

Литература

1. Каминский В.Н., Каминский Р.В., Сибиряков С.В., Лазарев А.В. и др. Использование информационных технологий при контрольно-исследовательских испытаниях турбокомпрессора на безмоторной стенде. Сб. трудов VI Международной научно-практической конференции «Информационные технологии в образовании, науке и производстве». – Протвино. 2012. С. 467.
2. Каминский В.Н., Каминский Р.В. и др. Разработка программного комплекса для решения технологических задач ЗАО «НПО «Турботехника». Сб. трудов VI Международной научно-практической конференции «Информационные технологии в образовании, науке и производстве». – Протвино. 2012. С.467.

Многоцелевые высокоэффективные микротурбины

доц. к.т.н. Костюков А.В., Горновский А.С., Косач Л.
Университет машиностроения
89154785532, kostukov123@yandex.ru

Аннотация. Приведены результаты разработки малоразмерного газотурбинного двигателя с эффективностью не ниже, чем у лучших поршневых ДВС. Показано, что применение в микротурбинах теплообменника со сверхвысокой степенью регенерации (95% и выше) позволяет поднять эффективный КПД малоразмерных газотурбинных двигателей до значений 38 – 43%.

Ключевые слова: высокоэффективная многоцелевая микротурбина, теплообменник со сверхвысокой степенью регенерации, центробежный компрессор, радиальная турбина, диффузор.

По данным недавнего отчета, опубликованного Минпромэнерго, к 2020 году выработают свой ресурс около 70% мощности ТЭС и ГЭС. Процессы модернизации электрического хозяйства и ввода в эксплуатацию новых мощностей не успевают за ростом потребления электричества. Будущее развития энергетической отрасли в России все чаще связывают с распределенной малой энергетикой. В качестве перспективных энергоустановок для малой распределенной энергетики рассматриваются работающие на дешевом топливе, природном газе, энергоустановки на базе поршневых газовых двигателей и микротурбин. Микротурбины имеют существенно меньшее техническое обслуживание и более дешевый капитальный ремонт. Так, у энергоустановок на базе поршневых ДВС интервалы между техническим обслуживанием составляют 250 – 500 моточасов. Текущий ремонт микротурбин Capstone (одна из ведущих фирм по производству микротурбин) осуществляется на месте установки через 8000 часов (один раз в год) и сводится к внешнему осмотру, замене или чистке воздушного фильтра. Стоимость капитального ремонта по истечении 8 лет составляет не более 30% от первоначальных инвестиций. У энергоустановок на базе поршневых ДВС стоимость капитального ремонта достигает 70 – 100% от первоначальных затрат на приобретение. Микротурбины также имеют недостижимую для поршневых двигателей экологическую чистоту и надежно, без снижения эффективности работают на бросовом топливе – малокалорийных газах (шахтные и др.). Эти качества вызвали в мире активный рост инвестиций в производство энергоустановок на базе микротурбин (в 1995 г. – около 100 млн. USD, а 2007 г. – около 940 млн. USD). Объем рынка энергоустановок на базе микротурбин в 2011 году составлял 8 млрд \$ США, а в 2015 году достигнет 17 – 18 млрд \$ США. К 2035 году U.S. Energy Information Administration прогнозирует прирост мощностей по микротурбинным установкам в США в размере 2,4 – 2,8 ГВт. Вместе с тем все более ужесточающиеся требования к автомобилям по экологии и успех в разработках высокоресурсных многотопливных экологически чистых энергетических микротурбин привели к появлению в мире (США, Европа, Япония) парка автобусов с работающей на природном газе гибридной силовой установкой, включающей малоразмерный регенеративный ГТД. Сегодня имеется тенденция к увеличе-

нию парка таких автобусов. В целом по результатам исследования японской аналитической компании Yano Research Institute ожидается 16-кратный рост рынка гибридных автомобилей в течение десяти лет: с 0,32 млн ед. в 2005 г. до 5,37 млн в 2015 г. Продолжает оставаться актуальным и применение микротурбин на тяжело нагруженных транспортных средствах и технике военного назначения. Причем особенную остроту эту потребность в ГТД имеет Россия. Связано это с низкими среднегодовыми температурами на огромных северных и северо-восточных территориях страны. Легкий запуск при температурах и, соответственно, надежность его эксплуатации, многотопливность, успешная конкуренция по расходу топлива при низких температурах атмосферного воздуха с транспортными дизелями говорят о больших перспективах применения ГТД на транспортных средствах в Российской Федерации. В качестве примера можно привести осуществляемую в настоящее время разработку перспективного БМП «Рыцарь» с микротурбинной гибридной силовой установкой для применения в условиях Севера. В России в настоящее время микротурбины не производятся, на ее огромный рынок поступают зарубежные энергоустановки (в основном Capstone).

Одной из основных причин, сдерживающих развитие рынка энергетических установок с микротурбинами, является их меньший по сравнению с поршневыми двигателями электрический КПД. Так электрический КПД одной из лучших микротурбинных энергоустановок (Capstone) достигает 34%, тогда как аналогичный параметр газопоршневого двигателя находится в диапазоне 38 – 40%.

Увеличение КПД микротурбины до 40% и выше можно получить за счет роста максимальной температуры газа и применения теплообменника со сверхвысокой степенью регенерации (95 – 97%). Первое направление возможно за счет применения в малоразмерных газотурбинных двигателях (микротурбинах) высокотемпературной керамики, и поэтому может рассматриваться только в качестве перспективы, а второе вполне реально для настоящего времени, причем опирается на отечественную разработку компактного роторного теплообменника [1]. Теплообменник прошел многочасовые испытания на стенде и в составе малоразмерных транспортных микротурбин мощностью 150 и 300 кВт. Полученная эффективность теплообменника составила 86%. Оценки показывают, что увеличение степени регенерации роторного теплообменника до 95% не приведет к недопустимому ухудшению габаритно-массовых показателей газотурбинного двигателя. Направление на применение теплообменника со сверхвысокой степенью регенерации весьма перспективно для газовых турбин малой мощности. Хорошо известно, что рост степени регенерации теплообменника приводит к снижению оптимальной (по КПД газотурбинного двигателя) степени сжатия воздуха в компрессоре (рисунок 1), а значит к увеличению расхода воздуха, росту размеров и КПД лопаточных машин и, соответственно, увеличению КПД самого малоразмерного газотурбинного двигателя.

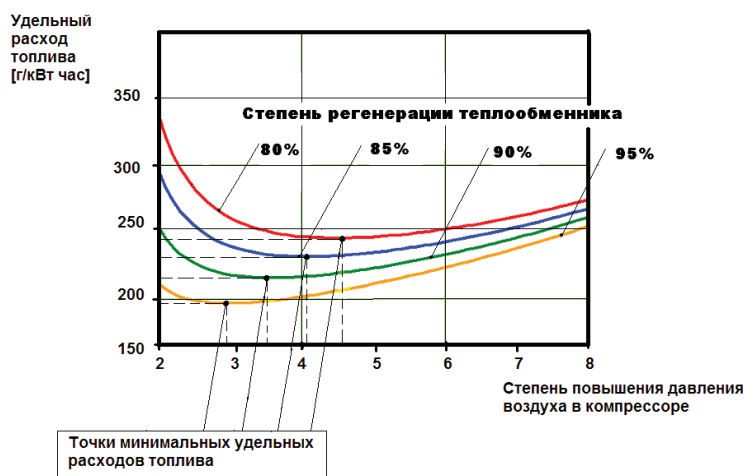


Рисунок 1. Зависимости удельного расхода топлива микротурбины от степени повышения давления в компрессоре при различных степенях регенерации теплообменника

Ниже приведены результаты выполненной в Университете машиностроения разработки многоцелевой микротурбины мощностью 50 кВт со сверхвысокой степенью регенерации тепла выхлопных газов.

Разработанная микротурбина включает высокооборотный ротор (60000 об/мин) турбокомпрессора с центробежным компрессором и радиальной турбиной, трубчатую малотоксичную камеру сгорания и роторный теплообменник (рисунок 2). В зависимости от применения микротурбины (на транспорте или в энергоустановке) ротор турбокомпрессора предполагается устанавливать либо на гибридных с керамическими телами качения подшипниках, либо на лепестковых газодинамических. Полученные расчетом показатели разработанной микротурбины приведены в таблице 1.

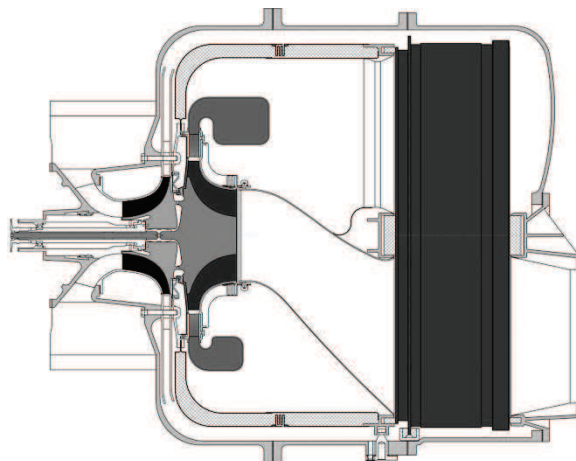
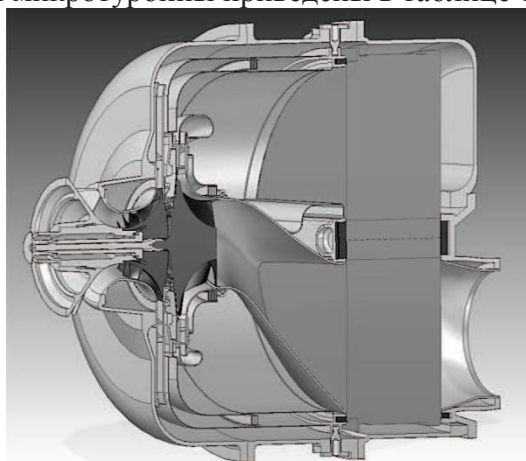


Рисунок 2. 3D модель и продольный разрез микротурбины мощностью 50 кВт со сверхвысокой степенью регенерации тепла выхлопных газов (95%)

Таблица 1

Показатели микротурбин и газопоршневых агрегатов

Параметр	Jenbacher (Австрия)	Cummins Inc. (США)	Capstone Micro Turbine (США)	Университет машиностроения
	Газопоршневой двигатель JMS208 GS	Газопоршневой двигатель 315GFBA	Микротурбина C60	Микротурбина МЦ 50
Мощность электрическая, кВт	330	315	60	50
КПД электрический, %	38,7	34,2	29	38
Температура газа на выходе, °С	478	510	280	187
Ресурс до капремонта, ч	60 000	48 000	60 000	60 000

При расчете приведенного в таблице 1 электрического КПД микротурбинной установки значение КПД высокооборотного генератора бралось такое же, как у Capstone (95%).

Ступени центробежного компрессора и радиально-осевой турбины для микротурбинной установки разрабатывались с использованием программных комплексов «ConceptNREC» и «Nimesa». Для предварительного одномерного газодинамического расчёта ступеней были использованы программы «Compal» и «Rital» программного комплекса «Concept NREC». Далее в программе «AxCent» были построены трёхмерные геометрические модели турбомашин. Полученные модели дорабатывались в программе «AxCent» (менялись законы распределения лопаточных углов и толщин по длинам лопаток, корректировались меридиональные обводы турбомашин). На рисунках 3 и 4 приведены полученные из расчётов течения рабочего тела (газ, воздух) в ступенях компрессора и турбины КПД лопаточных машин турбоком-

прессора. Расчеты течений выполнялись в программе «Fine/Turbo» программного комплекса «Numeca».

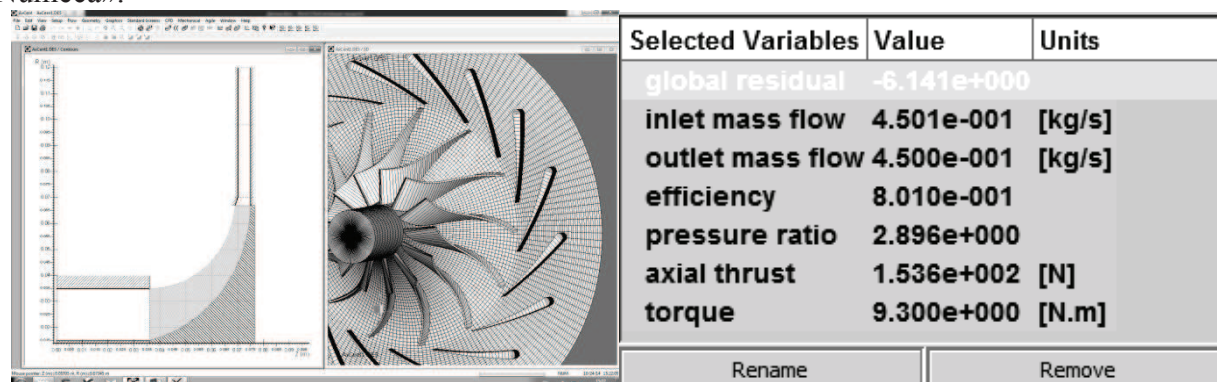


Рисунок 3. Ступень центробежного компрессора (степень повышения давления 2,8) и полученная эффективность ступени (адиабатический КПД)

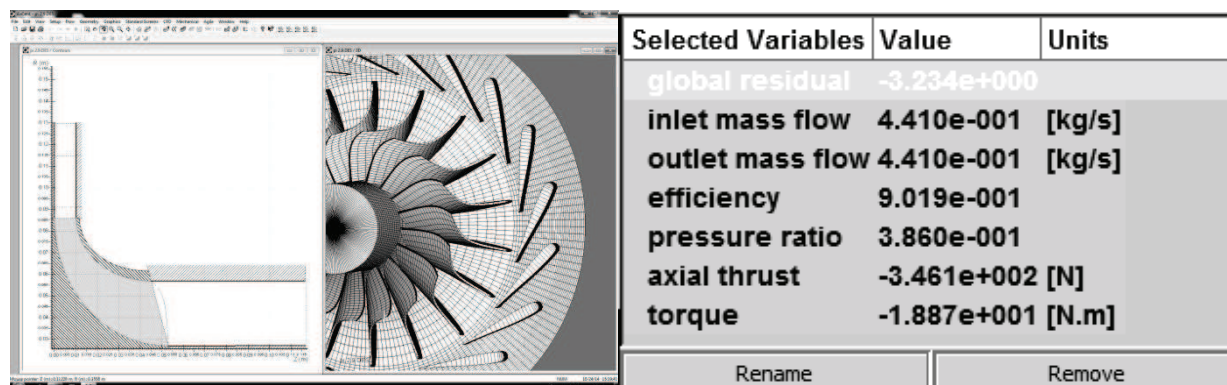


Рисунок 4. Ступень радиальной турбины и полученная эффективность ступени (КПД по полным параметрам 90%)

Одной из основных проблем проектирования высокоэффективной микротурбины являлась разработка теплообменника со сверхвысокой степенью регенерации (95%). Оценки показали, что степень регенерации 95% при приемлемых габаритах и массе может иметь только теплообменник роторного типа. Размеры разработанного роторного дискового каркасного теплообменника при эффективности 95% и потере давления по газовой стороне 6% составили: диаметр – 450 мм, толщина – 140 мм.

Важнейшей задачей проектирования роторных теплообменников является создание эффективных уплотнений для минимизации утечек рабочего тела. Эта проблема кардинально решена в каркасном теплообменнике [2, 3]. У него уплотнения работают не по пористой теплопередающей матрице, а по плоским поверхностям каркаса. Вследствие эффективного охлаждения [2, 3] каркас имеет малые тепловые деформации, что также положительно сказывается на эффективности работы уплотнений. Полученные величины утечек у такого теплообменника со степенью регенерации 86% рекордно малы и не превышают 1,5 – 2% от расхода воздуха через компрессор. Увеличение степени регенерации до 95% приведет к росту размеров теплообменника и, соответственно, должно привести к увеличению утечек. Однако, как показано в [4], этого увеличения можно как минимум избежать при выполнении каркаса из имеющего низкий коэффициент теплового расширения ($3,9 - 4,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) графитокремниевой керамики. В [5] расчётным путём было показано, что выполнение каркаса теплообменника из графитокремниевой керамики приводит к снижению деформаций плоских поверхностей диска охлаждаемого каркаса (с которыми контактируют уплотнения) в направлении оси вращения теплообменника до значения 0,14 мм, что в четыре раза меньше деформаций дисков каркаса, выполненного из стали 20 (0,64 мм).

Следует также отметить, что характерное для цикла со сверхвысокой регенерацией тепла невысокое значение давления за компрессором микротурбины также обеспечит снижение утечек в уплотнениях теплообменника.

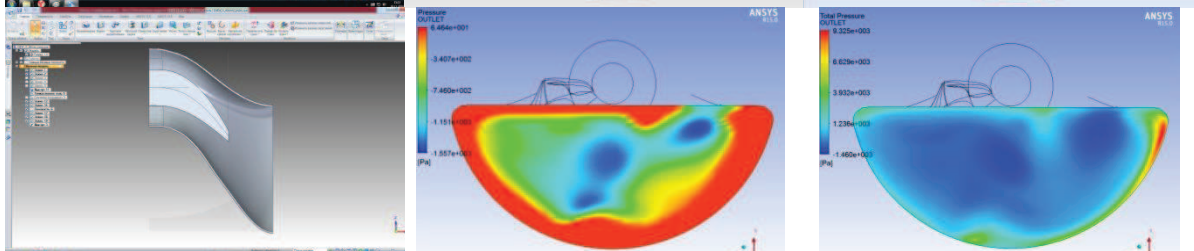
Значительной проблемой проектирования теплообменных аппаратов является задача получения равномерного распределения теплоносителей по поверхности теплопередающей матрицы. Для решения этой проблемы были проведены работы по оптимизации геометрии патрубка-диффузора, подводящего выходящий из турбины газ к теплообменнику. Для решения поставленной задачи в диффузоре устанавливались различные дефлекторы, после чего диффузор продувался газом (расчетно).

Расчет течения в диффузоре выполнялся в конечно-элементном программном комплексе с использованием модели турбулентности SST.

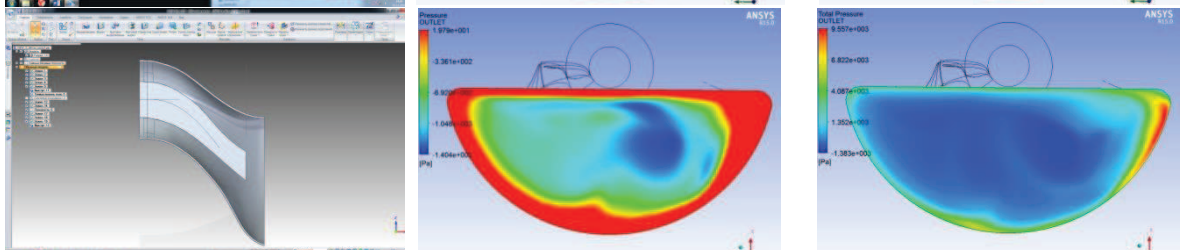
№1



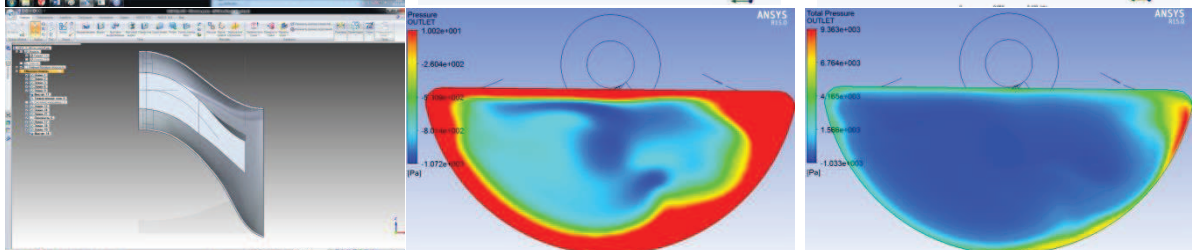
№2



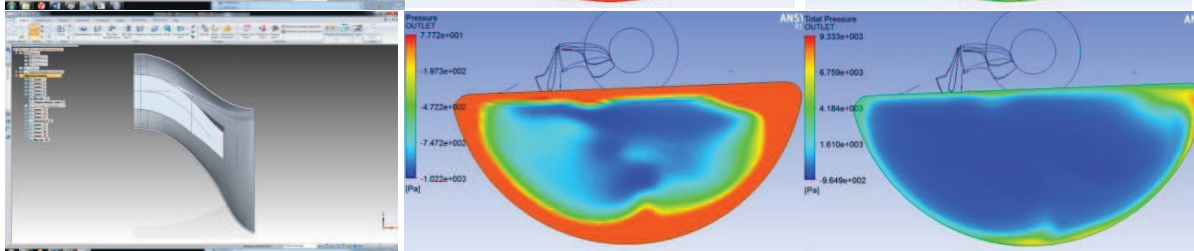
№3



№4



№5



№6

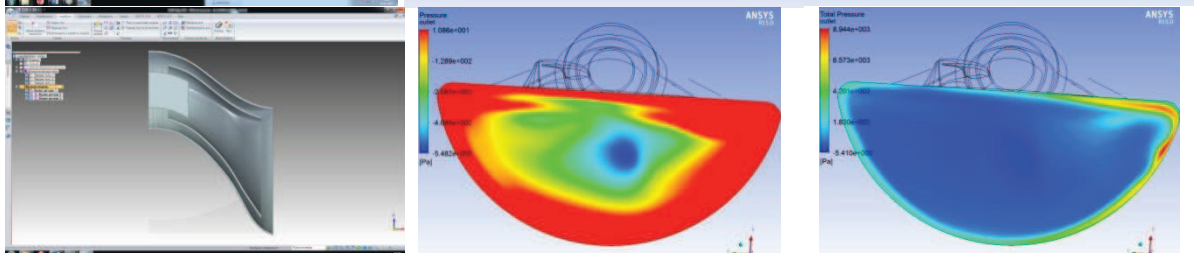


Рисунок 5. Различные варианты геометрии выходного диффузора № 1 – 6 и соответствующие им поля статических и полных давлений на выходе

Результаты расчетов приведены на рисунке 5 (поля статического и полного давлений на

выходе диффузора), а осредненные по расходу газа величины давлений – в таблице 1.

Таблица 1

Результаты математического моделирования течения газа в диффузоре

Вариант диффузора (№)	Повышение статического давления в диффузоре, Па	Потери полного давления в диффузоре, Па	Максимальное статическое (полное) давление на выходе, Па	Минимальное статическое (полное) давление на выходе, Па
1 (без дефлектора)	2198	1840	1789 (7998)	-2475 (-2676)
2	1351	3153	65 (9325)	-1557 (-1460)
3	2411	1808	20 (9557)	-1404 (-1383)
4	2347	1942	10 (9363)	-1072 (-1033)
5	2452	2002	78 (9333)	-1022 (-965)
6	-2338	26	11 (8944)	-548 (-541)

Как видно из таблицы лучшие результаты показал диффузор № 6. Он имеет весьма малые потери полного давления (26 Па) и наименьшую (по сравнению с другими диффузорами) неравномерность на выходе. Также в выходном сечении диффузора № 6 было получено существенное снижение зоны обратных токов.

Выводы

1. Применение сверхвысокой регенерации тепла выхлопных газов поднимает эффективность малоразмерных газотурбинных двигателей до и выше уровня лучших поршневых двигателей.
2. Разработанная многотопливная экологически чистая микротурбина является перспективным двигателем для транспорта и распределенной энергетики.
3. Разработанная микротурбина позволят занять российским производителям передовые позиции по экологически чистым энергетическим установкам и транспортным средствам.

Литература

1. Костюков А.В., Кустарев Ю.С. и др. Исследование роторного теплообменника малоразмерного регенеративного газотурбинного двигателя. Общероссийский н/т журнал «Полёт», № 1, 2005, с. 38-42.
2. Костюков А.В., Елисеев С.Ю. и др.. Способ охлаждения каркаса вращающегося дискового теплообменника и устройство для его осуществления. Патент на изобретение №2296930, 2007 г.
3. Костюков А.В., Кустарев Ю.С., и др. Исследование системы охлаждения каркаса роторного теплообменника. Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2007, с. 61-65.
4. Костюков А.В. Микротурбина с эффективным КПД более 43%. Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2012, т. 1, № 2(14), с. 179-182.

УДК: 621.438

Энергоаккумулирующие вещества как альтернативное топливо для стационарных и транспортных энергоустановок

доц. Кузнецов В.В., Лоик А.В.

Университет машиностроения

8(967)0285325, kuznetsov@yandex.ru

Аннотация. Рассматриваются возможности использования энергоаккумулирующих веществ (ЭАВ) как альтернативного топлива для транспортных и стацио-