

УДК 004.65

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ПАРОВОЙ ВИНТОВОЙ МАШИНЫ

Д. Р. Миннихметов¹

¹denisnaryto@mail.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (УУНИТ)

Аннотация. В данной работе рассматривается повышение эффективности работы тепловых электростанций, тепловых электростанций и котельных путем внедрения в их схему паровой винтовой машины для выработки полезной мощности. Приводится сравнение паровой винтовой машины с лопаточными машинами подобной мощности (200–1500 кВт). Описывается принцип работы паровой винтовой машины, а также ее устройство.

Ключевые слова: паровая винтовая машина, повышение эффективности, винтовые детандеры.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в энергетике России и всего мира решают проблему повышения эффективности работы энергоустановок и станций в целом различными способами. К ним относятся следующие методы:

- получение полезной мощности путем использования энергии водяного пара, вырабатываемого на производственно-отопительных котельных, тем самым превращая их в мини-ТЭЦ;
- использование энергии уходящих из газотурбинной установки газов для нагрева воды и пара для дальнейшего его использования в паросиловом цикле (парогазовые установки);
- утилизация тепла геотермальных источников и различных металлургических производств;
- сжижение углеводородных газов;
- утилизация энергии давления сжатого природного газа с целью получения электроэнергии и холода [1].

В качестве источника полезной мощности на котельных, ТЭЦ и ТЭС может служить винтовой детандер, работающий на вырабатываемом паре [4].

Винтовые детандеры относятся к машинам объемного типа, то есть расширение пара происходит в замкнутом изменяющемся объеме рабочей полости. И они имеют определенные преимущества перед лопаточными машинами в предложенном диапазоне мощностей:

- КПД расширения пара в винтовых детандерах практически равно КПД расширения пара в лопаточных турбинах той же мощности;
- частота вращения роторов винтового детандера значительно ниже частоты вращения ротора лопаточной турбины, что уменьшает нагрузки и упрощает конструкцию;
- винтовые детандеры хорошо работают на двухфазных средах, чего нельзя сказать о лопаточных турбинах;
- скорость движения пара в винтовых детандерах мала, и поэтому не наблюдается эрозийного износа рабочих поверхностей винтов при работе на газе, содержащем большое количество мелких, твердых частиц;

- эксплуатация винтовых детандеров абсолютно безопасна, при аварийной ситуации в случае разгона роторов не может произойти разрушения машины с разрушением ротора и разлетом обломков, зазор между роторами исчезнет и произойдет их заклинивание.

В ряде существующих станций пар с нужными параметрами для собственных нужд вырабатывается при помощи редукционно-охладительной установки (РОУ). При этом теряется пар с высокими параметрами, просто расширяется, не вырабатывая никакой полезной мощности. Это снижает общий КПД станции и котельной. Вместо РОУ этот пар можно направить в паровой винтовой детандер, или иначе в паровую винтовую машину (ПВМ).

ПВМ будет приводить во вращение генератор, который в свою очередь будет вырабатывать дополнительную мощность. Тем самым будет повышаться эффективность использования топливных ресурсов, так как не будет впустую теряться пар.

При этом пар необходимых параметров все также будет вырабатываться, и никакого вреда для схемы работы станции и котельной не будет [1].

ПАРОВАЯ ВИНТОВАЯ МАШИНА

Конструкция ПВМ показана на рис. 1 [3]. Она содержит корпус высокого давления (КВД) 1 с впускным патрубком, корпус низкого давления (КНД) 2 с выпускным патрубком, ведущий 3 и ведомый винтовые роторы. В КВД и в КНД попарно с обеих сторон установлены на валах двойные торцевые уплотнения 5 и опорные подшипники 6. В КВД установлены упорные подшипники 7, которые воспринимают осевые усилия, возникающие при работе машины.

Роторы входят в зацепление при помощи синхронизирующих шестерен 8, расположенных со стороны выпускного патрубка. Они же гарантируют зазор между роторами и исключают их зацепление. На обоих роторах установлены разгрузочные поршни (думмисы) 9, одна сторона которых сообщена с впуском, а вторая – с выпуском. Наличие думмисов на роторах значительно уменьшает осевые усилия, разгружая тем самым нагрузку на упорные подшипники [1].

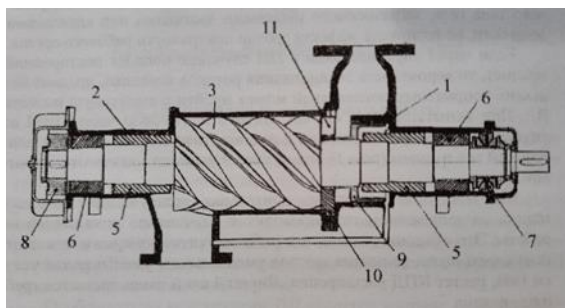


Рис. 1. Продольный разрез ПВМ по ведущему ротору [1]

В вертикальной плоскости разъема КВД и КНД установлено центрирующее днище 10, которое сопрягается с КВД и КНД. В нем выполнены отверстия для валов роторов и впускное окно 11 для подачи острого пара в парную полость, образуемую двумя винтовыми впадинами ведущего и ведомого роторов и корпусом. Именно наличие центрирующего днища обеспечивает точную соосность КВД и КНД. В результате такого решения повышается качество сборки машины, упрощается технология ее изготовления. Наличие общей горизонтальной плоскости разъема КВД и КНД облегчает процессы сборки и разборки машины. Это обеспечивает высокую ремонтпригодность ПВМ.

Как и в других паровых двигателях, в паровой винтовой машине большое влияние на КПД оказывает величина утечек. Однако в данном случае нет возможности использовать утечки для чего-то полезного, поэтому утечки через уплотнения недопустимы. Чтобы их избегать, торцевые уплотнения выполняются двойными. В качестве затворной жидкости в них используется вода. Профиль ведущих и ведомых зубьев обеспечивает непрерывное зацепление роторов при работе [1].

Рабочий процесс винтового детандера как объемной машины с внутренним расширением рабочего тела состоит из следующих периодически повторяющихся последовательных процессов:

1. Возникновение парной полости на стороне высокого давления винтов (рис. 2). Начальное значение объема парной полости (так называемый «мертвый объем») равно 0. Заполнение парной полости сжатым газом происходит через впускное окно, расположенное в корпусе на торце высокого давления роторов частично по торцу ведущего и ведомого роторов и частично – в верхней части корпуса. Под действием давления газа, действующего на боковые поверхности зубьев ведущего и ведомого роторов, последние начинают вращаться в противоположные стороны. При повороте роторов происходит отсечка парной полости зубьями винтов от впускного окна.

2. При дальнейшем вращении роторов до момента сообщения с выпускным окном, расположенном на торце низкого давления роторов, газ расширяется в замкнутом увеличивающемся объеме парной полости.

3. В конце процесса расширения парная полость сообщается с выпускной системой на торце низкого давления роторов. При сообщении парной полости с выпускным окном происходит выхлоп газа в выпускную полость. Недорасширенный газ за короткий промежуток времени стравливается в выпускную систему, и давление в парной полости становится равным давлению на выпуске. Объем парной полости при этом достигает максимального значения.

4. Далее совершается процесс выталкивания или «выжимания» газа из парной полости при постоянном давлении, равном давлению на выпуске. Объем парной полости при этом уменьшается от максимального его значения до 0 [5].

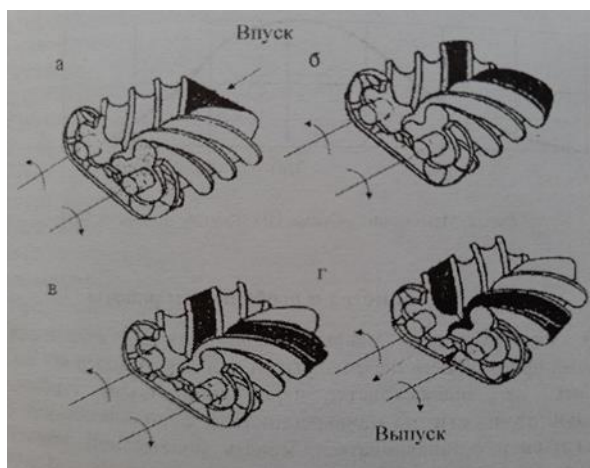


Рис. 2. Возникновение и развитие парной полости [1]

ПОКАЗАТЕЛИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА

При работе ПВМ имеет место перепад давления на впуске P_1 и на выходе P_2 , отношение которых $\pi = P_1/P_2$ превосходит отношение давлений, полученное в условии полного расширения пара. Это говорит нам о том, что ПВМ работает в условиях неполного расширения пара в машине. Таким образом у нас вырабатывается не полная мощность, которая теоретически могла бы быть нами получена [6].

На рис. 3 в $P - V$ координатах приведена теоретическая индикаторная диаграмма работы винтового детандера. Так как площадь индикаторной диаграммы в $P - V$ координатах равна цикловой работе l_i , то можно сравнить цикловую работу при полном расширении пара и при условии неполного расширения. Так, техническая работа полного расширения винтового детандера равна площади фигуры $a13ba$. Работа в режиме недорасширения равна площади фигуры $a12'2ba$. Треугольник $2'322'$ определяет ту недовыработку, которая появляется вследствие неполного расширения пара в ПВМ [1].

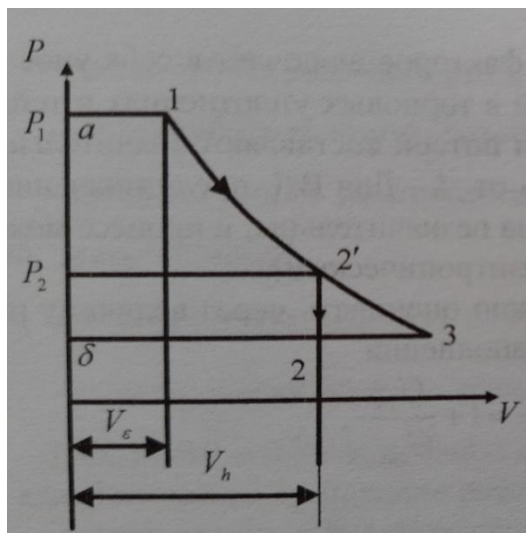


Рис. 3. Изображение рабочего процесса винтового детандера в $P - V$ координатах [1]

Существенное отличие реального цикла ПВМ от рассмотренного идеального объясняется потерями, возникающими вследствие:

- дросселирования пара при прохождении через впускное окно. При этом давление в ПП становится меньше, чем давление во впускном окне, и работоспособность пара снижается;

- теплообмена со стенками ПП. Эти потери значительно различаются для случаев, когда на входе имеется сухой насыщенный и перегретый пар. Если насыщенный пар поступает в ПП, то на ее более холодных стенках конденсируется влага, которая за счет центробежных сил стекает к периферии винтов, что дает возможность конденсации новых порций пара. При конденсации выделяется и отдается стенкам вся теплота парообразования, причем перепад температур между стенкой и паром может быть невелик. Термическое сопротивление пленки воды на стенке очень мало вследствие высокой теплопроводности воды, поэтому величина коэффициента теплоотдачи велика. В случае перегретого пара значение коэффициента теплоотдачи определяется теплопроводностью пара, которая в десятки раз меньше теплопроводности воды. Охлажденный на стенке, но не сконденсированный пар представляет собой значительно большее термическое сопротивление, чем пленка конденсата;

- неполноты расширения пара между винтовыми роторами.

На рис. 4 показано протекание рабочего процесса винтового детандера в $I - S$ координатах. Оттуда мы можем определить основной показатель эффективности работы винтового детандера – индикаторный (адиабатический или внутренний) КПД, который определяется по выражению

$$\eta_{ад} = \frac{l_i}{H_0},$$

где l_i – индикаторная работа, H_0 – располагаемый (изоэнтропный) теплоперепад, который определяется как разность:

$$H_0 = i_1 - i_{2ад},$$

где i_1 и $i_{2ад}$ – энтальпия газа в точках 1 и 2ад соответственно.

Значение l_i меньше располагаемого теплоперепада на величину потерь, которые имеют место вследствие следующих причин:

- 1) Дросселирование (мятие) заряда при наполнении через впускное окно;
- 2) Утечки и перетечки газа из парной полости;
- 3) Неполнота расширения газа в парной полости;
- 4) Теплообмен с окружающей средой [1].

Последняя из перечисленных причин обусловлена уносом тепла маслом, затворной водой в торцевых уплотнениях и теплоотдачей в атмосферу. Для ПВМ эти потери значительны и могут составлять 25–35% от индикаторной работы l_i [6].

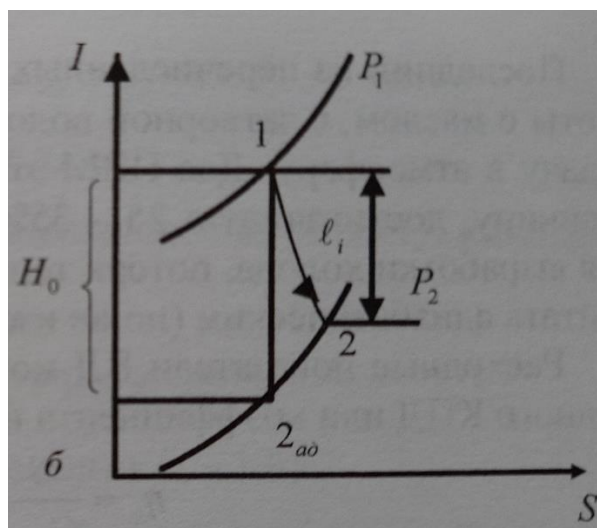


Рис. 4. Изображение рабочего процесса винтового детандера в I – S координатах [1]

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ВИНТОВОГО ДЕТАНДЕРА НА РАБОТУ МАШИНЫ

На работающей ПВМ пар на входе имеет температуру примерно равную 300 °С, из-за чего температура винтовых роторов значительно отличается от температуры корпуса в области опорных подшипников, которые нагреты до температуры ~60 °С. В этом случае межцентровое расстояние роторов увеличивается, но незначительно. А вот диаметры роторов увеличиваются, и они «разбухают». Тем самым уменьшается зазор между роторами по линии зацепления и возможно даже задевание роторов [2].

Поэтому можно сделать вывод о том, что на работающей ПВМ зазоры по линии зацепления можно свести к минимуму, определенному из условия отсутствия касания роторов. При этом в зазор будет утекать минимум пара и, следовательно, возрастет КПД самой машины.

Рабочий процесс ВД, совершающийся в каждой последовательной парной полости, состоит из процессов наполнения, объемного расширения и выталкивания газа из парной полости. Причем фазы наполнения и расширения сопровождаются утечками рабочего тела в зазоры по периметру парной полости.

Рассмотрим подробнее, из каких участков состоит зазор по периметру парной полости и их роль в утечках газа.

1. Зазор на торце высокого давления между ведущим и ведомым роторами, с одной стороны, и корпусом – с другой. Через этот зазор происходит утечка газа в область с давлением выпуска.
2. Зазор между ведущим и ведомым роторами по линии зацепления. Через этот зазор также происходит утечка газа в область с давлением выпуска.
3. Зазор между вершинами зубьев ведущего, ведомого и корпусом. Через этот зазор происходит перетечка газа между смежными парными полостями [2].

Роль каждого участка в суммарной утечке газа из парной полости различна. Основное влияние на эффективность работы винтового детандера оказывают зазор между роторами по линии зацепления, а также торцевой зазор на стороне высокого давления.

Стоит отметить, что поперечный размер зазора на каждом участке различен, кроме того, он меняется по углу поворота роторов, а также зависит от теплового состояния машины. Измерить величину зазоров при работе машины не представляется возможным.

СХЕМА ПОДКЛЮЧЕНИЯ ПАРОВОЙ ВИНТОВОЙ МАШИНЫ

Паровая винтовая машина может быть подключена как самостоятельное оборудование, но более целесообразно подключать его параллельно с редукционно-охлаждающей установкой. Это выгодно потому, что при случае неисправности машины не будет перебоя в снабжении станции или котельной паром необходимых параметров на собственные нужды. На рис. 5 представлена предлагаемая схема подключения ПВМ.

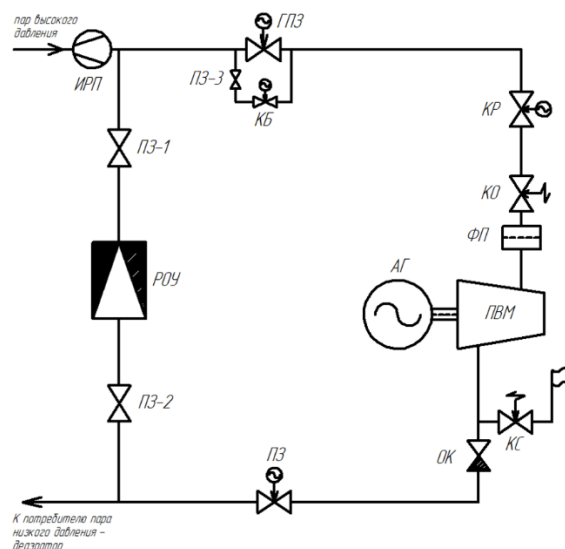


Рис. 5. Предлагаемая схема подключения ПВМ параллельно линии с РОУ:

ПВМ – паровая винтовая машина; АГ – электрогенератор; КР – кран регулирующий; ПЗ – главная паровая задвижка; КБ – кран паровой байпасный; ПЗ – паровая задвижка; КО – клапан отсечной аварийный; ОК – обратный клапан; КС – клапан сброса пара из ПВМ; ФП – фильтр паровой; ИРП – измеритель расхода пара; РОУ – редукционно-охлаждающая установка

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье приведены описание конструкции и принципы рабочего процесса винтового детандера, работающего на паре, то есть паровой винтовой машины.

Приведены преимущества и недостатки винтовых детандеров при сравнении с лопаточными турбинами той же мощности, описаны способы повышения эффективности работы станций и котельных путем применения на производстве паровых винтовых машин.

Было рассмотрено влияние теплового состояния машины на величину утечек и повышение эффективности работы уменьшением зазоров при работе. Представлена также возможная схема подключения паровой винтовой машины параллельно линии с редукционно-охлаждающей установкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Березин С. Р. Винтовые детандеры: Учебное пособие. Уфа: УГАТУ, 2010. 53 с.
2. Березин С. Р. Технология энергосбережения с использованием паровых винтовых машин // Теплоэнергетика. 2007. № 8. С. 40–43.
3. Березин С. Р. Винтовая расширительная машина/ Патент РФ № 2319840. 2006.
4. Репин А. Л. Повышение эффективности работы паровых котельных при использовании когенерационных установок с винтовым двигателем: дис. канд. техн. наук. Краснодар, 2006.
5. Данилов М. М., Иванова З. Н. Изменение объема парной полости в процессе расширения в винтовом детандере // Вестник МАХ. 2016. №4. С. 58–61.
6. Березин С. Р., Носков А. Н., Щеглов Г. А. Определение показателей рабочего процесса паровой винтовой машины // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. № 1. С. 50–56.

ОБ АВТОРАХ

МИННИАХМЕТОВ Денис Рустамович, дипл. 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» (УГАТУ, 2022).

METADATA

Title: Study of ways to improve the efficiency of steam screw machine operation.

Author: D. R. Minniakhmetov ¹

Affiliation:

¹ Ufa University of Science and Technology (UUST), Russia.

Email: ¹ denisnaryto@mail.ru

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa University of Science and Technology), no. 1 (30), pp. 81-87, 2024. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract: This paper considers the increase of the efficiency of thermal electric power plants, thermal power plants and boiler houses by introducing a steam screw machine into their scheme for generating useful power. The comparison of steam screw machine with vane machines of similar power (200-1500 kW) is given. The working principle of the steam screw machine is described, as well as its design.

Key words: steam screw machine, efficiency improvement, screw expanders.

About authors:

MINNIAKHMETOV Denis Rustamovich, Dipl. in specialty 13.03.01 "Heat power engineering and heat engineering" (Ufa State Aviation Technical University, 2022).