

УДК 621.452.3:629.735.03

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, ОТРАБОТАВШИХ ЛЕТНЫЙ РЕСУРС

А. М. БИКБУЛАТОВ, А. А. КУЛТЫГИН

Факультет авиационных двигателей УГАТУ  
Тел: (3472) 51 07 87 E-mail: konversia@mail.rb.ru

Рассматриваются вопросы конверсии авиационных двигателей в передвижные наземные энергетические установки. Обсуждаются разработанные в УГАТУ компрессорные, эксгаустерные установки и установки для обеспечения мощных мобильных  $\text{CO}_2$ -лазеров. Приводятся некоторые схемы конвертирования авиационных двигателей в мобильные наземные установки

*Авиационный двигатель; компрессор; эксгаустер; лазер; энергоустановка*

### ВВЕДЕНИЕ

Конвертирование авиационных газотурбинных двигателей в наземные энергетические установки (НЭУ) позволяет решить проблемы утилизации двигателей и их агрегатов, дает двигателям, снятым с летной эксплуатации, новую жизнь. Авиационный двигатель (АД) является исключительно высоконапряженным энергетическим объектом: на единицу массы АД (кг) приходится 5...10 кВт мощности.

Отличительной особенностью энергетических установок на базе АД является их высокая энерговооруженность, небольшие габариты и масса. В некоторых случаях такие установки имеют недостаточно высокие показатели эффективности. Это объясняется тем, что отдельные узлы авиационного двигателя решают специфические, порой не свойственные им задачи (например, работа компрессора в режиме эксгаустера). Кроме того, на эффективности установок такого типа сказывается и то обстоятельство, что АД, заложенные в основу НЭУ, уже отработали свой ресурс и эксплуатируются на пониженных (не всегда экономичных) режимах. Тем не менее конвертирование АД в наземные энергоустановки позволяет не тратить ресурсы и время на разработку принципиально новых узлов, использовать уже готовые модули авиационных двигателей, приобретая их по низким ценам как вторичные ресурсы, осуществлять произ-

водство и ремонт таких установок на специализированных предприятиях. В сумме это дает значительный положительный эффект.

Энергетические установки, созданные на базе конвертированных авиационных двигателей, снятых с летной эксплуатации, должны удовлетворять следующим требованиям:

– такие установки должны создаваться с минимальными доработками исходных модулей, с использованием производственной базы предприятий, не специализированных по авиационным двигателям;

– ресурс подобного типа установок должен соответствовать условиям использования этих устройств в течение 5...10 лет;

– конструкция ЭУ должна базироваться на авиационных газотурбинных двигателях (АГТД), планируемых к интенсивному снятию с летной эксплуатации на период производства энергоустановок.

В настоящее время лабораторией энергоустановок кафедры теории авиационных и ракетных двигателей (ТАРД) УГАТУ разработан ряд установок, в основу которых легли принципы конвертирования АГТД в наземные энергетические установки. Ниже приводятся основные направления и разработки создания энергетических установок.

Типичные образцы выпускаемых компрессорных установок

Марка	Тип установки	Конечное давление, МПа	Производительность, тыс.нм <sup>3</sup> /ч	Масса, т	Мощность, кВт
K5500-41-1	Стационарная, высокопроизводительная, умеренного давления	0,43	300	183	22000
АМС-4	Передвижная, высокого давления	1,0	3,8	52	540
3,5Г-108/35	Стационарная, повышенного давления	3,5	7,2	120	980
3Г-177/200	Стационарная, высокого давления	20	7,0	170	2000
АМС-2 АМС-4	Передвижная, высокого давления	10	3,42	92	1082
КПУ-16/100	Передвижная, высокого давления	10	0,96	26,7	386

### 1. МОБИЛЬНЫЕ КОМПРЕССОРНЫЕ УСТАНОВКИ

Задача создания высокопроизводительных источников сжатого воздуха (ИСВ) является крайне актуальной. Эти агрегаты требуются для получения сжатого воздуха, используемого в технологических целях в строительстве, нефтяной, нефтехимической, горной, химической и других отраслях, в пневмотранспортных системах, в системах наддува транспортных средств на воздушной подушке и т.д. Особую группу в этой совокупности представляют потребители центробежных компрессоров и легкомобильных компрессорных станций, например, в нефтегазодобывающих отраслях для питания забойных парогазогенераторов при термической обработке нефтяных пластов. Особенно актуальна задача обеспечения строителей магистральных трубопроводов передвижными компрессорными установками повышенной производительности для вытеснения нефти, очистки и испытания готовых плетей трубопроводов и их опрессовки.

Анализ существующих на сегодняшний день установок показал, что установки, выпускаемые как нашей, так и зарубежной промышленностью (табл. 1), далеки от удовлетворения потребностей потребителей, особенно в области таких, например, технологий, как строительство магистральных трубопроводов, нефтедобыча и т.д.

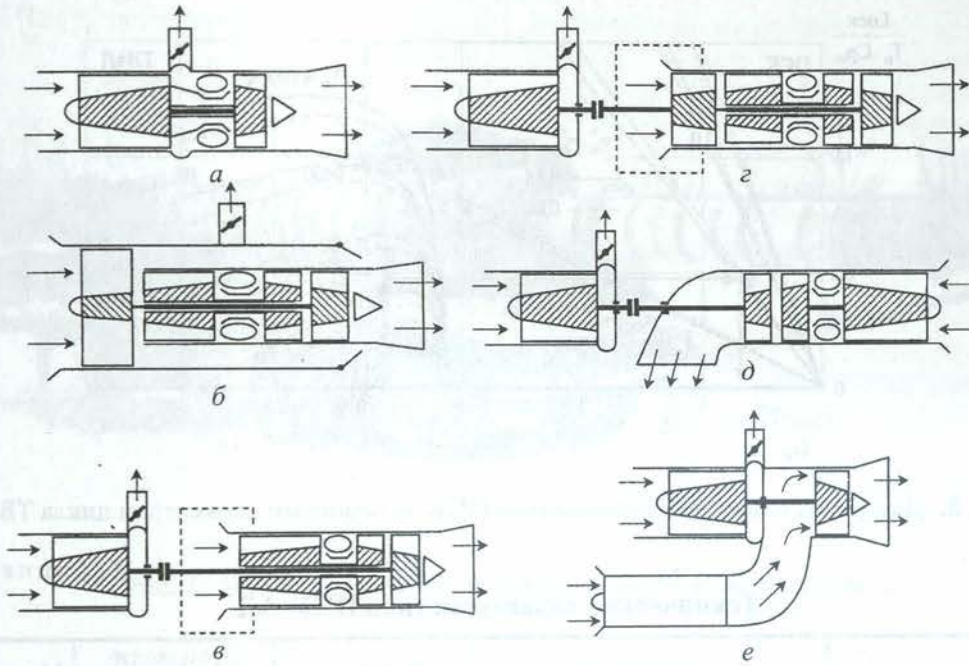
Передвижных установок низкого давления и высокой производительности ( $P_k = 0,4...1,0$  МПа,  $G_v = 150...300$  тыс.нм<sup>3</sup>/ч) вообще не существует. Все установки крайне громоздки, тяжеловесны и дороги, что исклю-

чает их эффективное использование во многих технологиях.

Научным коллективом кафедры ТАРД были разработаны мобильные компрессорные установки, в основу создания которых легли принципы конвертирования авиационных двигателей [2]. Принципиальные схемы установок приведены на рис. 1. Были разработаны установки двух типов: с отбором воздуха (рис. 1, а, б) и с отдельно стоящим компрессором (ОСК) (рис. 1, в-е).

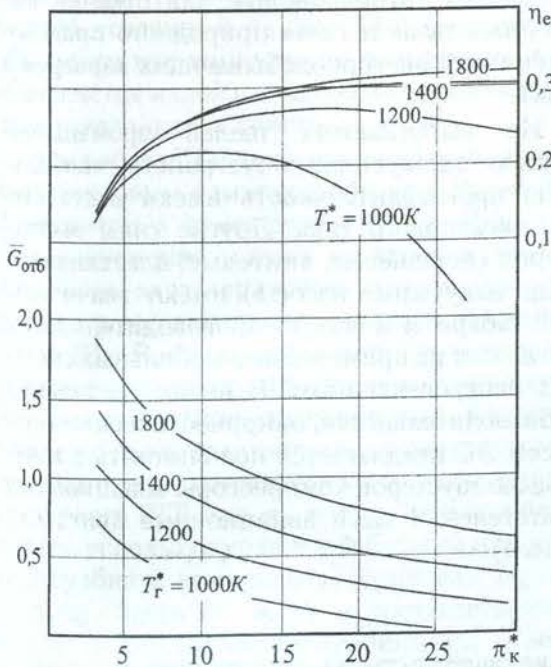
Возможность создания высокопроизводительных компрессорных установок на базе АД обосновывается наличием в составе АД штатного компрессора, от которого можно отобрать часть воздуха на нужды потребителя (рис. 1, а). Значения  $\bar{G}_{отб} = G_{отб}/G_{во}$  и  $\eta_{отб}$  в соответствии с рис. 2 могут быть получены при соответствующей коррекции элементов проточной части турбины. Без коррекции сопловых аппаратов турбины при отборе воздуха на режиме  $n = \text{const}$ ,  $F_c = \text{const}$  величина  $\pi_k^*$  понижается, а температура газа перед турбиной  $T_r^*$  возрастает.

Недопустимый рост температуры газа  $T_r^*$  может быть предотвращен за счет «раскрытия» сопла с соответствующим увеличением значения  $\pi_t^*$ , однако при достижении предельного значения  $\pi_t^* = \pi_{t_{пред}}^*$  скорость потока на выходе из турбины достигает скорости звука ( $\lambda_r = 1$ ) и дальнейшее «раскрытие» сопла уже не оказывает влияния на величину  $T_r^*$ . В результате при отборе воздуха за компрессором реального ГТД без коррекции площадей сопловых аппаратов обычно удается отобрать воздух в количестве  $\bar{G}_{отб} \leq 0,33...0,35$  при величине  $\eta_{отб}$  меньше тео-



**Рис. 1.** Компрессорные установки на базе ГТД: а — с отбором воздуха за цикловым компрессором; б — с отбором воздуха за промежуточной ступенью; в — с приводом ОСК от ротора турбокомпрессора; г — с приводом ОСК от ротора низкого давления; д — с приводом ОСК от свободной турбины; е — с выносным газогенератором

ретической (рис. 2). Создание компрессорных установок с отбором воздуха от штатного компрессора требует минимума доработок авиационного двигателя, однако эти установки имеют низкий КПД.



**Рис. 2.** Обобщенные зависимости  $\bar{G}_{отб}$ ,  $\eta_{отб} = f(\pi_{отб}^*, T_g^*)$  при  $\bar{\pi}_{отб}^* = 1,0$ ,  $\pi_c = 1,1$

Другим направлением является создание компрессорных установок на базе АД с использованием отдельно стоящего компрессора (ОСК). В качестве газотурбинного привода здесь может быть использован как ТВаД, ТВД (рис. 1, д), так и другие типы АД: ТРД, ТРДД (рис. 1, б-г, е), конвертированные по турбовальной схеме.

В этом случае основным уравнением при оценке параметров напорности и производительности компрессорной установки является баланс мощностей свободной турбины и ОСК:  $N_{оск} = N_{ст} \cdot \eta_{ст}$  (для схем рис. 1, в, д, е)  $N_{оск} + N_{кнд} = N_{тнд} \cdot \eta_{ст}$  (для схемы рис. 1, г). На основании этого баланса можно построить диаграмму определения параметров ОСК в зависимости от основных параметров цикла базового двигателя, конвертированного по турбовальной схеме (рис. 3).

Были созданы компрессорные установки трех типов (табл. 2), которые успешно прошли стендовые испытания и испытания в условиях реальных полигонов. Компрессорные установки были опробованы на трассе строительства газопровода «Уренгой-Тула» и показали отличные результаты. Технические характеристики установок приведены в табл. 2.

Сравнивая технические характеристики установок, разработанных на кафедре ТАРД,

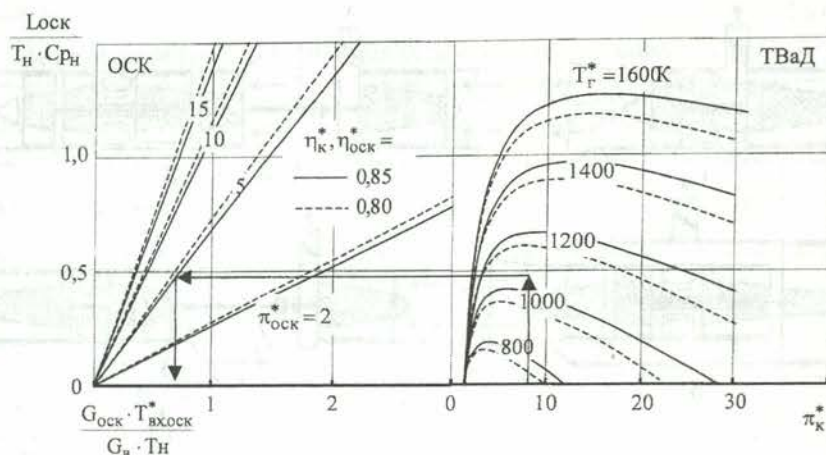


Рис. 3. Диаграмма определения параметров ОСК по основным параметрам цикла ТВАД

Таблица 2

### Технические характеристики ПКУ-АД

Марка	Тип установки	Конечное давление, МПа	Производительность, тыс.м <sup>3</sup> /ч	Масса, т
ПКУ-АД(НД)	Передвижная, низкого давления (рис.1, д)	0,3...0,5	200...300	7
ПКУ-АД(СД)	Передвижная, повышенного давления (рис.1, б)	2,0	55..60	5
ПКУ-АД(ВД)	Передвижная, высокого давления (рис.2)	6,5...8,5	6...12	15

с аналогами, приведенными в табл. 1, можно сказать, что ПКУ-АД по многим параметрам, а особенно по массе, превосходят существующие аналоги, обладая при этом более низкой стоимостью.<sup>1</sup>

### 2. МОБИЛЬНЫЕ ЭКСГАУСТЕРНЫЕ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ АВИАЦИОННЫХ ГТД

Современное развитие промышленности диктует новые требования к эксгаустерным (откачивающим) системам, а именно: высокую напорность, большую производительность, малые габариты, мобильность. Существующие эксгаустерные системы (ЭС) не всегда удовлетворяют всем указанным требованиям одновременно. В связи с этим рассматривается возможность создания ЭС на базе компрессора авиационного ГТД [1, 3, 4]. Такие системы могут применяться, например, в лазерной промышленности, в аэродинамических трубах, холодильных установках. Исследование рынка машиностроительной про-

мышленности выявило возросший интерес к передвижным ЭС, которые могут использоваться для нужд МЧС, для осушки магистральных трубопроводов, для откачки выхлопных газов и газов природного происхождения со дна горнодобывающих карьеров и шахт.

Из выпускаемых нашей промышленностью эксгаустерных устройств наибольшую производительность имеют эксгаустеры эжекторного типа. Другие типы эксгаустеров (поршневые, винтовые, пластинчатые и др. вакуумные насосы) имеют значительные габариты и малую производительность, что делает их применение в мобильных системах неперспективным. В целях увеличения производительности, напорности и снижения массы ЭС предлагается использовать в качестве эксгаустеров компрессоры авиационных двигателей и сами авиационные двигатели (рис. 4).

<sup>1</sup>На все типы компрессорных установок получены авторские свидетельства: на компрессорные установки — №№ 1036109, 1147096, 1713311; на турбокомпрессорные агрегаты — №№ 1064710, 1136552, 1489268; на газогенератор — № 1106915; на установку получения сжатого воздуха — № 1656950; на способ конвертирования двух авиационных двигателей в компрессорную установку — № 1726812 и патент РФ № 2147084.

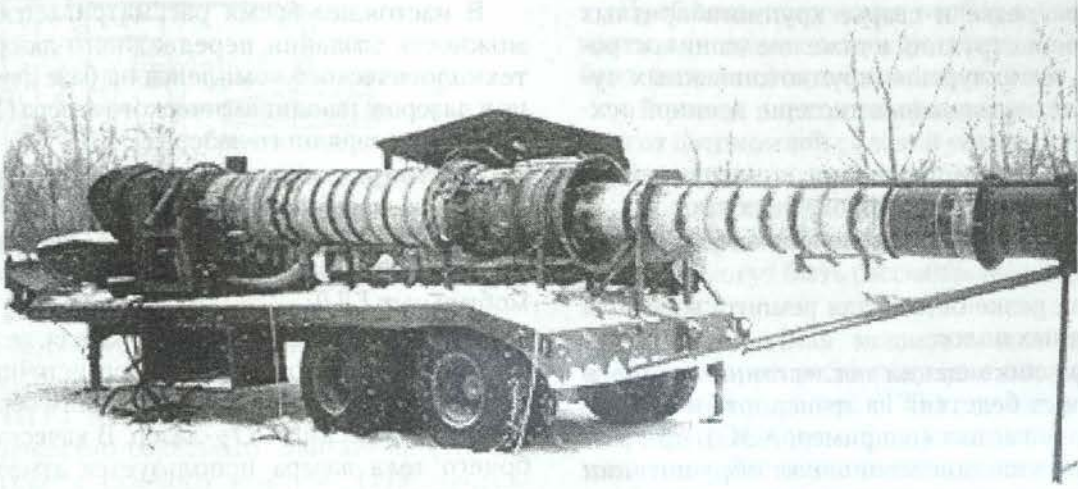


Рис. 4. Эксгаустер с двухступенчатым эжекторным подпором

Несмотря на то, что компрессорные установки предназначены для создания избыточного давления, а эксгаустерные — разрежения, принципиальные схемы некоторых из них могут совпадать (рис. 1, в–е). Поэтому опыт, полученный при создании компрессорных установок, оказался весьма ценным и при разработке ЭС. Кроме того, принципиально новым направлением является создание ЭС с использованием авиационного двигателя в качестве эксгаустера. В работе [5] освещались некоторые вопросы создания эксгаустерной установки для испытательного стенда аэродинамической трубы на базе ТРДД. Однако эксгаустер, созданный на базе ТРДД, не может обеспечить высокий уровень разрежения, что объясняется малой степенью повышения давления вентилятора двигателя.

При работе ГТД в режиме всасывания воздуха цикловым компрессором при  $P_{вх}^* < P_n$  с выхлопом в атмосферу ( $P_c = P_n$ ) степень разрежения потока на входе в двигатель можно характеризовать значением коэффициента восстановления полного давления  $\sigma_{вх} = P_{вх}^*/P_n$  (большей степени разрежения потока, создаваемого двигателем, будет соответствовать меньшее значение  $\sigma_{вх}$ ). Количественную связь величины  $\sigma_{вх}$  с параметрами реального термодинамического цикла одноконтурного ГТД при  $\pi_c = \pi_{сmin}$  можно установить, используя уравнение баланса мощностей турбин и компрессора двигателя  $N_k = N_T \eta_m$ . Здесь  $N_k$  и  $N_T$  — соответственно мощности компрессора и турбины;  $\eta_m$  — механический КПД. Если выразить работы сжатия и расширения через параметры рабочего процесса ГТД, то можно получить искомую

зависимость:

$$\sigma_{вх} = \frac{\pi_c}{\pi_k^* \sigma_{кс}} \left[ 1 - \frac{C_p T_{вх}^* \left( \pi_k^{*\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right)}{\bar{G}_r C_{pr} T_r^* \eta_k^* \eta_T^* \eta_m} \right]^{\frac{\kappa_r}{1-\kappa_r}}$$

Анализ характеристики изменения  $\sigma_{вх}$  показывает, что всасывающая способность ГТД-эксгаустера повышается при увеличении значений  $T_r^*$ ,  $\eta_k^*$ ,  $\eta_T^*$ ,  $\eta_m$ ,  $\bar{G}_r = G_{вх}/G_r$  и понижении величины  $T_{вх}^*$ .

При необходимости, всасывающая способность ГТД-эксгаустера может быть повышена за счет установки на входе в двигатель подпорного эжектора, в котором функцию активного газа будет выполнять атмосферный воздух, втекающий в тракт с пониженным давлением. Поэтому разработанная эксгаустерная установка на базе ТРД Р29-300 с двухступенчатым эжекторным подпором (рис. 4), позволяет получить более низкий уровень разрежения, чем в случае применения просто ГТД-эксгаустера. В настоящее время установка проходит испытания и используется для обеспечения работы технологического электроазрядного лазера.

### 3. УСТАНОВКИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТЫ МОЩНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ЛАЗЕРА

Принципиально новым направлением в современной промышленности является создание мобильных технологических лазеров большой мощности.

В настоящее время благодаря уникальным свойствам лазерного луча лазерные генераторы уже получили широкое распространение в различных отраслях народного хозяйства:

– при резке и сварке крупногабаритных металлоконструкций в тяжелом машиностроении и металлургии (крупнотоннажных судов, железнодорожных цистерн, военной техники);

– при термоупрочнении конструкций на стадии монтажа, валкопрокатных станах;

– при ремонте и замене железнодорожных путей;

– при резке бетона для ремонта взлетно-посадочных полос;

– при ликвидации последствий аварий и стихийных бедствий на транспорте и в крупных сооружениях (например, АЭС), при разборке завалов, дистанционном обрушивании аварийных конструкций, вскрытии емкости для стравливания давления, прорезке металлических и бетонных стен с целью создания проходов;

– для очистки акваторий морей от нефтепродуктов (особенно тонкой пленки на поверхности воды);

– при тушении пожаров (путем организации встречного пала или выжигания растительности на пути распространения огня);

– для карьерных разработок (добыча твердых пород, например гранитов);

– при бурении нефтегазовых скважин и интенсификации добычи нефти, вторичном вскрытии продуктивного пласта (сверление отверстий в обсадной колонне и выполнение дренажных каналов в цементном пласте) и т. п.

Мобильный мощный лазерно-технологический комплекс, созданный на базе авиадвигателей и их узлов, позволяет высокоэффективно использовать уникальное свойство лазерной установки — передачу энергии на расстояние сотен метров и возможность подведения луча при помощи системы зеркал в труднодоступные места сооружений, где применение другого инструмента исключено. Эти установки обладают высокой производительностью и рядом других преимуществ, обусловленных высокой концентрацией энергии в зоне воздействия луча.

Существующие стационарные энергетические системы промышленного типа не могут быть использованы при создании мобильных лазеров в силу их излишней тяжести и громоздкости. В наибольшей степени удовлетворяют предъявляемым требованиям системы, создаваемые с использованием новой технологии на базе авиационных ГТД — компактных и мощных источников энергии.

В настоящее время рассматривается возможность создания передвижного лазерного технологического комплекса на базе двух типов лазеров: газодинамического лазера (ГДЛ) и электроразрядного лазера (ЭРЛ).

Научно-исследовательские работы, проводимые на кафедре ТАРД УГАТУ с 1991 года, позволили сформулировать следующие основные принципы по созданию мощных мобильных ГДЛ:

– в качестве лазерного излучателя, не зависящего от стационарных энергоисточников, может быть использован наилучшим образом газодинамический  $\text{CO}_2$ -лазер. В качестве рабочего тела лазера используется атмосферный воздух, нагреваемый в камере подогрева. При этих конструктивных особенностях лазерный излучатель способен работать с перепадом давления 1,5–1,6 МПа при температуре рабочего тела на входе в излучатель 1400...1600 К с достаточным ресурсом, выдавая предельную мощность 6...8 кВт на 1 кг/с расхода рабочего тела при работе на керосине и 10...12 кВт — при работе на хинолине;

– конструкция подогревателя рабочего тела формируется по аналогии с хорошо отработанными конструкциями высокотемпературных камер сгорания авиационных двигателей типа Д-36, Д-136, Р-29-300, ПС-90А и др. При этом на 70...80% используется материальная часть этих камер сгорания с минимальным объемом доработок. Потери полного давления для таких камер подогрева составят не более 10%, т. е. 0,16...0,18 МПа;

– источник сжатого воздуха (ИСВ) такого ГДЛ должен обеспечить расход 4...8 кг/с при  $N_{\text{изл}} \cong 50$  кВт и 8...16 кг/с — при  $N_{\text{изл}} \cong 100$  кВт при давлении сжатия 2,0...2,3 МПа (с учетом потерь в магистрали отбора). Крайне желательно, чтобы этот воздух имел максимально возможную температуру 700...900 К. По этой причине и в силу стремления к уменьшению веса конструкции ИСВ необходимо обеспечить в нем принцип сжатия воздуха по одноступенчатой схеме, т. е. без теплообменника. Последним требованиям отвечают компрессорные устройства среднего и высокого давления (рис. 1, б, рис. 5) [2], на основе конвертирования авиационных двигателей и их узлов с превращением этих двигателей в двигатели с отбором воздуха за компрессором высокого давления. Они могут быть быстро и достаточно дешево реализованы в натурном виде;

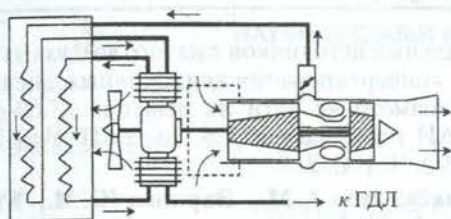


Рис. 5. Компрессорная установка высокого давления для обеспечения ГДЛ

– целесообразно применять в системе охлаждения лазера турбонасосной установки (ТНУ) от топливной системы мощного жидкостно-ракетного двигателя (ЖРД) с питанием газового контура ТНУ частью сжатого воздуха, подаваемого от источника сжатого воздуха. Это решение позволяет отказаться от внешнего источника электроэнергии при работе ГДЛ, что существенно расширяет область применения лазерно-технологического комплекса (ЛТК) в плане использования его в автономном режиме.

Наряду с газодинамическими в промышленности широко применяются электроразрядные лазеры. Для обеспечения работы электроразрядного лазера необходимы специальные прокачные устройства – эксгаустеры, предназначенные для прокачки рабочего тела через электроразрядную камеру и создания в ней разрежения. Например, обеспечение работы газового электроразрядного  $\text{CO}_2$ -лазера мощностью излучения 50кВт заключается в следующем:

– прокачивать через полость лазерного резонатора рабочее тело – лазерный газ (воздух – 94%,  $\text{CO}_2$  – 6%) при температуре  $420 \pm 100 \text{ K}$  в количестве 5 кг/с и более, в зависимости от мощности лазера;

– создавать разрежение  $\sim 0,02 \text{ МПа}$  в газоразрядной камере (ГРК);

– питать лазерный комплекс сжатым воздухом при давлении 0,4 МПа в количестве 1,0 кг/с для обеспечения работы газодинамического окна, отделяющего полость лазерного резонатора от атмосферы;

– питать лазерный комплекс электроэнергией  $\cong 1000 \text{ кВт}$ .

Эксгаустерные устройства, созданные на базе авиационных двигателей и их модулей, способные обеспечить полноценное решение поставленной проблемы, описаны выше. Интерес представляет привод электрогенератора для питания лазерного технологического комплекса.

Проблема получения необходимой мощности для привода электрогенератора может быть решена следующим способом:

– привод электрогенератора осуществляется от автономной силовой установки турбовального типа;

– в качестве источника мощности используется энергопривод эксгаустерной системы, при этом могут быть рассмотрены следующие варианты:

а) необходимая мощность для привода электрогенератора снимается с вала свободной газовой турбины (ГТГ), на которой срабатывается некоторый перепад давления выхлопных газов перед их выбросом в атмосферу  $P_T^*/P_H^* \geq 1,1$ . В качестве свободной турбины в этом случае может быть использована турбина (или фрагмент турбины) того же двигателя, на базе которого комплектуется ОСК. Сооружение ГТГ является сложной задачей, поскольку требует крепления к ротору турбины выходного вала, ориентированного назад, создания опор ротора с системой смазки, создания системы разгрузки осевых сил и т. д.;

б) мощность для привода электрогенератора снимается с вала воздушной турбины генератора (ВТГ), на которой срабатывает перепад давления между атмосферой и входом в ОСК, то есть ВТГ устанавливается на входе в ОСК и работает напросос (рис. 6). В качестве ВТГ также может быть использована турбина двигателя, на базе которого комплектуется ОСК.

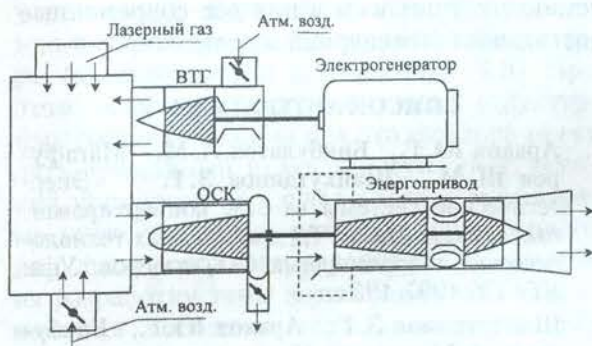


Рис. 6. Принципиальная схема установки ВТГ на входе в ОСК

Мобильные лазерные технологические комплексы большой мощности – это совершенно новые технологии. Аналогов этим установкам нет ни в России, ни за рубежом.<sup>2</sup>

<sup>2</sup>Принципы создания, а также основные элементы установок, обеспечивающих технологические лазеры, защищены авторскими свидетельствами №№ 1147096, 1481467, 224544, 280046, 284192, 213009.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вопросы утилизации авиационных двигателей, отработавших летный ресурс, далеко не ограничиваются рамками этой статьи. Авиационные двигатели как энергоузлы могут применяться в различного типа установках, где необходимы большие мощности, высокие обороты приводящего вала, небольшая масса установок, в струйных технологиях и др. [3].

В настоящее время на базе авиационных двигателей создаются установки для сушки и очистки помещений, например, для очистки железнодорожных вагонов. В этих установках сушка и очистка осуществляются струей горячего воздуха (выхлопных газов), отбираемого от АГТД. На этом же принципе работают установки по очистке от снега и мусора взлетно-посадочных полос.

Разработаны мобильные электростанции, где мощность, необходимая для привода электрогенератора, отбирается от вала АГТД, конвертированного по турбовальной схеме, либо от турбовального двигателя.

Возможно создание на базе авиационных двигателей греющих или холодильных установок, тепловых насосов.

Для нужд сельского хозяйства разработаны и изготавливаются аэрозольные генераторы, которые позволяют опылять поля и леса без использования авиации.

Таким образом, авиационные двигатели, снятые с летной эксплуатации, получают вторую жизнь в виде наземных энергетических установок, привнося в них все современные достижения инженерной мысли.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арьков Ю. Г., Бикбулатов А. М., Магафуров Ш. М., Шайхутдинов З. Г. Энергетические системы на базе конвертированных авиационных ГТД для мощных технологических газоразрядных  $CO_2$ -лазеров. Уфа: УГАТУ, 1997. 195 с.
2. Шайхутдинов З. Г., Арьков Ю. Г., Бикбулатов А. М. и др. Проблемы создания мо-

бильных источников сжатого воздуха на основе конвертирования авиационных двигателей и возможные пути их решения // 60-летию УАИ посвящается: Сб. тр. УАИ. Уфа: УАИ, 1992. Ч. 1. С. 215.

3. Бикбулатов А. М., Зарипов Ю. М., Култыгин А. А. Использование авиационного ГТД как модуля эксгаустерной системы мощного технологического газоразрядного лазера // Изв. вузов. Авиационная техника. 1998. № 1. С. 115–118.
4. Бикбулатов А. М., Култыгин А. А. Использование компрессора авиационного двигателя в эксгаустерной системе мобильного электро-разрядного лазера // Изв. вузов. Авиационная техника. 1999. № 4. С. 69–72.
5. Беляев В. Я., Илларионов А. М., Пономарев Н. Н. Оптимизация эксгаустерных установок сверхзвуковых аэродинамических труб, проектируемых на основе авиационных двигателей // Наземное применение авиационных двигателей в народном хозяйстве. М.: ВИМИ, 1975. Вып. 1. С. 184–190.

## ОБ АВТОРАХ



**Бикбулатов Ахат Мидхатович**, доцент, докторант каф. теории авиационных и ракетных двигателей УГАТУ. Дипл. инж.-механик (УАИ, 1976), канд. техн. наук по тепловым двигателям ЛА (УАИ, 1983). Исследования в области энергетических установок на базе АГТД.



**Култыгин Андрей Алексеевич**, аспирант той же кафедры. Дипл. инж. по авиационной и ракетно-космической теплотехнике (УГАТУ, 1997). Исследования в области энергетических установок на базе АГТД.