

РОТОРНЫЕ МАШИНЫ

Е.М. Пузырёв, В.А. Голубев, М.Е. Пузырёв

Рассмотрены направления развития паровых двигателей, в том числе с учетом термодинамических особенностей пара как рабочего тела. Указано на необходимость более широкого применения паровых машин в теплоэнергетике. Рассмотрен принцип действия однороторных компрессоров и возможность их применения в качестве расширительных машин для циклов Ренкина и других.

Ключевые слова: пар, паровой двигатель, турбина, компрессор.

В АлтГТУ значительное внимание уделяется разработке различных типов двигателей, в том числе паровых [1], которые представляют большой интерес для промышленной энергетики, в связи с постоянным удорожанием энергии и, прежде всего, электрической. По принципу действия паровые двигатели менее сложны, чем ДВС. Это конструктивно более простые устройства, по сути это есть расширительные машины, то есть разнообразные по принципу действия обращенные компрессоры, не менее широко распространенные, чем ДВС.

Ранее, в «век пара», паровые двигатели также имели большое разнообразие и применялись на паровозах, пароходах, паровых автомобилях и в проектах даже на самолетах. Однако на сегодня в электро- и силовой энергетике наиболее распространены паровые турбины, используемые, преимущественно, для привода турбогенераторов электростанций, силовых приводов насосов, тягодутьевых машин и другого оборудования ТЭЦ. Паровые турбины, вытеснив другие типы двигателей, оказались практически невостребованными, прежде всего, из-за дороговизны и низкой маневренности. В малой и локальной энергетике в настоящее время используются дизельные электростанции (ДЭС) и поршневые мини-ТЭЦ на природном газе.

Паропоршневые двигатели сегодня производятся в ограниченных количествах, например, немецкой фирмой Spilling. В [2] предложена переделка современных типовых поршневых ДВС для работы на пар. При этом показатели термодинамической эффективности оказываются не ниже, чем у паровых турбин, а круг их применимости огромен [2]. В отличие от западных стран и даже, например, Украины, их использование во многом сдерживается законодательным закреплением в

России монополизма больших генерирующих компаний.

В качестве недостатков поршневых машин следует отметить следующее. Во-первых, необходимость применения смазочных материалов, которые попадают в рабочее тело – воду, создавая проблемы в котле. Во-вторых, собственно рабочий объем занимает незначительную долю в ДВС, 15-25% в отличие от турбины.

Рассматривая историческое развитие двигателе- и компрессоростроения применительно к вопросу о паровых машинах при выборе аналогов следует отдать предпочтение последнему, как более успешному. Так на сегодня наиболее распространенными являются не поршневые, а винтовые компрессоры. Согласно [3] возможно их применение и в качестве паровой расширительной машины. Недостатками двухвинтовых роторных машин этого типа являются:

- низкая производительность или мощность единичной установки из-за участия в работе только одного из шести каналов;
- сложность конструкции, в том числе из-за требования высокой точности изготовления плотно установленных, взаимно контактирующих, вращающихся элементов и системы компенсации осевых усилий;
- низкая надежность из-за больших некомпенсированных осевых и радиальных усилий роторов.

Из последних, наиболее эффективных, выделим одновинтовой компрессор [4]. Этот тип компрессоров производится компаниями DAIKIN, VILTER и другими. Одновинтовой компрессор, как любой другой оппозитный агрегат, отличается полной уравновешенностью радиальных нагрузок, что положительно влияет на долгосрочную службу подшипников, а также, компактностью, низким уровнем шума и простотой в эксплуатации.

Рассматриваемый механизм (Рисунок 1) с соответствующими усовершенствованиями предлагается [5] использовать в качестве расширительной машины для цикла Ренкина, в двигателях внешнего и внутреннего сгорания, а так же в паровых и пневматических приводах и компрессорах.

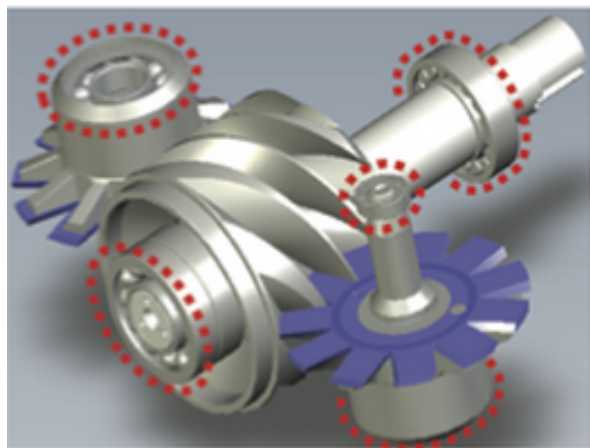


Рисунок 1 – Ротор одновинтового компрессора с глобоидальным профилем и заслонки

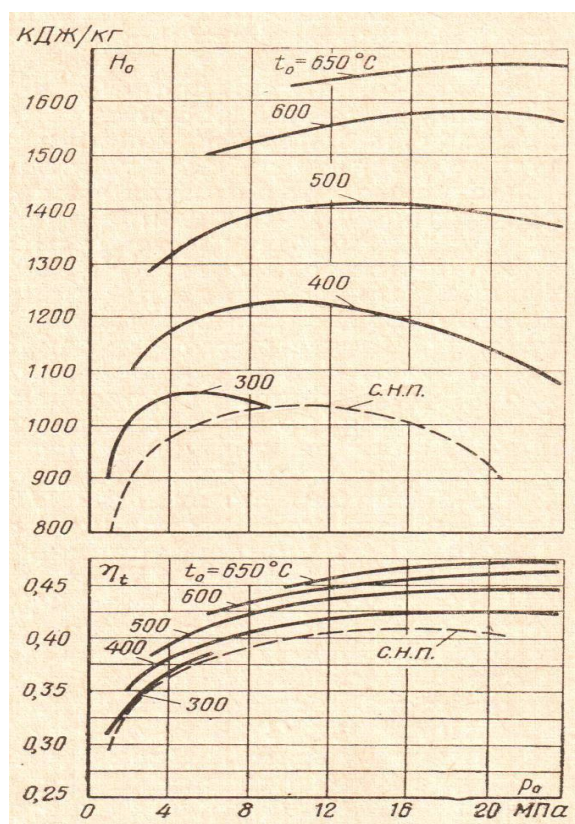


Рисунок 2 – Влияние начального давления на предполагаемый теплоперепад и КПД идеального цикла парового двигателя (с.н.п.- сухой насыщенный пар

При рассмотрении паросилового цикла Ренкина с использованием усовершенствованного роторного механизма учитываются известные термодинамические оценки и исследования эффективности цикла [6], в том числе приведенные на рисунках 2 и 3.

На рисунке 2 показано, что рост параметров, перегрева, пара позволяет значительно увеличить "заряд" энергии в сравнении с состоянием насыщения. Повышение давления так же значительно увеличивает потенциал пара и поэтому в энергетике эти приемы используются одновременно, их потолок ограничивается только прочностью и стойкостью труб пароперегревателя котла.

С другой стороны для промышленной энергетики параметры пара типично ограничены категорией: $p=4\text{МПа}$, $t_0=440^\circ\text{C}$. При этом, как следует из рисунков 2 и 3 кпд цикла весьма значительный до $\eta_t=38\%$ в сравнении с предельным – $\eta_{t\max}=47,5\%$, и расширительные машины, при простом устройстве и ценовой доступности, могут получить широкое распространение.

Во вторых срабатывание пара до температуры $95-115^\circ\text{C}$, характерной для неподназорной энергетики позволит полностью использовать выхлоп для несения отопительной нагрузки, повышая полный кпд использования топлива до 80-85%.

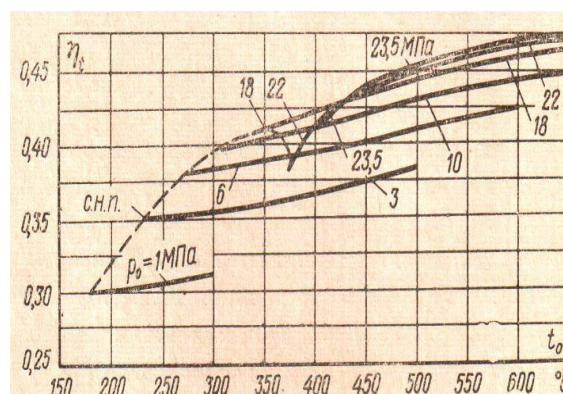


Рисунок 3 – Влияние начального давления и температуры пара на КПД идеального цикла парового двигателя

Паровые двигатели предполагается выполнять стационарными с приводимой мощностью в десятки и сотни киловатт и основное направление по усовершенствованию прототипа [5] было направлено на увеличение пропускной способности и степени сжатия: установка на валу попарно двух и более ступеней, профилирование рабочих каналов, увеличение числа заслонок, установка про-

межуточного отбора рабочего тела и другое. Например, выполнение роторной машины из установленных на валу попарно ступеней позволяет, при прочих равных условиях, увеличить в два, четыре и более раз мощность, а последовательная установка пар ступеней увеличить степень расширения. Один из вариантов машины показан на рисунке 4.

Роторная машина в варианте расширительной машины, рисунок 4, включает, пару рабочих ступеней, правую и левую, установленных встречно (зеркально) с расположением зоны высокого давления в середине между ними и этим обеспечивается взаимная компенсация осевых усилий и увеличение в два раза мощности установки. Каждая ступень содержит установленный, в корпусе 1 ротор 2, имеющий винтовые многозаходные рабочие каналы 3, образованные винтовыми перегородками 4 и при этом направления их навивок в ступенях выполняются противоположными. Каналы 3 плотно перекрыты корпусом 1 и заслонками 5, закрепленными на звездочках 6, с валами 7 зеркально симметрично по отношению к ротору 2.

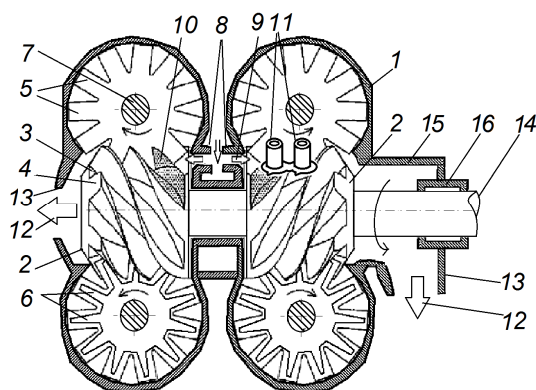


Рисунок 4 – Вариант расширительной роторной машины

Перед каждой заслонкой 5, в зоне её входа в рабочий канал 3, в корпусе 1 с обеих сторон от роторов 2 установлены патрубки 8 сжатого рабочего тела, служащие для его подвода, показано стрелкой 9. Штриховкой показан текущий объем 10 канала 3 в процессе расширения рабочего тела. В корпусе 1 так же симметрично установлены патрубки 11 промежуточного отбора рабочего тела, а стрелкой 12 показан его выхлоп в патрубки 13. Роторы 2 закреплены на валу 14. Вал служит для отбора мощности и выводится из расширительной машины 15 через уплотнение 16 простейшего типа, возможно с двух сторон. И так как давление в выхлопе близко

к атмосферному, конструкция торцевых уплотнений и машины в целом упрощается.

Естественно, что роторная машина, рисунок 4, может быть компрессором. Вал 14 подключается к двигателю со сменой направления вращения вала 14 и заслонок 5, патрубки 13 соединены с атмосферой а, патрубки 8 сжатого воздуха к ресиверу.

Предлагаемая роторная машина может применяться в силовых циклах. В цикле подобном газовой турбины (Рисунок 5) с подключением ступени сжатия к ступени расширения через камеру сгорания или в циклах ДВС с установкой в корпусе ступеней расширения, за подводящими патрубками в зонах высокого давления пар свечей и/или топливных форсунок. В замкнутых циклах (Рисунок 6) двигателей внешнего сгорания и других с контуром циркуляции рабочего тела. Здесь так же используются пары рабочих ступеней, но направления навивок рабочих каналов 3 пар ступеней одинаковые.

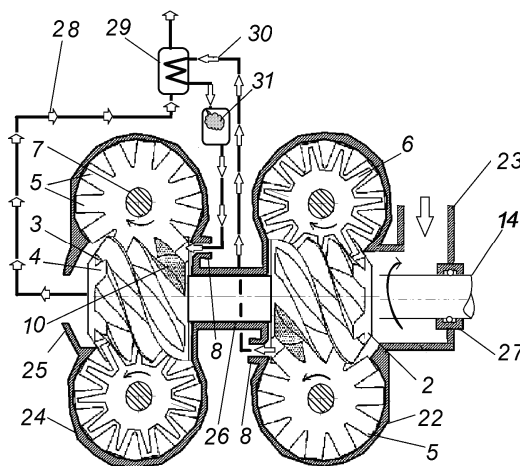


Рисунок 5 – Вариант применения роторной машины в цикле типа газовой турбины

В роторной машине цикла типа газовой турбины (Рисунок 5) справа расположена ступень компрессора 22 с ротором 2, заслонками 5 и патрубками высокого давления 8 и всасывающим 23, а слева ступень расширения 24 с патрубками высокого давления 8 и выхлопным 25. Роторы 2 ступеней закреплены на валу 14 с расположением зоны высокого давления между ними, и этим компенсируются осевые усилия.

Вал 14 установлен в подшипнике 26, на его выходе, так как он установлен на всасе, используется подшипник 27, причем без уплотнения, что упрощает конструкцию машины. Выхлопной патрубком 25 ступени расши-

рения 24 выхлопным газоходом 28 подключен к регенеративному теплообменнику 29 и далее к атмосфере, а патрубок высокого давления 8 компрессора 22 трактом 30 подключен последовательно к теплообменнику 29, камере сгорания 31 и к парубку высокого давления 8 ступени расширения 24.

Отметим, что роторная машина для цикла ДВС, в варианте без регенерации тепла выхлопа, выполняется ещё проще, прямым соединением патрубками высокого давления 8 ступеней 22 и 24 с установкой в её корпусе, за подводщими патрубками пары свечей и/или топливных форсунок.

Пара ступеней сжатия 22 и расширения 24, установленных на общем валу 14 могут использоваться в замкнутых циклах типа силового цикла двигателя внешнего сгорания и других циклов (Рисунок 6). В контур циркуляции рабочего тела входят ступень сжатия 22, регенераторы 32, 33, теплоты выхлопа и промежуточных отборов ступени расширения 24, с патрубками отбора 11 и горячий теплообменник 34, соединенные в общий контур циркуляции трубопроводами 35. Тепло в горячий теплообменник 34 подается от подогревателя 36 по контуру циркуляции 37.

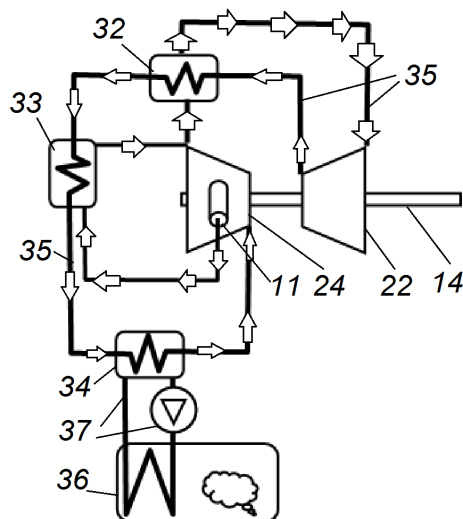


Рисунок 6 – Вариант применения роторной машины в цикле двигателя внешнего сгорания

Особо следует рассмотреть паровой цикл Ренкина, используемый ТЭЦ. Здесь пар расширяется в сотни и тысячи раз от давления в сотни атмосфер до глубокого вакуума.

Такое срабатывание давления может быть обеспечено последовательным включением двух, трех ступеней расширения. Расширительная машина с двумя последова-

тельно включенными блоками высокого 38 и низкого давления 39 установленными последовательно и подключенными паропроводами 40 к котлу 41 показана на рисунке 7.

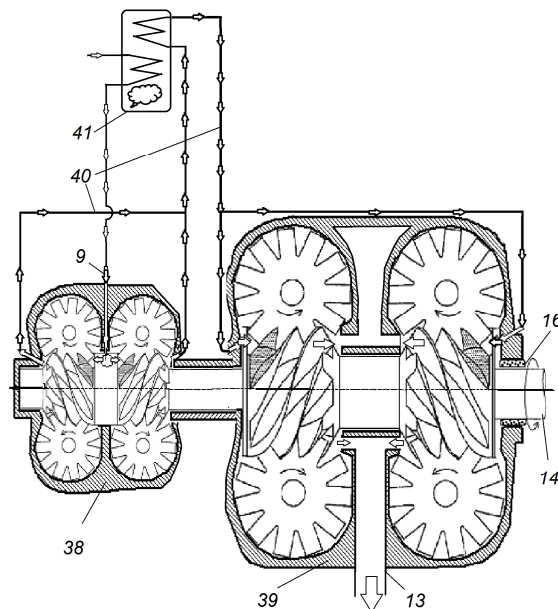


Рисунок 7, – Вариант применения роторной машины в цикле двигателя внешнего сгорания

При работе роторной машины 15 расширительного типа, рисунок 4, сжатое рабочее тело, например, пар, вводится через подводщие патрубки 8, как условно показано стрелками 9, в рабочие каналы 3 перед заслонками 5 одновременно в правой и левой ступенях. При дальнейшем повороте вала 14 и роторов 2 каналы 3 перемещаются относительно корпуса 1 и отключаются от патрубка 8, а заслонки 5, входят в каналы 3 и выделяют в этих замкнутых объемах порцию пара. Пар давит на винтовые перегородки 4 канала 3 и заслонку 5, расширяется в выделенном штриховкой объеме 10 рабочего канала 3, совершает перемещение и полезную работу. Кроме того, доля частично расширившегося пара при совмещении объема 10 с отверстием патрубка 11 промежуточного отбора может быть отведена для теплофикации и/или регенерации тепла, обеспечивая повышение экономичности цикла.

Расширение пара заканчивается с открытием канала 3 на выхлоп, при выходе луча заслонки 5 из зацепления, причем канал 3 снова начинает заполняться паром от второго патрубка 8 и вторая заслонка 5 выделяет следующую порцию пара. Отработавший пар поступает на выхлоп через отводящие пат-

рубки 13, как показано стрелками 12. Этот процесс протекает и в других каналах 3, в том числе и во второй, симметрично расположенной, половине ротора 2, с передачей работы пара и вращающего момента на вал 14.

Отметим, что конструкция [5] работоспособна и в высокотемпературных циклах тип газовых турбин и ДВС. Благодаря парной, встречной установке ступеней при работе компенсируются их осевые усилия. Размещение зоны высокого давления в центре, с более низким давлением на выходе 12 упрощается конструкция вывода вала 14 из машины. Уплотнение 16 препятствует потере отработавшего рабочего тела по вращающемуся валу 14 расширительной машины 15.

Работа роторной машины в силовых циклах, например, типа газовой турбины, рисунок 5, с подключением ступеней через камеру сгорания 31 не отличается от описанной выше. Воздух всасывается через патрубок 23, сжимается в ступени компрессора 22, далее нагнетается по тракту 30 в ступень расширения 24, причем движется по ступеням 22, 24 в одном направлении, на проход. Между ступенями к рабочему телу подводится тепло, причем в процессе близком к изобарному. Сначала воздух подогревается в регенеративном теплообменнике 29 теплом выхода и/или промежуточных отборов из патрубков 11 средой, которая подается по газоходу 28 из выхода 25 и/или из патрубков отбора 11 расширительной ступени, обеспечивая повышение экономичности цикла. Основное тепло в цикл вводится в камеру сгорания 31 путем сжигания топлива в потоке воздуха, затем продукты сгорания расширяются в ступени 24 с передачей полученной мощности через вал 14, на привод компрессора 22 и электрогенератора.

При работе пары ступеней сжатия 22 и расширения 24, рисунок 6, установленных на общем валу 14 в замкнутых циклах типа газовой холодильной машины, силового цикла двигателя внешнего сгорания и других циклов принцип действия тот же. Рабочее тело входит в ступень сжатия 22 по трубопроводу 35, в нем сжимается и поступает в регенераторы 32, 33. В них рабочее тело подогревается за счет теплоты выхода и промежуточных отборов, поступающих из патрубков 11 ступени расширения 24, обеспечивая повышение КПД цикла. Основное тепло подводится в горячем теплообменнике 34 от внешнего источника, подогревателя 36 с контуром циркуляции 37. Затем горячее рабочее тело по трубопроводу 35 поступает для совершения полезной рабо-

ты в ступень расширения 24. Далее рабочее тело после выхода из расширительной машины 24 охлаждается в регенераторе 32, отдавая тепло, и снова поступает в компрессор 22 и цикл повторяется. Работа ступеней 22 и 24 так, как было описано выше, осевые усилия ступеней взаимно компенсируются.

В паровом цикле Ренкина с высоким давлением пара применяется роторная машина (Рисунок 7) с последовательным включением двух и более пар ступеней. Перегретый пар высокого давления из котла 41 по паропроводу 40 поступает, как показано стрелкой 9 в блок 38 высокого давления и здесь расширяется более низкого давления. Далее пар по паропроводам 40 возвращается в котел 41, повторно перегревается и по паропроводам 40 подается в блок 39 низкого давления. В блоке 39 низкого давления пар расширяется до глубокого вакуума и по патрубку 13 низкого давления сбрасывается в паровой конденсатор. После конденсации вода возвращается в котел 41, испаряется и цикл повторяется. Работа ступеней расширения так, как было описано выше, осевые усилия ступеней в блоках взаимно компенсируются. В роторной машине имеется одно уплотнение 16 вала 14 и по схеме подключения, оно установлено в зоне промежуточного давления и это упрощает его конструкцию.

Рассмотрим варианты реализации

Пример 1. Двигатель с циклом типа газовой турбины (Рисунок 5) для привода электрогенератора с частотой вращения 50 Гц. Ротор 2 выполнен с шестью каналами и двумя заслонками, соответственно за один оборот в работе 12 каналов и работа каналов осуществляется с частотой 600 Гц. Благодаря уравновешенности радиальных и осевых сил обеспечивается плавный ход и низкий уровень звука. Степень повышения давления не менее чем в прототипе, свыше 25, $p=2,5$ МПа.

Пример 2. Расширительная машина (Рисунок 7) с последовательным включением двух блоков ступеней со степенью снижения давления в каждом блоке $n=25$ имеем $P_1/P_2=n^2=625$ соответственно уменьшение давления в 625 раз. Расширение пара в паровых конденсационных турбинах малой мощности типично осуществляют до давления $P_2=8$ кПа $=0,008$ МПа и соответственно начальное давление пара составит $P_1=5$ МПа, типичное для турбин малой мощности. Для более мощных паровых турбин расширение осуществляют от наибольшего давления $P_1=25,5$ МПа до давления $P_2=0,004$ МПа с отношением давлений $P_1/P_2=6375$. Здесь по-

требуются два блока со степенью снижения давления $n_2=(6375)^{0.5}=80$ или три блока с низкой степенью сжатия $n_3=(6375)^{1/3}=18,54$.

Компания «ПроЭнергоМаш» проектирует и производит котлы [7, 8] и в том числе безбарабанные с различными параметрами пара. Реконструирует в том числе энергетические котлы типа БКЗ-75 с параметрами перегретого пара 4МПа/440°C, достаточно эффективными для создания мини ТЭЦ [7, 9, 10]

или паропроводных устройств. Оценочно при этом удельный расход пара минимально может составить при термодинамическом КПД цикла $\eta_i=38\%$ и преобразовании механической энергии в электричество с эффективностью $\eta_m=90\%$ около 4,2 т/МВт и может быть ещё более снижен при использовании регенеративного подогрева питательной воды в цикле (Рисунок 8).

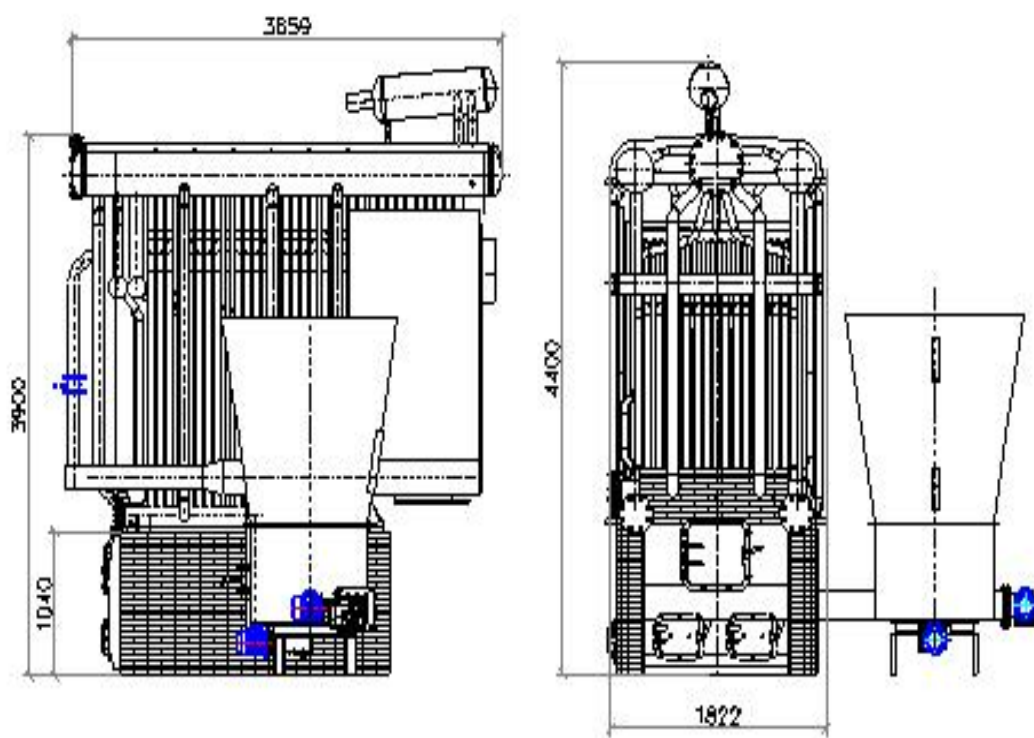


Рисунок 8 – Общий вид котла E-4 с топочным устройством для растительных отходов

Котельные и ТЭЦ типично потребляют большое количество электроэнергии на привод циркуляционных насосов тепловых сетей, питательных насосов котлов и их тягодутьевых машин, вентиляторов и дымососов. Электросиловое хозяйство и на многих ТЭЦ не защищено от аварийного останова и даже происходят аварии с полным обесточиванием городов и энергосистем при потере электропитания собственных нужд тепловых электростанций. Поэтому возможность перевода основных потребителей на паровой привод, в том числе с установкой электрогенератора для собственных нужд позволит не только заметно увеличить отпуск электроэнергии, но и повысит аварийную устойчивость котельных, ТЭЦ и энергосистем в целом.

Применение малогабаритных котлов безбарабанной конструкции «ПроЭнергоМаш», которые благодаря высокоэффективным вихревым топкам «Торнадо» могут использовать широкий круг топлив и отходов, имеющихся повсеместно: уголь, торф, древесные отходы, лузгу и другие отходы сельскохозяйственного производства позволит создать и транспортабельные установки.

Выводы

Применение роторных машин и новых разработок котельно-топочной техники позволит комплексно [7-11] решать вопросы реконструкции и строительства угольных и утилизационных котельных и мини ТЭЦ с использованием новых технологий:

- по организации эффективного и экологически более чистого сжигания топлив и огневой утилизации отходов;
- по получению пара высоких параметров, в том числе в водогрейных и транспортельных котельных;
- по использованию пара для привода оборудования и производства электроэнергии для собственных нужд и возможно для сторонних потребителей при появлении в России развивающего энергетическое законодательства (вместо устаревшего, защищающего монополизм и отсталость).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доронин В.Т. Пять паровых двигателей // Ползуновский Альманах.- 2009.- №3.- С. 153-158.
2. Дубинин В. С. Обеспечение независимости электро- и теплоснабжения России от электрических сетей на базе поршневых технологий. – М.: Изд-во МЭИ, 2009. – 164 с.
3. Патент РФ 2374455. Паровая винтовая машина.
4. Михайлов А.К., Ворошилов В.П. Компрессорные машины. М.: Энергоатомиздат. 1989. – 288 с.
5. Пузырев Е.М. Роторная машина. / Заявка на патент № 2013143340. 24.10.- 2013.
6. Щегляев А.В. Паровые турбины. М.: Энергия. 1976. – 368 с.
7. Пузырёв Е.М. Применение вихревых топок «Торнадо» для перевода котлов на использование растительных и кородревесных отходов / Пузырёв Е.М., Афанасьев К.С., Голубев В.А., Пузырев М.Е., Жуков Е.Б. // Сб. докл. V Научно-

практическая конференция «Минеральная часть топлива, шлакование, очистка котлов, улавливание и использование золы», Т.1. Челябинск, 2011г, с.236 – 248.

8. Пузырёв Е.М. Применение вихревых топок «Торнадо» для утилизации углесодержащих и древесных отходов / Пузырев Е.М., Афанасьев К.С., Голубев В.А., Пузырёв М.Е. и др. // Сб. докл. VII Всероссийский семинар ВУЗов по теплофизике и энергетике.- Кемерово: Издательство КузГТУ, 2011.- С. 126-135.

9. Пузырёв Е.М. Опыт разработки вихревых топок на дробленом угле для котлов малой и средней мощности / Пузырев Е.М., Афанасьев К.С. // Энергетик.- 2009.-№ 4.

10. Голубев В.А. Оценка доли зеленой энергии и сжигании биомассы / Голубев В.А., Пузырёв Е.М., Пузырёв М.Е. // Ползуновский вестник.- 2012.- №3/1.- С. 39-41.

11. Пузырёв Е.М. Разработка технологии пиролиза и применение газогенераторов при утилизации отходов / Пузырёв Е.М., Лурий В.Г., Лаптов А.В., Пузырёв М.Е. // Ползуновский вестник.- 2010.- №1.- С. 87-92.

Пузырёв Е.М., д.т.н., зам директора по научной работе, e-mail: pem-energo@list.ru

Голубев В.А., аспирант, старший инженер e-mail: wadon@yandex.ru

Пузырёв М.Е., старший инженер, e-mail: pem.proekt@mail.ru

ООО «ПроЭнергоМаш-Проект»,
г. Барнаул 656037, проспект Калинина, 57,
тел. 8(3852) 227-130