

ISSN 0132-0890
www.rudmet.ru

Черные металлы

Издается с 1961 года
(№ 1084)

4.2022

С Днем космонавтики!



ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Издательский дом
«Руда и Металлы»

№ 4 (1084), апрель 2022 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

Официальный информационный орган
Федерального УМО
«Технологии материалов»

Редакционный совет:

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),
Д. Г. Еланский, Н. А. Зюбан, И. Е. Илларионов, Л. М. Капуткина, А. А. Казаков, А. П. Коликов,
А. Г. Корчунов, А. В. Кушнарев, И. О. Леушин, 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

Ответственный секретарь: Е. Ю. Рахманова

Редактор: Э. Э. Бабали

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: chernet@rudmet.ru, tsirulnikov@rudmet.ru

www.rudmet.ru

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал
по актуальным проблемам металлургии и машиностроения
«Черные металлы» № 4 (1084), апрель 2022 г.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере
связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
(Свидетельство ПИ № ФЧ77-48681 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: 06.05.2022. Формат 60x90/8.

Печ. л. 9,5. Офсетная печать. Бумага офсетная.

Тираж 800 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»)

© Оформление. АО «Издательский дом «Руда и Металлы», «Черные металлы», 2022

© Фото для обложки предоставлено пресс-службой РКК «Энергия» им. С. П. Королева

На фото: Ракета с кораблем-модулем «Прогресс М-УМ» с узловым модулем «Причал» перед стартом на космодроме Байконур, ноябрь 2021 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Производство чугуна

- К. В. Голощапов, О. А. Кобелев, А. Е. Титлянов, Р. Ю. Казбеков.* Разработка теплоизолирующей вставки в дутьевой канал воздушной фурмы доменной печи с применением математического моделирования 4

Производство стали

- Р. А. Гизатулин, А. И. Мусатова, Н. В. Мартюшев, Д. В. Валуев, А. И. Карлина.* Разработка и применение нормативных тактовых моделей для модернизации электросталеплавильного цеха. . . 10

Литейное производство

- И. О. Леушин, А. Н. Грачев, Л. И. Леушина, П. М. Явтушенко.* Жидкоподвижная самотвердеющая смесь улучшенной технологичности для изготовления форм и стержней стального литья. 17
- Т. Р. Гильманшина, А. А. Ковалева, С. А. Худоногов, Д. Ю. Крицкий.* Использование графисодержащего шлама в составе противопригарных покрытий 23

Прокатка и термообработка

- Д. Л. Шварц, А. М. Михайленко, Е. И. Салихянова.* Оптимизация калибровок валков для прокатки швеллеров. Сообщение 2. Пространство швеллерных калибров 27
- О. Б. Крючков, А. В. Крохалев, П. И. Маленко, Э. В. Седов.* Экспериментально-расчетное исследование эквивалентного коэффициента теплопроводности при нагреве рулона ленты. 34

Химические технологии

- И. В. Скворцова, Е. А. Елисеева, С. Л. Березина, В. С. Болдырев.* Особенности анодного поведения хрома в кислотном электролите 41

Нанесение покрытий и обработка поверхности

- Ю. Н. Гойхенберг, Д. С. Полухин.* Структура, свойства и качество композитного никель-фосфорного покрытия, наносимого на стальные подложки различного состава 46

Энергетика и экология

- И. А. Султангузин, П. А. Шомов, А. В. Егоров, И. В. Евсеенко, Ю. В. Яворовский.* Топливо-энергетический баланс электрометаллургического мини-комплекса 50
- В. С. Дубинин, Т. А. Степанова, С. О. Шкарупа, В. П. Крупский.* Новые способы производства электроэнергии с использованием пара систем испарительного охлаждения высокотемпературных установок черной металлургии 57

Машиностроительные технологии

- В. Д. Кухарь, В. А. Коротков, С. С. Яковлев, А. А. Шишкина.* Анализ напряженно-деформированного состояния при получении рифлей в стальной цилиндрической заготовке 62
- Е. А. Даниленко, А. С. Ямников, А. А. Маликов.* Влияние упругих деформаций нежесткой коробчатой заготовки, лимитированных конструкцией приспособления, на точность обработанных поверхностей. 66
- В. В. Истоцкий.* Конструктивные особенности концевых фрез с комбинацией режущих и деформирующих зубьев для обработки вязко-пластичных сплавов 71

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 систем испарительного охлаждения высокотемпературных установок черной металлургии

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

Т. А. Степанова, заведующая кафедрой¹, канд. техн. наук

С. О. Шкарупа, заведующий лабораторией²

В. П. Крупский, главный конструктор³, эл. почта: krupski@ecocube.by

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

²Московский государственный областной технологический университет, Королёв, Россия.

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

Рассмотрено применение двух вариантов паропоршневых двигателей для производства электроэнергии из пара, вырабатываемого системами испарительного охлаждения. Паропоршневые двигатели, в отличие от классических поршневых паровых машин, имеют достаточно высокую частоту вращения, что обеспечивает их приемлемые габариты и возможности прямого соединения с современными электрогенераторами частотой вращения 1500 об/мин без мультипликатора. Такие двигатели создают путем конвертации серийных двигателей внутреннего сгорания устаревших марок, благодаря чему они имеют низкую стоимость и короткие сроки окупаемости. Первый вариант — это паропоршневые двигатели, работающие на паре с паросодержанием 0,9; они обладают достаточно высоким КПД для тех низких параметров пара, которые вырабатываются испарительными системами охлаждения. Этот вариант требует применения сепаратора пара. Второй вариант — это паропоршневые двигатели, способные работать на пароводяной смеси и перегретой воде. Они могут использовать пароводяную смесь, непосредственно выходящую из системы испарительного охлаждения без сепарации, но обладают в разы более низким КПД.

Ключевые слова: испарительные системы охлаждения, высокотемпературные установки, черная металлургия, паровая поршневая машина, паропоршневые двигатели, пароводяная смесь.

DOI: 10.17580/chm.2022.04.10

Введение

Системы испарительного охлаждения обладают рядом преимуществ перед другими известными способами охлаждения. К их основным достоинствам относят: многократное (в 50–100 раз) сокращение расхода технологической воды по сравнению с водяным охлаждением; повышение стойкости ограждающих конструкций (срок службы охлаждаемых элементов увеличивается до 4–6 лет), а следовательно, увеличение рабочих кампаний металлургических агрегатов в целом; эффективную утилизацию вторичного тепла и, как следствие, экономию топлива и электроэнергии; снижение капитальных и эксплуатационных затрат по сравнению с оборотным циклом водоохлаждения [1].

В настоящее время, по данным World Steel Association, в мире продолжается тенденция по увеличению производства стали: в 1970 г. произведено 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 [2]. Одним из способов решения данной задачи является выработка электроэнергии из пара испарительных систем охлаждения в черной металлургии. Однако из-за своих параметров такой пар непригоден для работы не только паровых турбин, но и классических паровых машин и обычных

паропоршневых двигателей (ППД). Актуальность использования пара испарительных систем охлаждения определяется значительным ростом стоимости электроэнергии, получаемой от централизованных источников. 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, доходящим до 7–8 тыс. руб/(МВт·ч). Кроме того, высока стоимость выполнения технических условий энергосистемы [3]. Также во многих регионах России имеются инфраструктурные ограничения для подключения новых потребителей к национальной электроэнергетической сети. По данным Росстата, в 2017 г. было подано заявок на присоединение к сети в объеме 39 ГВт, заключено договоров на подключение 24 ГВт (на сумму 72 млрд руб.), фактически присоединено 23 ГВт [4]. Однако еще более актуальным применением ППД является прямой привод питательного насоса системы испарительного охлаждения. Это обеспечивает безаварийную работу высокотемпературной установки, где применено испарительное охлаждение при перерывах в электроснабжении, которые возникают все чаще из-за нарастания опасных

погодных явлений (гололедные явления, ураганы и др.) в связи с глобальным изменением климата.

Целью данной работы является рассмотрение новых возможностей получения электроэнергии из пара большинства систем испарительного охлаждения при помощи двух типов ППД.

Теория вопроса

Пар систем испарительного охлаждения для выработки электроэнергии не используют из-за значения паросодержания менее 0,9–0,85 [1], так как эта пароводяная смесь способствует эрозии лопаток паровых турбин [5, 6]. От такого источника тепловой энергии может работать паровая турбина, если применить органическое рабочее тело в бинарном цикле, что используют при работе геотермальной электростанции, где значение мощности составляет от нескольких единиц до десятка МВт [7]. Расходы пароводяной смеси систем испарительного охлаждения, которые на порядок меньше расходов пароводяной смеси в геотермальных установках, не позволяют создать турбины малой мощности для работы на органическом рабочем теле. Причины те же, что при создании паровых турбин малой мощности, они и изложены в работе [8]. В этой ситуации компания DeVeTec создала линейку поршневых двигателей мощностью от 130 до 200 кВт для расширения пара этилового спирта. Это рабочее тело получает относительно низкопотенциальную тепловую энергию (270 °С) от различных установок черной металлургии. Данный двигатель представляет собой модифицированный двигатель грузового автомобиля [9–11]. Применение рабочего тела с температурой кипения меньше воды позволяет иметь перегретый пар при относительно невысокой температуре. Идея использования двигателя внутреннего сгорания как базы для создания двигателя расширителя пара «паропоршневой двигатель» [12], была высказана одним из авторов еще в 2004 г., за рубежом она уже реализована.

Паропоршневыми двигателями называют 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 ППД было введено в 2004–2005 гг. [12–15], а в настоящее время уже широко применяется исследователями [16–18]. Авторы разрабатывают ППД, работающие на насыщенном водяном паре и пароводяной смеси. Такой подход значительно упрощает и удешевляет установку для производства электроэнергии из низкопотенциального теплоносителя, но требует инновационного подхода, например для решения проблем воды в картерном смазочном масле. Один из вариантов решения данной проблемы авторами реализован.

Следует отметить, что еще в 1945 г. академик Н. В. Иноземцев, один из основателей советской школы двигателестроения, писал, что при мощности ниже 5000 л.с. (3676 кВт) надо применять поршневую паровую машину [19], а основатель советской школы паротурбостроения А. В. Щегляев в 1953 г. руководил кандидатской диссертацией по поршневой паровой машине мощностью около 1000 кВт [20]. В современных публикациях показаны преимущества поршневых паровых машин перед паровыми турбинами и винтовыми паровыми двигателями [21–23].

Для выработки электроэнергии из пара систем испарительного охлаждения авторы не рассматривают классические поршневые паровые машины из-за их недостатков: низкой частоты вращения, которая приводит к большим габаритам и металлоемкости, а также невозможности использования прямого привода современных относительно высокооборотных электрогенераторов без мультипликатора. У таких установок большое содержание смазочного масла в выхлопном паре, что не позволяет использовать его конденсат для питания испарительной системы охлаждения без сложной системы его 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 машины практически не зависит от мощности, поэтому они могут эффективно работать при относительно малых расходах пара, характерных для систем испарительного охлаждения в черной металлургии. Используя принципы работы классической поршневой паровой машины, впервые были предложены ППД, которые сохраняют преимущества паровых машин и не имеют указанных ранее их недостатков. Для использования пароводяной смеси из систем испарительного охлаждения в классических паровых машинах и обычных ППД ее надо сепарировать для получения насыщенного пара, что требует дополнительного дорогостоящего оборудования. С другой стороны, под научным руководством авторов создан одноцилиндровый отсек ППД, способный работать на пароводяной смеси. Он предназначен для проведения исследований ППД, работающего на пароводяной смеси, который планируют использовать в паровых котельных в России, у которых нет пара, а есть пароводяная смесь. Удельный расход насыщенного пара, определенный по расходу тепловой энергии, был достаточно высоким (около 100 кг/(кВт·ч)), что для котельных не имело значения, так как вся пароводяная смесь использовалась для приготовления горячей воды в системе горячего водоснабжения. В результате испытаний такого одноцилиндрового отсека на пароводяной смеси давлением 0,8 МПа получена мощность около 3 кВт при 1200 об/мин. Данный отсек создан путем конвертации в ППД одноцилиндрового четырехтактного бензинового двигателя УД1 мощностью 2 кВт при 3000 об/мин. Полученные результаты будут использованы при создании четырехцилиндрового ППД мощностью 12 кВт путем конвертации двухдвухцилиндровых двигателей УД2 в ППД.

Научная новизна данной работы заключается в использовании пароводяной смеси, вырабатываемой системами испарительного охлаждения установок черной металлургии, для генерации электроэнергии, что можно сделать только при помощи ППД, в том числе при их работе сразу на пароводяной смеси без сепарации. На пароводяной смеси ни один из ранее известных паровых двигателей работать не сможет. Таким образом, впервые создан паровой двигатель, способный работать на такой смеси.

Недостатком ППД является более низкий механический КПД, чем у классических поршневых паровых машин. Это обусловлено их более высокой частотой вращения. Механический КПД классических поршневых паровых машин составляет 0,9–0,92 [19]. Механический КПД ППД будет на уровне поршневых двигателей внутреннего сгорания, которые конвертируются в ППД, т. е. 0,75–0,92 [24].

Для оценки удельного расхода пара ППД, работающего на насыщенном паре, можно использовать данные классических поршневых паровых машин, приняв, что механический КПД ППД равен 0,835, и он в $0,91/0,835 = 1,09$ раз меньше, чем у классических поршневых классических машин. Данные классических поршневых паровых машин, заимствованные из справочника [25]; предполагаемые данные обычных ППД, работающих на насыщенном паре по удельному эффективному расходу пара при тех же параметрах пара, приведены в **таблице**.

В таблице приведены данные ППД, работающих по конденсационному циклу, так как он обеспечивает максимальную выработку электроэнергии из пара. Показаны данные для давления 0,8 МПа и ниже, так как в системах испарительного охлаждения максимально возможное давление для таких систем применительно к доменным печам составляет 0,8 МПа [1]. Возможна работа ППД в режиме когенерации, когда давление на выхлопе превышает атмосферное и выхлопной пар используется для производства тепловой энергии. В настоящее время такие поршневые паровые машины выпускают [26, 27].

Предполагаемые ППД могут иметь практически любую мощность, при этом удельный эффективный расход пара от нее не зависит. Это означает возможность привода системой ППД различного оборудования металлургического предприятия вместо электропривода (насосы, дымососы, воздуходувки, 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 1. Кроме того, при применении ППД 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 [28]. Различные экстремальные проявления погодно-климатических процессов (повышенные и пониженные температуры, 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 [29–33].

Самостоятельная генерация электроэнергии без подключения 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

Данные классических поршневых паровых машин и предполагаемые данные по удельному эффективному расходу пара паропоршневых двигателей, работающих на насыщенном паре, при тех же параметрах свежего пара, давлении отработанного пара и кратности расширения

Давление свежего пара, МПа	Кратность расширения, ед.	Давление отработанного пара, Па	Удельный индикаторный расход пара поршневых паровых машин, кг/кВт·ч	Удельный эффективный расход пара ППД при его механическом КПД 0,835, кг/(кВт·ч)
0,8	2	Очень низкое	6,3	7,5
0,5		(отсечка 0,04–0,05)	7,3	8,7
0,3			8,7	10,4
0,8	1	Низкое (отсечка 0,05)	7,3	8,7
0,5			7,8	9,3
0,3			8,9	10,6
0,25			9,6	11,49

вращения, позволяющую иметь отклонения частоты тока на уровне центральных электросетей. Особенностью ППД является возможность при определенных условиях точного поддержания частоты в результате явления самостабилизации [34–38]. Таким образом, применение ППД в черной металлургии может обеспечить не только экономию энергоресурсов, но и снижение аварийных случаев, связанных с нарушением электроснабжения оборудования.

Для оценки экономического эффекта от использования ППД в качестве примера рассмотрено их применение непосредственно с использованием пароводяной смеси, вырабатываемой системами испарительного охлаждения без сепарации применительно к доменной печи полезным объемом 2000 м³. Согласно работе [1, табл. 42], паропроизводительность установки испарительного охлаждения и клапанов воздухонагревателей составляет 19 т/ч. Верхний предел давления в рассматриваемой системе испарительного охлаждения, обусловленный термостойкостью применяемых материалов, 0,8 МПа избыточных [1]. Примем, что величина абсолютного давления в барабане-сепараторе составляет 0,5 МПа. Согласно таблице, удельный расход самого простого и неэкономичного ППД однократного расширения при таком давлении составляет 8,7 кг/(кВт·ч). Таким образом, при этом расходе пара можно получить механическую мощность $19000/8,7 = 2184$ кВт. Но это при сепарации пароводяной смеси. Если сепарацию не использовать, то удельный расход при избыточном давлении 0,8 МПа, согласно исследованиям авторов статьи на моделирующем ППД, упомянутыми выше, составил 100 кг/(кВт·ч), а механическая мощность в этом случае составит $19000/100 = 190$ кВт. По оценкам авторов, больше половины такой мощности будет при избыточном давлении 0,5 МПа. При прямом приводе металлургического оборудования это вытеснит примерно более 100 кВт электрической мощности, так как исключаются КПД электрогенератора и электродвигателей. Величина заменяемой

электроэнергии при работе 8000 ч/год составит за год минимум $100 \cdot 8000 = 800000$ кВт·ч = 800 МВт·ч. При цене 7000 руб./ МВт·ч [3] годовая экономия составит $800 \cdot 7000 = 5,6$ млн руб.

Моделирующий паропоршневой двигатель, являющийся дальнейшим развитием газодинамической поршневой машины [39], имеет рабочий объем 0,3 л. Мощность двигателя примерно пропорциональна его рабочему объему, т. е. нужен рабочий объем исходного двигателя внутреннего сгорания, подвергаемого конвертации в ППД, $0,3 \cdot 190/3 = 19$ л. Это близко к рабочему объему дизеля Дб (19,1 л [40]), стоимость которого не превышает 1 млн руб. Себестоимость конвертации этого дизеля в ППД в серийном производстве не превысит 0,5 млн руб. Таким образом, суммарные затраты на ППД не превысят 1,5 млн руб. С учетом стоимости вытесненной электроэнергии 5,6 млн. руб., определенной выше, срок окупаемости составит $1,5/5,6 = 0,27$ года = 3,2 мес.

Объем научно-исследовательской работы (НИР) по созданию такого ППД, работающего на пароводяной смеси, непосредственно вырабатываемой системой испарительного охлаждения без сепарации, может составлять несколько миллионов рублей в зависимости от технического задания. Если предположить, что стоимость данной НИР 6 млн руб., включая поставку указанного паропоршневого двигателя, то срок окупаемости, включая затраты на НИР, составит $6/5,6 = 1,07$ года.

Заключение

Системы испарительного охлаждения вырабатывают пар с параметрами, под которые можно создать ППД. Привод электрогенератора от такого двигателя обеспечит выработку собственной электроэнергии и экономию энергоресурсов. Возможна автономная работа от центральных электросетей такого электрогенератора с получением качественной электроэнергии по частоте, что позволяет уменьшить аварийность оборудования при неизбежных перерывах электроснабжения. ■

Библиографический список

1. Андроньев С. М. Испарительное охлаждение металлургических печей. — М.: Металлургия, 1970. — 424 с.
2. Stroganov K., Tolkanov S., Korkots K., Fedukhin A. Thermostatic cover for improving energy and technological efficiency of steel mills // E3S Web of Conferences 110, 01003. 2019. SPbWOSCE-2018. — URL: (дата обращения: 24.05.2021).
3. Зайченко В. М., Чернявский А. А. Сравнение характеристик распределенных и централизованных схем энергоснабжения // Промышленная энергетика. 2016. № 1. С. 2–8.
4. Филиппов С. П., Дильман М. Д., Илюшин П. В. Распределенная генерация и устойчивое развитие регионов // Теплоэнергетика. 2019. № 12. С. 4–17.
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. Филиппов Г. А., Поваров О. А., Прякин В. В. Исследования и расчеты турбин влажного пара. — М.: Энергия, 1973. — 232 с.
7. Томаров Г. В., Шипков А. А. Геотермальная комбинированная бинарная электростанция с системой перегрева пара вторичного вскипания: выбор оптимальных рабочих тел // Теплоэнергетика. 2019. № 1. С. 63–71.
8. 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. P. 1–6.

9. Высокоэффективное производство электроэнергии из отходящего тепла // Черные металлы. 2015. № 12. С. 7, 8.
10. Вендт П., Цвикель Г., Витке Х. Оптимальное энергопотребление за счет инновационного использования вторичных тепловых ресурсов // Черные металлы. 2016. № 8. С. 54–58.
11. Шмидт М. Высокоэффективное использование отходящего тепла в металлургической промышленности // Черные металлы. 2017. № 7. С. 50–52.
12. 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.
13. Дубинин В. С. Сопоставление систем централизованного и децентрализованного энергоснабжения в современных условиях России. Часть 1 // Промышленная энергетика. 2005. № 9. С. 7–12.
14. Дубинин В. С. Сопоставление систем централизованного и децентрализованного энергоснабжения в современных условиях России. Часть 2 // Промышленная энергетика. 2005. № 10. С. 8–15.
15. Дубинин В. С. Сопоставление систем централизованного и децентрализованного энергоснабжения в современных условиях России. Часть 3 // Промышленная энергетика. 2005. № 11. С. 11–16.
16. Трохин И. С. Особенности конструкций паровых поршневых моторов для малых и средних теплоэлектроцентралей // Промышленная энергетика. 2013. № 2. С. 45–47.
17. Трохин И. С. Паропоршневые мини-ТЭЦ на биотопливе — эффективное решение для «зеленых» зданий // Зеленые здания. 2013. № 4. С. 110–113.
18. Передерий С. Паровые установки для выработки электро- и тепловой энергии // Леспроектинформ. 2017. № 6. С. 126–128.
19. Иноземцев Н. В. Тепловые двигатели: учебник для студ. вузов. — М.: Оборонгиз, 1945. — 392 с.
20. Кирсанов И. Н. Модернизация и реконструкция поршневых паровых машин: дис. ... канд. техн. наук / Моск. энергетич. ин-т (МЭИ). — М., 1953. — 164 с.
21. Трохин И. С. Мини-ТЭЦ с паровыми моторами для бесперебойного энергоснабжения ответственных потребителей // Промышленная энергетика. 2012. № 9. С. 15–20.
22. Трохин И. С. Паровые моторы для газотурбинных и паросиловых мини-ТЭС // Промышленные и отопительные котельные и мини-ТЭЦ. 2012. № 5. С. 30–33.
23. Передерий С. Малые тепловые электростанции // Леспроектинформ. 2020. № 6. С. 104–107.
24. Володин А. И. Локомотивные двигатели внутреннего сгорания. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Транспорт, 1990. — 256 с.
25. 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.
26. Трохин И. С. О применении поршневых паровых машин на мини-ТЭЦ в зарубежной биоэнергетике // Промышленная энергетика. 2014. № 10. С. 43, 44.
27. Степанова Т. А., Дубинин В. С., Трохин И. С., Шкарупа С. О., Ростова Д. М. Высокотемпературная паропоршневая энергетика: монография / под ред. И. С. Трохина. — М.: Изд-во МЭИ, 2018. — 104 с.
28. Гашо Е. Г., Гужов С. В., Кролин А. А. Оценка последствий изменения климата на безопасность и надежность функционирования электроэнергетического комплекса г. Москвы // Надежность и безопасность энергетики. 2018. № 3. С. 208–216.
29. Семенов В. Г. Холод и энергетические аварии // Новости теплоснабжения. 2017. № 1. С. 12–19.
30. 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.
31. Santágata D. M., Castesanan P., Rösslera C. E., Gómeza 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.
32. 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, Iss. 6. P. 1801–1813.
33. 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.

34. Дубинин В. С. Обеспечение независимости электро- и теплоснабжения России от электрических сетей на базе поршневых технологий: монография. — М.: Изд-во Моск. ин-та энергобезопасности и энергосбережения, 2009. — 164 с.
35. Шкарупа С. О. Использование точечного преобразования для аналитического описания процесса в тепловом двигателе дискретного действия // Динамика сложных систем. 2010. № 2. С. 39–42.
36. Шкарупа С. О., Аракелян Э. К. Экспериментальное исследование самостабилизации частоты вращения одноцилиндрового пневматического поршневого двигателя // Вестник Моск. энергетич. ин-та. 2017. № 1. С. 84–91.
37. Трохин И. Особенности тепловых двигателей дискретного действия для мини-ТЭЦ // Промышленные и отопительные котельные и мини-ТЭЦ. 2017. № 2. С. 40–43.
38. Трохин И. С. Самостабилизация частоты на поршневых мини-ТЭЦ — автоматизация XXI века // Автоматизация и IT в энергетике. 2018. № 11. С. 28–32.
39. Трохин И. Газодинамическая поршневая машина для паровых котельных-мини-ТЭЦ // Промышленные и отопительные котельные и мини-ТЭЦ. 2017. № 1. С. 8, 9.
40. Артемьев Е. И., Вегера Н. Л., Шумило И. А., Волков В. М. Дизель Д-6. — М.: Mashgiz, 1957. — 192 с.

"Chernye metally", 2022, No. 4, pp. 57–61
DOI: 10.17580/chm.2022.04.10

New ways to generate electricity using steam evaporative cooling systems for high-temperature iron and steel plants

Information about authors

V. S. Dubinin, Cand. Eng., Associate Professor¹, e-mail: promteploenergetika@rambler.ru

T. A. Stepanova, Cand. Eng., Head of the Dept.¹;

S. O. Shkarupa, Head of Laboratory²;

V. P. Krupsky, Chief Designer³, e-mail: krupski@ecocube.by

¹ National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Russia, Moscow.

² Moscow State Regional Technological University, Korolev, Russia.

³ Ekokuber Ltd., Minsk region, village Leskovka, Republic of Belarus.

Abstract: Currently, the thermal energy of steam generated by evaporative cooling systems of high-temperature ferrous metallurgy units is used practically only for space heating and hot water supply. This ineffective use occurs because evaporative cooling systems generate steam with a steam content of 0.9 at best and often just a steam-water mixture. As a result, it cannot be used for the operation of steam turbines, and in the case of a steam-water mixture, for the operation of classic steam engines and conventional steam-piston engines, which are high-speed single-expansion steam engines. This article will discuss the possibility of using a steam-piston engine to generate electricity from steam generated by 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. Furthermore, 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. The first option is to use steam-piston engines to operate on steam with a steam content of 0.9; in this operating mode, steam-piston engines have relatively high efficiency for steam parameters generated by evaporative cooling systems. However, this option requires the use of a steam separator. The second option involves using unique steam-piston engines that can operate on a steam-water mixture and even on overheated water. These engines can use a steam-water mixture directly from evaporative cooling systems without separation, but in this case, efficiency is considerably lower.

Keywords: evaporative cooling systems, ferrous metallurgy, high-temperature plants, ferrous metallurgy, reciprocating steam engine, steam-piston engine, steam-water mixture.

References

1. Andronov S. M. Evaporative cooling of metallurgical furnaces. Moscow: Metallurgiya, 1970. 424 p.
2. 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.
3. Zaychenko V. M., Chernyavskiy A. A. Comparison of characteristics of distributed and centralized power supply schemes. *Promyshlennaya energetika*. 2016. No. 1. pp. 2–8.
4. Filippov S. P., Dilman M. D., Ilyushin P. V. Distributed generation and sustainable development of regions. *Teplotenergetika*. 2019. No. 12. pp. 4–17.
5. Belyaev A. M., Rubtsov V. G., Samoylov O. A. et al. Application of an integrated approach to combat wet-steam erosion in JSC UTZ's new steam turbines. *Elektricheskie stantsii*. 2019. No. 4. pp. 21–26.
6. Filippov G. A., Povarov O. A., Pryakhin V. V. Research and calculations of wet steam turbines. Moscow: Energiya, 1973. 232 p.
7. Tomarov G. V., Shipkov A. A. Geothermal combined binary power plant with flash steam superheating system: selection of optimal working fluids. *Teplotenergetika*. 2019. No. 1. pp. 63–71.
8. 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.
9. Marion M., Baldermann M. Energy network in integrated mills — reasonable use of by-product gases in the energy network. *Chernye Metally*. 2015. No. 12. pp. 7, 8.
10. Wendt P., Zwickel G., Witke H. Optimal energy consumption owing to innovative usage of secondary heat resources. *Chernye Metally*. 2016. No. 8. pp. 54–58.
11. Shmidt M. High-efficient usage of waste heat in metallurgy. *Chernye Metally*. 2017. No. 7. pp. 50–52.
12. 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 Russian energy sector. *Abstracts of reports of the International scientific-practical conference "Small power industry 2004", October 11–14, 2004 (Moscow)*. Moscow: Malaya energetika, 2004. pp. 19–21.
13. Dubinin V. S. Comparison of systems of centralized and decentralized energy supply in modern conditions of Russia. Part 1. *Promyshlennaya energetika*. 2005. No. 9. pp. 7–12.
14. Dubinin V. S. Comparison of systems of centralized and decentralized energy supply in modern conditions of Russia. Part 2. *Promyshlennaya energetika*. 2005. No. 10. pp. 8–15.
15. Dubinin V. S. Comparison of systems of centralized and decentralized energy supply in modern conditions of Russia. Part 3. *Promyshlennaya energetika*. 2005. No. 11. pp. 11–16.
16. Trokhin I. S. Structural features of steam piston motors for small and medium combined heat and power plants. *Promyshlennaya energetika*. 2013. No. 2. pp. 45–47.
17. Trokhin I. S. Steam piston mini-CHPs on biofuel — an effective solution for "green" buildings. *Zelenye zdaniya*. 2013. No. 4. pp. 110–113.
18. Perederiy S. Steam plants for the generation of electricity and heat. *Lesprominform*. 2017. No. 6. pp. 126–128.
19. Inozemtsev N. V. Heat engines: textbook for students of technical universities. Moscow: Oborongiz, 1945. 392 p.
20. Kisanov I. N. Modernization and reconstruction of piston steam engines: Dissertation ... of Candidate of Engineering Sciences. Moscow Power Engineering Institute. Moscow, 1953. 164 p.
21. Trokhin I. S. Mini-CHP with steam engines for uninterrupted power supply to responsible consumers. *Promyshlennaya energetika*. 2012. No. 9. pp. 15–20.
22. Trokhin I. S. Steam engines for gas turbine and steam power mini-CHPs. *Promyshlennye i otopitelnye kotelnnye i mini-TETS*. 2012. No. 5. pp. 30–33.
23. Perederiy S. Small thermal power plants. *Lesprominform*. 2020. No. 6. pp. 104–107.
24. Volodin A. I. Locomotive internal combustion engines. 2nd edition revised and enlarged. Moscow: Transport, 1990. 256 p.
25. HÜTTE. Das Ingenieurs Taschenbuch. Translated from Germany. Part 2. 10th edition. Berlin: Tipografiya Shpamera v Leyptsige, 1921. 1298 p.
26. Trokhin I. S. On the use of piston steam engines at mini-CHPs in foreign bioenergy. *Promyshlennaya energetika*. 2014. No. 10. pp. 43, 44.
27. Stepanova T. A., Dubinin V. S., Trokhin I. S., Shkarupa S. O., Rostova D. M. High-temperature steam piston energy: monograph. Edited by I. S. Trokhin. Moscow: Izdatelstvo MEI, 2018. 104 p.
28. Gasho E. G., Guzhev S. V., Krolin A. A. Assessment of consequences of climate change on the safety and reliability of functioning of the electric power complex of Moscow. *Nadezhnost i bezopasnost energetiki*. 2018. No. 3. pp. 208–216.
29. Semenov V. G. Cold and energy crashes. *Novosti teplosnabzheniya*. 2017. No. 1. pp. 12–19.
30. 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. pp. 209–221.
31. Santagata D. M., Castesana P., Rössler 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. pp. 404–414.
32. 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, Iss. 6. pp. 1801–1813.
33. 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.
34. Dubinin V. S. Ensuring the independence of electricity and heat supply in Russia from electrical networks based on piston technologies: monograph. Moscow: Izdatelstvo Moskovskogo instituta energobezopasnosti i energosberezheniya. 2009. 164 p.
35. Shkarupa S. O. The use of point transformation for analytical description of the process in a heat engine of discrete action. *Dinamika slozhnykh sistem*. 2010. No. 2. pp. 39–42.
36. 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.
37. Trokhin I. S. Features of heat engines of discrete action for mini-CHP. *Promyshlennye i otopitelnye kotelnnye i mini-TETS*. 2017. No. 2. pp. 40–43.
38. Trokhin I. S. Frequency self-stabilization at piston mini-CHPs — automation of the 21st century. *Avtomatizatsiya i IT v energetike*. 2018. No. 11. pp. 28–32.
39. Trokhin I. S. Gas-dynamic piston machine for steam boilers-mini-CHP. *Promyshlennye i otopitelnye kotelnnye i mini-TETS*. 2017. No. 1. pp. 8, 9.
40. Artymyev E. I., Vegera N. L., Shumilo I. A., Volkov V. M. Diesel D-6. Moscow: Mashgiz, 1957. 192 p.