

ISSN 0132 – 0890

www.rudmet.ru

ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Издается с 1961 года
(№ 1079)

11.2021



Тема номера: Юбилей объединенной кафедры “Металлургия и технологии обработки материалов” Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого (стр. 26-49).

ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Издательский дом
«Руда и Металлы»

№ 11 (1079), ноябрь 2021 г.

Издается с 1961 г.

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал
по актуальным проблемам металлургии и машиностроения

Учредители:

Акционерное общество
«Издательский дом
«Руда и Металлы»

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»

Федеральное бюджетное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Магнитогорский государственный технический
университет им. Г. И. Носова»

При участии:

ПАО «ММК»
ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга «БМК»
Государственного Эрмитажа
Журнала «Stahl und Eisen»

Официальный информационный орган
Федерального УМО
«Технологии материалов»

Редакционный совет:

Председатель редакционного совета: О. Н. Сосковец

Главный редактор: В. М. Колокольцев

Первый зам. главного редактора: К. Л. Косырев

Зам. главного редактора: А. Г. Воробьев, Е. В. Цирульников

А. М. Беленький, В. Блек (Германия), Ю. Л. Бобарикин (Беларусь), О. И. Борискин, И. В. Буторина,

Р. М. Валеев, Е. П. Волынкина, А. В. Выдрин, С. П. Галкин, Е. А. Голи-Оглу (Дания), Я. М. Гордон (Канада),

В. Я. Дашевский, Д. Г. Еланский, Н. А. Зюбан, В. П. Иващенко (Украина), И. Е. Илларионов, Л. М. Капуткина,

А. А. Казаков, А. П. Коликов, А. Г. Корчунов, А. В. Кушнарев, И. О. Леушин, В. А. Луценко (Украина),

И. П. Мазур, Ю. Ю. Пиотровский, А. Н. Савенок (Беларусь), А. В. Серебряков, И. А. Султангузин,

С. С. Ткаченко, А. Я. Травянов, Н. А. Чиченев, М. В. Чукин, П. Шеллер (Германия), Е. А. Яценко

Редакция:

Зам. главного редактора: Е. В. Цирульников

Редактор Е. Ю. Рахманова

Издатель — АО «Издательский дом «Руда и Металлы»
Адрес издателя: 119049, Москва, Ленинский просп., 6,
стр. 2, МИСиС, оф. 622

Адрес редакции:

фактический: 119049, Москва, Ленинский проспект 6,
стр. 2, МИСиС, оф. 617

почтовый: 119049, Москва, а/я № 71

Телефон/факс: (495) 955-01-75

Эл. почта: chermet@rudmet.ru, tsirulnikov@rudmet.ru

www.rudmet.ru

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал
по актуальным проблемам металлургии и машиностроения
«Черные металлы» № 11 (1079), ноябрь 2021 г.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере
связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
(Свидетельство ПИ № ФС77-48681 от 28.02.2012 г.)

Товарный знак и название «Черные металлы» являются исключительной
собственностью Издательского дома «Руда и Металлы»

Отпечатано с предоставленных готовых файлов
в типографии «Канцлер»
150044, Россия, Ярославль, ул. Полушкина Роща, 16, стр. 66А.
Тел. (4852) 58-76-33

Дата выхода в свет: 08.12.2021. Формат 60×90/8.

Печ. л. 11. Офсетная печать. Бумага офсетная.

Тираж 1000 экз. Цена свободная

За достоверность рекламной информации ответственность несет рекламодатель
За достоверность научно-технической информации ответственность несет автор
Перепечатка материалов возможна только с письменного разрешения редакции
При перепечатке ссылка на «Черные металлы» обязательна
«Реклама» — материал публикуется на правах рекламы
Публикуемые материалы не обязательно отражают точку зрения редакции
и редсовета журнала

ISSN 0132-0890



9 770132 089006 >

Подписные индексы:

12985 («Пресса России»)

Обогащение руд

- Б. Л. Красный, И. Г. Зимбовский, У.В. Дмитракова, Е.Д. Чылбак-оол.* Химический способ восстановления фильтрующей способности керамических фильтрующих элементов 4

Производство стали и металловедение

- В. Е. Рошин, А. В. Рошин, Ю. С. Кузнецов, Ю. Н. Гойхенберг.* Технологические и материаловедческие аспекты перехода в черной металлургии на безуглеродные процессы 10
- С. В. Давыдов.* Фазовые равновесия в карбидной области диаграммы «железо — углерод». Часть 2. Полная диаграмма системы «железо — карбид $\epsilon\text{-Fe}_2\text{C}$ » 18

5 лет объединенной кафедре «Металлургия и технологии обработки материалов» Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого

- Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартьянов, Я. И. Радькин, И. А. Цырганович.* Влияние скорости волочения на механические свойства и микротвердость тонкой проволоки 26
- М. Н. Верещагин, В. Г. Шепелевич, О. М. Остриков.* Прочность, пластичность, микротвердость и неомогенная пластическая деформация лент из аморфных многокомпонентных сплавов на основе железа 30
- Ю. Л. Бобарикин, Я. И. Радькин, Ю. В. Мартьянов, А. В. Стрельченко.* Влияние скоростных параметров редуцирования на точность получаемого трубного профиля 35
- М. Н. Верещагин, М. Ю. Целуев, С. Н. Целуева.* Модифицирование металлических дисперсий при высокоэнергетической обработке 39
- Ю. Л. Бобарикин, Ю. В. Мартьянов, А. В. Веденеев, А. В. Хотько.* Модернизация метода Хантера испытания металлокорда в соответствии с условиями эксплуатации автомобильной шины 45

Прокатка и другие процессы ОМД

- А. Г. Корчунов, Е. М. Медведева, В. А. Харитонов, Д. В. Константинов.* Влияние пластического обжатия на напряженно-деформированное состояние арматурного каната 50
- М. И. Румянцев, А. Н. Завалицин, А. Н. Колыбанов, О. Н. Есипова.* Обоснование натяжения полосы в цифровом двойнике стана холодной прокатки 55
- А. Б. Сычков, А. Б. Моллер, Г. Я. Атангулова, Г. В. Агутин.* Особенности структурообразования и формирования механических свойств в фасонном прокате из стали 09Г2С в процессе ускоренного водяного охлаждения 60

Энергетика, экология и рециклинг

- В. С. Дубинин, Т. А. Степанова, С. О. Шкарупа, В. П. Крупский.* Новые способы производства электроэнергии с использованием пара котлов-утилизаторов, работающих на отходящих газах высокотемпературных установок черной металлургии 68
- А. А. Николаев, П. Г. Тулупов.* Методика моделирования случайных возмущений длин электрических дуг для оптимальной настройки нелинейного П-регулятора импеданса 74
- В. А. Колесников, В. А. Бродский, Д. Ю. Жуков, А. В. Колесников.* Техногенные металлосодержащие отходы I-II класса — сырье для получения новых продуктов и материалов . . . 81

Хроника

- Памяти Леонида Абрамовича Вайсберга 88

Журнал «Черные металлы» по решению ВАК Министерства образования и науки РФ включен в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук» по металлургии

Журнал «Черные металлы» включен в Международную базу данных Chemical Abstracts Service

Журнал «Черные металлы» включен в Международную базу данных Scopus, II квартал (2020)

(по версии SCIMAGO)

Новые способы производства электроэнергии с использованием пара котлов-утилизаторов, работающих на отходящих газах высокотемпературных установок черной металлургии

В. С. Дубинин, доцент¹, канд. техн. наук, эл. почта: promteploenergetika@rambler.ru

Т. А. Степанова, заведующая кафедрой энергетики высокотемпературной технологии¹, доцент, канд. техн. наук

С. О. Шкарупа, заведующий лабораторией²

В. П. Крупский, главный конструктор³

¹Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва, Россия.

²Московский государственный областной технологический университет, Королев, Россия.

³ООО «Экокубер», дер. Лесковка, Минская обл., Беларусь.

В настоящее время тепловая энергия пара, вырабатываемого паровыми котлами-утилизаторами высокотемпературных установок черной металлургии, используется для отопления и горячего водоснабжения. Такие потребители тепловой энергии нестабильны в течение суток и по сезонам и, как правило, малы по сравнению с объемом вырабатываемого пара. Это обусловлено тем, что паровые котлы-утилизаторы являются неотъемлемой частью высокотемпературных установок. Они обеспечивают грубое обеспыливание отходящих газов и их предварительное охлаждение, необходимое для работы фильтров, далее эти горючие газы используют в качестве энергоносителей и направляют в газовые трубопроводные сети. В результате основная часть такого пара полезно не используется. Пар, вырабатываемый большинством паровых котлов-утилизаторов, не является перегретым и имеет высокое влагосодержание, поэтому он неприменим для работы паровых турбин. Но и для перегретого пара из-за его малого объемного расхода применение паровых турбин относительно малой мощности нецелесообразно из-за низкого КПД.

В статье рассмотрено применение паропоршневых двигателей с целью использования пара, вырабатываемого паровыми котлами-утилизаторами, для производства электроэнергии. Паропоршневой двигатель, в отличие от классических поршневых паровых машин, имеет достаточно высокую частоту вращения. Вместе с приемлемыми габаритами это дает возможность их прямого соединения с современными электрогенераторами частотой вращения 1500 об/мин без мультипликатора. Такие двигатели создают путем конвертации серийных двигателей внутреннего сгорания преимущественно устаревших марок. Невысокая стоимость такого паропоршневого двигателя обеспечивает короткие сроки окупаемости такого оборудования.

Ключевые слова: вторичные энергоресурсы, высокотемпературные установки, черная металлургия, паровая поршневая машина, паропоршневые двигатели.

DOI: 10.17580/chm.2021.11.12

Введение

В настоящее время в Российской Федерации и в мире, по данным World Steel Association, продолжается тенденция по ежегодному увеличению производства стали: в 1970 г. — 600 млн т, в 2000 г. — 850 млн т, в 2010 г. — 1,414 млрд т, а в 2016 г. — 1,628 млрд т. При этом постоянно растут требования к снижению энергетических затрат на производство металлопродукции [1]. Одним из способов решения данной задачи является выработка электроэнергии из пара котлов-утилизаторов черной металлургии. Однако, параметры этого пара делают невозможным его применение для работы паровых турбин. Актуальность использования пара от котлов-утилизаторов определяется тем, что стоимость электроэнергии, получаемой от централизованных источников, резко возрастает. Регулируемые тарифы на отпускаемую электроэнергию для неорганизованных потребителей на низком напряжении к 2015 г. возросли до 4–5 тыс. руб/(МВт·ч). Однако в настоящее время только 15–20 % электроэнергии можно

приобретать по регулируемым ценам. Остальную часть потребитель вынужден приобретать по более высоким ценам либерализованного рынка электроэнергии, доходщим до 7–8 тыс. руб/(МВт·ч). Кроме того, высока стоимость выполнения технических условий энергосистемы [2].

В данных условиях предприятия черной металлургии вырабатывают электроэнергию для собственных нужд, в том числе из вторичных энергоресурсов. Например, в ПАО «НЛМК» функционирует утилизационная ТЭЦ мощностью 150 МВт. В качестве вторичного топлива она использует доменные и коксовые газы. Кроме того, там имеется газотурбинная расширительная станция в составе двух бескомпрессорных газовых турбин суммарной мощностью 24 МВт [3, 4]. Таким образом, используется химическая энергия указанных газов и энергия давления, но не упоминается об использовании пара котлов-утилизаторов для генерации электрической энергии. В АО «ЕВРАЗ НТМК» реализован проект утилизации ранее не востребуемого ресурса — конвертерного газа в котлах-охладителях ОКФ-160, что позволяет

Таблица 1

Паровые котлы-утилизаторы предприятий черной металлургии России и других стран СНГ

Марка паровых котлов-утилизаторов	Металлургический агрегат	Паропроизводительность, т/ч	Давление пара, МПа	Температура пара, °С	Литературный источник	
КУ-125М	Мартеновские печи	40,8	4,5	385	[8]	
КУ-100Б-1М		31,8	1,8	399		
КУ-100-1М		33,9	1,8	360		
КУ-80-3М		26,9	1,8	358		
КУ-60-2М		19,9	1,8	366		
КУ-40-1М		13,4	1,8	358		
КУ-16	Металлургические печи	2,8	1,2	242	[9]	
КУ-40		7,4	1,3	250		
КУ-50		9	1,7	375		
КУ-60-2		20	4,4	392		
КУ-80-3		26,9	4,4	385		
КУ-100-1		33,9	4,4	382		
КУ-125		42,4	4,4	385		
КУ-20-39		18	3,9	Насыщенный пар		
УЭЧМ-34		6	1	— „ —		
УЭЧМ-67		8	1,2	—		
КСТ-80		25	3,9	450		
КУ-150		50,5	4,5	394		
ОКГ-100-2		100-тонный конвертер	160	2,6	Насыщенный пар	[9]
ОКГ-100-3	210		4,7	— „ —		
ОКГ-130	130-тонный конвертер	0–345	4	— „ —		
ОКГ-130БД		0–345	4	— „ —		
ОКГ-180	180-тонный конвертер	60–198	4,6	— „ —		
ОКГБД-250	250-тонный конвертер	160	2	— „ —		
ОКГ-250-2		0–250	2	— „ —		
ОКГ-400	400-тонный конвертер	0–285	4	— „ —		
ОКГ-160БД-1	160-тонный конвертер	0–200	4	— „ —	[10]	

осуществлять нагрев обратной сетевой воды теплофикационной системы [4]. При этом в летний период, когда не работает система отопления, данный ресурс не используется.

Целью данной работы является рассмотрение новых возможностей получения электроэнергии из насыщенного пара большинства котлов-утилизаторов с применением паропоршневых двигателей, в том числе при их работе на пароводяной смеси.

Основная часть

Пар большинства паровых котлов-утилизаторов не используют для выработки электроэнергии либо из-за низкой производительности парового котла-утилизатора одного металлургического агрегата, либо из-за неподходящих параметров пара для использования в паровой турбине. Пар котла-охладителя ОКГ-160 является, как и у всех ОКГ, насыщенным, и паровые турбины не могут работать на таком паре из-за эрозии лопаток. С этим явлением борются даже на турбинах, работающих на перегретом паре, где в конце расширения влажность пара составляет всего 10–12 % [5].

При выработке котлами-утилизаторами перегретого пара их паропроизводительность в большинстве случаев недостаточна для использования в паровых турбинах. В работе [6] показано, что внутренний относительный КПД паровой турбины при снижении объемного расхода пара падает, начиная с расхода 6380,3 м³/ч, при котором значение КПД составляет 0,7, а мощность 6000 кВт. При объемном расходе пара 4000 м³/ч КПД = 0,6, а при дальнейшем уменьшении объемного расхода пара указанный КПД снижается практически вертикально. Следует отметить, что в работе [6] рассматривали низкие параметры пара (3,43 МПа, 435 °С). При более высоком давлении расход пара будет меньше, а минимально допустимый расход пара возрастет (в [6] расход пара составлял 28,5 т/ч). Именно поэтому характерной особенностью паротурбинных установок для генерации электроэнергии в условиях промышленного предприятия является отсутствие турбин, работающих по конденсационному циклу [7], так как требование высокого КПД для турбин с противодействием не столь актуально в связи с полезным использованием тепловой энергии выходного пара. Но даже линейка таких относительно маломощных паровых турбин производства АО «Уральский турбинный завод» находится в диапазоне 30–60 МВт при расходах свежего пара 180–450 т/ч [7].

Рассмотрим подробнее параметры пара паровых котлов-утилизаторов, используемых и использованных ранее на предприятиях черной металлургии России и других стран СНГ (табл. 1) [8–10].

Из табл. 1 видно, что значительная часть паровых котлов-утилизаторов вырабатывает насыщенный пар, не пригодный для работы паровых турбин. Многие паровые котлы-утилизаторы, вырабатывающие перегретый пар, имеют малую паропроизводительность для использования пара в паровых турбинах.

В данной ситуации следует обратить внимание на поршневые паровые машины. Еще в 1945 г. академик Н. В. Инноземцев, один из основателей советской школы двигателестроения, писал, что при мощности ниже 5000 л. с. (3676 кВт) надо применять поршневую паровую машину [11], а И. Н. Кирсанов, под руководством основателя советской школы паротурбостроения А. В. Щегляева, защитил диссертацию по поршневой паровой машине в 1953 г. [12].

Для выработки электроэнергии из пара паровых котлов-утилизаторов классические поршневые паровые машины установки неприменимы ввиду множества недостатков,

например их низкая частота вращения приводит к большим габаритам и металлоемкости, а также к невозможности использовать прямой привод современных относительно высокооборотных электрогенераторов без мультипликатора. У таких установок большое содержание смазочного масла в выхлопном паре, из-за чего его конденсат неприменим для питания паровых котлов-утилизаторов без сложной системы очистки.

С другой стороны, классические поршневые паровые машины имеют ряд преимуществ перед паровыми турбинами. Они применимы для работы на насыщенном паре, именно на таком паре работали первые поршневые паровые машины. Удельный расход пара поршневой паровой установки практически не зависит от мощности, поэтому они могут эффективно работать при относительно малых расходах пара, характерных для паровых котлов-утилизаторов в черной металлургии. Используя принципы работы классической поршневой паровой машины, впервые предложены паропоршневые двигатели, которые сохраняют указанные преимущества паровых машин и не имеют указанных выше недостатков. Паропоршневыми двигателями (ППД) называются высокооборотные поршневые паровые машины с частотой вращения 1000 об/мин и более при однократном расширении пара. Они могут быть получены конвертацией поршневых двигателей внутреннего сгорания. Понятие

«паропоршневые двигатели» было введено в научный оборот одним из авторов в 2004–2005 гг. [13–16].

Недостатком паропоршневого двигателя является более низкий механический КПД, чем у классических поршневых паровых машин, что обусловлено их более высокой частотой вращения. Механический КПД классических поршневых паровых машин составляет 0,9–0,92 [11]. Механический КПД паропоршневого двигателя будет на уровне поршневых двигателей внутреннего сгорания (0,75–0,92), которые конвертируются в паропоршневой двигатель [17].

Для оценки удельного расхода пара паропоршневого двигателя можно использовать данные классических поршневых паровых машин, приняв, что механический КПД паропоршневых двигателей равен 0,835 и он в 1,09 раза (0,91/0,835) меньше, чем у классических поршневых машин. Следует отметить, что при использовании ППД многократное расширение обеспечивается последовательным соединением нескольких паропоршневых двигателей. Первый из них является частью высокого давления паросиловой установки, второй — среднего, а в случае двукратного расширения — низкого давления. Это позволяет использовать ППД более гибко. Например, в отопительный период останавливать часть низкого давления, и выхлопную пароводяную смесь направлять в бойлер горячей воды с целью отопления. Данные классических поршневых паровых машин и предполагаемые данные паропоршневых двигателей по удельному

Таблица 2

Характеристики классических поршневых паровых машин и предполагаемые данные по удельному эффективному расходу пара ППД при тех же параметрах свежего пара, давлении отработанного пара и кратности расширения

Поршневые паровые машины	Индикаторная мощность поршневых паровых машин, кВт	Давление пара, Па	Температура пара, °С	Кратность расширения, раз	Давление отработанного пара, Па	Удельный индикаторный расход пара поршневых паровых машин, кг/(кВт·ч)	Удельный эффективный расход пара поршневых паровых машин, кг/(кВт·ч)	Удельный эффективный расход пара паропоршневых двигателей при его механическом КПД 0,835, кг/(кВт·ч)	Литературный источник
Машина Шмидта, Германия, 1921 г.	110	5,755		4	6	3,48	–	4,16	[18]
НАМИ-012, высокооборотная автомобильная машина	73,5*	2,6	60	1	Вероятно 40	–	8,8	8,8	[19]
Судовая машина прямоточной золотниковой системы Фридрихштадт, Норвегия, 1930 г.	800	1,5	300	2	5	6,5	–	7,7	[20]
Высокооборотная машина ЦНИИ лесосплава СПУ-250	183*	3,45	392	2	26	–	5,12	5,12	[21]
Машина по диссертации И. Н. Кирсанова	949	1,2	220	2	–	7,63	–	9,1	[12]
Машины из справочника 1924 г.	–	1	Насыщенный пар	2	Очень низкое (отсечка 0,04–0,05)	6	–	7,1	[22]
	–	0,8				6,3	–	7,5	
	–	0,5				7,3	–	8,7	
	–	0,3				8,7	–	10,4	
	–	1		1	Низкое (отсечка 0,05)	7,07	–	8,46	
	–	0,8				7,3	–	8,7	
	–	0,5				7,8	–	9,3	
	–	0,3				8,9	–	10,6	
–	0,25				9,6	–	11,49		

*Эффективная мощность, а не индикаторная.

эффективному расходу пара при тех же параметрах пара приведены в **табл. 2** [18–22].

Из табл. 2 видно, что часть предполагаемых паропоршневых двигателей, в том числе двукратного расширения, имеет давление на выхлопе 20 кПа и более. Такое давление соответствует температуре конденсации пара более 58 °С. Это означает, что выхлопную пароводяную смесь можно использовать для горячего водоснабжения близкорасположенных потребителей. В табл. 2 приведены паропоршневые двигатели, работающие по конденсационному циклу, так как он обеспечивает максимальную выработку электроэнергии из пара. Возможна работа ППД в режиме когенерации, когда давление на выхлопе превышает атмосферное и выхлопной пар используется для производства тепловой энергии. Такие поршневые паровые машины, выпускаемые в настоящее время, существуют [23].

Предполагаемые паропоршневые двигатели могут иметь практически любую мощность, при этом удельный эффективный расход пара от нее не зависит. Это означает возможность привода системой паропоршневых двигателей различного оборудования металлургического предприятия вместо электропривода (насосы, дымососы, воздухоподувки, компрессоры и др.). Такой подход повышает энергоэффективность вследствие отсутствия двойного преобразования энергии, которое существует при использовании электрогенераторов (механическая в электрическую, электрическая в механическую). КПД каждого такого преобразования меньше единицы. Кроме того, при применении паропоршневого двигателя вместо электродвигателей исключены аварийные остановки оборудования при кратковременных перерывах электроснабжения. Возможны не только кратковременные нарушения электроснабжения при штатном срабатывании систем автоматической защиты, но и многочасовые, которые увеличились из-за роста опасных климатических явлений [24]. Различные экстремальные проявления погодноклиматических процессов (сильные жара, морозы, а также так называемые волны тепла и холода, т. е. периоды стояния экстремально высоких и низких температур наружного воздуха в течение нескольких дней подряд) могут существенным образом осложнить работу электрических объектов [25–29].

При этом следует отметить, что самостоятельная генерация электроэнергии без подсоединения к электросети не обеспечивает требований качества электроэнергии по частоте при подключении потребителей непосредственно к электрогенератору, приводимому любым тепловым двигателем. Не существовало таких тепловых двигателей, которые обеспечивали бы точность поддержания частоты вращения, позволяющую иметь отклонения частоты тока на уровне центральных электросетей. Особенностью ППД является возможность при определенных условиях точного поддержания частоты благодаря явлению самостабилизации [30–32]. Таким образом, применение ППД в черной металлургии может обеспечить не только экономию энергоресурсов, но и уменьшить аварии оборудования, связанные с нарушением электроснабжения.

Для оценки предполагаемого экономического эффекта от использования паропоршневых двигателей рассмотрим их применение с использованием насыщенного пара,

вырабатываемого котлом-утилизатором ОКГ-160, работающего в АО «ЕВРАЗ НТМК». Это может быть один или несколько паропоршневых двигателей асинхронных электрогенераторов, работающих параллельно с центральными электросетями. В этом случае переменные режимы их работы из-за циклического расхода пара возможны. Расход пара ОКГ-160: 0–200 т/ч, его номинальное давление 4 МПа. Используя графики рис. VI.14 в работе [33] по расходу и давлению пара в период продувки, можно предположить, что давление пара в этот период будет меняться от 2 до 4 МПа, а средний расход пара составит не менее 100 т/ч. Рассмотрим пессимистический вариант, используя удельный расход насыщенного пара паропоршневого двигателя при давлении свежего пара 1 МПа (при большем давлении он будет меньше) приведенный в табл. 1. Для варианта однократного расширения $m = 8,46 \text{ кг}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$. Тогда средняя мощность N на валу паропоршневых двигателей составит $N = M/m = 100000/8,46 = 11820,3 \text{ кВт}$.

КПД асинхронного электрогенератора не меньше асинхронного короткозамкнутого электродвигателя, работающего в режиме электрогенератора. Возьмем для использования в режиме электрогенератора электродвигатель АИР355МБ мощностью 200 кВт при синхронной частоте вращения 1000 об/мин. Его КПД = 94,5 [34]. Тогда средняя электрическая мощность, которая может быть получена за период продувки, составит $N = 11820,3 \cdot 0,945 = 11170,2 \text{ кВт}$.

При работе предлагаемой системы электрогенерации 8000 ч/год с учетом того, что цикл работы конвертера составляет 60 мин, а время продувки — 17 мин [33] выработка электроэнергии за год составит:

$$E = 11170,2 \cdot 8000 \cdot 17/60 = 25319120 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 25319,12 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$$

Приняв рыночную стоимость электроэнергии 7 тыс. руб./ (МВт·ч), имеющую тенденцию к повышению [2], имеем экономию на оплату электроэнергии $25319,12 \cdot 7000 = 177233840 \text{ руб} = 177,234 \text{ млн руб}$.

Приводом электрогенератора мощностью 200 кВт может быть паропоршневой двигатель, полученный конвертацией дизеля Д12. Этот дизель используется в составе дизель-генератора мощностью 200 кВт при 1500 об/мин. Возможность получения мощности 200 кВт при 1000 об/мин от паропоршневого двигателя, полученного путем конвертации дизеля Д12, подтверждается проведенными авторами испытаниями одноцилиндрового отсека паропоршневого двигателя, полученного конвертацией поршневого двигателя мощностью 2 кВт с частотой вращения 3000 об/мин. При давлении пароводяной смеси 0,8 МПа и частоте вращения 1200 об/мин была получена мощность паропоршневого двигателя около 3 кВт в котельной «Текстильщик» г. Королева.

Стоимость дизеля Д12 не превышает 2 млн руб, стоимость электродвигателя мощностью 200 кВт не превышает 1 млн руб., себестоимость конвертации дизеля Д12 в серийном производстве также не превышает 1 млн руб. При использовании всего пара от ОКГ-160 для генерации электроэнергии потребуется $11170,2/200 \approx 66$ таких двигатель-генераторных установок стоимостью каждая не более $2 + 1 + 1 = 4 \text{ млн руб}$. и общей стоимостью $66 \cdot 4 = 264 \text{ млн руб}$. Таким образом, простой срок окупаемости

с учетом годовой экономии на оплату электроэнергии 177,234 млн руб. составит не более $264/177,234 = 1,49$ года.

Для работы одного или нескольких электрогенераторов автономно от центральных электросетей необходима их постоянная, а не циклическая работа. В этом случае необходимо использовать пароводяной аккумулятор тепловой энергии. В период продувки пар будет идти как в паропоршневые двигатели, так и для зарядки пароводяного аккумулятора. В период паузы пар из этого аккумулятора будет идти в паропоршневые двигатели. Такие аккумуляторы использовали в СССР для выравнивания расхода пара от охладителей конвертерных газов [33]. Однако их применение безусловно увеличит срок окупаемости: один пароводяной аккумулятор объемом 30 м³ на давление 1,2 МПа имеет стоимость 82 тыс. евро, а их потребуется несколько десятков. Однако срок окупаемости увеличится незначительно, так как в $60/17 = 3,53$ раза уменьшится мощность паропоршневых двигателей с электрогенераторами и, соответственно, их число. В связи с высоким курсом рубль-евро, он может даже уменьшиться, если использовать пароводяные аккумуляторы российского производства, стоимость которых будет в разы меньше. Для определения наилучшего варианта применения ППД на конкретном предприятии необходимо привести подробные расчеты вариантов с учетом территориальных возможностей расположения дополнительного оборудования. В том числе, для рассматриваемого примера применения ППД, может оказаться целесообразной конвертация в ППД дизеля тепловозного дизель-генератора. Частота тока такого электрогенератора 100 Гц. Удобно снизить частоту вращения ППД по сравнению с дизелем в 2 раза и получить промышленную частоту 50 Гц. Это будет всего один ППД мощностью, несколько большей 3000 кВт.

Стоимость такой научно-исследовательской работы может составлять несколько млн руб.

Заключение

Практически все паровые котлы-утилизаторы вырабатывают пар с параметрами, под которые можно создать паропоршневой двигатель. Привод электрогенератора от такого двигателя обеспечит выработку собственной электроэнергии и экономию энергоресурсов. Возможна автономная от центральных электросетей работа такого электрогенератора при достаточном качестве электроэнергии, что позволяет уменьшить аварийность оборудования при неизбежных перерывах электроснабжения. ■

Библиографический список

1. *Strogonov K., Tolkanov S., Korkots K., Fedyukhin A.* Thermostatic cover for improving energy and technological efficiency of steel mills // E3S Web of Conferences 110, 01003 (2019). SPbWOSCE-2018. DOI: 10.1051/e3sconf/201911001003.
2. *Зайченко В. М., Чернявский А. А.* Сравнение характеристик распределенных и централизованных схем энергоснабжения // Промышленная энергетика. 2016. № 1. С. 2–8.
3. *Лицар В. В., Кудрин Б. И.* Отраслевой семинар-совещание руководителей и специалистов энергетических служб предприятий металлургической промышленности // Промышленная энергетика. 2017. № 3. С. 56–59.
4. *Кошарная Ю. В.* Повышение энергоэффективности и обеспечение экологической безопасности — основные направления деятельно-

- сти энергетических служб предприятий металлургической промышленности // Промышленная энергетика. 2018. № 6. С. 2–5.
5. *Беляев А. М., Рубцов В. Г., Самойлов О. А.* и др. Применение комплексного подхода для борьбы с влажно-паровой эрозией в новых паровых турбинах АО «УТЗ» // Электрические станции. 2019. № 4. С. 21–26.
6. *Dubin V. S., Stepanova T. A., Shkarupa S. O., Alekseevich M. Y.* Prospects for use of steam-piston engines to increase the economic attractiveness of environmentally friendly processes for the processing of copper-molybdenum concentrates of promising deposits in Kazakhstan // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Ser. 1749 012030. P. 1–6.
7. *Ухлин А. А., Степанов М. О., Шибяев Т. Л.* Уникальные проекты паровых турбин АО «Уральский турбинный завод» для промышленной генерации // Теплоэнергетика. 2020. № 12. С. 58–65.
8. *Воинов А. П., Зайцев В. А., Куперман Л. И.* и др. Котлы-утилизаторы и энерготехнологические агрегаты. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 272 с.
9. *Роддатис К. Ф., Полтавецкий А. Н.* Справочник по котельным установкам малой производительности. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 488 с.
10. Энергетическое оборудование для тепловых электростанций и промышленной энергетики: каталог. Ч. 1. — М.: ЦНИИТЭИтяжмаш, 1995. — 128 с.
11. *Иноземцев Н. В.* Тепловые двигатели: учебник для студентов вузов. — М.: Оборонгиз, 1945. — 392 с.
12. *Кирсанов И. Н.* Модернизация и реконструкция поршневых паровых машин: дисс. ... канд. техн. наук / Московский энергетический ин-т (МЭИ). — М.: Б.и., 1953. — 164 с.
13. *Дубинин В. С., Лаврухин К. М., Тутов Д. П.* Сопоставление централизованных и децентрализованных систем энергоснабжения в связи с ожидаемой ситуацией в энергетике России // Тез. докл. междунар. науч.-практ. конф. «Малая энергетика-2004» 11–14 октября 2004 г. (г. Москва). — М.: Малая энергетика, 2004. С. 19–21.
14. *Дубинин В. С.* Сопоставление систем централизованного и децентрализованного энергоснабжения в современных условиях России. Часть 1 // Промышленная энергетика. 2005. № 9. С. 7–12.
15. *Дубинин В. С.* Сопоставление систем централизованного и децентрализованного энергоснабжения в современных условиях России. Часть 2 // Промышленная энергетика. 2005. № 10. С. 8–15.
16. *Дубинин В. С.* Сопоставление систем централизованного и децентрализованного энергоснабжения в современных условиях России. Часть 3 // Промышленная энергетика. 2005. № 11. С. 11–16.
17. *Володин А. И.* Локомотивные двигатели внутреннего сгорания. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1990. — 256 с.
18. *Гартманн О. Г.* Пар высокого давления: пер. с нем. Б. А. Люблинского; ред. Н. А. Доллежал. — М.: Гостехиздат, 1927. — 76 с.
19. *Шебалин Ю. А., Шлыков Ю. П.* О паровых электростанциях малой мощности // Лесная промышленность. 1955. № 8. С. 21–24.
20. *Зайцев В. И.* Современные типы судовых паровых машин. — Л.: Морской транспорт, 1963. — 90 с.
21. *Петров Я. П.* Из опыта создания паросиловых установок на повышенные параметры пара // Сб. науч. тр. по лесосплаву № 2. — М.: Гослесбумиздат, 1957. С. 111–137.
22. НÜТТЕ. Справочная книга для инженеров, архитекторов, механиков и студентов: пер. с нем. [Р.С.Ф.С.Р. Науч.-техн. отдел В.С.Н.Х. Бюро иностр. науки и техники]. Ч. 2. — 10-е изд. — Берлин: Тип. Шпамера в Лейпциге, 1921. — 1298 с.
23. *Степанова Т. А., Дубинин В. С., Трохин И. С., Шкарупа С. О., Ростова Д. М.*: под ред. Трохина И. С. Высокотемпературная паропоршневая энергетика: монография. — М.: Изд-во МЭИ, 2018. — 104 с.
24. *Гашо Е. Г., Гужов С. В., Кролин А. А.* Оценка последствий изменения климата на безопасность и надежность функционирования электро-энергетического комплекса г. Москвы // Надежность и безопасность энергетики. 2018. № 3. С. 208–216.
25. *Семенов В. Г.* Холод и энергетические аварии // Новости теплоснабжения. 2017. № 1. С. 12–19.
26. *Añel J. A., Fernández-González M., Labandeira X., López-Otero X., de la Torre L.* Impact of cold waves and heat waves on the energy production sector // Atmosphere. 2017. Vol. 8. P. 209–221.
27. *Santágotaa D. M., Castesana P., Rösslera C. E., Gómez D. R.* Extreme temperature events affecting the electricity distribution system of the metropolitan area of Buenos Aires (1971–2013) // Energy Policy. 2017. Vol. 106. P. 404–414.
28. *Hanski J., Rosqvist T., Crawford-Brown D.* Assessing climate change adaptation strategies — the case of drought and heat wave in the French nuclear sector // Regional Environmental. Change. 2018. Vol. 18. № 6. P. 1801–1813.

29. Alipour P., Mukherjee S., Nateghi R. Assessing climate sensitivity of peak electricity load for resilient power systems planning and operation: A study applied to the Texas region // *Energy*. 2019. Vol. 185. P. 1143–1153.
30. Дубинин В. С. Обеспечение независимости электро- и теплоснабжения России от электрических сетей на базе поршневых технологий : монография. — М. : Изд-во Московского ин-та энергобезопасности и энергосбережения, 2009. — 164 с.
31. Шкарупа С. О. Использование точечного преобразования для аналитического описания процесса в тепловом двигателе дискретного действия // *Динамика сложных систем*. 2010. № 2. С. 39–42.
32. Шкарупа С. О. Аракелян Э. К. Экспериментальное исследование самостабилизации частоты вращения одноцилиндрового пневматического поршневого двигателя // *Вестник Московского энергетического института*, 2017. № 1. С. 84–91.
33. Куперман Л. И., Романовский С. А., Сидельковский Л. Н. Вторичные энергоресурсы и энерготехнологическое комбинирование в промышленности. — Киев : Вища школа Головное изд-во, 1986. — 303 с.
34. Радин В. И., Лондин Й., Розенкноп В. Д. и др. Унифицированная серия асинхронных двигателей : каталог «Интерэлектро». — М. : Энергоатомиздат, 1990. — 416 с.

"Chernye metally", 2021, No. 11, pp. 68–73

DOI: 10.17580/chm.2021.11.12

New methods of electricity generation using steam from waste heat boilers fired by waste gases from high-temperature plants in ferrous metallurgy

Information about authors

V. S. Dubinin, Cand. Eng., Associate Prof.¹, e-mail: promteploenergetika@rambler.ru;

T. A. Stepanova, Cand. Eng., Associate Prof., Head of the Dept. of Power Engineering of High-Temperature Technology¹;

S. O. Shkarupa, Head of Laboratory²;

V. P. Krupskiy, Chief Designer³

¹ National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (Moscow, Russia)

² Leonov Moscow Region University of Technology (Korolev, Russia)

³ Ekokuber Ltd. (Leskovka, Minsk region, Belarus)

Abstract: Currently, the thermal energy of the steam generated by the heat recovery steam generator (HRSG) of high-temperature ferrous metallurgy units is used practically only for space heating and hot water supply. In this regard, the consumption of heat energy is unstable during the day and over the seasons and, as a rule, much less steam is consumed than is generated. This is because HRSGs are an integral part of high-temperature installations. They provide primary dedusting and pre-cooling of waste gases, which is necessary for the operation of filters. Then these combustible gases are used as energy carriers and are sent to gas pipeline networks. As a result, steam is generally not used efficiently. The steam generated by most HRSGs is not superheated and has a high moisture content, which makes it difficult to use this steam in steam turbines. However, even in the case of superheated steam, its low volumetric flow rate makes the use of steam turbines impractical due to the low efficiency of low-power turbines. This article will discuss the possibility of using a steam-piston engine to generate electricity from steam generated by the HRSG and evaporative cooling systems. In contrast to the classic reciprocating steam engines, the steam-piston engines have a relatively high rotational speed. As a result, they are smaller and can be connected directly to modern power generators with a 1500 rpm speed. Such engines can be manufactured by converting serial internal combustion engines, which significantly reduces their cost and provides a short payback period for such equipment.

Key words: secondary energy, high-temperature plants, ferrous metallurgy, reciprocating steam engine, steam-piston engine.

References

- Strogonov K., Tolkanov S., Korkots K., Fedyukhin A. Thermostatic cover for improving energy and technological efficiency of steel mills. *E3S Web of Conferences Spb WOSCE-2018*. 2019. 110, 01003.
- Zaychenko V. M., Chernyavskiy A. A. Comparison of characteristics of distributed and centralized power supply schemes. *Promyshlennaya energetika*. 2016. No. 1. pp. 2–8.
- Lifar V. V., Kudrin B. I. Industry seminar-meeting of heads and specialists of energy services of enterprises of the metallurgical industry. *Promyshlennaya energetika*. 2017. No. 3. pp. 56–59.
- Kosharnaya Yu. V. Improvement of energy efficiency and ensurance of environmental safety are the main activities of energy services of metallurgical enterprises. *Promyshlennaya energetika*. 2018. No. 6. pp. 2–5.
- Belyaev A. M., Rubtsov V. G., Samoylov O. A. et. al. Application of an integrated approach for combating wet steam erosion in new steam turbines of JSC UTZ. *Elektricheskie stantsii*. 2019. No. 4. pp. 21–26.
- Dubinin V. S., Stepanova T. A., Shkarupa S. O., Alekseevich M. Y. Prospects for use of steam-piston engines to increase the economic attractiveness of environmentally friendly processes for the processing of copper-molybdenum concentrates of promising deposits in Kazakhstan. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Ser. 1749 012030. pp. 1–6.
- Ukhlin A. A., Stepanov M. O., Shibaev T. L. Unique projects of steam turbines of JSC Ural Turbine Works for industrial generation. *Teploenergetika*. 2020. No. 12. pp. 58–65.
- Voinov A. P., Zaytsev V. A., Kuperman L. I. et. al. Waste heat boilers and power technology units. Moscow: Energoatomizdat, 1989. 272 p.
- Roddatis K. F., Poltaretskiy A. N. Small boiler plants handbook. Moscow: Energoatomizdat, 1989. 488 p.
- Power equipment for thermal power plants and industrial power engineering: catalog. Part 1. Moscow: TsNIITeltyazhmash, 1995. 128 p.
- Inozemtsev N. V. Heat engines: textbook for students of technical colleges. Moscow: Oborongiz, 1945. 392 p.
- Kiranov I. N. Modernization and reconstruction of piston steam engines: Dissertation ... of Candidate of Engineering Sciences. Moscow Power Engineering Institute (MEI). Moscow, 1953. 164 p.
- Dubinin V. S., Lavrukhin K. M., Titov D. P. Comparison of centralized and decentralized energy supply systems in connection with the expected situation in the energy sector in Russia. *Abstracts of the International scientific-practical conference "Small Energy 2004" October 11-14, 2004 (Moscow)*. Moscow: Malaya energetika, 2004. pp. 19–21.
- Dubinin V. S. Comparison of centralized and decentralized energy supply systems in modern conditions in Russia. Part 1. *Promyshlennaya energetika*. 2005. No. 9. pp. 7–12.
- Dubinin V. S. Comparison of centralized and decentralized energy supply systems in modern conditions in Russia. Part 2. *Promyshlennaya energetika*. 2005. No. 10. pp. 8–15.
- Dubinin V. S. Comparison of centralized and decentralized energy supply systems in modern conditions in Russia. Part 3. *Promyshlennaya energetika*. 2005. No. 11. pp. 11–16.
- Volodin A. I. Locomotive internal combustion engines. 2nd edition, revised and enlarged. Moscow: Transport, 1990. 256 p.
- Hartmann O. H. Hochdruckdampf. Translated from German by Lyublinskiy B. A. Edited by Dollezhall N. A. Moscow: Gostekhizdat, 1927. 76 p.
- Shebalin Yu. A., Shlykov Yu. P. About small steam power plants. *Lesnaya promyshlennost*. 1955. No. 8. pp. 21–24.
- Zaytsev V. I. Modern types of ship steam engines. Leningrad: Morskoy transport, 1963. 90 p.
- Petrov Ya. P. From the experience of creating steam power plants for increased steam parameters. Collection of scientific works on timber rafting No. 2. Moscow: Goslesbumizdat, 1957. pp. 111–137.
- HbTTE. Des Ingenieurs Taschenbuch. Translated from German. Part. 2. 10th edition. Berlin: Tipografiya Shpamera v Leypzige, 1921. 1298 p.
- Stepanova T. A., Dubinin V. S., Trokhin I. S., Shkarupa S. O., Rostova D. M. High-temperature steam-piston power engineering: monograph. Moscow: Izdatelstvo MEI, 2018. 104 p.
- Gasho E. G., Guzhov S. V., Krolin A. A. Assessment of the consequences of climate change on the safety and reliability of the electric power complex in Moscow. *Nadezhnost i bezopasnost energetiki*. 2018. No. 3. pp. 208–216.
- Semenov V. G. Cold and energy accidents. *Novosti teplosnabzheniya*. 2017. No. 1. pp. 12–19.
- Acel J.A., Fernández-González M., Labandeira X., Lpez-Otero X., de la Torre L. Impact of cold waves and heat waves on the energy production sector. *Atmosphere*. 2017. Vol. 8. pp. 209–221.
- Santógataa D. M., Castesanac P., Ruslsera C. E., Gymeza D. R. Extreme temperature events affecting the electricity distribution system of the metropolitan area of Buenos Aires (1971–2013). *Energy Policy*. 2017. Vol. 106. pp. 404–414.
- Hanski J., Rosqvist T., Crawford-Brown D. Assessing climate change adaptation strategies — the case of drought and heat wave in the French nuclear sector. *Regional Environ. Change*. 2018. Vol. 18. No. 6. pp. 1801–1813.
- Alipour P., Mukherjee S., Nateghi R. Assessing climate sensitivity of peak electricity load for resilient power systems planning and operation: A study applied to the Texas region. *Energy*. 2019. Vol. 185. pp. 1143–1153.
- Dubinin V. S. Ensuring the independence of electricity and heat supply of Russia from electrical networks based on piston technologies: monograph. Moscow: Izdatelstvo Moskovskogo instituta energobezopasnosti i energosberezheniya, 2009. 164 p.
- Shkarupa S. O. The use of point transformation for the analytical description of the process in a heat engine of discrete action. *Dinamika slozhnykh sistem*. 2010. No. 2. pp. 39–42.
- Shkarupa S. O., Arakelyan E. K. Experimental study of self-stabilization of the rotational speed of a single-cylinder pneumatic piston engine. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta*, 2017. No. 1. pp. 84–91.
- Kuperman L. I., Romanovskiy S. A., Sidelkovskiy L. N. Secondary energy resources and energy-technological combination in industry. Kiev: Vishcha shkola, 1986. 303 p.
- Radin V. I., Londin J., Rozenkноп V. D. et. al. Unified series of asynchronous motors: Interelektro catalog. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 416 p.