В. Д. Буров, А. А. Дудолин, В. В. Макаревич, Е. В. Макаревич –
Московский энергетический институт (Технический университет)

Одной из эффективных технологий, основанных на использовании газа для производства электрической энергии, являются электростанции на базе газопоршневых двигателей внутреннего сгорания. Такие газовые двигатели имеют высокий КПД производства электроэнергии, достаточно низкий уровень выбросов вредных веществ, являются надежными в эксплуатации и способны длительное время работать при частичных нагрузках без ущерба для своего ресурса и практически без снижения КПД.

Потенциал применения газопоршневых двигателей

зарубежных производителей на территории РФ

В настоящее время электростанции на базе газопоршневых двигателей мощностью от 1 до 4 МВт являются наиболее востребованным источником постоянного энергоснабжения жилищно-коммунального сектора, промышленных предприятий, угледобывающих и нефтегазовых промыслов. У них есть ряд преимуществ перед дизельными и газотурбинными приводами. В частности, устраняется необходимость доставки дизельного топлива в удаленные районы нефте- и газодобычи. Газопоршневые двигатели в диапазоне мощности до 4 МВт имеют более высокий *КПД* по сравнению с газовыми турбинами, приспособлены для работы на частичных нагрузках. Кроме того, они менее подвержены влиянию высокой температуры окружающего воздуха, и их ресурс в 2-3 раза больше, чем у газовых турбин [1].

Использование различного газообразного топлива (природного, нефтяного или шахтного газа) влияет как на конструктивные характеристики газопоршневых установок (ГПУ), так и на основные параметры, в том числе на степень сжатия, среднее эффективное давление и, как следствие, на агрегатную мощность. Целью данных исследований являлся сравнительный анализ характеристик разных типов ГПУ и разработка рекомендаций по выбору энергоустановки, наиболее подходящей для каждого потребителя.

В настоящее время на мировом рынке представлено достаточно много компаний-производителей газопоршневых установок. Наиболее крупные из них, выпускающие ГПУ средней мощности в диапазоне 1...4МВт на базе газопоршневых двигателей собственного производства (включая лицензионные), – Caterpillar S.A.R.L,. Cummins Inc и Waukesha Engine Dresser Inc (США), MWM, GmbH и MTU Onsite Energy (Германия), GE Energy Jenbacher gas engines (Австрия), Mitsubishi Heavy Industries Ltd. (Япония), Rolls-Royce Power Engineering Plc (Power Generation) (Великобритания) *(табл. 1)*. Остальные компа-

Табл. 1. ***Основные производители газопоршневых установок***

Производитель	Диапазон мощности, МВт
Caterpillar S.A.R.L.	0,07-5,9
Cummins Inc.	0,33-1,8
FG Wilson (Engineering) Ltd.	< 1
Ford Power Products	< 1
GE Energy Jenbacher gas engines	0,3-4
General Motors Corporation	< 1
Guascor S.A.	< 1,2
Iveco Motors S.p.a.	< 1
Lister Petter Ltd.	< 1
MAN B&W Diesel A/S	> 5
MAN Nutzfahrzeuge AG	< 1
Mitsubishi Heavy Industries Ltd.	0,68-5,75
MTU Onsite Energy	0,3 - 2
MWM, GmbH	0,18-4,0
Niigata Power Systems Co. Ltd.	1,1 - 5,4
Perkins Engines Company Ltd.	< 1
Rolls-Royce Power Engineering Plc	1,19 - 8,75
Volvo Penta	< 1
Wartsila Finland Oy	4,14 - 9,0
Waukesha Engine Dresser Inc	0,15 - 3,37

нии выпускают ГПУ в диапазонах малой мощности – менее 1 МВт и большой мощности – более 4 МВт или комплектуют газопоршневые установки двигателями других производителей.

На российском энергетическом рынке в сегменте от 1 до 4 МВт представлено достаточно ограниченное число фирм-производителей - Caterpillar, Cummins, GE Jenbacher и Waukesha. ГПУ других производителей в данной работе не рассматривались по причине их недостаточно широкого распространения в России.

Основные технические и конструктивные характеристики рассматриваемых вариантов ГПУ приведены в *табл. 2*.

В зависимости от вида топлива газопоршневых электростанций (ГПЭС), графиков и характера электрических нагрузок потребителей рассмотрены четыре основных категории ГПЭС:

1 – на традиционном «легком» природном газе ($Q_{нр}$=31,8 МДж/м^3, r=0,7 кг/м^3), предназначены для потребителей коммунально-бытового сектора;

2 – на традиционном «легком» природном газе ($Q_{нр}$=31,8 МДж/м^3, r=0,7 кг/м^3), предназначены для потребителей городского промышленного сектора;

3 – на особом «тяжелом» нефтяном попутном газе ($Q_{нр}$=59,25 МДж/м^3, r=1,22 кг/м^3), предназначены для потребителей нефтяных компаний;

4 – на особом тяжелом шахтном газе ($Q_{нр}$=16,41 МДж/м^3, r=1,11 кг/нм^3), предназначены для потребителей угледобывающих

Табл. 2. ***Технические характеристики вариантов ГПУ различных производителей***

Основные параметры	Waukesha APG1000	Waukesha APG3000	Waukesha 16V-AT27GL	Waukesha VHP9500 GSI	Caterpillar G3616 LE	Caterpillar G3612 LE	Caterpillar G3520C	Caterpillar G3516 LE	Jenbacher J620GS	Jenbacher J320GS	Cummins 1750GQN B-50	Cummins 1160 GQKA
Номинальная мощность, кВт	1000	3200	3250	1175	3859	2575	2000	1030	3041	1063	1750	1160
Перегрузочная способность, кВт	1000	3200	3575	1293	3859	2575	2000	1030	3041	1063	1750	1160
Скрость нагружения и разгружения, %	40	40	30	30	15	15	15	15	15	15	30	30
Минимальное значение метанового числа	80	40	35	35	50	50	80	30	75	75	45	45
Потребление топлива, кВт	2422	7764	8778	3869	9831	6215	4919	2882	7189	2664	4677	2974
КПД электрический, %	41,3	41,2	37	30,4	39,3	41,4	40,6	35,7	42,3	39,9	37,4	39
Номинальная частота вращения, об/мин	1500	1500	1000	1000	1000	1000	1500	1500	1500	1500	1500	1500
Степень автоматизации по ГОСТ 14228-80	Третья											
Включение на паралл. работу на общую шину, распределение нагрузки между ГПГУ	Автоматическое											
Среднее эффективное давление (BMEP), бар	17,3	16,1	14,35	9,66		-	-	-	-	-	16	16
Степень сжатия	10	11	9	8	10,5	10,5	11,3	12	11	12,5	12	14,5
Расположение блоков	V-образное											
Количество цилиндров, шт	16	18	16	16	16	12	20	16	20	20	18	16
Диаметр цилиндра / ход поршня, мм	152/165	220/240	275/300	238/216	300/300	300/300	170/190	170/190	190/120	135/170	180/200	159/190
Объем двигателя, л	48	164,2	214	154	339	248	86	69	124,8	48,7	91,62	81,44
Регулятор частоты	Электронный											
Система воздухоснабжения	Турбонаддув с охлаждением, обедненная топливная смесь											
Тип стартера	Э	П	П	П	П	П	Э	Э	Э	Э	Э	Э
Емкость масляной системы, л	454	820	1188	625	1325	1030	541	401	670	370	560	380
Емкость рубашки охлаждения (Jw + Ax), л	189	526	590	560	900	-	-	-	-	-	-	-
Сервисные интервалы замены масла, ч	1500	3000	4000	3000	5000	5000	5000	5000	1000	1000	1500	1500
Ресурс до капитального ремонта, моточас	48000	48000	80000	72000	65000	65000	100000	65000	60000	60000	60000	60000
Полный ресурс, моточас	240000	240000	400000	360000	-	-	200000	-	180000	240000	300000	300000
Габаритные размеры: длина, мм ширина, мм высота, мм	5283 2159 2235	7 880 1 925 3 260	10060 2590 3350	7370 2340 3300	9320 2121 4126	8062 2121 4026	6070,5 1853,4 2248,3	4917 2205 2012	8900 2200 2800	5700 1700 2300	5606 1721 2661	4890 2074 2240
Сухой вес, кг	14182	36 333	49000	21040	64470	51230	18350	12873		10500	16062	15000
Эмиссия NO_x, мг/нм^3	500.0	500.0	900.0	500.0	457.0	337.0	250.0	500.0	300.0	300.0	350.0	350.0
Удельная стоимость ГПУ, $/кВт	523.5	539.4	649.8	694.0	677.4	713.1	695.0	601.0	560.2	600.3	605.0	618.0
Средняя стоимость ТО, включая затраты на расходные материалы и запчасти, руб./кВт	25059	47086	49072	15203	25967	22141	34230	21658	34920	26955	48484	36844

Примечание. Тип стартера: Э – электрический, П – пневматический.

компаний.

При выполнении расчетов учитывались плановые остановы оборудования на регламентные работы, которые были отнесены на период минимальных электрических нагрузок ГПЭС. В итоге условно было принято количество часов работы в год на номинальной мощности для 1-й категории – 7500 ч, для 2-й – 8 000 ч, для 3-й и 4-й категории – 7 000 ч.

На *рис. 1* представлены основные критерии, характеризующие наиболее важные технические, эксплуатационные и экономические показатели ГПЭС, на основе которых выполнялось сравнение установок в пределах каждой категории.

Технические и конструктивные характеристики:

- электрический *КПД* на клеммах генератора ($КПД_{эл}$), максимальное значение которого характеризует технические и термодинамические преимущества конструкции двигателя ГПУ;
- метановое число (метановый индекс), минимальное значение которого показывает возможность работы ГПУ без снижения электрической мощности на различных видах газа;
- экологические показатели по NO_x (при 5 % O_2) – минимальное значение эмиссии оксидов азота определяет снижение экологической нагрузки ГПЭС на окружающую среду:
- удельная масса ГПУ (отношение сухой массы/$N_{эл}$) – характеризует техническое совершенство энергоустановок, исходя из их массогабаритных показателей (критерий применим только в пределах группы ГПУ с одинаковым количеством оборотов);
- ресурсные показатели (продолжительность эксплуатации ГПУ до капитального ремонта и полный назначенный ресурс) – максимальная продолжительность этих периодов определяет как техническое совершенство конструкции ГПУ, так и минимизирует эксплуатационные издержки в процессе работы ГПЭС (критерий применим только в пределах группы ГПУ с одинаковым количеством оборотов).

Табл. 3. ***Матрица попарно сравниваемых характеристик значимости***

	$П_1$	$П_2$	…	$П_i$	ε_i	$\alpha_i=\varepsilon_i/\varepsilon_0$
$П_1$	1	2	…	3	ε_1	α_1
$П_2$	1/2	1	…	4	ε_2	α_2
			…			
$П_i$	1/3	1/4	…	1	ε_i	α_i
					$\varepsilon_0=\Sigma\varepsilon_0$	

$П_i$ – показатель или значимая характеристика ГПУ; ε_i – суммарный вес каждого сравниваемого показателя; α_i – коэффициент значимости

Эксплуатационные показатели:

- диапазон регулирования мощности (отношение минимальной электрической мощности, при которой двигатель ГПУ устойчиво работает в течение продолжительного периода времени, к номинальной мощности энергоустановки) – минимальное значение характеризует возможность устойчивой работы ГПУ в области графиков электрических нагрузок с ярко выраженными максимумами и минимумами энергопотребления.
- скорость нагружения и разгружения (отношение разрешенной производителем величины шага набора/сброса электрической мощности к номинальной мощности ГПУ) – максимальное значение характеризует возможность устойчивой работы ГПУ в области резкопеременных графиков электрических нагрузок (промышленные предприятия, нефтедобыча и угледобыча – пуски приводных электродвигателей насосов, вентиляторов, дробилок, конвейеров, подъемников и других механизмов с мощными асинхронными электродвигателями).
- средняя стоимость технического обслуживания (ТО), включая затраты на расходные материалы и ЗИП (за период до 1-го капитального ремонта) – минимальное значение соответствует минимуму эксплуатационных издержек за указанный период. В эту стоимость входят затраты на смазочное масло, которые определятся исходя из удельного суммарного годового расхода масла (на угар и плановую замену) на 1 кВт.ч электроэнергии, выработанной за этот период, и составляют до 1/3 суммарных затрат на ТО. Минимальное значение данного критерия характеризует не только преимущества конструкции привода ГПУ, но также и минимизирует эксплуатационные издержки на дорогое синтетическое смазочное масло в процессе работы ГПЭС.

Экономические критерии:

Рис. 1. **Основные критерии сравнения ГПУ**

- внутренняя норма рентабельности проекта (основной критерий ранжирования) должна быть не меньше принятой ставки дисконтирования: чем выше, тем больше доходность проекта;
- чистый дисконтируемый доход должен быть больше нуля, максимальное значение соответствует суммарному максимальному доходу за весь расчетный период;
- индекс прибыльности демонстрирует относительную величину доходности проекта, определяет сумму прибыли на единицу инвестированных средств. Обязательное условие реализации проекта: индекс прибыльности должен быть больше 1.

На основе данных критериев, в целях определения оптимального варианта ГПУ, была проведена подробная оценка технико-экономических характеристик агрегатов, отвечающих условиям работы ГПЭС при обеспечении электроэнергией рассматриваемых категорий потребителей.

Для сравнения вариантов используется общепринятый метод, состоящий из двух этапов. На первом этапе для вышеуказанных критериев определяются весовые коэффициенты значимости каждого из рассматриваемых параметров (характеристик) газопоршневых установок и составляется матрица характеристик *(табл. 3)*.

На втором этапе, после определения весовых коэффициентов для каждого показателя, определяется значение критериев применительно к типу исследуемой ГПУ, на основании которого и будет проводиться ранжирование агрегатов. Максимальный суммарный бал (К) соответствует наиболее эффективному типа ГПУ:

$$K_i = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i \left(\frac{\Pi_i}{\Pi_{i,\,max}}\right)^{\pm 1}.$$

Результаты сравнительного анализа свидетельствуют об эффективности использования ГПУ, работающих как на природном газе, так и на попутном нефтяном и шахтном газе, при энергообеспечении потребителей рассматриваемых категорий.

Установлено, что в ГПЭС на природном газе (потребители 1-й и 2-й категории, *рис. 2*) целесообразно использование высокооборотных двигателей, из которых можно выделить следующие: Waukesha, серия APG; Cummins, серия 1750 и 1160; Jenbacher, серия 620 и 320. Данные ГПУ при сравнительно невысокой удельной стоимости имеют довольно высокий электрический *КПД* и обеспечивают быстрое нагружение/разгружение.

В рассматриваемых категориях к высооборотным ГПУ приближаются и среднеоборотные энергоустановки Waukesha серий ATGL и VHP *(рис. 2)*, что обусловлено их возможностью быстрого набора и сброса мощности.

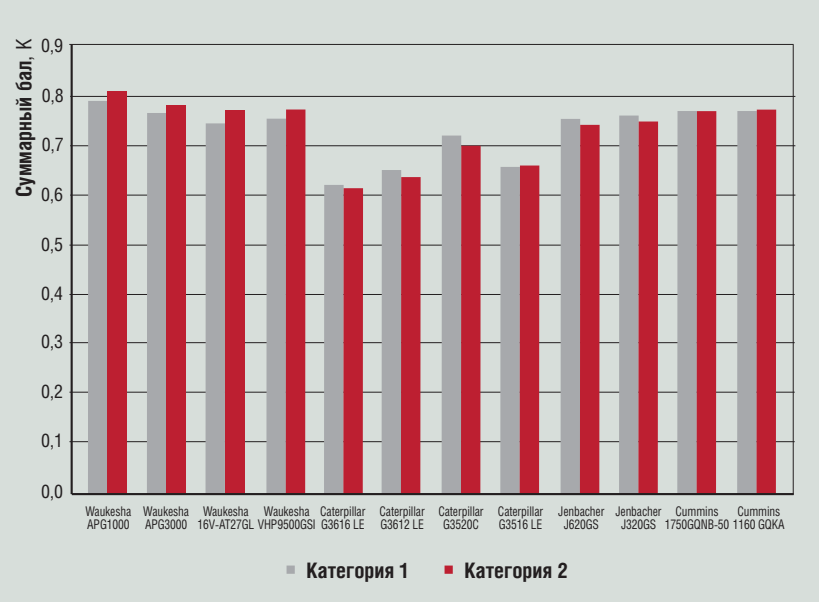


Рис. 2. **Результаты ранжирования ГПУ по техническим критериям для категорий 1, 2**

При проведении исследований для ГПЭС, обеспечивающих нагрузку потребителей 3-й категории, был принят ПНГ с усредненным значением метанового индекса – 44,6. Как видно из данных *табл. 2*, для значительной части ГПУ этот индекс превышает заданное значение (>50). Следовательно, такие агрегаты не смогут работать на ПНГ при номинальной мощности без дополнительных мероприятий, поэтому они были исключены из рассмотрения в этой категории.

Для энергоустановок, работающих на ПНГ, целесообразно использование среднеоборотных двигателей с частотой вращения вала 1000 об/мин, обеспечивающих устойчивую работу на попутном газе. Надежная работа ГПУ данного типа обеспечивается как за счет большего объема камеры сгорания, так и за счет низкого среднеэффективного давления, при которых двигатель работает в менее напряженном режиме. Преимуществом данных установок являются также низкие эксплуатационные затраты, которые обеспечиваются расширенными интервалами технического обслуживания, и высоким назначенным ресурсом.

Из исследованных вариантов ГПУ наиболее полно данным преимуществам отвечают уста-

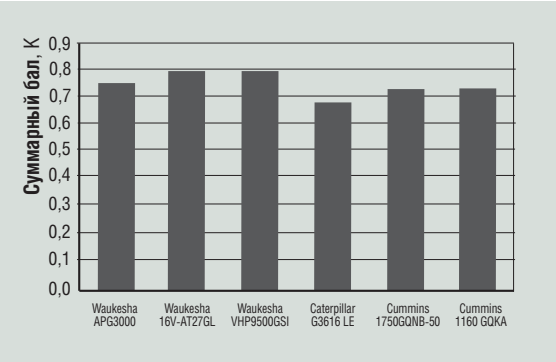


Рис. 3. **Результаты ранжирования ГПУ по техническим критериям для категории 3**

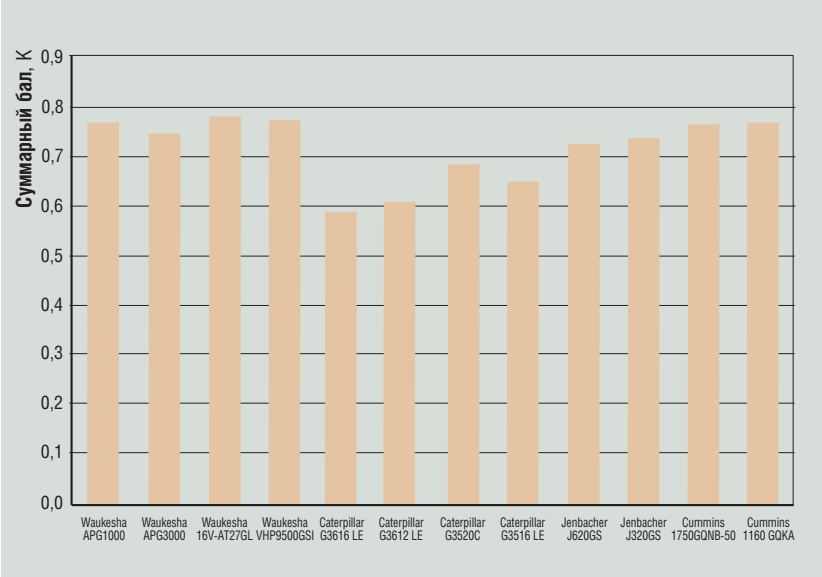


Рис. 4. **Результаты ранжирования ГПУ по техническим критериям для категории 4**

новки компаний Waukesha (серий ATGL и VHP) и Cummins, серии 1160 *(см. рис. 3)*.

При использовании попутного нефтяного и шахтного газа в качестве топлива ГПЭС улучшается такой немаловажный показатель работы станции как экологический. До недавнего времени значительная часть ПНГ сжигалось в факелах. Его использование в качестве топлива позволяет компаниям существенно сократить «экологические» штрафы, а также получить дополнительный доход от продажи квот в соответствии с условиями Киотского протокола [2].

Проведенные исследования показали, что при работе на шахтном газе, так же как и на ПНГ совокупности факторов лучшие показатели имеют среднеоборотные ГПУ с частотой вращения 1000 об/мин *(рис. 4)*. Несмотря на то что они уступают другим типам ГПУ по показателям тепловой экономичности, этот критерий для данной группы потребителей оказывается не настолько весомым, поскольку попутный нефтяной и шахтный газ являются побочным, условно бесплатным топливом. Здесь гораздо большую значимость приобретают такие критерии, как полный ресурс (у VHP9500GSI до 400 тыс. часов) и увеличенные интервалы технического обслуживания, что в конечном итоге и повлияло на ранжирование агрегатов.

Из всех рассматриваемых энергоустановок с частотой вращения 1000 об/мин в 4-й категории при работе на шахтном газе лучшими показателями обладают ГПУ типа Waukesha серий ATGL и VHP. Хорошие показатели также имеют и ГПУ Cummins серий 1750 и 1160, что обусловлено их возможностью работать при переменных нагрузках (быстрое прохождение сброса/наброса нагрузки) и относительно невысокой стоимостью.

Для окончательного вывода и формирования заключения в работе проведен также и финансово-экономический анализ. Расчеты выполнены в прогнозных ценах в соответствии со «Сценарными условиями развития электроэнергетики Российской Федерации на 2009-2020 годы» в среде Project Expert 7.19. Горизонт расчета принимался равным максимальному сроку службы ГПУ (400 тыс. ч), для агрегатов с меньшим сроком службы были учтены затраты на реновацию оборудования. Оценка суммарных капиталовложений в варианты ГПЭС выполнена на основе данных, представленных производителями оборудования, а также на основе экспертных оценок и проектов-аналогов.

Поскольку рассматриваемые варианты не выравнены по количеству отпускаемой электроэнергии, то сравнение по чистому дисконтируемому доходу (NPV) не является корректным. В качестве основного критерия ранжирования была принята внутренняя норма рентабельности (IRR), которая не должна быть ниже принятой ставки дисконтирования – 13%. Результаты ранжирования по финансово-экономическим критериям представлены на рис. 5-7.

Рис. 5. **Результаты ранжирования по экономическим критериям для категорий 1, 2**

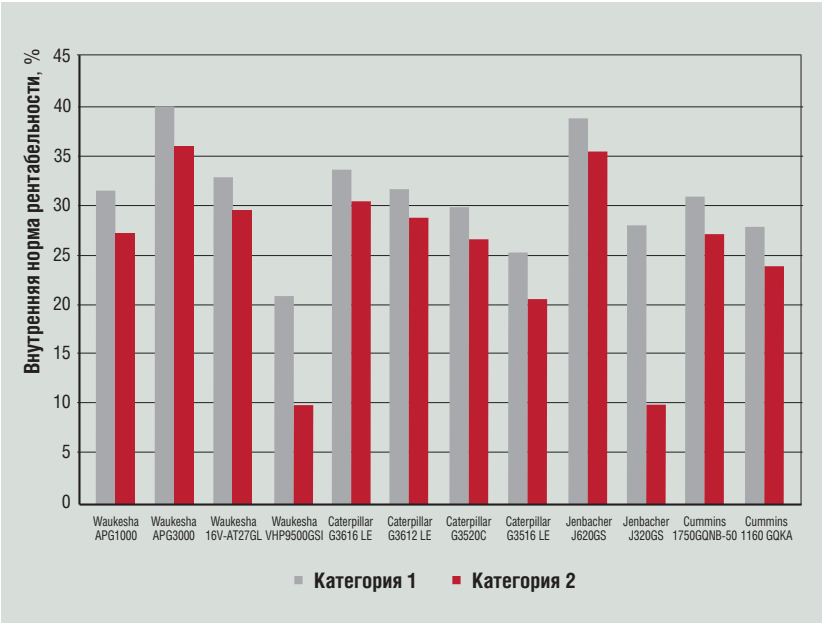
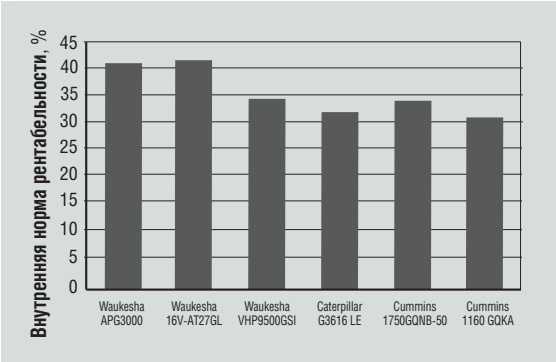


Рис. 6. **Результаты ранжирования по экономическим критериям для категории 3**



Для категорий 1, 2 учитывалась стоимость топлива, поэтому значительное влияние имеет техническое совершенство ГПУ, а именно КПД. Независимо от числа оборотов мощные энергоустановки с высокими значениями КПД стали лидерами (Waukesha APG3000, Jenbacher J620 GS и Caterplilar G3616LE). При этом ГПУ более низкой мощности обладают худшими показателями, чем установки большей мощности.

Стоимость попутного и шахтного газа принята равной «ноль» р./м^3, что снизило эксплуатационные издержки – отсутствуют затраты, связанные с покупкой топлива и влиянием тепловой экономичности агрегатов (*КПД* установок). Наилучшими показателями в 3-й категории обладают мощные высоко- и среднеоборотные ГПУ типа Waukesha и Cummins серии 1750; в 4-й категории – также наиболее мощные ГПУ Waukesha и Jenbacher J620 GS.

Исходя из результатов сравнительного анализа для всех категорий потребителей, независимо от вида используемого топлива, наиболее предпочтительны в качестве основного оборудования ГПЭС среднеоборотные установки компании Waukesha серий ATGL и VHP. Основными их преимуществами являются:

- возможность работы газопоршневой установки с частотой вращения 1000 об/мин на всех видах топлива (природный газ, ПНГ и шахтный метан);
- надежная работа ГПУ за счет большего объема камеры сгорания;
- возможность работа газопоршневого двигателя при низком среднеэффективном давлении в менее напряженном режиме;
- низкие эксплутационные затраты за счет расширенных интервалов обслуживания (замена масла через 3 000-4 000 ч).
- высокий ресурс энергоустановок – 72 000 ч до первого капитального ремонта, назначенный ресурс до 360 000 - 400 000 ч.

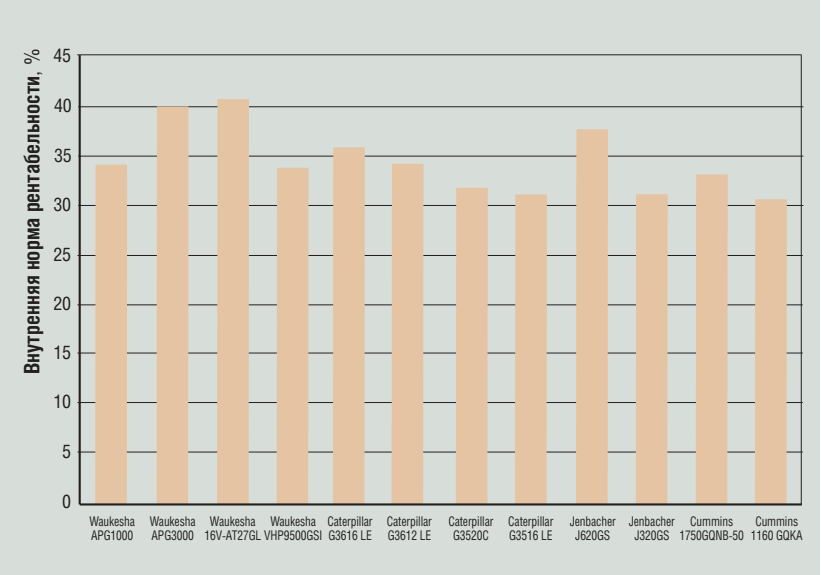


Рис. 7. **Результаты ранжирования по экономическим критериям для категории 4**

Использованная литература:

1. Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электрических станций. - М.: Изд-во МЭИ, 2002.- 584 с.

2. Федоров С.Д., Облакевич С.В., Радюк О.П. Проблема утилизации шахтного метана в когенерационных установках и пути ее решения на примере шахты им. А.Ф. Засядько//Промэлектро, 2006, №5.

3. Ю. В. Кромин. Попутный газ - топливо для газопоршневых ТЭЦ//Турбины и дизели, 2007, №5.

4. В.Ю. Бетлинский, Р. А. Жердецкий. У нефтяников есть энергичный попутчик - попутный нефтяной газ для электростанций нефтяных месторождений//Турбины и дизели. 2006, №3.