеры	Инд

	400	сгорания	ивид.
Эмиссия, ppm	30	Ресурс до кап. Ремонта, ч	400 00

На рис. 4 показана конструкция лопаточных машин ГТЭ-0,1.

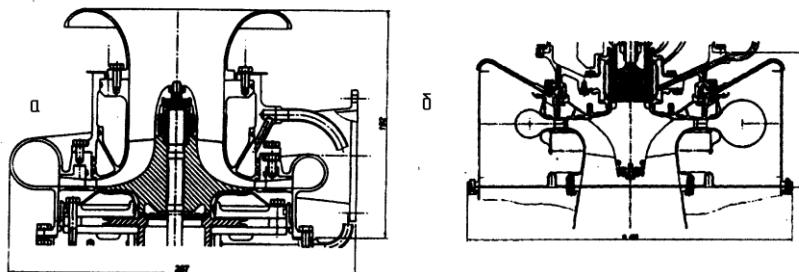


Рис. 4. Лопаточные машины ГТЭ-0,1: а- центробежный компрессор, б- центростремительная турбина.

Все проектные показатели энергоагрегата ГТЭ-0,1 соответствуют лучшим образцам мирового уровня. Однако энергоагрегат пока находится в стадии разработки и, к сожалению, до стадии коммерческой реализации пока не доведен.

На мировом рынке подобные ГТД, получившие название «Микрогазотурбинный агрегат» (МГТА) представлены рядом американских, европейских и японских фирм. В России большее распространение получили МГТА американской корпорации Capstone моделей C30 и C60, C200, основные параметры которых представлены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры МГТА корпорации
Capstone

Параметры, размерность	C30	C65	C200
Электрическая мощность, кВт	30	65	200
Электрический КПД, %	26	28	33
Коэффициент использования энергии топлива (при утилизации), %	80...90	80...90	68...90
Номинальная частота, Гц	50	50	50
Напряжение, В	380...480	380...480	380...480
Эмиссия (NO _x), ppm	9	9	9
Уровень шума, дБ	60	60	80
Температура газов на выходе, °С	275	309	280
Топливо	Керосин, газ, дизельное	Керосин, газ, дизельное	Керосин, газ, дизельное
Частота вращения ротора, об/мин	96000	98000	60000
Опоры	Газодин амич.	Газодин амич.	Газодина мич

Ресурс до кап. ремонта, ч	60000	60000	60000
Габаритн. размеры (контейнер), мм	1515x76 2x1943	1956x76 2x2110	3660x1700x2490

Единственной подвижной частью МГТА является вращающийся вал с размещенными на нем центростремительной турбиной, центробежным компрессором и ротором электрогенератора, представляющий собой постоянный магнит. Вал подвешен на воздушных газодинамических опорах. Статор электрогенератора охлаждается потоком воздуха, поступающего на всасывание в компрессор. Компактный регенератор встроен во внешнее кольцевое пространство над кольцевой камерой сгорания. Электрогенератор генерирует переменный трехфазный ток с частотой до 1600 Гц, который выпрямляется, а затем снова преобразуется в переменный напряжением 400 В, стабильной частотой 50Гц. Конструктивная схема МГТА представлена на рис. 5.

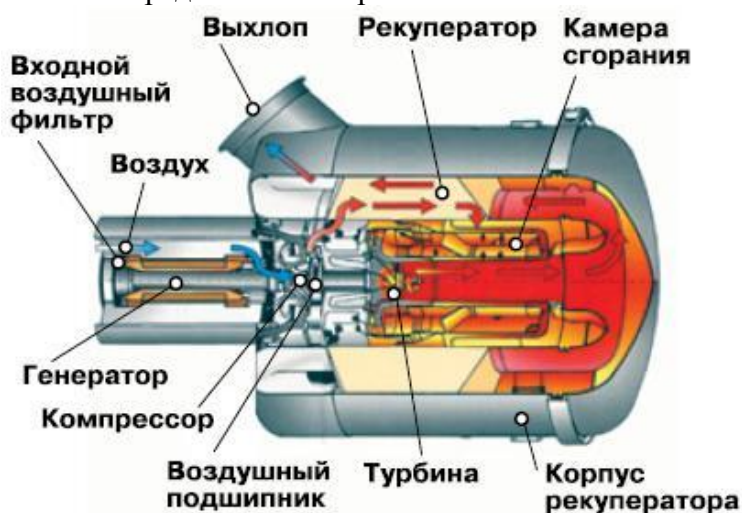


Рис. 5. Конструктивная схема МГТА С30 и С65 корпорации Capstone

В стандартном варианте МГТА Capstone. поставляется в контейнерном исполнении, содержащем топливную систему, вспомогательные агрегаты, а также блок системы автоматического управления. Размещение оборудования внутри контейнера (на примере С30) показано на рис.. 6

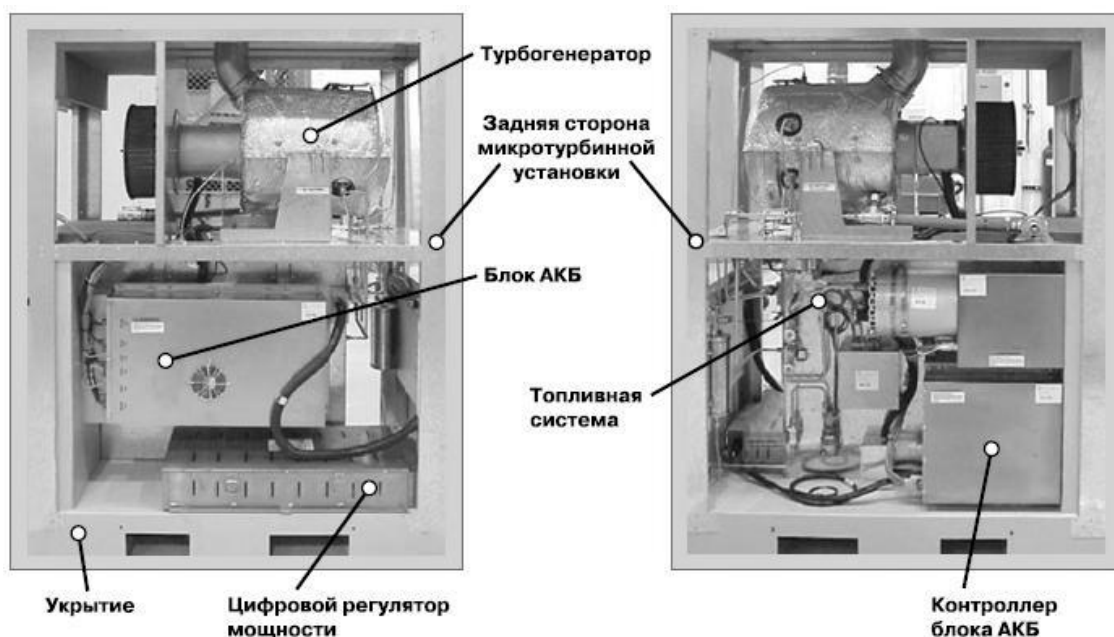
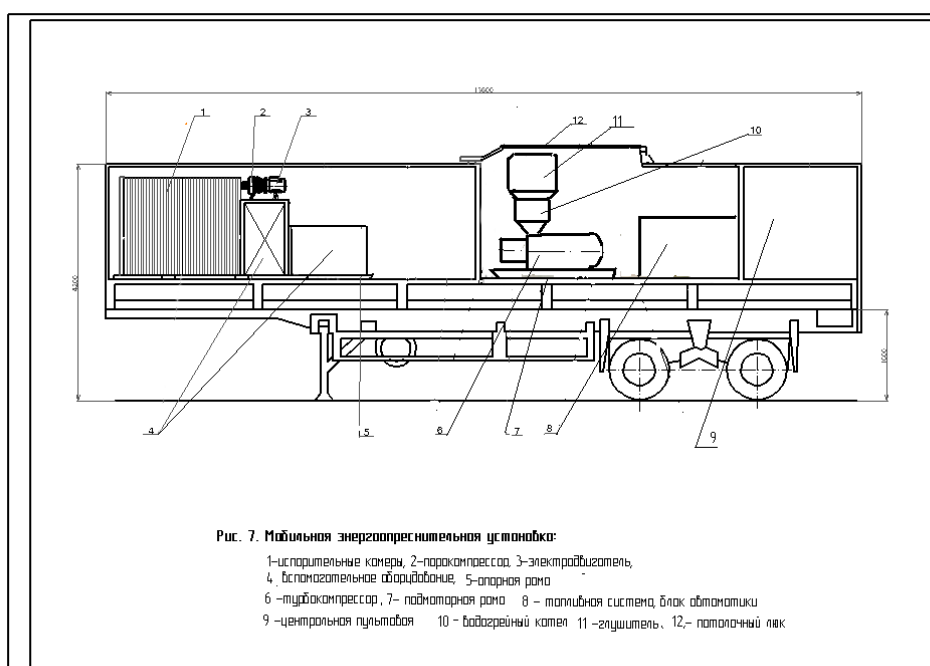


Рис. 6. Устройство микротурбинной энергоустановки на примере модели С30.

Компоновка энергоопреснительной установки на шасси большегрузного автомобиля.

Исходя из существующих реалий для мобильной энергоопреснительной установки был выбран импортный МГТА С65 свободного компоновочного исполнения, а также парокompрессорная опреснительная установка «Каскад*» разработки ФГУП ММПП «Салют» производительностью 24 т/сут по дистиллированной воде и утилизационный водогрейный котел. Таким образом полная компоновочная схема мобильной энергоопреснительной установки включает в себя энергоисточник МГТА С65 электрической мощностью 65 кВт, парокompрессорную опреснительную установку, на привод которой требуется электрическая мощность 13 кВт, а также утилизационный водогрейный котел тепловой мощностью 590 кВт с гладкотрубной матрицей объемом 0,15 м³.



Все оборудование монтируется в кузове полуприцепа модели СЗАП-93272-01 автомобиля «КАМАЗ», рис. 7. Грузоподъемность прицепа 23500 кг, длина грузовой платформы 13460 мм, ширина 2480 мм, высота до потолочного полотна 2510 мм. Внутренний объем кузова разделен на отдельные отсеки. В первом из них монтируется опреснительная установка со вспомогательным оборудованием и блоком автоматики, Во втором отсеке устанавливается собственно газотурбинный агрегат со вспомогательным оборудованием и водогрейным котлом. В конструкции водогрейного котла предусмотрен байпасный канал и синхронная система управления жалюзи на входе, что позволяет регулировать тепловую нагрузку котла за счет изменения расхода газа через матрицу водонагревателя.

Пульт управления газотурбинным агрегатом и опреснительной установкой вынесены в отдельную пультыш.

Литература

1. Опреснительные установки «КАСКАД». Рекламный проспект .М. ФГУП ММПП

«Салют», 2005 г.

2. В.М. Пожидаев Микрогазотурбинная электростанция для автономных объектов связи. М. Академия энергетики, №1, 2005 г.
3. Газотурбинный двигатель 9И56. Рекламный проспект АО «КАДВИ», Калуга
4. Мини-теплоэлектростанция ТЭС-75/700. Рекламный проспект АО «КАДВИ», Калуга.
5. В. Леонтьев, А. Саркисов Микроэнергетическая газотурбинная установка ГТЭ-0,1, М. Газотурбинные технологии, июль-август 2003 г.
6. В.Л. Иванов, А.И. Леонтьев, Э.А. Манушин, М.И. Осипов Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок, М. Изд МГТУ им. Баумана, 2004 г.
7. Improved Gas Turbine Efficiency on Automotive Regeneration Configuration/ NATO OTAN, RTO-TR-AVT-036.