

---

УДК 621.01:539.4

---

## НОВЫЕ ПАРОВЫЕ МАШИНЫ. ВЗГЛЯД ИЗ РОССИИ.

---

**В.А. Жигалов**

инженер-конструктор, 659306, г. Бийск, Россия.

e-mail: schigalov@inbox.ru

---

Приведены данные, доказывающие что поршневые паровые машины имеют наименьший удельный расход пара среди всех типов паровых машин и турбин, одинаковых мощностей. Перечислено, какой мощности паровые машины можно изготовить из узлов и деталей двигателей внутреннего сгорания и компрессоров, выпускающихся в настоящее время. Сделаны выводы о рациональности использования малых тепловых электростанций с поршневыми паровыми машинами. Описаны технические решения, которые могут быть использованы при проектировании и изготовлении малых тепловых электростанций с поршневыми паровыми машинами.

---

*Ключевые слова:* поршневая паровая машина, расход пара.

---

---

## NEW STEAM ENGINES. VIEW FROM RUSSIA.

---

**Vladimir A. Zhigalov**

design engineer, 159306 Biysk, Russia.

e-mail: schigalov@inbox.ru

---

### ABSTRACT

---

The data proving that piston steam engines have the lowest specific steam consumption among all types of steam engines and turbines of the same capacity are presented.

It is listed what power steam engines can be made from components and parts of internal combustion engines and compressors, currently available.

The conclusions about the rationality of the use of small thermal power plants with piston steam engines.

The technical solutions that can be used in the design and manufacture of small thermal power plants with piston steam engines are described.

---

*Keywords:* piston steam engine, steam consumption.

---

## Введение

Рассмотрим энергоснабжение предприятий и других объектов, потребляющих одновременно тепловую и электрическую энергию. Таких, например, как предприятия пищевой промышленности, которые расходуют пар низких параметров для тепловой обработки продуктов и электроэнергию для холодильных установок. Другой пример – лесопереработка, где пар необходим для сушильных камер, а электроэнергия для распиловки брёвен. Или тепличные хозяйства и многое, многое другое. И, конечно, тепло- и электроснабжение небольших посёлков, включая объекты министерства обороны, перебои в электроснабжении которых часто приводят к остановкам котельных.

Известно, что совместное производство тепловой и электрической энергии более экономично, чем раздельное производство. При небольшой величине потребления совместное производство тепловой и электрической энергии может производиться на малых тепловых электростанциях (МТЭС). Чаще всего на этих электростанциях химическая энергия топлива преобразуется в тепловую энергию с помощью паровых котлов. Затем заключённая в водяном паре тепловая энергия преобразуется в механическую энергию с помощью паровых двигателей – турбин, винтовых или поршневых машин. Эта схема энергоснабжения может использоваться на нефтедобывающих предприятиях, попутный газ которых непригоден для газовых двигателей, но горит в топках паровых котлов.

Оставшаяся после агрегата тепловая энергия в зимнее время используется на отопление и технологические нужды, а в летнее время может использоваться на технологические нужды или для получения холода с помощью абсорбционных холодильных машин.

Малые тепловые электростанции могут использоваться не только в России, но и во многих других странах, имеющих районы с невысокой плотностью населения, где линии электропередач строить невыгодно. Кроме России к таким странам можно отнести Китай, Индию, Пакистан, страны юго-восточной Азии, страны южной Америки и даже Канаду.

## Сравнение экономичности паровых турбин и поршневых паровых машин.

Основное влияние на экономичность паровых электростанций имеет удельный расход пара двигателем, который применяется в данной электростанции. Под удельным расходом пара понимается количество пара, которое расходуется для получения единицы мощности, развиваемой двигателем в данный момент [2]. В качестве двигателя мы будем рассматривать паровую турбину и поршневую паровую машину однократного расширения. Вот три фактора, которые оказывают наибольшее влияние на экономичность этих двигателей.

Два фактора для машин и турбин одинаковы. Это давление пара и его температура на входе в машину или турбину. Давление и температура пара на выходе из машины или турбины зависят от третьего фактора, который для машин и турбин различен.

Для турбины это количество ступеней расширения. Чем больше ступеней расширения – тем меньше удельный расход пара. В таблице 1 показан удельный расход пара турбиной в зависимости от числа ступеней расширения у данной турбины [5].

**Таблица 1.** Удельный расход пара с давлением 2,2 МПа в кг/кВт в зависимости от количества ступеней расширения паровой турбины

Число ступеней расширения	8	6	4	3	2
Удельный расход пара	6,5	9	11	14	16

А для поршневых паровых машин это коэффициент наполнения цилиндров. Коэффициент наполнения цилиндра – это та часть рабочего объёма цилиндра, которая во время впуска заполняется свежим паром. Связь между коэффициентом наполнения цилиндра и углом поворота коленчатого вала машины, во время которого происходит впуск пара в цилиндр, проиллюстрирована разработанной нами диаграммой и представленной на рисунке 1.



Рисунок 1. Зависимость коэффициента наполнения цилиндров от угла поворота коленчатого вала машины.

В таблице 2, составленной по данным [1, 4] и расчётам автора, показана связь между удельным расходом пара и коэффициентом наполнения цилиндров машины.

**Таблица 2.** Удельный расход пара с давлением 2,2 МПа, в кг/кВт, в зависимости от коэффициента наполнения цилиндров поршневой паровой машины.

Коэффициент наполнения	0,2	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36
Удельный расход пара	7,35	7,89	8,4	8,9	9,37	9,85	10,29	10,74	11,17

Анализируя данные таблиц 1 и 2 можно увидеть, что существуют паровые турбины, которые имеют несколько меньший, чем у поршневых паровых машин однократного расширения, удельный расход пара. Однако не следует этим обольщаться и отдавать предпочтение паровым турбинам. Надо помнить, что многоступенчатые турбины, работающие на паре низкого давления, выпускают мировые лидеры турбостроения. И стоимость этих турбин весьма высока, и требуют они для своей эксплуатации специалистов высокой квалификации.

А можно при незначительном усложнении сконструировать и изготовить поршневую паровую машину двойного или тройного расширения. И будет эта машина иметь более низкий, чем самая лучшая турбина, удельный расход пара [4].

И есть у многоступенчатых турбин ещё один, и очень большой недостаток. Чем больше число ступеней расширения – тем больше длина вала турбины. А чем больше длина

вала турбины – тем меньшее количество остановок (отключений с остыванием) эта турбина может выдержать [5]. А при использовании в качестве топлива для котла древесных отходов, лузги или пеллет котёл может требовать несколько остановок в год. И столько же раз придётся останавливать турбину.

### **Источники пара для работы поршневых паровых машин.**

В качестве источников пара могут использоваться барабанные или прямоточные паровые котлы (парогенераторы).

В барабанных котлах может использоваться твёрдое топливо, такое как уголь различных фракций, древесные отходы, растительная лузга и пеллеты. Может использоваться жидкое топливо, водоугольные эмульсии или газовое топливо.

Для прямоточных котлов используется жидкое или газообразное топливо.

В большинстве случаев газовое топливо более экономично использовать в газовых турбинах или газовых двигателях. Но на нефтедобывающих предприятиях, попутный газ которых часто не пригоден для работы газовых двигателей, этот газ следует сжигать в топках котлов.

В случаях, когда не предполагается использование тепловой энергии после паровой машины, возможен отказ от конденсации пара после паровой машины. В этом случае проводится подготовка воды в количестве, необходимом для работы машины. В большинстве случаев это оказывается более экономичным, чем содержание оборудования, необходимого для конденсации. Часто в таких случаях предпочтительным является использование барабанных котлов, которые менее требовательны к качеству питающей воды, чем прямоточные котлы.

### **Удельный расход пара различными агрегатами.**

В поршневых паровых машинах весь поступивший в них пар совершает работу, а через турбины малой мощности и винтовые паровые машины часть поступившего пара проходит не совершая работы. В связи с этим соотношение получаемых от этих агрегатов механической работы и тепловой энергии сместится в сторону увеличения количества теплоты.

В таблице 3, составленной по данным [1,4 , 5], показан удельный расход пара различными агрегатами. В ней собраны данные по поршневым паровым машинам (ППМ) и паровым турбинам серии ОР, выпускавшихся до 1950 г., а также по турбоагрегатам и винтовым паровым машинам (ВПМ), которые выпускаются в настоящее время.

К сожалению, данных о паропоршневых двигателях у автора нет.

Для сравнения экономичности агрегатов, использующих пар различных начальных параметров, фактический удельный расход пересчитан для пара со следующими параметрами:

- давление пара на входе в агрегат – 1,2 МПа
- температура пара на входе в агрегат – 260 °С
- давление пара на выходе из агрегата – 0,3 МПа

Таблица 3. Удельный расход пара различными паровыми агрегатами малой мощности.

Вид агрегата	Модель агрегата	Давление пара на входе в агрегат, МПа	Температура пара на входе в агрегат, °С	Давление пара на выходе из агрегата, МПа	Мощность агрегата, кВт	Фактический удельный расход пара, кг/кВт•ч	Коэффициент пересчёта	Расчётный удельный расход пара, кг/кВт•ч
Турбины	ОР-0,3-1	1,5	260	0,1	300	25	1,06	<b>26,5</b>
	АП-0,75	3,5	435	0,1	750	13,1	1,12	<b>14,7</b>
	ТГ-0,75/Р13	1,2	250	0,4	740	17,6	0,96	<b>16,9</b>
	ОР-1,5-3	1,5	350	0,3	1500	14,5	1,02	<b>14,8</b>
	ТП-1100	1,47	220	0,04	800	12,0	1,04	<b>12,5</b>
	ТП-320	1,37	194	0,12	235	18,5	0,94	<b>19,8</b>
Машины	Винтовая паровая машина	1,3	250	0,1	250	30	1,02	<b>30,6</b>
	Поршневая паровая машина СК-500	1,6	350	0,1	370	6,8	1,08	<b>7,4</b>
	Поршневая паровая машина ЛМ-Х	1,3	330	0,1	245	7,9	1,07	<b>8,5</b>

Данные таблицы 1 показывают, что удельный расход пара у поршневых машин, потребляющих пар низких параметров, примерно вдвое ниже, чем у большинства паровых турбин, потребляющих пар тех же параметров.

### Малая тепловая электростанция (МТЭС) с поршневой паровой машиной.

На рисунке 2 нами изображена схема малой тепловой электростанции, в которой привод электрогенератора осуществляется поршневой паровой машиной.

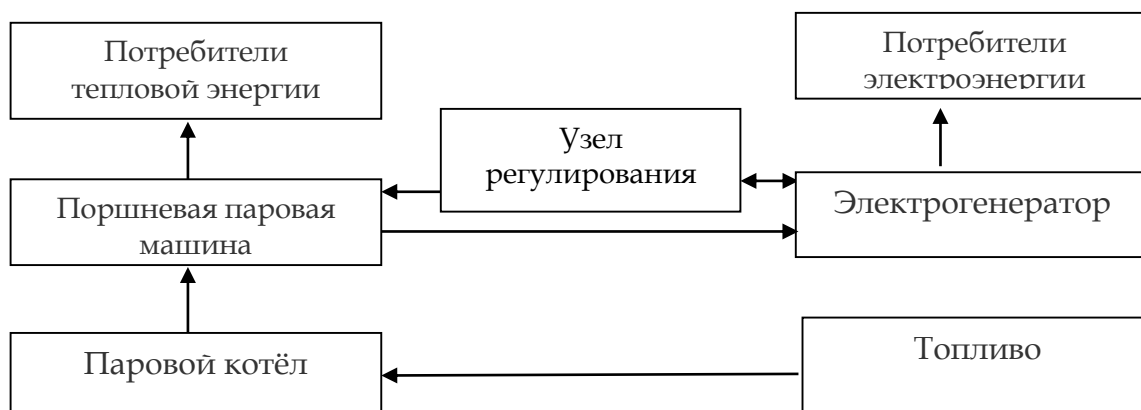


Рисунок 2. Принципиальная схема МТЭС с поршневой паровой машиной

Условно МТЭС с поршневой паровой машиной можно разделить на два относительно независимых модуля – тепловой и силовой.

Тепловой модуль состоит из парового котла, котельно-вспомогательного оборудования и устройств для хранения и подачи топлива. Котёл (парогенератор) может быть как барабанного, так и прямоточного типа. Прямоточный котёл должен постоянно работать в режиме оптимальной мощности, а пар, который не используется в настоящий момент, должен уходить в конденсатор (теплообменник). Это необходимо для того, чтобы при увеличении нагрузки на агрегат не происходило снижение частоты вращения машины из-за недостатка пара. Теперь понятно, что в электростанциях, после которых тепловая энергия использоваться не будет, прямоточные котлы применяться не могут.

Перегрев пара является желательным условием, но отнюдь не обязательным. В качестве энергетического модуля может использоваться любая действующая котельная с котлом на низкие параметры пара. Но надо понимать, что КПД агрегата будет довольно низким.

Силовой модуль состоит из поршневой паровой машины и соединенного с ней электрогенератора. Следует отметить, что при необходимости изменения соотношения получаемых от паровой машины тепловой и электрической энергий эта машина должна быть многоцилиндровой. Изменение этого соотношения может быть и суточным, и недельным, и годовым. Возможны три варианта работы такой машины, которые ранее не применялись и разработаны автором.

1. При работе в режиме однократного расширения во все цилиндры подаётся пар из подводящей магистрали, после расширения в цилиндрах он отводится для дальнейшего использования.
2. В режиме двойного расширения пар из подводящей магистрали подаётся в меньшую часть цилиндров, и из них расширившийся пар вытесняется в ресивер. В остальные цилиндры пар подаётся из этого ресивера и срабатывает до атмосферного давления. В этом режиме может быть получено наибольшее количество механической или электрической энергии.
3. В режиме с промежуточным отбором пара в часть цилиндров подаётся пар из подводящей магистрали, из них расширившийся пар вытесняется в ресивер. Часть пара из ресивера идёт на технологические нужды, а остальной подаётся в цилиндры второй ступени.

Изменение режима работы машины не требует никаких её регулировок, необходимы просто манипуляции кранами управления, подключающими цилиндры к магистралям подачи и сброса пара.

Первый вариант работы на примере трёхцилиндровой паровой машины, работающей в режиме однократного расширения, показан нами на рисунке 3.

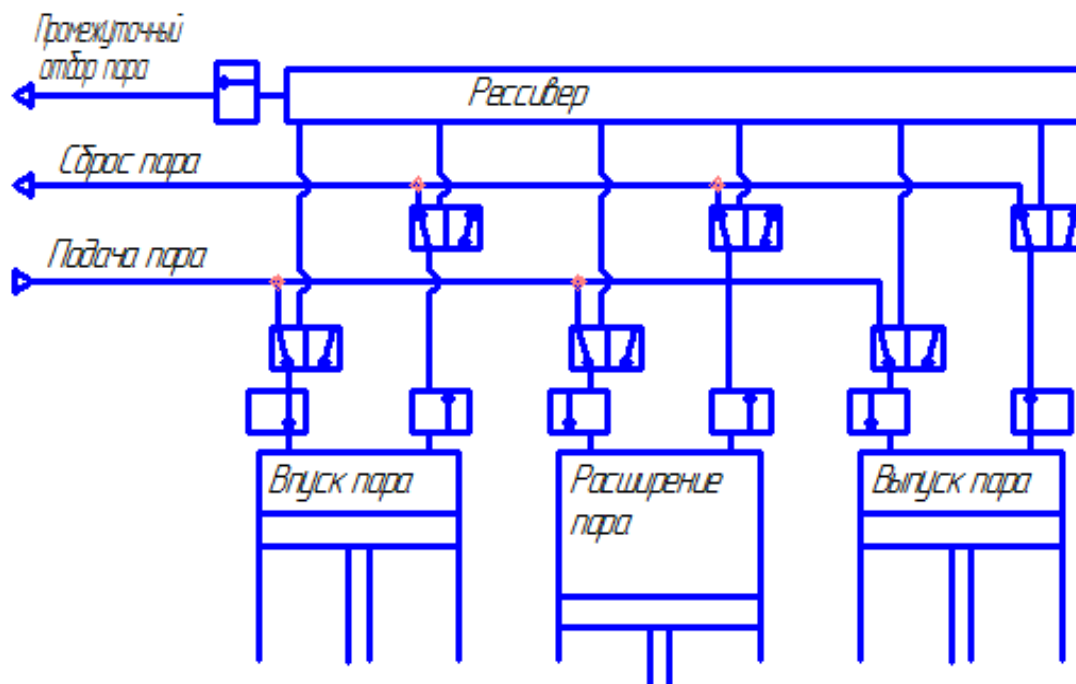


Рисунок 3. Схема подачи пара в поршневую паровую машину и отвода пара от неё.

### Методика расчёта мощности и расхода пара поршневыми паровыми машинами различного типа и рабочего объёма.

Данная методика называется методикой расчёта по среднему давлению в цилиндрах. Она учитывает и работу пара во время его впуска в цилиндр, когда состояние пара не меняется или меняется незначительно. Эта методика расчёта представлена в работах [2, 4] и доработана автором. Во первых в формулах используются данные в системе единиц СИ. И составлена формула расчёта среднего давления в цилиндрах взамен непосредственного измерения этого давления. Проведённые эксперименты показали совпадение результатов при использовании непосредственного измерения и расчётных данных

Мощность паровой машины вычисляем по формуле

$$N = (p_c - p_p) \cdot z \cdot \pi D^2 / 4 \cdot l \cdot n \cdot (1 - k_m) \cdot k$$

$N$  – мощность машины, кВт;

$p_c$  – среднее давление пара в цилиндрах, МПа;

$p_p$  – величина противодействия, МПа;

$z$  – число цилиндров;

$\pi D^2 / 4$  – площадь поршня, м<sup>2</sup>;

$l$  – ход поршня, м;

$n$  – частота вращения машины, с<sup>-1</sup>;

$k_m$  – коэффициент механических потерь;

$k = 1000$  – коэффициент перевода кратных единиц в кВт;

Среднее давление в цилиндрах  $p_c$  вычисляем по формуле

$$p_c = [p_v \cdot k_n + p_v / 2 \cdot (1 - k_n^2)] \cdot (1 - k_k)$$

$p_v$  – давление пара на входе в машину, МПа;

$k_n$  – коэффициент наполнения машины;

$k_k$  – коэффициент конденсации;

Расход пара машиной  $d$  вычисляем по формуле

$$d = V \cdot k_n \cdot n \cdot 3600 \cdot \gamma \text{ где}$$

V – рабочий объём машины, м<sup>3</sup>;

k<sub>n</sub> – коэффициент наполнения цилиндров машины;

n – частота вращения машины, с<sup>-1</sup>;

3600 – коэффициент перевода в часовой расход;

γ – удельный вес пара, кг/м<sup>3</sup>;

**Пример расчёта**

В таблице 4 приведены данные о мощности и расходе пара для поршневой паровой машины однократного расширения, изготовленной на базе шестицилиндрового двигателя размерностью 21/21. (Диаметр цилиндров 210 мм, ход поршней 210 мм, рабочий объём 44 литра). Площадь поршня πD<sup>2</sup>/4 составляет 0,0346 м<sup>2</sup>.

**Таблица 4.** Мощность машины и расход пара при изменении давления и температуры пара.

Параметры пара на входе машины		Удельный вес пара, кг/м <sup>3</sup>	Среднее давление в цилиндре x, МПа	Противодавление после машины, МПа		Частота вращения, об/с	Мощность машины, кВт	Расход пара, кг/час
p, МПа	t, °C			min	max			
1,2	187	6,010	k <sub>n</sub> =0,4 p <sub>c</sub> =0,84	0,1		500/60	215	3960
					0,25		170	
	220	5,479	k <sub>n</sub> =0,25 p <sub>c</sub> =0,69	0,1			170	
					0,25		130	
1,5	197	7,446	k <sub>n</sub> =0,4 p <sub>c</sub> =1,05	0,1		750/60	415	6370
					0,35		305	
	240	6,600	k <sub>n</sub> =0,25 p <sub>c</sub> =0,862	0,1			330	
					0,35		265	
2,2	216	10,766	k <sub>n</sub> =0,4 p <sub>c</sub> =1,54	0,1		1000/60	840	14210
					0,5		605	
	260	9,090	k <sub>n</sub> =0,25 p <sub>c</sub> =1,265	0,1			680	
					0,5		525	
3,6	243	17,680	k <sub>n</sub> =0,4 p <sub>c</sub> =2,52	0,1		1000/60	1410	23340
					0,8		1060	
	280	15,873	k <sub>n</sub> =0,25 p <sub>c</sub> =2,07	0,1			1145	
					0,8		920	

В таблице 5 приведены данные расчёта мощности и расхода пара для такой же, как в таблице 4, паровой машины размерностью 6-21/21 при различных значениях коэффициента наполнения. Для работы паровой машины используется перегретый пар с давлением 1,2 МПа.

**Таблица 5.** Мощность и расход пара в зависимости от коэффициента наполнения.

Коэффициент наполнения	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	0,34	0,36
Мощность машины, кВт	179	184	189	193	198	202	207	211	215
Расход пара, кг/час	1578	1745	1904	2063	2221	2380	2530	2697	2856



Удельный расход пара, кг/кВт*час	8,860	9,480	10,07	10,69	11,22	11,78	12,26	12,78	13,28
----------------------------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

#### Анализ данных таблиц 4 и 5.

1. Мощность машины тем выше, чем больше коэффициент наполнения цилиндров. Связано это с тем, что при повышении коэффициента наполнения цилиндров растёт среднее давление в них. Следовательно повышается усилие, которое шатуны передают от поршней коленчатому валу.
2. Расход пара тем выше, чем больше коэффициент наполнения цилиндров. Это происходит потому, что за каждый оборот коленчатого вала в цилиндры подаётся большее по весу количество пара.
3. При повышении коэффициента наполнения расход пара растёт быстрее, чем мощность машины. Это происходит потому, что в формулу, по которой рассчитывается среднее давления пара, входит отрицательное значение  $kn^2$  - квадрата коэффициента наполнения.
4. При снижении коэффициента наполнения снижается температура пара на выходе из машины. Действительно, снижение коэффициента наполнения вызывает повышение коэффициента расширения пара в цилиндрах машины.

#### Паровые машины, которые могут быть изготовлены на базе ДВС, выпускающихся в настоящее время в России.

Для изготовления поршневых паровых машины можно использовать основные узлы и детали двигателей внутреннего сгорания, как российского, так и иностранного производства. Далее приведена таблица 6, в которую собраны данные о мощности и расходе пара для поршневых паровых машин однократного расширения, которые могут быть изготовлены на базе шести- или восьмицилиндровых рядных тронковых ДВС, выпускающихся в России. Взяты именно рядные ДВС, поскольку их конструкция позволяет изготовить машины с горизонтальным расположением цилиндров, в которых возможность попадания конденсата в картер сведено к минимуму. Расчёты проведены автором для машин различного рабочего объёма при трёх значениях величины давления пара.

**Таблица 6.** Мощность и расход пара для машин, изготовленных на базе различных ДВС.

№	Размерность двигателя и производитель	Объем двигателя, л	Мощность машины, кВт, при давлении пара			Расход пара, кг/час, при давлении пара		
			1,2 МПа	2,2 МПа	3,6 МПа	1,2 МПа	2,2 МПа	3,6 МПа
1	6-11/12,5 ММЗ Минск	7,12	32	92	156	337	825	1030
2	6-13/14 АМЗ Барнаул	11,15	50	145	244	528	1290	1610
3	6-13/15,4 ЯМЗ Ярославль	12,4	55	161	272	588	1435	1790
4	4-15/20,5 ЧТЗ Челябинск	14,45	66	188	318	790	1800	2460
5	6-15/16 ЧТЗ Челябинск	16,95	78	220	373	940	2120	2880
6	6-15/18	19,2	90	260	440	1000	2570	3750

	БТМ Барнаул							
7	6-18/20 Звезда С-Питербург	31	140	420	700	1620	4160	6060
8	6-18,5/21,5 УДМЗ Екатеринбург	34,7	155	470	780	1810	4660	6780
9	6-21/21 ВДМ Балаково	44	200	600	1000	2300	5900	8600
10	6-21/26 ВДМ Балаково	54	245	735	1230	2800	7240	10550
11	8-21/26 ВДМ Балаково	72	330	980	1630	3900	9650	14070
12	6-20/28 ПДМ Пенза	52,8	240	720	1200	2780	7080	10320
13	6-23/30 РуМо Н-Новгород	75	340	1020	1700	3950	10050	14660
14	8-23/30 РуМо Н-Новгород	100	455	1360	2270	4600	13400	19550
15	6-31,8/33 ПДМ Пенза	157	790	1850	3060	7360	16650	27240

В столбце «Размерность двигателя» первая цифра – количество цилиндров, дальше диаметр цилиндров и ход поршней в сантиметрах.

Мощность машины и расход пара могут отличаться от указанных в таблице 6 как в большую сторону, так и в меньшую, если изменять коэффициент наполнения цилиндров.

**Поршневые паровые машины, которые могут быть изготовлены с использованием узлов и деталей поршневых крейцкопфных компрессоров.**

Паровые машины на базе компрессоров с оппозитными базами 4М4, 2М10, 4М10, и 4М16 имеют цилиндры двухстороннего действия с усилием на штоке соответственно 4, 10 и 16 тонн. Если использовать пар с давлением 1,3 МПа и температурой 250°С, при коэффициенте наполнения цилиндров равном 0,24, паровые машины, изготовленные на базе этих компрессоров будут иметь указанные в таблице 7 мощность и расход пара.

Таблица 7. Мощность и расход пара для машин, изготовленных на базе различных компрессоров.

Обозначение базы	Усилие на штоке, т	Диаметр цилиндр, мм	Диаметр штоков, мм	Ход поршней, мм	Рабочий объём, л	Частота вращения, об/мин	Мощность, кВт	Расход пара, т/час
4М4	4	200	48	150	36,6	750	235	2,02
2М10	10	320	60	220	69,5	500	280	2,5
4М10	10	320	60	220	139	600	710	6,13
4М16	16	400	80	300	296	500	1200	10,0

Можно использовать более мощные базы с усилиями на штоке 25 или 40 тонн и с числом цилиндров до 8. Паровые машины на их основе будут иметь мощность до 4000 кВт. Не сложно рассчитать мощность паровых машин при использовании в качестве базовых ДВС или компрессоров любых других марок, в том числе и иностранного производства, и для других параметров пара.

Поршневые паровые машины фирмы «Shilling» (Германия), выполненные по крейцкопфной схеме с цилиндрами двухстороннего действия, имеют те же удельные значения мощности и расхода пара, что и указанные в таблице для компрессоров.

Ранее выпускавшиеся паровые машины имели существенный недостаток – большой вес на единицу мощности. Удельный вес поршневых паровых машин, которые могут быть изготовлены на базе современных ДВС или компрессоров, не превышает аналогичный показатель паровых турбин, использующих пар одинаковых с машинами параметров.

Стоимость поршневой паровой машины незначительно превышает стоимость двигателя или компрессора, на базе которого она будет изготовлена. Вместе с тем машины, имеющие больший ресурс, будут иметь более высокую стоимость.

### **Выводы:**

Согласно законам термодинамики тепловые машины любой конструкции, преобразующие тепловую энергию в механическую, и имеющие одинаковые параметры рабочего тела, для рассмотренных агрегатов при одинаковых параметрах водяного пара, имеют одинаковую теоретическую величину КПД.

Только объёмные машины, в которых весь поступивший в них пар совершает работу, позволяют достигать наименьших значений удельного расхода пара.

Конструкции поршневых двигателей внутреннего сгорания и компрессоров отработаны настолько, что механические потери в них не превышают 10%. Такие же малые потери будут иметь изготовленные на их базе ППМ.

Простота конструкции и габаритные размеры ППМ, созданных на основе современных ДВС или поршневых компрессоров, позволяют устанавливать их в действующих котельных или использовать их в транспортабельных силовых модулях.

МТЭС с поршневыми паровыми машинами позволяют получать электрическую и тепловую энергию по ценам более низким, чем сложившиеся на рынке.

При полном использовании энергии пара, прошедшего через машину, общий КПД МТЭС с поршневыми паровыми машинами может достигать до 65%.

Выводы сделаны автором на основании приведённых в этой статье данных.

К аналогичным выводам приходят и многие другие авторы, например, В.С. Дубинин, И.С. Трохин и ещё ряд серьёзных исследователей, как в России, так и других странах. И практически, никто эти выводы не оспаривает. Но, как и во многих других отраслях промышленности и энергетики России, владельцы предприятий, которые могли бы выпускать экономичные электростанции с ППМ, не считают возможным вкладывать собственные средства в исследовательские и опытно-конструкторские работы. Хотя затраты здесь будут минимальными, поскольку все технические решения, которые используются в ППМ, были проработаны в прошлые века и, дополнительно, в последнее десятилетие.

### **Примеры использования поршневых паровых машин.**

Например, машину мощностью 80 кВт легко изготовить на базе оппозитного двигателя 6Н 358 (6-15/16), используемого в бронетранспортёрах. При этом, если техника военная, то Министерство обороны может её использовать для своих отдельно расположенных объектов, существенно сократив расходы на их обслуживание.

Хорошую машину мощностью от 200 до 600 кВт можно изготовить на базе двигателя 6-21/21. Электростанция с такой машиной будет покрывать потребности в электроэнергии и тепле небольших предприятий.

А электростанцию с паровой машиной на базе двигателя Д50, которая может иметь мощность от 800 до 3000 кВт, есть возможность устанавливать непосредственно в местах добычи полезных ископаемых. Незаменимая вещь для угольных разрезов!

И конечно в любой котельной могут быть установлены электростанции для покрытия собственных расходов котельной или машины необходимой мощности для прямого привода насосов и вентиляторов.

Автор считает, что паропоршневые двигатели, имеющие постоянный впуск пара в цилиндры через калиброванные отверстия, хотя и имеют более простую конструкцию, чем обычные ППМ, однако уступают им по другим показателям, в частности, имеют больший удельный расход пара и меньшую мощность на 1 л рабочего объёма. Но они не лучше, и не хуже поршневых паровых машин, они просто другие.

### **Технические решения, которые могут использоваться при изготовлении электростанций, в состав которых входят ППМ.**

В ближайшее время поршневые паровые машины (ППМ) докажут своё превосходство в малой энергетике над другими тепловыми машинами, такими, как агрегаты с дизельными, бензиновыми и газовыми ДВС, винтовыми паровыми машинами, паровыми турбинами малой мощности и газовыми турбинами. Тогда и появится возможность их серийного изготовления. А в настоящее время наиболее перспективным направлением, по мнению автора, является проектирование и изготовление опытных образцов ППМ на базах четырёхтактных тронковых ДВС и крейцкопфных компрессоров.

В этой паре ППМ на базе тронковых ДВС могут иметь более высокую мощность на единицу рабочего объёма, чем ППМ на базе крейцкопфных компрессоров. Это возможно за счёт использования пара с более высокими параметрами. Однако ППМ на базе тронковых ДВС имеют более сложную систему смазки, т.к. полностью избежать попадания конденсата в смазочное и охлаждающее масло машины невозможно.

Возможно сочетание преимуществ тронковой и крейцкопфной схем машин при использовании в тронковой схеме поршней, длина которых превышает ход поршня. В средней части такого удлинённого поршня необходимо выполнить полости, предназначенные для сбора конденсата и масла, проникающих через уплотнения поршня. В гильзе цилиндра должны быть выполнены отверстия, предназначенные для удаления собранных поршнем конденсата из цилиндра и масла из картера. Это позволит практически полностью разделить полости цилиндров и картера.

Разделению полостей цилиндра и картера способствует так же такое расположение машины, когда оси цилиндров располагаются горизонтально. При использовании поршней увеличенной длины, разделяющих полости картера и цилиндра, желательно для уплотнения цилиндра использовать бессмазочные кольца.

Используя коленчатый вал четырёх- или восьмицилиндрового рядного ДВС можно изготовить оппозитную ППМ. Такое расположение цилиндров позволит увеличить их диаметр по сравнению с диаметром цилиндров исходного двигателя и соответственно увеличить мощность машины. Увеличение диаметра цилиндров возможно потому, что коленчатые валы дизельных двигателей рассчитываются на давление в цилиндре во время вспышки топлива 10 МПа и выше.

Весьма скоро следует ожидать переход от единичного изготовления опытных образцов агрегатов с поршневыми паровыми машинами к их серийному производству.

Впоследствии могут быть использованы и другие типы машин, в которых пар расширяется в замкнутом объёме, например, роторно-лопастные машины.

### **О ППМ на базе четырёхтактных тронковых ДВС.**

В связи с тем, что в отличие от ДВС поршневые паровые машины являются двухтактными, эти машины при меньшем среднем давлении в цилиндрах способны развивать мощность, сравнимую и даже превышающую мощность ДВС одинакового с ними рабочего объёма. При этом их распределительные валы должны вращаться синхронно с коленчатыми валами, что требует изменения шестерней или звёздочек распределительного механизма.

У ППМ есть особенность, которая не позволяет использовать крышки цилиндров (или головки блоков) существующих ДВС и компрессоров. В основном это связано с тем, что существующие впускные клапаны, имеющие механический привод на открывание и пружинный привод на закрывание, не могут быть использованы, так как внешнее давление пара будет эти клапаны открывать, и впуск пара в цилиндры будет происходить постоянно. Использование более мощных пружин поднимет нагрузки в газораспределительном (а в данном случае парораспределительном) механизме выше допустимых пределов. Не требующие мощных пружин двухседельные клапаны не обеспечивают необходимую герметичность из-за термических деформаций.

### **О ППМ на базе крейцкопфных компрессоров.**

Мощность ППМ на базе компрессоров ограничена максимальным допустимым усилием на штоке, и, следовательно, равна максимальной мощности двигателя, используемого в компрессоре данного типа. Потому, хотя такие машины имеют цилиндры двухстороннего действия, их удельные весовые и объёмные показатели не превышают аналогичных показателей машин, изготовленных на базе тронковых ДВС. Кроме того, требуется установка привода парораспределительных механизмов.

### **Выбор электрогенератора**

При использовании ППМ для привода электрогенератора в составе агрегата в настоящее время существует три способа получения электроэнергии необходимого качества. Все три способа требуют регулирования паровой машины таким образом, что при изменении нагрузки на неё частота вращения агрегата находилась в заданных пределах.

Первый – это использование генераторов постоянного тока с регулированием частоты вращения агрегата в некотором, довольно широком диапазоне. Полученная электроэнергия может использоваться непосредственно в том виде, в каком она получена, либо преобразуется с помощью инвертора в одно- или трёхфазный переменный электрический ток необходимой частоты.

Второй – использование генераторов переменного тока с регулированием частоты вращения агрегата в некотором диапазоне. Полученный переменный ток может быть выпрямлен, а затем преобразуется с помощью инвертора в одно- или трёхфазный переменный электрический ток необходимой частоты.

Третий – использование генераторов переменного тока с точным регулированием частоты вращения агрегата, когда на зажимах генератора получается электрическая энергия необходимого качества.

Следует помнить, что применение инвертора значительно, в 2-3 раза, повышает стоимость агрегата именно за счёт стоимости инвертора. Вместе с тем агрегаты, в которых используются частотные преобразователи, имеют более простую, не требующую высокой точности систему управления частотой вращения.

Для регулирования частоты вращения машины при изменении нагрузки на неё используются несколько методов.

**Качественный** – предполагает изменение давления пара перед цилиндрами машины. Этот способ регулирования с помощью дросселя наименее экономичный, хотя и наиболее простой.

**Количественный** – изменение величины отсечки, т.е. изменение величины угла поворота коленчатого вала, во время которого происходит выпуск пара в цилиндры. Необходимо иметь возможность изменять отсечку в пределах от  $10^\circ$  до  $180^\circ$  угла поворота коленчатого вала после ВМТ. Такой широкий диапазон регулирования не позволяет использовать технические решения, которые применяются в настоящее время в двигателях с изменяющимися фазами газораспределения.

Следует обратить внимание на то, что с увеличением величины отсечки мощность машины растёт медленнее, чем расход пара. Это значит, что машины с малой величиной отсечки экономичнее, чем машины с большой (0,32 и выше) величиной отсечки. Однако у машин с маленькой величиной отсечки возникают проблемы с регулированием частоты вращения в режиме частичных нагрузок.

Это заставляет использовать для впуска пара в машину золотниковое парораспределение. При этом золотники могут быть использованы только на выпуск пара, а выпуск пара будет осуществляться через клапаны. Возможно использование золотников как на выпуск, так и на выпуск пара. В обоих случаях требуется использование отдельных механизмов, управляющих впуском и выпуском пара. В машинах с золотниковым парораспределением следует использовать двухконтурную систему смазки машины. Это вызвано тем, что в механизме парораспределения возможна конденсация пара и попадание конденсата в систему смазки. Потому необходимо разделить системы смазки коленчатого вала и механизма парораспределения.

Количественный метод регулирования наиболее точный, но и наиболее сложный. При частоте вращения машины выше 250 об./мин. этот метод может быть реализован с помощью двух последовательно расположенных золотников во впускных каналах каждого цилиндра.

Существует и комбинированный метод регулирования, называемый *регулированием изменением противодавления*. Он сочетает достаточную точность регулирования и невысокую сложность.

При работе машины в режиме частичных нагрузок, когда мощность будет менее 0,5 номинальной, возможно отключение подачи пара в часть цилиндров.

### **Заключение**

Хочется верить, что поршневые паровые машины докажут своё превосходство в малой энергетике над другими тепловыми машинами, такими, как агрегаты с дизельными, бензиновыми и газовыми ДВС, винтовыми паровыми машинами, паровыми турбинами малой мощности и газовыми турбинами. Тогда и появится возможность их серийного изготовления, а представленные технические решения помогут всем, кто занимается этим перспективным направлением.

Список литературы

1. НУТТЕ, справочник, под редакцией В.К. Запорожец, том третий, Главная редакция литературы по машиностроению и металлообработке, Москва-Ленинград, 1936.
2. Б.А. Горбунов, Ф.Л. Юдицкий, Конструкция судовых паровых машин, Издательство министерства морского и речного флота СССР, Москва-Ленинград, 1953.
3. Н.В. Иноземцев, Курс тепловых двигателей, Государственное издательство оборонной промышленности, Москва, 1954.
4. Теплотехнический справочник, под редакцией С.Г. Герасимова, Государственное энергетическое издательство, Москва-Ленинград, 1957.
5. Кирюхин В.И., Тараненко Н.М., Огурцова Е.П. Паровые турбины малой мощности КТЗ, Энергоатомиздат, Москва, 1987