

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тверской государственный технический университет»  
(ТвГТУ)

**ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ  
В ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

*Сборник  
научно-практических трудов*

*Выпуск 11*

Тверь 2023

УДК 621.365:536.33(082)

ББК 34я73

Рецензенты: начальник службы энергетических режимов балансов филиала АО «СО ЕЭС» Тверского РДУ к. т. н. Чернышов Д.В.; зав. кафедрой прикладной физики ТвГТУ, д. т. н., профессор Болотов А.Н.

Энергоресурсосбережение в промышленности: сборник научно-практических трудов / под ред. А.Н. Макарова. Вып. 11. Тверь: Тверской государственный технический университет, 2023. 228 с.

Приведены результаты научно-исследовательских работ, выполненных преподавателями, аспирантами и магистрантами кафедры электроснабжения и электротехники ТвГТУ. Представленные статьи посвящены постановке и решению практических задач в области энергоресурсосбережения в электрометаллургических и электротехнических установках. Показано влияние университетов, фундаментальных законов физики, естествознания на развитие энергетической техники, экономию топливно-энергетических ресурсов. Приведены результаты расчета теплообмена в электродуговых сталеплавильных печах и рекомендации по энергоресурсосберегающим режимам их работы. Разработаны мероприятия по повышению КПД дуг электропечей, снижению удельного расхода электроэнергии в печах. Выполнен анализ использования возобновляемых источников энергии, «умных сетей» для электроснабжения жилых, офисных зданий и предприятий.

Предназначен для студентов направления «Электроэнергетика» и аспирантов направления «Электро- и теплоэнергетика». Может быть полезен персоналу металлургических, машиностроительных, энергетических компаний.

ISBN 978-5-7995-1305-4

© Тверской государственный  
технический университет, 2023

**ВВЕДЕНИЕ:  
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ  
ПО ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЮ  
НА КАФЕДРЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ  
ТВЕРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

*А.Н. Макаров*

© Макаров А.Н., 2023

*Аннотация.* Дано описание тематики научно-исследовательских работ, выполняемых на кафедре электроснабжения и электротехники (ЭСиЭ) ТвГТУ. Отмечено наиболее важное направление работы и основные научные достижения кафедры, по которым она занимает лидирующие позиции в мире, а именно разработка теории теплообмена излучением в электродуговых сталеплавильных и факельных нагревательных печах, топках паровых котлов электростанций, камерах сгорания газотурбинных установок. По результатам исследований научно-педагогический состав кафедры регулярно публикует статьи в журналах и изданиях, входящих в базу данных РИНЦ и в мировую базу Web of Science, Scopus, получает патенты на изобретения, выпускает монографии и учебные пособия, издает ежегодный сборник научно-практических трудов.

**Ключевые слова:** научное открытие, законы, учебник, энергоресурсосбережение, печи, топки, камеры сгорания.

Кафедра ЭСиЭ ТвГТУ является выпускающей по подготовке бакалавров и магистров по направлению «Электроэнергетика и электротехника». Ежегодный выпуск бакалавров по направлению «Электроэнергетика и электротехника» (ЭЛЭ) по дневной и заочной формам обучения составляет 85–95 человек, магистров по дневной форме обучения – 10–15 человек.

Заведующим кафедрой А.Н. Макаровым сделано научное открытие фундаментальных законов физики, законов теплового излучения газовых объемов [1, 2].

По данному научному направлению кафедра занимает лидирующие позиции в мире, выполняя расчеты теплообмена в электродуговых сталеплавильных, факельных нагревательных печах, топках паровых

котлов электростанций, камерах сгорания газотурбинных установок с целью выбора энергоресурсосберегающих режимов их работы [3, 4].

По данному научному направлению преподаватели кафедры в соавторстве с проф. А.Н. Макаровым ежегодно публикуют 4–5 статей в англоязычных журналах, входящих в Мировую базу Web of Science, Scopus, 4–5 статей в ведущих российских журналах, 25–30 статей в изданиях, входящих в РИНЦ, получают 2–3 патента РФ на изобретения, каждые два года выпускают монографию или учебное пособие, ежегодный сборник научных трудов кафедры «Энергоресурсосбережение в промышленности»

Учебник зав. кафедрой ЭСиЭ профессора А.Н. Макарова «Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках» [2], в котором изложено научное открытие автора и представлена разработанная им на основе этого открытия пионерская теория теплообмена в электродуговых сталеплавильных и факельных печах, топках, камерах сгорания, утвержден УМО по образованию в металлургии Министерства образования и науки Российской Федерации и используется для обучения студентов в металлургических и энергетических университетах и на металлургических и энергетических кафедрах, а также в металлургических и энергетических компаниях для расчета энергосберегающих режимов работы электродуговых сталеплавильных печей, топок паровых котлов, камер сгорания газотурбинных установок электростанций.

За последние 20 лет электропотребление в электродуговых сталеплавильных печах, в которых выплавляют 40 % стали, сократилось на 30 %, и это заслуга сотрудников металлургических компаний, преподавателей кафедр металлургического направления, подготавливающих высококвалифицированных специалистов. Определенная заслуга в экономии электроэнергии принадлежит и разработчику теории теплообмена в электродуговых сталеплавильных печах А.Н. Макарову, преподавателям кафедры ЭСиЭ ТвГТУ, которые публикуют статьи по энергоресурсосбережению в печах.

## НАШИ ЮБИЛЯРЫ



Геннадий Серафимович Кузьмин родился 4 марта 1948 г. в г. Кувшиново Калининской обл. в семье адвоката районного суда.

С 1955 по 1963 гг. учился в восьмилетней школе № 24 г. Калинина. В 1966 г. окончил школу № 11 с производственным образованием, где получил квалификацию токаря.

С 1966 по 1971 гг. обучался на дневном отделении Калининского политехнического института (КПИ), факультет «Технология машиностроения и электрификация горных работ». Институт окончил с отличием, присвоена квалификация «горный инженер-электрик». В КПИ прошел военную подготовку по профилю «командир взвода наземной артиллерии». В 1971 г. Г.С. Кузьмину было присвоено воинское звание лейтенанта, в 1977 г. – старшего лейтенанта.

С 1971 по 1977 гг. был младшим научным сотрудником НИС КПИ. Одновременно в период с 1975 по 1977 гг. по совместительству работал преподавателем на кафедре электротехники КПИ. В 1976 г. в Московском горном институте защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. В 1977 г. избран по конкурсу ассистентом, в 1981 г. – старшим преподавателем, с 1984 г. по настоящее время на должности доцента кафедры электроснабжения и электротехники ТвТГТУ. Читает курсы лекций «Общая электротехника», «Теоретические основы электротехники», «Теория надежности электроустановок», «Основы научных исследований».

В 1981 г. окончил заочное отделение математического факультета Калининского государственного университета по специальности «математик, преподаватель». С 1981 по 1982 гг. стажировался в отделении прикладных исследований секции математики Берлинского университета им. Гумбольдта (ГДР). В 1985 г. получил высшее политическое образование в Университете марксизма-ленинизма при Калининском обкоме КПСС. Работал секретарем отборочной комиссии факультета АСУ КПИ (1985 г.). Общий трудовой стаж составляет 53 года, в том числе научно-педагогический 52 года.

Научные исследования и разработки проводятся по направлениям:  
надежность и безопасность эксплуатации электрооборудования;  
методы статистического анализа безотказности, ремонтпригодности и ускоренных испытаний на надежность в условиях неполной информации;

экономико-математическое моделирование по оптимизации технического обслуживания и ремонта оборудования электротехнической и горной промышленности;

гражданско-правовые аспекты административно-хозяйственного управления комплексом ремонтно-сервисного обеспечения пользователей услуг в некоммерческих организациях. По результатам НИР опубликовано более 250 научных и учебно-методических работ.

Г.С. Кузьмин проводит все виды занятий и является ведущим преподавателем по курсу «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) для направления ЭЛЭ. Ежегодно руководит преддипломной практикой и дипломным проектированием студентов, под его руководством выполняются магистерские диссертации. В специальные части дипломных проектов и магистерских диссертаций включаются новые достижения и разработки в области электроэнергетики.

Г.С. Кузьмин является куратором лаборатории ТОЭ, занимается разработкой рабочих программ и лабораторно-методического обеспечения учебного курса ТОЭ. Под руководством Г.С. Кузьмина за последние пять лет переработаны для применения на ПК и выпущены в электронных версиях методические указания к лабораторным работам, варианты контрольных и расчетно-графических заданий. Для проведения лабораторных занятий со студентами ЭЛЭ закуплены и используются в учебном процессе «Миниатюрные электротехнические лаборатории» МЭЛ-2, награжденные дипломом Московской международной промышленной выставки-ярмарки «Образовательная среда-2005». Лаборатории МЭЛ-2 обеспечены расчетно-лабораторным практикумом и методическими указаниями в печатной и электронной версиях.

Педагогическую работу Г.С. Кузьмина характеризует добросовестность, творческое отношение, доброжелательность и требовательность по отношению к студентам. Лекции читаются на высоком научно-методическом уровне, на занятиях освещаются новые научно-технические достижения в области электроэнергетики.



Виктор Александрович Зайцев родился в Казахстане в 1948 г., тогда же семья переехала в г. Кропоткин Краснодарского края, где в 1966 г. В.А. Зайцев окончил среднюю железнодорожную школу № 45 с серебряной медалью и поступил в МГТУ им. Н.Э. Баумана на факультет приборостроения. В 1972 г. был призван как офицер запаса на двухгодичную службу в Советскую Армию. После службы в 1974 г. поступил на работу во 2-й ЦНИИ МО

в г. Калинин на должность инженера, а затем младшего научного сотрудника. В 1977 г. был призван в ряды Советской Армии в добровольном порядке, где прослужил до 1998 г. и уволился в запас в звании полковника. Во время службы окончил в 1990 г. Военно-инженерную радиотехническую академию ПВО им. Л.А. Говорова, а также защитил в 1984 г. кандидатскую диссертацию. В 1988 г. получил ученое звание «старший научный сотрудник». Неоднократно поощрялся командованием за активное участие в разработке вооружения и военной техники Советской, а впоследствии Российской армии.

Общий стаж работы составляет 50 лет, из них научный стаж 38 лет, педагогический 47 лет и стаж преподавания 24 года. На кафедре ЭСиЭ В.А. Зайцев работает с 2008 г., преподает учебные дисциплины «Электротехника и электроника», «Введение в специальность», «Учебная практика», «Электромеханика»; в настоящее время ведет дисциплину «Электрические машины», а также дисциплину «Электротехника и электроника».

Педагогическую деятельность В.А. Зайцева характеризует добросовестный и творческий подход, доброжелательность и требовательность по отношению к студентам. Лекции читаются им на высоком научно-методическом уровне, на занятиях освещаются новые научно-технические достижения в области электроэнергетики. В.А. Зайцев уделяет достаточное количество времени развитию и совершенствованию методики преподавания как теоретических, так и практических, в том числе и лабораторных, аспектов преподаваемых дисциплин.

### **Библиографический список**

1. Макаров А.Н., Свенчанский А.Д. Оптимальные тепловые режимы дуговых сталеплавильных печей. М.: Энергоатомиздат, 1992. 96 с.
2. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках. СПб.: Лань, 2014. 384 с.
3. Дорофеев Г.А., Зинягин Г.А., Макаров А.Н. Производство стали на основе железа прямого восстановления: монография. Старый Оскол: ТНТ, 2021. 324 с.
4. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых сталеплавильных и факельных нагревательных печах, топках паровых котлов, камерах сгорания газотурбинных установок: монография. М. – Вологда: Инфро-Инженерия, 2022. 452 с.

**INTRODUCTION:  
FUNDAMENTAL AND APPLIED RESEARCH WORKS  
ON ENERGY CONSERVATION AT THE DEPARTMENT OF POWER  
SUPPLY AND ELECTRICAL ENGINEERING  
OF TVER STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

*A.N. Makarov*

***Abstract.** The description of the topics of research works carried out at the Department of Power Supply and Electrical Engineering of TvSTU is given. The most important direction of work and the main scientific achievements of the department are noted, according to which it occupies a leading position in the world, namely, the development of the theory of heat exchange by radiation in electric arc steelmaking and flare heating furnaces, furnaces of steam boilers of power plants, combustion chambers of gas turbine installations. According to the research results, the scientific and pedagogical staff of the department regularly publishes articles in journals and publications included in the RSCI database and in the world database Web of Science, Scopus, receives patents for inventions, issues monographs and textbooks, publishes an annual collection of scientific and practical works.*

***Keywords:** scientific discovery, laws, textbook, energy saving, furnaces, burner, combustion chambers.*

Об авторе:

МАКАРОВ Анатолий Николаевич – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники, Тверской государственной технической университет. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

About the author:

MAKAROV Anatoly Nikolaevich – Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

# РАЗДЕЛ 1. ВЛИЯНИЕ УНИВЕРСИТЕТОВ НА ЭНЕРГОРЕСУРСОПОТРЕБЛЕНИЕ В МИРЕ

УДК 669.187: 621.186

## ВЛИЯНИЕ УНИВЕРСИТЕТСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ НА РЕСУРСОПОТРЕБЛЕНИЕ В МИРЕ

### ЧАСТЬ I. ОБРАЗОВАНИЕ В ДРЕВНИХ ЦИВИЛИЗАЦИЯХ И ПЕРВЫХ УНИВЕРСИТЕТАХ

*А.Н. Макаров*

© Макаров А.Н., 2023

*Аннотация.* Изложены основы функционирования образовательной системы в древних цивилизациях. Сделан вывод о том, что опыт древних цивилизаций стал основой для создания первых университетов в Западной Европе. Приведено описание обучения, дисциплин, изучаемых в первых университетах, указаны ученые степени, присуждаемые после окончания университетов.

*Ключевые слова:* древнегреческие философы, первые университеты, высшее образование, бакалавры, магистры, строительство, ресурсопотребление.

В вузах Советского Союза и России студенты обучались по программам специалитета на квалификацию инженера.

В сентябре – октябре 2007 г. Госдума приняла, Совет Федерации одобрил, а президент В.В. Путин подписал закон, устанавливающий уровни высшего профессионального образования в университетах – **бакалавриат и магистратуру; особняком, вне названных уровней, стоит подготовка специалиста.** Согласно закону для получения степени бакалавра в университете необходимо учиться четыре года, а для получения степени магистра еще два года дополнительно. Основная масса студентов высших учебных заведений учится в соответствии с новым законом по программам бакалавриата. Прием в магистратуру осуществляется на конкурсной основе, и обучаться в ней получают возможность 10–25 % выпускников бакалавриата. Законом предусмотрен также курс обучения в университете в пять и более лет по программам подготовки специалистов. Их перечень утверждается Правительством РФ. В основном в него входят программы подготовки специалистов, от

которых зависит безопасность человека и государства (в специалитете чаще всего готовят будущих сотрудников органов и структур здравоохранения, внутренних дел, госбезопасности, обороны и оборонной промышленности).

Необходимость перехода на двухуровневую систему высшего профессионального образования вызвана включением Российской Федерации в **Болонский процесс**. Основная цель Болонского процесса – создание общеевропейской системы высшего профессионального образования, которая будет способствовать повышению мобильности граждан на мировом рынке труда и усилению конкурентоспособности европейской, в том числе российской, высшей школы. Болонская декларация, подписанная более чем 30 странами Европы, предусматривает внедрение системы, обеспечивающей сопоставимость дипломов европейских стран, создание единой методологии высшего образования. Включение Российской Федерации в Болонский процесс означает, что российские документы о высшем образовании будут признаваться и соответственно котироваться в Европе, а европейские документы признаваться и учитываться у нас [1–12].

**Болонский процесс получил название от города Болонья, Италия, где в 1088 г. был создан первый в мире университет.** Университетскому образованию предшествовало обучение в частных школах, которые возникли в египетской, древнегреческой, римской цивилизациях приблизительно три тысячи лет назад.

Мудрецы того времени, например древнегреческий философ **Эзоп** (640–560 гг. до н. э.), зарабатывали на жизнь, наставляя учеников или выступая на площадях средиземноморских городов с просветительными выступлениями.

Древнегреческий философ **Фалес** (625–547 гг. до н. э.) установил причину солнечного затмения, занимался астрономией, предсказывал солнечные затмения, доказал, что диаметр делит круг пополам и что в равнобедренном треугольнике углы при основании равны.

Фалес доказывал равенство треугольников по одной стороне и двум прилежащим углам. Земля в Античности (древнем греко-римском мире) рассматривалась как центр Вселенной.

Древнегреческий философ **Анаксимандр** (610–547 гг. до н.э.) первым в Элладе начертил географическую карту мира, построил модель небесной сферы – глобус, создал астрономические инструменты, солнечные часы, разработал космогонию, (гипотезу о происхождении мира). Анаксимандр утверждал:

«Нет ничего приятнее, чем совершать хорошие дела».

«Презренно трусливое молчание, когда должно звучать слово осуждения».

«Если человек причинил тебе небольшой ущерб, не плати ему большим злом».

**Периандр** – древнегреческий мудрец, 666–586 гг. до н. э., которому принадлежат следующие высказывания:

«Народное правление лучше тирании».

«Будь готов умереть за отечество».

«Кто хочет править спокойно, пусть охраняет себя не копьями, а всеобщей любовью».

Древнегреческому философу **Анаксимену** (605–525 гг. до н. э.) принадлежат следующие высказывания:

«Боги любят мудрость. Люди, посвятившие себя ей – любимцы богов».

«Небесные светила, в круговороте вокруг Земли, проходят не под Землей, а вращаются вокруг нее».

Мудрецы древнего мира имели свои платные школы, посещали города своей страны с выступлениями или проповедями, собирая на площадях народ, который благодаря этому приобщался к естествознанию, астрономии, усваивал нравственный кодекс поведения человека.

Гуляя в тенистой роще, Анаксимен беседовал со своим учеником. «Скажи мне, – спросил юноша, – почему тебя часто одолевают сомнения? Ты прожил долгую жизнь, умудрен опытом, учился у великих эллинов. Как же так, что и для тебя осталось столь много неясных вопросов?»

В раздумье философ очертил посохом перед собой два круга: маленький и большой. «Твои знания – это маленький круг, а мои – большой. Но все, что осталось вне этих кругов, – неизвестность. Малый круг мало соприкасается с неизвестностью. Чем шире круг твоих знаний, тем больше его граница с неизвестностью. И впредь, чем больше ты станешь узнавать нового, тем больше будет возникать у тебя неясных вопросов» (рис. 1).

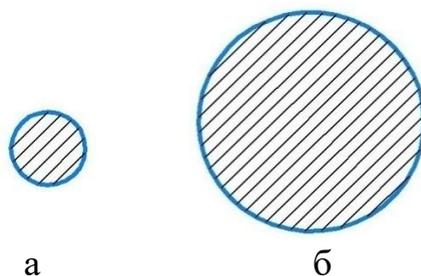


Рис. 1. Объемы знаний ученика (а) и мудреца (б)

Древнегреческий философ **Пифагор** (576–496 гг. до н. э.) родился в Южной Италии. Изучал религию пророка **Зороастра** (около трех с половиной тысяч лет тому назад), которому истина открылась в виде

представления о едином Боге-творце. Души людей, покидая тело, попадают на суд, где и определяется их дальнейшая участь. Он проповедовал воскресение и вечную жизнь воссоединившихся душ и тел. Учение Зороастра тревожило жрецов, ибо всем незнатным людям они отводили после смерти подземное царство. Зороастр погиб от кинжала жреца.

В результате первой прочитанной им лекции Пифагор приобрел две тысячи взрослых учеников, которые не вернулись домой, а вместе со своими женами и детьми создали огромную школу и государство «Великая Греция» на основе законов и правил Пифагора, почитаемых учениками как божественные заповеди. Пифагор сформировал теорему, носящую его имя. В то время в обращении были только целые числа, отсутствовали простые и десятичные дроби. Пропаганда учения Пифагора уравнивала всех свободных граждан.

Примерно в IV в. до н. э. философы греческой цивилизации обобщают знания, накопленные мудрецами Египта и Вавилона. В это время возникает профессиональное занятие наукой. **Аристотель** (384–322 гг. до н. э.) систематизировал знания в обширную энциклопедию. **Архимед** (287–212 гг. до н. э.) развивал арифметику, геометрию, гидравлику (разработал винт для подъема воды), механику. **Евклид** (III в. до н. э.) в своих многотомных «Началах» изложил основы античной математики и геометрии, способы определения площадей, объемов фигур и тел. Во II тысячелетии до н.э. индийские астрономы создали календарь, разбив год на 12 месяцев по 30 дней.

К середине III в. до н. э. окрепла Римская империя, просуществовавшая до Великого переселения народов, которое началось в IV–V вв. н. э. с вторжением в Европу гуннов – тюркоязычных кочевников из Приуралья. Под ударами гуннов германские племена двинулись на юг и на запад, Римская империя разделилась на Западную и Восточную. Восточная империя – Византия – просуществовала до падения от турецких завоевателей (1460 г.).

Древнегреческий ученый **Птоломей** (90–160 гг.) – создатель **геоцентрической модели** мира, согласно которой Земля является центром Вселенной и небесные тела, включая Солнце, вращаются вокруг нее. Только спустя 1 300 лет Коперник и Кеплер создадут гелиоцентрическую систему галактики.

Во II–III вв. в Западной Европе получило распространение **христианство**, одна из основных религий человечества. Современное летоисчисление ведется от рождения ее основоположника Иисуса Христа (рис. 2). Христом создан моральный кодекс поведения человека с его основными правилами: «Не убей, не укради, не лжесвидетельствуй, не обманывай, не блуди. Относитесь с любовью друг к другу, прощайте

обида, не мстите». Христианской православной религии свойственны гуманизм, высокий моральный дух. По численности последователей **христианство** является первой в современном мире конфессией (ее исповедуют около двух миллиардов человек), **ислам** (мусульманство) – вторая по численности мировая религия (один миллиард человек), **буддизм** по количеству последователей (около четырехсот миллионов) занимает третье место.



Рис. 2. Альбрехт Дюрер «Христос среди учителей», 1506 г.  
(фото: Национальный музей Тиссена-Борнемисы, Мадрид) [13]

Греко-римская цивилизация пришла в упадок в V в. В это время окрепли позиции христианской церкви, центром которой стал Рим. С этого периода развитие общества происходило при большом влиянии церкви.

Древнерусское государство Киевская Русь, объединившее восточных славян, возникло во второй половине IX в. и занимало территорию от Ладожского и Онежского озер на севере до Черного моря на юге, от Перемышля на западе до Муром на востоке. В XII в. Киевская Русь распалась на феодальные княжества. В 1240–1380 гг. на Руси было монголо-татарское иго.

Накопленные человечеством знания, книги, в которых обобщен философский опыт, явились фундаментом для создания университетов. Первый университет, как отмечено выше, появился в 1088 г. в Болонье (рис. 3).



Рис. 3. Лоренцо де Вольтолина.  
Генрих Германский обучает студентов Болоньи  
(вторая половина XIV в.) [14]

Университеты готовили образованных людей, под руководством которых развивались градостроительство, торговля, дорожное строительство, мостостроение, судостроение и другие отрасли хозяйства средневековых западноевропейских городов, а также юриспруденция, налогообложение. Благодаря университету Болонья стала процветающим городом Западной Европы.

В последующие годы и десятилетия университеты появились и в других городах и странах: Париже, Тулузе и Монпелье, Франция (соответственно в 1120, 1229 и 1289 гг.), Оксфорде и Кембридже, Англия (в 1167 и 1209 гг.), Саламанке, Испания (1218 г.), Падуе, Неаполе и Сиене, Италия (1222, 1224 и 1240 гг.), Коимбре, Португалия (1290 г.) и др. В XI–XVI вв. (точнее, в период с 1088 по 1592 гг.) в Западной Европе было создано 54 университета: десять во Франции, восемь в Италии, восемь в Германии, один в Англии, семь в Шотландии, пять в Испании, три в Швейцарии, два в Голландии и по одному университету в Австрии, Швеции, Дании, Ирландии, Хорватии, Чехии, Словакии, Польше, Литве [3–5].

**Наличие университетов и подготовка высокообразованных людей способствовали развитию и процветанию стран Западной Европы, достижению наиболее высокой цивилизации в мире. Заложенный и развиваемый университетами цивилизационный приоритет западноевропейских стран сохраняется ими вплоть до настоящего времени.**



**течение 4–5 лет**, но поступало на них не более одной трети бакалавров. После сдачи устного испытания по выбранной отрасли знания и публичной защиты диссертации, одобренной ученым советом факультета, соискателю присуждалась **ученая степень магистра**, которая давала право преподавать «семь свободных искусств». Небольшая часть магистров, преподававших в университете и проводивших исследования, защищали докторские диссертации и получали **ученые степени доктора права, медицины, богословия и ученое звание профессора**.

### **Библиографический список**

1. Макаров А.Н. Перекройка с переводом. Профессиональное образование нужно начинать со школы // Поиск. 2008. № 1–2. С. 7–8.
2. Панарина Е.А. Вузовские ученые готовы взять на себя стратегическую ответственность // Поиск. 2008. № 50. С. 8–9.
3. Большая Оксфордская энциклопедия / под ред. Ben Dupre. М.: Росмэн, 2007. 661 с.
4. Макаров А.Н. Энергетическое образование в России в 1991–2008 годах и в условиях мирового экономического кризиса // Академия Энергетики. 2009. № 2. С. 30–34.
5. Макаров А.Н. Учесть неучтенное. Не так страшно положение российской науки, как малюют его некоторые эксперты // Поиск. 2010. № 18. С. 9–10.
6. Макаров А.Н. Кувалда не тонет? Промышленники предпочитают обходиться устаревшими технологиями и оборудованием // Поиск. 2011. № 6. С. 17–18.
7. Макаров А.Н. Научно-технологическая безопасность России в начале XXI века // Академия Энергетики. 2010. № 2. С. 18–22.
8. Варшавский А. Потрачено с умом. Результативность научного труда в России выше, чем в Америке // Поиск. 2009. № 21. С. 14.
9. Рогов С. Альтернатива примитиву // Поиск. 2010. № 12. С. 6–7.
10. Гладкова Н. Под грузом вузов. Систему профобразования перекосило // Поиск. 2010. № 36. С. 3.
11. Боровская Н. Кредит – пропуск в вуз // Поиск. 2007. № 34–35. С. 16.
12. Попасть в сотню! Минобрнауки планирует поменять всю систему высшего образования // Поиск. 2010. № 40. С. 4.
13. Христос среди учителей // WIKI 2 [сайт]. URL: [https://wiki2.org/ru/Христос\\_среди\\_учителей](https://wiki2.org/ru/Христос_среди_учителей) (дата обращения: 13.08.2020).
14. Средние века // АКАДЕМИК [сайт]. URL: [https://dic.academic.ru/pictures/wiki/files/76/Laurentius\\_de\\_Voltolina\\_001.jpg](https://dic.academic.ru/pictures/wiki/files/76/Laurentius_de_Voltolina_001.jpg) (дата обращения: 21.07.2022).

# IMPACT OF UNIVERSITY EDUCATION ON RESOURCE CONSUMPTION IN THE WORLD. PART I. EDUCATION IN ANCIENT CIVILIZATIONS AND THE FIRST UNIVERSITIES

*A.N. Makarov*

***Abstract.** The foundations of the functioning of the educational system in ancient civilizations are outlined. It is concluded that the experience of ancient civilizations became the basis for the creation of the first universities in Western Europe. The description of training, disciplines studied at the first universities is given, the academic degrees awarded after graduation from universities are indicated.*

***Keywords:** ancient Greek philosophers, first universities, higher education, bachelors, masters, construction, resource consumption.*

Об авторе:

МАКАРОВ Анатолий Николаевич – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

About the author:

MAKAROV Anatoly Nikolaevich – Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Electricity and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

УДК 669.187: 621.186

## ВЛИЯНИЕ УНИВЕРСИТЕТСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ НА РЕСУРСОПОТРЕБЛЕНИЕ В МИРЕ

### ЧАСТЬ II. ВЛИЯНИЕ УНИВЕРСИТЕТОВ НА РЕСУРСОПОТРЕБЛЕНИЕ В ЗАПАДНОЙ ЕВРОПЕ

*А.Н. Макаров, К.Б. Корнеев, М.С. Хрусталева*

© Макаров А.Н., Корнеев К.Б., Хрусталева М.С., 2023

***Аннотация.** В статье рассматривается влияние средневековых университетов на формирование индустриального общества Западной Европы. Отмечается вклад выпускников университетов в развитие*

*теории и практики строительства архитектурных сооружений, мостов, кораблей, а также в формировании медицинских знаний.*

***Ключевые слова:** университеты, строительство, добыча полезных ископаемых, вырубка лесов.*

**В университетах магистры, доктора, профессора проводили научные исследования двух видов: фундаментальные, направленные на открытие новых законов природы, физических явлений и разработку теорий физических явлений, методик расчета устройств, конструкций, технологий, и прикладные, направленные на создание новых устройств, конструкций, сооружений, технологий [1].**

В строительстве учеными университетов того времени на базе знаний механики выполнены **фундаментальные исследования**, на основе которых разработаны основные принципы и методики расчета строительных конструкций и сооружений на прочность, изучены свойства материалов, применяемых в строительстве. Полученные результаты использовались в **прикладных научных исследованиях** и практике строительства крепостей, замков, жилых домов, дворцов, мостов, дорог. В Западной Европе в строительстве широко применялись каменные природные строительные материалы, цемент, известь, гипс, бетон, керамика, стекло, железо (рис. 1). Добыча природных полезных ископаемых с появлением университетов в Западной Европе резко возросла, и эта тенденция сохраняется до настоящего времени.



*Bologna*

Рис. 1. Средневековый квартал Болоньи. Гравюра XVI в. [2]

5–6-этажные дома строились из камня с черепичными крышами, шпилеобразные соборы имели характерные признаки готического стиля [2]. Средневековый город делился на ряд районов. Например, Париж в XIV–XVI вв. имел следующие районы: западный, занятый королевским дворцом; восточный, включающий Собор Парижской Богоматери, резиденцию архиепископа, госпиталь, хозяйственные постройки; южный – университет Сорбонна со студенческим кварталом; юго-западный – аббатство; северный и восточный кварталы – улицы, населенные бюргерами, наемными рабочими, грузчиками, строительными рабочими, матросами, ремесленниками (рис. 2).



Рис. 2. Париж на рубеже XVI–XVII вв. Гравюра 1608 г. [3]

Бюргеры – купцы, торговцы, ростовщики, банкиры – сосредоточили в своих руках экономические ценности и занимали ведущее место в городах. Они, как правило, имели университетское образование, нередко ученую степень магистра и часть из них входила в магистраты (городские советы), возглавляемые выборными бургомистрами.

Несмотря на цивилизационные приоритеты в развитии, которые создавали городам университеты, западноевропейские средневековые города имели ряд недостатков. В них отсутствовали бани, больницы, средневековые улицы не имели тротуаров, были узкими, источали запахи нечистот и были покрыты мусором, который никем не вывозился. Антисанитария, стаи крыс, отсутствие благоустройства в быту и домашнем

хозяйстве приводили к частым эпидемиям. Улицы имели сточные канавы, в которые выливали помои, однако были настолько узкими, что нижние этажи жилых домов не получали солнечного света.

При всем этом научные работы магистров и докторов средневековых университетов западноевропейских стран были передовыми для того времени. Происходили диспуты на научные темы, защищались докторские и магистерские диссертации по теориям, методикам расчета, новым конструкциям, материалам в механике, градостроительстве, мостостроении, судостроении, а также по новым методам лечения (рис. 3).



Рис. 3. Диспут врачей в Парижском университете. Миниатюра из рукописи «Chants royaux», 1527 г., Французская национальная библиотека [4]

**Магистерские и докторские диссертации в области медицины (фундаментальные исследования) были посвящены лечению и предупреждению болезней, разработке лекарств и лечебных средств. Прикладными медицинскими исследованиями в практической**

деятельности, направленной на лечение болезней, апробацию разработанных лекарств, выполнение несложных операций, занимались как врачи-теоретики, так и практикующие дипломированные врачи. Студенты могли сопровождать докторов во время их визитов к пациентам, следить за постановкой диагноза, осуществлением медицинских предписаний и действием лекарств. За известным доктором по улице следовала толпа студентов.

Студенты медицинских факультетов присутствовали при хирургических операциях, выполняемых их учителями, магистрами и докторами, и перенимали полезный опыт. Количество студентов в пределах одной специальности или одного факультета составляло 8–12 человек. Срок обучения и возраст студентов обычно не ограничивались. Книги являлись редкостью и стоили дорого, так как изготавливались из обработанной кожи животных – пергамента. Например, на медицинском факультете Парижского университета в XV в. было всего 12 книг, которые прикреплялись цепями к полке или кафедре. В XVII–XVIII вв. в городах Западной Европы росло количество аптек [2], в которых можно было приобрести химические лекарственные препараты (рис. 4).



Рис. 4. Средневековая аптека [5]

Со временем аптеки превратились в научно-исследовательские лаборатории, где исследовались лекарственные и другие химические препараты.

Университеты на механических факультетах готовили бакалавров и магистров – мосто- и кораблестроителей. Строительство мостов через реки представляло собой сложную задачу, технологии для решения которой разрабатывались в университетах. В эпоху Средневековья из нескольких рядов бревен, вбитых в дно реки, строили отсеки. С помощью грязи отсеки делали водонепроницаемыми, затем посредством водяного колеса откачивали из них воду. Грунт укрепляли сваями, забивая их разработанными в университетах специальными машинами. Устанавливали деревянную решетку из дубовых балок и досок, заполняемую круглыми камнями и связующими веществами. Для строительства арок возводили деревянные подмости, поверх которых укладывали блоки песчаника или гранита. После закладки краеугольных камней подмости убирали, арку держал ее собственный вес. Арки укрепляли несколькими слоями камней, достигающими уровня мостового настила. В конце строительства прокладывали мощеную дорогу из твердого камня (рис. 5). Основные принципы строительства мостов с эпохи Средневековья остаются неизменными.



Рис. 5. Карлов мост в Праге, возведенный в XIV в. [6]

В университетах Западной Европы готовили кораблестроителей и развивали корабельную науку. Подготовку, обучение кораблестроителей и мореплавателей проводили магистры и доктора

механики, математики, астрономы, картографы, практикующие капитаны. Ученые составляли географические карты и астрономические таблицы, совершенствовали компасы, астролябии. Ими созданы прообразы навигационных приборов, таких как квадрант и секстант. В XV–XVI вв. в университетах Испании и Португалии корабельная наука того времени достигла совершенства. В этих странах наилучшим образом строили корабли, приспособленные к длительному океанскому плаванию под парусами. Они отличались гармоничным сочетанием архитектурных и гидромеханических решений, точностью в раскрое парусного вооружения и полным учетом особенностей гидродинамики корпуса в штормовых условиях плавания (рис. 6). Поскольку для строительства кораблей использовалось дерево, в Западной Европе шла интенсивная вырубка лесов.

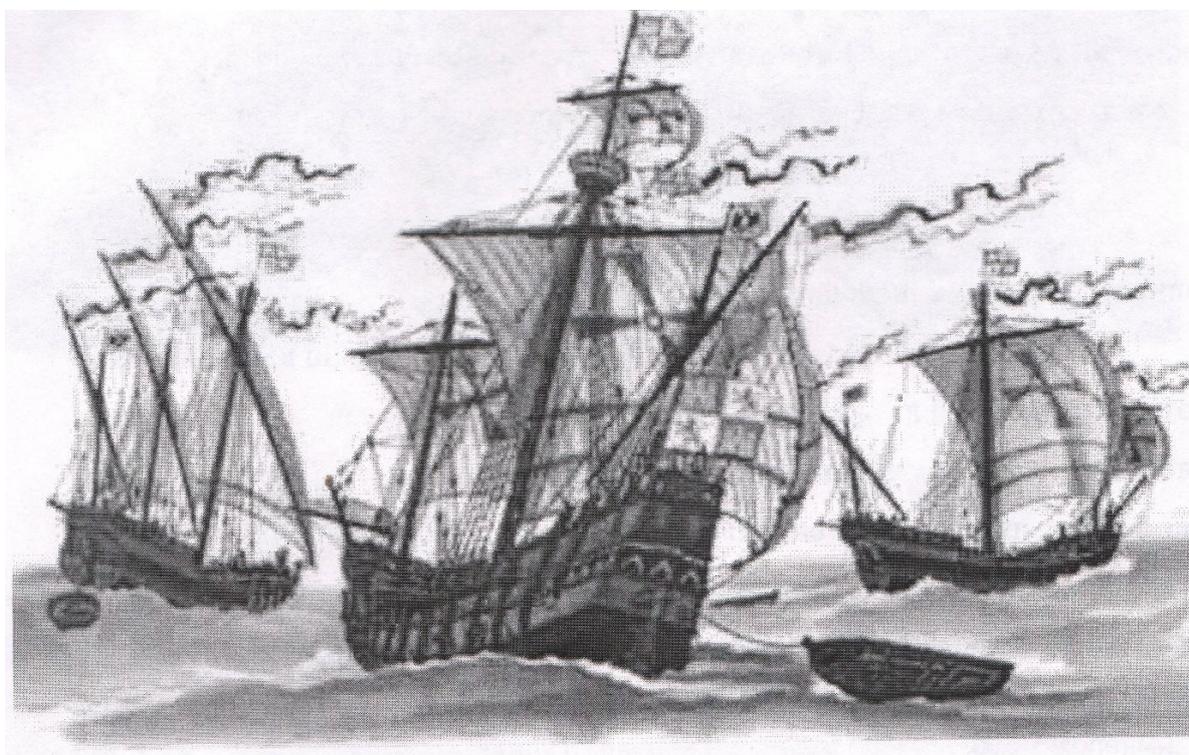


Рис. 6. Корабли первой трансатлантической экспедиции Христофора Колумба в 1492 г. [7]

Строительство крупных высокобортных парусников позволило европейцам совершить первые дальние океанические плавания. Так, в 1492 г. Христофор Колумб на каракке и двух каравеллах достиг берегов Америки. Совершилось открытие Нового Света. В период с 1480 по 1580 гг. на морях и в океанах властвовали испанцы, португальцы, голландцы. Приблизительно с 1660 г. доминирующая позиция

принадлежала англичанам, которые в 1580 г. разбили испанский флот [5–9]. Португальский мореплаватель Васко де Гама совершил плавание из Лиссабона в Индию, установив морское сообщение с Южной Африкой и Юго-Восточной Азией.

### Библиографический список

1. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках: учебное пособие. СПб.: Лань, 2014. 384 с.

2. Европа в средние века и раннее новое время. Болонья. XIII век // WORLDLAB.CO. URL: <https://www.worldlab.co/bolonya-xiii-vek/> (дата обращения: 21.10.2020).

3. Claude Chastillon // WIKIPEDIA. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Claude\\_Chastillon#/media/File:ParisCharlesV.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Claude_Chastillon#/media/File:ParisCharlesV.jpg) (дата обращения: 30.10.2022).

4. Образование и философия в Средние века // ФОКСФОРД. URL: <https://foxford.ru/wiki/istoriya/obrazovanie-i-filosofiya-v-srednie-veka> (дата обращения: 30.10.2022).

5. Аптекарское средневековье: что представляла собой европейская фармация в X–XVII веках. URL: <https://www.medisord.ru/blog/articles/aptekarskoe-srednevekovye-cto-predstavlyala-soboj-evropeiskaya-farmaciya> (дата обращения: 15.11.2022).

6. Карлов мост в Праге // LIVE JOURNAL. URL: [https://www.sllic.pics.livejournal.com/masteroc/50816465/7135395\\_original/jpg](https://www.sllic.pics.livejournal.com/masteroc/50816465/7135395_original/jpg) (дата обращения: 13.10.2020).

7. История кораблестроения как поиск непротиворечивого диалога с океаном // Историческая эволюция штормовой мореходности корабля от древности до наших дней. URL: [https://www.shipdesign.ru/History\\_1.html](https://www.shipdesign.ru/History_1.html) (дата обращения: 15.07.2022).

8. Словарь иностранных слов русского языка // АКАДЕМИК. URL: <https://dic.academic.ru/dic/nst/ruwic/686297> (дата обращения: 13.10.2022).

9. Территории, включенные в состав России в XVI–XIX веках // Поиск. 2021. № 24. С. 8.

10. Макаров А.Н. Перекройка с переводом. Профессиональное образование нужно начинать со школы // Поиск. 2008. № 1–2. С. 7–8.

11. Панарина Е.А. Вузовские ученые готовы взять на себя стратегическую ответственность // Поиск. 2008. № 50. С. 8–9.

12. Большая Оксфордская энциклопедия / пер. с англ. А.И. Кима, У.В. Санциной, Т.В. Сафроновой и др. М.: Росмэн, 2007. 661 с.

# IMPACT OF UNIVERSITY EDUCATION ON RESOURCE CONSUMPTION IN THE WORLD. PART II. IMPACT OF UNIVERSITIES ON RESOURCE CONSUMPTION IN WESTERN EUROPE

*A.N. Makarov, K.B. Korneev, M.S. Khrustaleva*

**Abstract.** *The article examines the influence of medieval universities on the formation of industrial society in Western Europe. The contribution of university graduates to the development of the theory and practice of the construction of architectural structures, bridges, ships, as well as in the formation of medical knowledge is noted.*

**Keywords:** *universities, construction, mining, deforestation.*

Об авторах:

МАКАРОВ Анатолий Николаевич – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

КОРНЕЕВ Константин Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: Energy-tver@mail.ru

ХРУСТАЛЕВА Мария Сергеевна – студентка, Тверской государственный технический университет. E-mail: masamasa1487@gmail.com

About the authors:

MAKAROV Anatoly Nikolaevich – Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Electricity and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

KORNEEV Konstantin Borisovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electricity and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: Energy-tver@mail.ru

KHRUSTALEVA Maria Sergeevna – Student, Tver State Technical University. E-mail: masamasa1487@gmail.com

## **ВЛИЯНИЕ УНИВЕРСИТЕТСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ НА РЕСУРСОПОТРЕБЛЕНИЕ В МИРЕ**

### **ЧАСТЬ III. КОЛОНИЗАЦИЯ ГОСУДАРСТВ МИРА ЗАПАДНОЕВРОПЕЙСКИМИ СТРАНАМИ И РЕСУРСОПОТРЕБЛЕНИЕ В КОЛОНИАЛЬНЫХ СТРАНАХ**

*А.Н. Макаров, К.Б. Корнеев, М.С. Хрусталева*

© Макаров А.Н., Корнеев К.Б., Хрусталева М.С., 2023

***Аннотация.** В статье представлен анализ влияния университетского образования на формирование колониальной политики западноевропейских стран. Анализируются причины технологического превосходства европейских стран, а также цивилизационные, культурные и прагматические причины ограничений трансфера технологий в колонии. Отмечается значительная роль западноевропейских стран в эксплуатации природных ресурсов южноамериканских, африканских и азиатских колоний.*

***Ключевые слова:** университеты, научные исследования, развитие строительства, металлургии, химии, колонизация, эксплуатация полезных ископаемых.*

**Создание университетов позволило государствам Западной Европы далеко опередить остальные страны мира в техническом, технологическом, цивилизационном развитии.**

Деятельность университетов преображала города и страны, в которых они находились. В городах процветали право, медицина, строительство, культура, книгоиздание. Выпускники университетов разрабатывали проекты по строительству мостов, дорог, зданий, сооружений и руководили работами при реализации этих проектов. Магистры входили в магистраты (органы власти) и участвовали в управлении городами и провинциями. Университеты были демократичными социальными институтами, и местные власти не вмешивались в их деятельность. В противном случае университет покидал город и обосновывался в более благоприятном месте. Утрата университета наносила городу ощутимый ущерб.

В странах Западной Европы развивались металлургия, химия, был изобретен порох и создано огнестрельное оружие (пушки, мушкеты). Выпускники университетов становились премьер-министрами (например, четырнадцать британских премьер-министров – выпускники Кембриджа),

советниками королей и правителей, управляющими в магистратах городов, управляющими имениями дворян, учеными и преподавателями, добывающими новые знания, учителями школ, юристами, составляющими законы управления государствами, судьями, адвокатами, нотариусами, священниками, докторами и магистрами медицины с лечебной практикой, докторами и магистрами богословия с практикой церковной службы, купцами, торговцами, строителям мостов, дорог и кораблей, металлургами, книгоиздателями, клерками, секретарями и писарями в магистратах, судах, нотариальных конторах, проектировали замки, дворцы, дома.

**Западноевропейские государства использовали свои достижения в научной, гражданской и военной сферах, а также Великие географические открытия для колонизации стран и целых континентов. Высокое цивилизационное развитие позволило превосходно вооружить и экипировать колонизаторов. Они были оснащены пушками, мушкетами, закованы в латы, в то время как на колониальных территориях уровень развития был ниже, отсутствовало огнестрельное оружие и воины были вооружены только луками, копьями и стрелами. Европейцы превратили открытые ими территории в колонии, за счет которых быстро обогащались.**

Индийские государства Центральной и Южной Америки были покорены испанскими конкистадорами в XVI–XVII вв. (рис. 1).

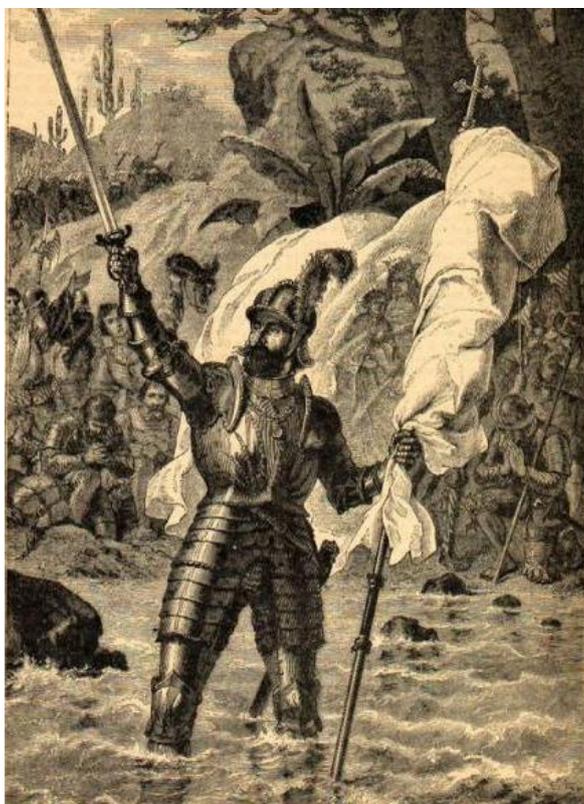


Рис. 1. В. Нуньес де Бальбоа провозглашает власть Испании над Тихим океаном [1]

Конкистадоры отбирали у индейцев и в огромных количествах вывозили из Америки золото, серебро, алмазы и другие ценности, а также полезные ископаемые. При этом сопротивление индейцев беспощадно подавлялось. Так, в 1530 г. испанские конкистадоры под предводительством Эрнана Кортеса продвигались в глубь Американского континента, атакуя индейские поселения и отбирая золото, серебро, алмазы. Численность отряда составляла полторы сотни хорошо вооруженных огнестрельным и холодным оружием всадников на конях. Отряд вступил на территорию племени ацтеков протяженностью с севера на юг около четырех тысяч километров. Численность населявшего эти земли племени ацтеков составляла в то время около 50 миллионов человек.

Вождь племени для оказания сопротивления колонизаторам собрал отряд из 80 тысяч воинов. Состоялось сражение между хорошо вооруженной закованной в броню рыцарской кавалерией, численностью 150 человек, и многотысячным отрядом ацтеков, вооруженным копьями, луками и стрелами. Ацтеки были разбиты, при этом погибло около 10 тысяч индейцев.

Испанцы, имевшие частичный иммунитет от оспы, чумы, завезли на континент возбудителей этих болезней, в результате чего около 45 миллионов лишенных иммунитета аборигенов в XVI в. погибли от эпидемий инфекционных заболеваний. Поэтому испанцы нередко заходили в индейские поселения и просто забирали из них все ценности – эпидемии уничтожили большую часть коренного населения, способного оказать сопротивление.

**Большинство западноевропейских стран имели от двух до нескольких десятков колоний на Американском, Африканском континентах и в Юго-Восточной Азии. Период колонизации длился около 500 лет.** Испания владела колониями в Северной и Южной Америке, Африке, Юго-Восточной Азии, в том числе ей принадлежали Перу, Филиппины, Западная Сахара, Марокко, Гвинея. Португалии принадлежали тринадцать колоний, среди которых Бразилия, часть Анголы, Мозамбик, Гвинея-Бисау, часть Индии, часть территории Китая, Восточный Тимор. Нидерландам принадлежали семнадцать колоний, в том числе территории современных ЮАР, Тринидада и Тобаго, часть Бразилии, Суринам, Шри-Ланка, часть Малайзии, Индонезия, Австралия, часть Индии. Франция имела сорок колоний, среди них Сирия, Ливан, Гаити, Гвиана, Алжир, Тунис, Марокко, Мали, Сенегал, Судан, Гвинея, Нигер, Того, Конго, ЦАР, Чад, Камерун, Мадагаскар, часть Индии, Вьетнам, Лаос, Камбоджа и др. [5]. Великобритания владела ста тринадцатью колониальными территориями, простиравшимися от Дальнего Востока до Северной и Южной Америки, поэтому англичане с гордостью говорили:

«Над Великобританией не заходит солнце». Владениями Великобритании были территории Индии (включая Пакистан и Бангладеш), Мальты, Гибралтара, Афганистана, Непала, Цейлона, Ирака, Кувейта, Бахрейна, Омана, Египта, Судана, Кении, Уганды, Танзании, Сомали, Замбии, ЮАР, Намибии, Нигерии, Ганы и др. (рис. 2). Германия владела одиннадцатью колониями, в том числе Восточной Африкой, Танзанией, Намибией, Камеруном, Того, Новой Гвинеей, частью Китая. Бельгии принадлежали четыре колонии в Африке и Азии. Италии имела одиннадцать территорий, среди которых Ливия, Эфиопия, Эритрея.



Рис. 2. Карикатура на британского магната Сесила Джона Родса, мечтающего о владении Африкой [2]

**Колонии традиционно создавались метрополиями с целью эксплуатации природных ресурсов, месторождений полезных ископаемых, плодородных земель, людских ресурсов (рабство) (рис. 3). Колонии управлялись тонкой прослойкой представителей колониальной державы, а официальным языком становился язык колонизаторов. Эксплуатация природных богатств, труда аборигенов в пользу метрополии приводила к деградации колониальных стран. Россия была одной из немногих стран, не участвующих в разделе Африки, Юго-Восточной**

**Азии и не занимавшейся работорговлей.** В русской прессе выражалось сочувствие судьбе рабов-африканцев.

На протяжении сотен лет европейцы открыто ущемляли права местных жителей, подвергали их ассимиляции, присваивали природные ресурсы и территории. Кроме того, совершались массовые убийства местного населения, людей морили голодом, сгоняли в резервации. Франция почти пять веков практиковала колониализм. В борьбе с французскими колонизаторами только в Африке погибло свыше двух миллионов местных жителей. В период колонизации Бельгией конголезской территории, которая в десять раз больше самой Бельгии, было убито почти десять миллионов коренного населения. Массовое истребление племен гереро и нама, совершенное немцами, считается первым актом геноцида XX столетия.



Рис. 3. Неизвестный художник. «Порабощенный человек, работающий в поле» (около 1850 г.) [2]

**Колониальные страны получили независимость в конце XIX–XX вв., то есть через 400–500 лет после начала колонизации, в результате освободительных войн и революций.** Например, Индия обрела независимость в 1947 г. Советский Союз морально, часто материально (оружием) поддерживал освободительную борьбу народов.

Большинство стран Африки обрели независимость только в 1960-е гг. В 1963 г. тридцать государств Африки на конференции Организации африканского единства объявили об освобождении от британского, французского, испанского, бельгийского колониального ига. Советский Союз сыграл решающую роль в крушении колониальной системы. После распада СССР в 1991 г. Россия стала его правопреемницей. **Поддержкой Советским Союзом освободительного движения от колониального гнета объясняется недружественное отношение западноевропейских стран и США к России в настоящее время. Западные европейские страны потеряли колонии, в результате чего их территория существенно уменьшилась. Россия, наоборот, приросла огромными территориями Сибири и Дальнего Востока, и это обстоятельство не дает душевного покоя правителям, владельцам бизнеса и ряду обывателей в странах Запада. Западные европейские страны, выступая единым фронтом, координируют в рамках своей общемировой стратегии действия, направленные против сил национального освобождения и стран, поддерживающих эти силы, в том числе против России.** В частности, эти страны создали на Украине антироссийский режим, который поддерживают деньгами и оружием.

Большинство стран (членов ООН) сравнительно недавно освободились от колониального гнета. В период с 1945 по 1973 гг. свыше полутора миллиардов человек сбросили колониальное и полуколониальное иго, возникло свыше семидесяти новых национальных государств [1–6].

### **Библиографический список**

1. Васко Нуньес де Бальбоа // FRpedia [сайт]. URL: [https://frpedia.wiki/ru/Vasco\\_Núñez\\_de\\_Balboa#wiki-13](https://frpedia.wiki/ru/Vasco_Núñez_de_Balboa#wiki-13) (дата обращения: 20.11.2022).
2. Самые ожидаемые выставки 2021 года в мире // theartnewspaper. URL: <https://www.theartnewspaper.ru/posts/8720/> (дата обращения: 20.11.2022).
3. Макаров А.Н. Наука и образование в модернизации промышленного комплекса // Академия Энергетики. 2011. № 2. С. 40–46.
4. Макаров А.Н. Анализ эффективности энергомашиностроительных компаний // Академия Энергетики. 2012. № 2. С. 82–89.
5. Макаров А.Н. НИР и сопровождение энергомашиностроительной продукции // Академия Энергетики. 2013. № 3. С. 72–78.
6. Меры государственного регулирования по развитию энергетического машиностроения РФ // Академия Энергетики. 2009. № 1. С. 22–34.

**IMPACT OF UNIVERSITY EDUCATION ON RESOURCE  
CONSUMPTION IN THE WORLD. PART III. COLONIZATION  
BY THE WESTERN EUROPEAN COUNTRIES OF THE STATES  
OF THE WORLD AND RESOURCE CONSUMPTION  
IN THE COLONIAL COUNTRIES**

*A.N. Makarov, K.B. Korneev, M.S. Khrustaleva*

***Abstract.** The article presents an analysis of the influence of university education on the formation of the colonial policy of Western European countries. The reasons for the technological superiority of European countries, as well as civilizational, cultural and pragmatic reasons for the limitations of technology transfer in the colonies are analyzed. The significant role of Western European countries in the exploitation of natural resources of South American, African and Asian colonies is noted.*

***Keywords:** universities, scientific research, development of construction, metallurgy, chemistry, colonization, exploitation of minerals.*

Об авторах:

МАКАРОВ Анатолий Николаевич – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

КОРНЕЕВ Константин Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: Energy-tver@mail.ru

ХРУСТАЛЕВА Мария Сергеевна – студентка, Тверской государственный технический университет. E-mail: masamasa1487@gmail.com

About the authors:

MAKAROV Anatoly Nikolaevich – Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Electricity and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

KORNEEV Konstantin Borisovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electricity and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: Energy-tver@mail.ru

KHRUSTALEVA Maria Sergeevna – Student, Tver State Technical University. E-mail: masamasa1487@gmail.com

**ВЛИЯНИЕ УНИВЕРСИТЕТСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
НА РЕСУРСОПОТРЕБЛЕНИЕ В РОССИИ**

**ЧАСТЬ I. ОБРАЗОВАНИЕ И РЕСУРСОПОТРЕБЛЕНИЕ  
В РОССИИ В X–XVII ВЕКАХ**

*А.Н. Макаров*

© Макаров А.Н., 2023

***Аннотация.** В статье изложены аспекты технологического и образовательного развития России в X–XVII вв. Описывается эффект отсутствия системы высшего (университетского) образования на товарооборот с зарубежными странами. Отмечается значительное культурное и технологическое влияние России на присоединяемые в рамках культурной и исследовательской экспансии земли.*

***Ключевые слова:** Россия, торговля, меха, ценный соболь, освоение Сибири и Дальнего Востока.*

Отсутствие в России университетов до XVIII в. негативно сказывалось на развитии страны. В России в IX–XIII вв. города строили в основном деревянные с крепостью-детинцем или кремлем в центре, занимаемым князем, духовной властью, боярами, дружинниками, составляющими охрану князя (рис. 1). Ремесленный люд – плотники, кузнецы, кожевники, гончары, наемные рабочие – селился на городских окраинах. (рис. 2).

После принятия в 988 г. христианства в русских городах появились каменные храмы высотой 30–40 метров, покрытые листами меди и имеющие шлемовидную форму. Церкви ярко выделялись на фоне деревянной городской постройки (рис. 2). Жилища князей и бояр – хоромы и терема – представляли собой несколько соединенных переходами строений, высоких деревянных зданий – башен. Поблизости от них находились поварня, конюшня, кузница, баня. Зажиточные горожане жили в двухэтажных срубках (нижний этаж был хозяйственным, верхний – жилым). Торговцы и землепашцы селились в подоле или в близлежащих к городу деревнях (рис. 3).



Рис. 1. А.М. Васнецов. Старая Москва. У стен древнего города [1]

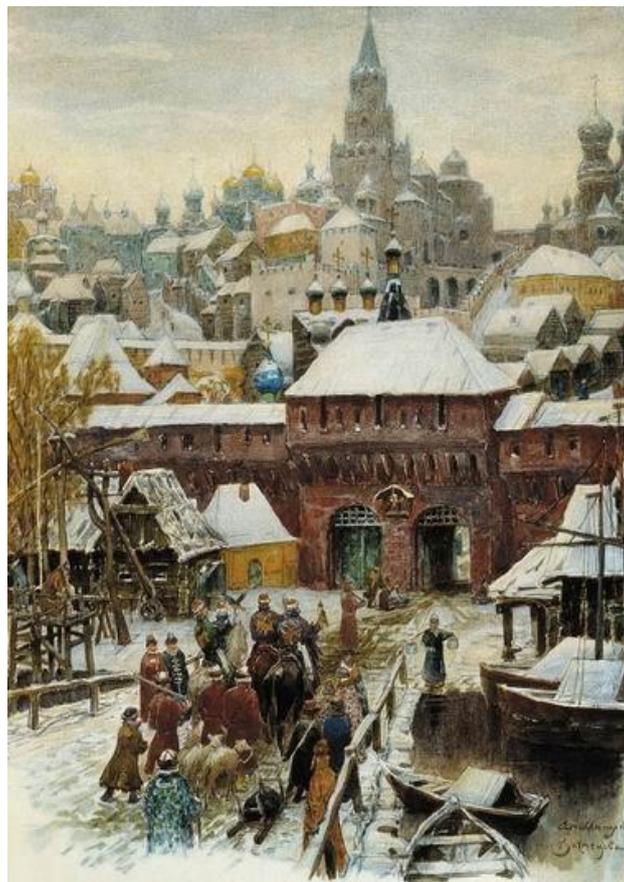


Рис. 2. А.М. Васнецов. Москва. Конец XVII века [2]



Рис. 3. П. Суходольский. Полдень в деревне (1864 г.) [3]

В России крестьянские дети обучались письму и счету в церковно-приходских школах; состоятельные граждане, дворяне, купцы приглашали для обучения своих детей иностранных преподавателей и гувернеров. В XV–XVI вв. был переведен на русский язык ряд книг докторов медицины западноевропейских университетов, а также лечебники, травники. Российские лекари имели лавки в торговых рядах и пользовались в своей практике травами, кореньями, заморскими лекарственными средствами. В XV–XVI вв. русских лекарей было немного, врачи с университетским образованием были иностранцами.

В конце XV в. при Иване III возникло государство, объединяющее княжества вокруг Москвы. Было свергнуто татаро-монгольское иго (1480 г.), оживился внутренний рынок, установились и расширились торговые связи с Востоком и Западом. В отношении Московского государства стали использовать название «Россия».

**Россия торговала с западноевропейскими странами медом, воском, зерном, пенькой, салом, треской, семгой, говяжьими, тюленьими, моржовыми шкурами, а также собольими, песцовыми, куньими мехами. Последние пользовались особым большим спросом в странах Европы. Из западноевропейских стран купцы привозили огнестрельное оружие, ткани, вина, пряности [1].**

Меха составляли важную часть торговли. Наиболее ценными и дорогими являлись собольи меха. Вследствие большого спроса в Западной

Европе на меха из соболя последний на территории Московской Руси к концу XVI в. практически исчез, что обусловило необходимость освоения новых территорий. В XVI в. Золотоордынское ханство перестало существовать, но Казанское и Астраханское ханства, образовавшиеся в результате распада Золотой Орды, вторгались в русские земли. Согласно летописям, с 1521 по 1545 гг. казанские ханы совершили около сорока набегов, в основном близ Нижнего Новгорода, Вятки, Костромы, Галича и Мурома.

В 1552 г. Иваном Грозным был снаряжен большой поход на Казань. После 49-дневной осады городские стены были взорваны порохом, и в октябре 1552 г. Казань взяли штурмом. В 1556 г. Астрахань была взята без боя отрядом воеводы Ивана Черемисинова, после чего Астраханское ханство прекратило свое существование. Россия добила контроль над всем бассейном Волги и получила выход в Каспийское море. Победа Ивана IV над Казанским и Астраханским царствами привела к строительству нескольких городов – Самары (1586 г.), Саратова (1590 г.), Царицына (1589 г.). Россия получила возможность наладить торговые связи с Востоком.

**Торговля мехами, соболем с западноевропейскими странами была очень выгодным делом для русских купцов. Для промысла соболя потребовалось освоить земли за Уралом. Начало освоению этих территорий положили купцы Строгановы, которые в 1580 г. для добычи пушнины и покорения Сибири снарядили отряд атамана Ермака, численностью 300 человек казаков, оружием, боеприпасами, провиантом, лошадьми. В 1582 г. казаки, вооруженные пушками и ружьями, разбили десятитысячный отряд хана Кучума, вооруженный в основном холодным оружием [4].**

В последующие годы освоение Сибири продолжилось. Казаки продвигались в глубь территории по рекам, принимая присягу местных народов (ненцев, тунгусов, якутов, бурят и др.) на верность российскому царю. Эти народы вели в основном родоплеменной образ жизни. Казаки по пути оставляли остроги (казачьи заставы) в 20–30 человек, которые стали основой построенных впоследствии крепостей и городов, таких как Тюмень, Тобольск, Тара, Березов, Обдорск, Нерчинск, Якутск, Охотск. На казачьи заставы привозили из России крестьянок, некоторые казаки впоследствии вступали в брак с представительницами местных племен, и таким образом возникали поселения. За казаками следовали купцы с приказчиками, охотниками за ценным товаром – пушниной. Большая часть проживающих в Сибири народностей добровольно присягали российской короне, царю, некоторые приходилось подчинять силой оружия.

Жители русских поселений мирно соседствовали с присоединенными народами, с уважением относились к их религиозным и культурным традициям. Коренное население и поселенцы были равноправны, платили в государственную казну одинаковые налоги. **За время освоения Сибири, в период с 1580 по 1725 гг., численность коренного населения возросла в три раза, что объясняется толерантностью, терпимостью поселенцев к иному мировоззрению, образу жизни, поведению, обычаям.** За несколько десятилетий русские первопроходцы достигли Тихого океана, в несколько раз увеличив территорию России (рис. 4).

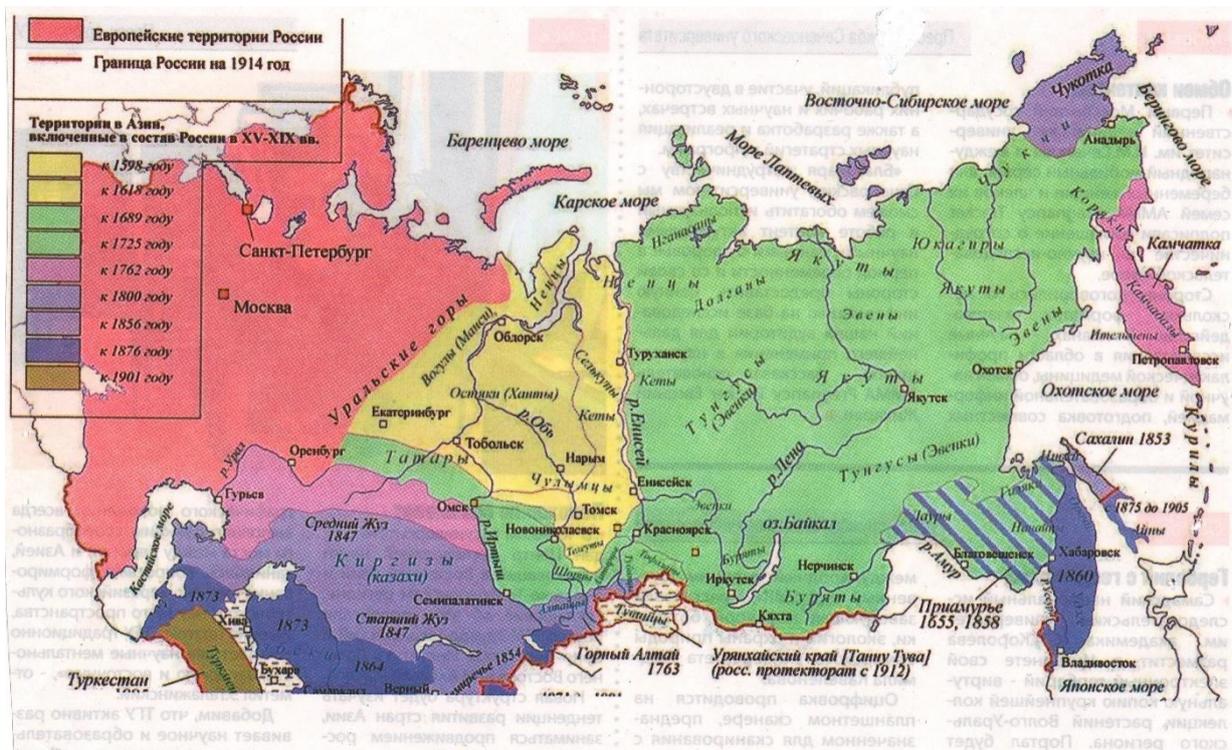


Рис. 4. Территории, включенные в состав России в XVI–XIX вв. [4] (масштаб по горизонтали меньше масштаба по вертикали)

В отличие от западноевропейских стран, которые выкачивали из колоний природные богатства, Россия обеспечивала развитие присоединенных земель, открывая школы, больницы, университеты. У местных народов развивались культура, письменность, на территории создавалась добывающая и перерабатывающая промышленность. Коренные народы были равноправны с населением европейской части страны. В настоящее время все присоединенные в XVI–XVII вв. к России восточные и северные территории и народы имеют такой же экономический, культурный потенциал, как территории и народы центральных, южных, западных областей страны.

## Библиографический список

1. Васнецов Аполлинарий Михайлович // Словари онлайн. URL: <https://slovaronline.com/browse/ecdef424-2788-3ff1-9914-5b7a9b4e216c/> васнецов-аполлинарий-михайлович (дата обращения: 30.10.2022).
2. Конец 18 века // artwall. URL: [https://www.artwall.ru/products/poster\\_41149?frame=31&material=canvas&size=43&subframe=thin](https://www.artwall.ru/products/poster_41149?frame=31&material=canvas&size=43&subframe=thin) (дата обращения: 30.10.2022).
3. Мудрость предков // GOLOS. URL: <https://golos.id/ru--mudrostx/@fon-b/mudrost-predkov> (дата обращения: 30.10.2022).
4. Территории, включенные в состав России в XVI–XIX веках // Поиск. 2021. № 24. С. 8.

### IMPACT OF UNIVERSITY EDUCATION ON RESOURCE CONSUMPTION IN RUSSIA. PART I. EDUCATION AND RESOURCE CONSUMPTION IN RUSSIA IN THE X–XVII CENTURIES

*A.N. Makarov*

***Abstract.** The article describes aspects of technological and educational development of Russia in the X–XVII centuries. The effect of the absence of a higher (university) education system on trade turnover with foreign countries is described. There is a significant cultural and technological influence of Russia on the lands being annexed within the framework of cultural and research expansion.*

***Keywords:** Russia, trade, furs, valuable sable, development of Siberia and the Far East.*

Об авторе:

МАКАРОВ Анатолий Николаевич – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники, Тверской государственной технической университет. E-mail: [tgtu\\_kafedra\\_ese@mail.ru](mailto:tgtu_kafedra_ese@mail.ru)

About the author:

MAKAROV Anatoly Nikolaevich – Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Electricity and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: [tgtu\\_kafedra\\_ese@mail.ru](mailto:tgtu_kafedra_ese@mail.ru)

## **ВЛИЯНИЕ УНИВЕРСИТЕТСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ НА РЕСУРСОПОТРЕБЛЕНИЕ В РОССИИ**

### **ЧАСТЬ II. ВЛИЯНИЕ ИМПЕРАТОРА ПЕТРА I ВЕЛИКОГО НА ОБРАЗОВАНИЕ, РЕСУРСОПОТРЕБЛЕНИЕ В РОССИИ**

*А.Н. Макаров, К.Б. Корнеев, Е.П. Алисова*

© Макаров А.Н., Корнеев К.Б., Алисова Е.П., 2023

***Аннотация.** В статье рассмотрено, какое влияние оказала деятельность императора Петра I на развитие образования в промышленности России. Указывается значительная роль Петра I в формировании системы высшего образования, промышленности, в освоении недр, развитии армии и городов.*

***Ключевые слова:** Петр I Великий, Россия, образовательная система, университеты, добыча полезных ископаемых.*

**В России до Петра I** образование было в основном домашнее и преобладали теологические дисциплины. Состоятельные граждане (чаще всего дворяне) приглашали для обучения своих детей иностранных, реже отечественных преподавателей. Для крестьянства, которое составляло подавляющее большинство населения страны, и для мещанства образование считалось роскошью, без которой можно обойтись. Приблизительно 10 % населения России основам письма и счета в объеме двух классов обучались в церковно-приходских школах. Первое учебное заведение высшего образования – Киево-Могилянская академия – открылось в 1632 г. В академии изучали славянский, латинский, греческий языки и семь «свободных искусств». В 1687 г. в Москве открыта Славяно-греко-латинская академия, которую окончили Л.Ф. Магницкий, В.К. Тредиаковский, М.В. Ломоносов. Ее программа была по большей части богословской.

В России не было национальной медицины и отечественных врачей. Представителей знати лечили немногочисленные врачи-иноземцы. На всю страну существовала одна-единственная царская аптека. Типографии печатали в основном церковные книги. Промышленность была представлена несколькими железоделательными заводами и ткацкими, писчебумажными, стекольными, соляными мануфактурами. Общее количество промышленных предприятий в то время составляло не более тридцати. Не существовало регулярной армии. Для Европы Россия того

времени была варварской страной, на нее смотрели как на будущую колонию [1–6].

**Колоссальное влияние на развитие образования в России оказал Петр I (рисунок).** В детстве Петр получил домашнее образование и в течение всей жизни пополнял знания, уделяя особое внимание изучению военного дела. Во время заграничной поездки 1697–1698 гг. Петр I прошел полный курс артиллерийских наук в Кенигсберге, освоил плотницкое ремесло на верфях Амстердама, изучил корабельную архитектуру и черчение, окончил теоретический курс кораблестроения в Англии. За границей Петр увидел, как люди, окончившие университеты, преобразуют жизнь в своих государствах. В западноевропейских странах интенсивно развивались техника, строительство, мореплавание, торговля. Петр понимал, что Россия сильно отстает в техническом и научном отношении и что именно недостаток образованных людей сдерживает ее развитие. Посетив Англию, Голландию и другие страны, он убедился в колоссальной разнице между Европой и Россией и сделал два вывода:

1. Россия не сможет сохранить независимость, если не ликвидирует этот разрыв.

2. Развитие промышленности и торговли напрямую зависит от уровня образования, науки, культуры.



Император России Петр I Великий [7]

**По возвращении на Родину Петр I создал массовую образовательную систему, так как русской промышленности, армии, флоту нужно было множество образованных людей для развития техники, энергетики, строительства кораблей, крепостей. 14 января 1701 г. он учреждает первое русское государственное светское учебное заведение – Московскую математико-навигационную школу. В соответствии с его указом 1714 г. в губернских городах создаются цифирные школы, которые находились под патронажем государства, открываются горные училища, военные и технические школы, издается научная и учебная литература. В 1724 г. была образована Академия наук и художеств и первый российский университет. В 1755 г. основан Императорский Московский университет, в 1812 г. – Казанский университет. В период с 1825 по 1845 гг. открылись еще пятнадцать новых университетов.**

Увеличение количества образованных людей при Петре Великом обеспечило возникновение большого количества мануфактур и горных предприятий, положило начало освоению новых железорудных месторождений на Урале, в Олонецком крае, Липецке, добыче цветных металлов (меди, серебра). В царствование Петра I Россия преодолела отсталость от передовых стран Запада и научилась использовать огромные природные ресурсы на благо страны. Промышленность развивалась быстрыми темпами. Так, за 25 лет количество мануфактур возросло и к 1725 году количество мануфактур с двадцати-тридцати увеличилось до двухсот. По выплавке металла страна вышла на первое место в мире. Петром I Великим были созданы крупнейшая в мире регулярная армия, флот; установлены дипломатические и торговые связи; заложены новые города, прорыты каналы. Россия вошла в сообщество европейских государств и стала одной из держав, решающих судьбу континента. **Это показывает, как много может значить государственная воля в развитии страны и какую роль в развитии играют образование, наука.** Согласно переписи 1897 г., 23 % населения было грамотно. К этому времени страна имела 65 государственных высших учебных заведений, в которых учились 71 380 человек, и 54 общественных и частных университета, где обучались 52 150 студентов. Начальное образование получали десять миллионов человек.

По методике обучения и аттестации университеты дореволюционной России были близки к западноевропейским. Степень бакалавра присваивалась после сдачи экзаменов и защиты выпускной работы. Степень магистра существовала на всех факультетах российских университетов, кроме медицинского, и присуждалась по итогам публичной защиты диссертации. Наряду с университетами, выпускавшими бакалавров

и магистров, в России существовали и учебные заведения, которые готовили инженеров, – институты инженеров путей сообщения, гражданских инженеров, горных инженеров.

**После революции 1917 г. система высшего образования была перестроена** в соответствии с декретом от 2 сентября 1921 г., утвердившим новое положение о высших учебных заведениях в РСФСР. Помимо упразднения привилегированных сословий (дворянства, духовенства, купечества), были упразднены и ученые степени бакалавра и магистра. Однако университетам и институтам была оставлена возможность обучать и аттестовывать студентов, обучающихся на квалификации специалиста, инженера. С указанной функцией вузы успешно справлялись на протяжении всего XX в.

**В настоящее время в связи с включением РФ в Болонский процесс в российских университетах восстановлено обучение и аттестация выпускников на ученые степени бакалавра и магистра.** У двухуровневой системы образования в России есть как сторонники, так и противники. Последние считают бакалавра «недоучкой» с неполным набором знаний и недостаточной квалификацией. Данное мнение следует считать заблуждением: знание бакалаврами естественнонаучных и профессиональных дисциплин характеризуется полнотой и достаточностью, бакалавр способен эффективно вести свою деятельность как лицо с высшим профессиональным образованием [1–5]. **В настоящее время квалификация бакалавра, обучающегося четыре года, не ниже квалификации инженера, который обучается пять лет.** Бакалавр изучает все специальные и профессиональные дисциплины, которые изучает инженер, обучаясь на специалитете, и выполняет выпускную работу в том же объеме, что и студенты, аттестуемые на квалификацию инженера. Этого удалось достичь за счет сокращения в учебном плане бакалавров объема некоторых гуманитарных и социально-экономических, а также ряда разделов естественнонаучных дисциплин при сохранении всего блока профессиональных и специальных дисциплин подготовки инженеров. При этом условии профессиональная подготовка бакалавров не уступает профессиональной подготовке инженеров, что обеспечивает конкурентоспособность всех отраслей промышленности и энергетики. Совершенно очевидно, что необходимо создать общественную аттестационную организацию на звание профессионального инженера, и базисная основа в России для этого есть. Российские университеты готовят магистров с более высокой квалификацией для решения не только эксплуатационных и проектных задач, выполняемых инженерами, но и проектно-конструкторских, научно-исследовательских задач и преподавания в вузах и колледжах.

**Как показывает анализ истории высшего образования и науки, университеты неизменно и всегда, в том числе в настоящее время и в**

**будущие времена, определяют техническое, технологическое, цивилизационное развитие любой страны, так как их научно-педагогический состав готовит высококвалифицированные кадры для всех отраслей хозяйственно-экономической деятельности и проводит фундаментальные и прикладные научные исследования.** Страны Западной Европы, в которых возникли первые университеты тысячу лет назад, по сей день являются лидерами в техническом, технологическом, цивилизационном развитии во всем мире. Для занятия лидирующей позиции любой стране необходимы первоочередное финансирование университетов и высокая бюджетная оплата труда научно-педагогического состава.

**В этом случае на преподавательские должности в университеты будут идти лучшие, наиболее умные и талантливые выпускники университетов, которые обеспечат подготовку высококвалифицированных специалистов для страны, что позволит России стать мировым лидером. При низкой оплате труда на преподавательские должности в университеты нередко идут выпускники со средними знаниями и способностями, они будут готовить низкоквалифицированных, малоспособных специалистов и хозяйственно-экономическая деятельность страны может обвалиться, а страна окажется на обочине прогресса.**

### **Библиографический список**

1. Панарина Е.А. Вузовские ученые готовы взять на себя стратегическую ответственность // Поиск. 2008. № 50. С. 8–9.
2. Большая Оксфордская энциклопедия / пер. с англ. А.И. Кима, У.В. Санциной, Т.В. Сафроновой и др. М.: Росмэн, 2007. 661 с.
3. Макаров А.Н. Энергетическое образование в России в 1991–2008 годах и в условиях мирового экономического кризиса // Академия Энергетики. 2009. № 2. С. 30–34.
4. Макаров А.Н. Учесть неучтенное. Не так страшно положение российской науки, как малюют его некоторые эксперты // Поиск. 2010. № 18. С. 9–10.
5. Макаров А.Н. Кувалда не тонет? Промышленники предпочитают обходиться устаревшими технологиями и оборудованием // Поиск. 2011. № 6. С. 17–18.
6. Аптекарское средневековье: что представляла собой европейская фармация в X–XVII веках // Медисорб. URL: <https://www.medisorl.ru/blog/articles/aptekarское-srednevekovе-что-prodstavlyala-sobojj-evropeiskaya-farmaciya> (дата обращения: 15.08.2022).
7. Первый Император Всероссийский Петр I Великий // DZEN. URL: [https://dzen.ru/a/ZIKxK2CU\\_1XojpHf](https://dzen.ru/a/ZIKxK2CU_1XojpHf) (дата обращения: 25.11.2022).

# IMPACT OF UNIVERSITY EDUCATION ON RESOURCE CONSUMPTION IN RUSSIA. PART II. THE IMPACT OF EMPEROR PETER I THE GREAT ON EDUCATION AND RESOURCE CONSUMPTION IN RUSSIA

*A.N. Makarov, K.B. Korneev, E.P. Alisova*

**Abstract.** *The article examines the impact of the activities of Emperor Peter I on the development of education and industry in Russia. The significant role of Peter I in the formation of the system of higher education, industry, in the development of mineral resources, the development of the army and cities is indicated.*

**Keywords:** *Peter I the Great, Russia, educational system, universities, mining.*

Об авторах:

МАКАРОВ Анатолий Николаевич – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

КОРНЕЕВ Константин Борисович – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: Energy-tver@mail.ru

АЛИСОВА Екатерина Петровна – студентка кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

About the authors:

MAKAROV Anatoly Nikolaevich – Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Electricity and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

KORNEEV Konstantin Borisovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electricity and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: Energy-tver@mail.ru

ALISOVA Ekaterina Petrovna – student of the Department of Electricity and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

## ВЛИЯНИЕ УНИВЕРСИТЕТОВ НА РАЗВИТИЕ ЧЕЛОВЕЧЕСТВА И ЭНЕРГОРЕСУРСОПОТРЕБЛЕНИЕ В МИРЕ

*А.Н. Макаров*

© Макаров А.Н., 2023

*Аннотация.* Проанализировано влияние фундаментальных законов физики, открытых в университетах, на создание механизмов, машин, технологий, веществ, индустриализацию промышленно-развитых стран, потребление топливно-энергетических ресурсов, рост продолжительности жизни и увеличение численности населения Земли.

*Ключевые слова:* университеты, индустриализация, топливно-энергетические ресурсы, продолжительность жизни, население Земли.

На основании фундаментальных законов физики в середине XIX в. были созданы паровые машины, пароходы, паровозы, а в конце XIX – начале XX вв. произошла индустриализация общества, что выразилось в ускоренном создании новых устройств, механизмов, машин, технологий. На основе открытых фундаментальных законов физики в области электричества были разработаны теории и методики расчетов электрических машин, трансформаторов, линий электропередач, электрических аппаратов, осуществлена электрификация промышленности, сельского хозяйства, быта. Открытие фундаментальных законов физики в области теплоты стало основой для разработки теорий и методик расчета двигателей внутреннего сгорания, паровых котлов, паровых и газовых турбин, холодильных установок, создания автомобильного транспорта, тракторов, комбайнов, бытовых и промышленных холодильных установок, развития авиации. Научные исследования становятся массовым явлением. В Советском Союзе в XX в. массово открывались школы, университеты, научно-исследовательские институты. Фундаментальными исследованиями в университетах и академических институтах занимались около 500 тысяч человек, прикладные НИР в 6 тысяч отраслевых НИИ проводили свыше шестнадцати миллионов человек. **На основе 36 фундаментальных законов физики за были разработаны тысячи теорий, десятки тысяч методик расчета машин, механизмов, устройств, технологий, веществ. Появились такие научные и технические направления, как машиностроение, энергетика, автоматическое управление, физическая химия, техническая химия, конструкционные материалы, генетика, биология, биотехнология, геофизика, океанология, горные науки, ядерная физика,**

информационные технологии, микропроцессорное управление [1–6]. За последние сто лет наука дала 90 % знаний, полученных за все время существования человечества (рис. 1).

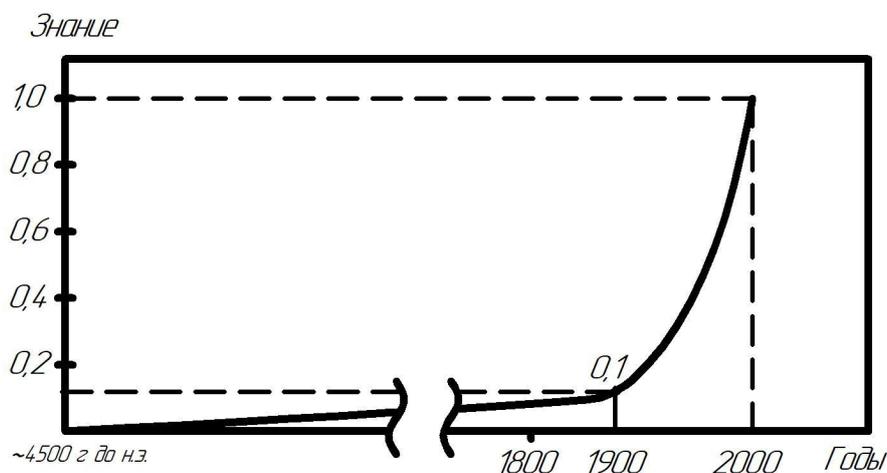


Рис. 1. Развитие науки, знания за шесть с половиной тысяч лет истории человечества [7]

На основе фундаментальных законов физики разработаны техника и технологии для добычи топливно-энергетических ресурсов (угля, нефти, газа и др.) [7–15]. До начала XIX в. человечество использовало для выполнения работ преимущественно мускульную энергию животных, энергию ветра, падающей воды. В 1850 г. 90 % топливно-энергетического баланса мира составляла древесина и 10 % уголь. В 2000 г. топливно-энергетический баланс включал в себя уголь (27 %); нефть (40 %); газ (23 %); энергию АЭС и ГЭС (10 %). Потребление топливно-энергетических ресурсов человечеством за последние полвека увеличилось в двадцать раз (рис. 2).

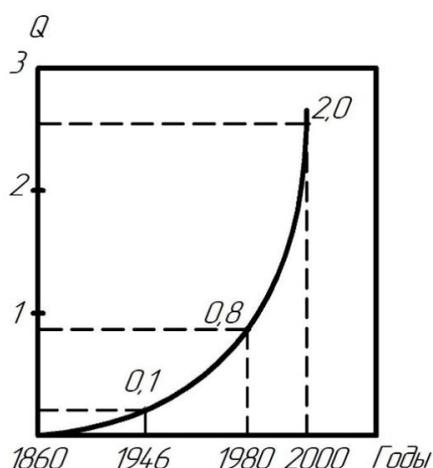


Рис. 2. Потребление топливно-энергетических ресурсов человечеством (угля, нефти, газа и др.:  $1Q = 300\,000$  млрд кВт·ч энергии) [7]

Оптимальное энергопотребление на душу населения линейно возрастает с убыванием среднегодовой температуры воздуха. В высокоширотных северных странах затраты энергии на отопление жилых, коммунальных и производственных зданий достигают 40–50 % от общего энергопотребления. Например, в Исландии, где среднегодовая температура составляет +1 °С, на каждого жителя приходится 9 т условного топлива (у. т.) в год; на Мальте, при среднегодовой температуре +18,5 °С, потребление составляет 2,5 т у. т. в год на человека. Потребление энергии на душу населения возросло за последнее столетие в пять раз, что наряду с сокращением продолжительности рабочего времени, улучшением питания и медицинского обслуживания привело к существенному увеличению средней продолжительности жизни в передовых странах (рис. 3).

*Прод. жизни, лет*

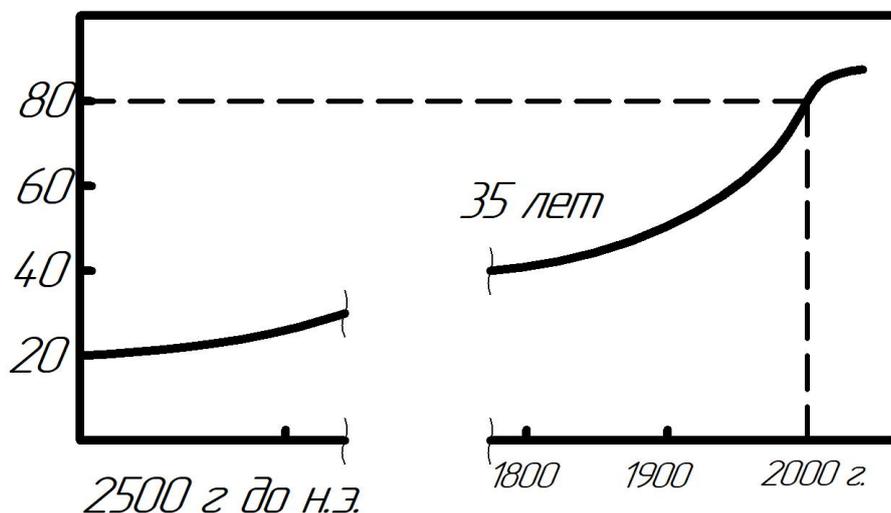


Рис. 3. Изменение средней продолжительности жизни человека [7]

Около половины потребляемых топливно-энергетических ресурсов в развитых странах приходится на выработку электроэнергии, благодаря чему в период с 1900 по 2000 гг. были достигнуты следующие результаты [16, 17]:

электрическое освещение вдвое увеличило время активной суточной деятельности человека, изменило его быт за счет увеличения времени на образование, досуг;

использование лифтов и освещения изменило облик городов, увеличило этажность застройки и способствовало урбанизации общества;

электропривод изменил характер производства, сделал его более компактным, значительно сократил долю тяжелого ручного труда, создал условия и позволил реализовать автоматизацию производства;

электротранспорт (электрички, троллейбусы, трамваи, метро и пр.) обеспечил возможность ежедневных массовых перемещений людей, что позволило не привязывать место работы к месту проживания; кроме того, этот вид транспорта более экологичен по сравнению с другими;

радио, телевидение, телефон, интернет обеспечили возможность оперативного обмена информацией;

холодильные промышленные установки позволили сохранять большие объемы свежей пищевой продукции (овощи, фрукты, мясо, рыбу и др.) и поставлять населению свежие продукты без консервации (засолки, закваски, копчения, варенья, вяления) в течение года от прошлого до свежего урожая, что значительно улучшило качество питания, снизило потребление соли, сахара, канцерогенов, вызывающих ряд заболеваний людей (гипертонию, сахарный диабет, рак, инфаркт, инсульт и др.) и увеличить продолжительность жизни;

круглогодичное выращивание овощей, ягод в промышленных теплицах с вертикальным расположением стеллажей-грядок позволило обеспечить население всех климатических зон, в том числе северных, в течение года свежими овощами, ягодами.

Средняя продолжительность жизни вследствие роста потребления энергии на душу населения, улучшения питания, медицинского обслуживания, санитарно-медицинского просвещения в развитых странах за последнее столетие увеличилась с 50 до 78 лет (см. рис. 3). В результате значительного улучшения качества жизни население Земли за этот период увеличилось в четыре раза – с двух до восьми миллиардов человек (рис. 4).

В средние века, например в конце XVI в., население России составляло семь миллионов, Англии – пять миллионов человек, аналогичное количество населения было во Франции, Италии, на территории Германии и других западноевропейских стран. Как до нашей эры, так и в средние века население Земли росло медленно вследствие недостаточного питания, отсутствия санитарного просвещения, эпидемий. Например, в 1348–1350 гг. от бубонной чумы в Европе погибло двадцать миллионов человек. Чуму лечили сушеными травами. В Италии, Флоренции и других странах эпидемия охватила подавляющее большинство населения. Урожай не убирали, не следили за домашним скотом. В домах царила антисанитария. Люди считали, что наступил конец света. Мораль пришла в упадок, суды не работали. В Венеции и Флоренции население вследствие эпидемии сократилось вдвое, в Милане двери в жилищах зараженных заколачивали, чтобы не выпускать их на улицу.

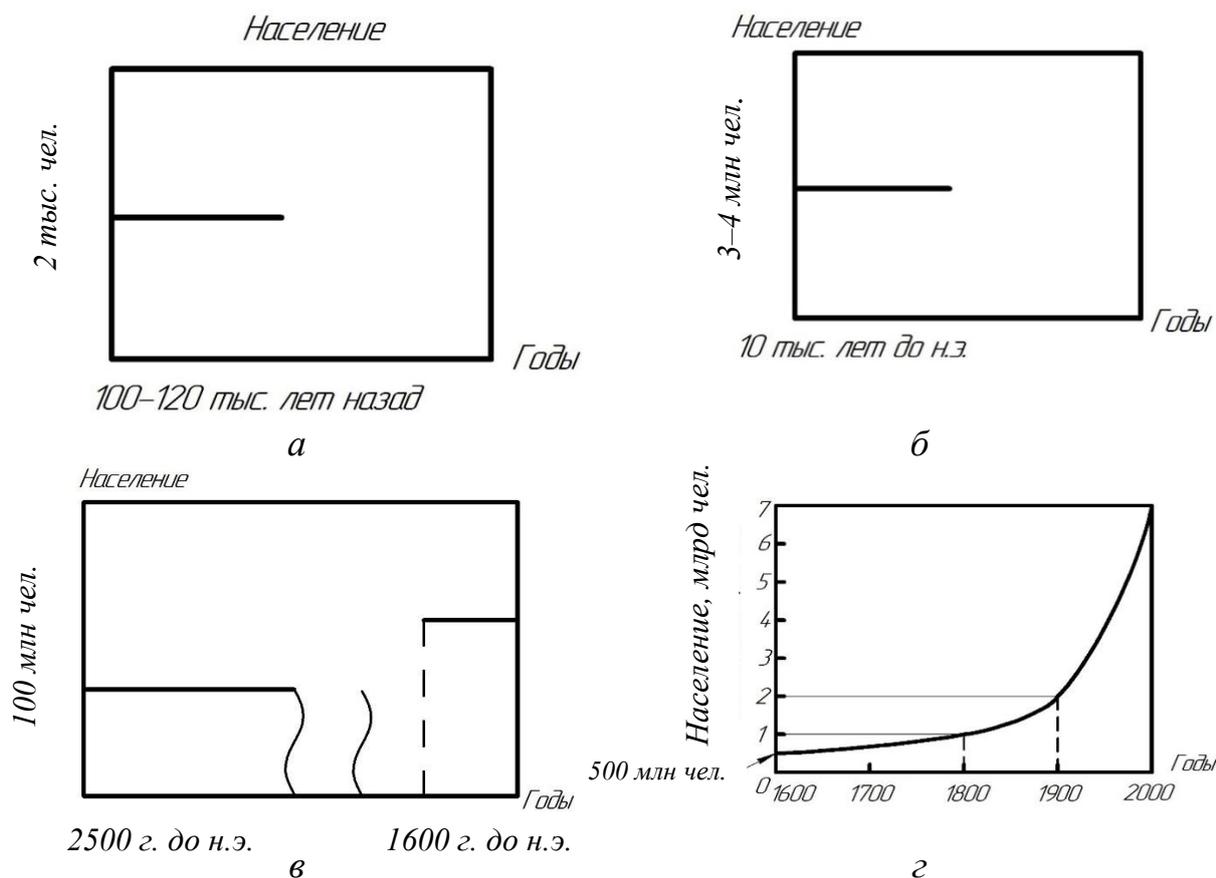


Рис. 4. Изменение численности населения Земли во времени: 100–120 тысяч лет назад (а); 10 тысяч лет до н. э. (б); 2500 год до н. э. – 1600 г. н. э. (в); 1600–2000 гг. (г) [7]

Бубонная чума пронеслась по всей Европе. Большинство населения Европы считали чуму Божьей карой за грехи. Папа Римский объявил крестный ход, но это не помогло остановить эпидемию. В Европе умерло 113 кардиналов. Флаггеланты хлестали себя плетью с гвоздями, истязая до крови, прося Бога отпустить грехи. Однако через несколько месяцев французский Авиньон, где находилась резиденция Папы Римского, превратился в город-призрак. Папа призвал на помощь Дошелиака – известного врача с докторской степенью, который рекомендовал ему покинуть зараженных, есть и пить умеренно. Папа Римский выжил. Через два года чума пошла на спад и люди стали искать виновных в пандемии. В заговоре против христиан безосновательно обвинили евреев, поскольку они часто были кредиторами, держателями кредитных контор. Евреям предъявили обвинение в отравлении колодезь, и многие из них были сожжены на кострах. По Франции, Германии, Италии прокатилась волна еврейских погромов.

Летом 1348 г. чума пришла в Англию. Большая часть населения (90 %) занималась земледелием, отдавая значительную часть получаемой продукции землевладельцам в виде налога. Поэтому большинство крестьян нищенствовали. Чума уничтожила половину населения Англии. Многие лорды остались без прислуги. Ввиду дефицита рабочей силы феодальные устои обрушились. «Черная смерть» подтолкнула Англию к прогрессу. Английские крестьяне добивались свободного, не крепостного, найма, и землевладельцы вынуждены были согласиться с их требованиями. Так крестьяне становились наемными работниками. Ввиду дефицита рабочей силы, возникшего вследствие пандемии чумы, собственники земли при найме вынуждены были вдвое увеличить зарплату батраков. Чума периодически, через 10–20 лет, возвращалась в Европу, но вследствие приобретенного населением иммунитета уже не имела таких катастрофических потерь.

### **Библиографический список**

1. Макаров А.Н. Перекройка с переводом. Профессиональное образование нужно начинать со школы // Поиск. 2008. № 1–2. С. 7–8.
2. Панарина Е.А. Вузовские ученые готовы взять на себя стратегическую ответственность // Поиск. 2008. № 50. С. 8–9.
3. Большая Оксфордская энциклопедия / пер. с англ. А.И. Кима, У.В. Санциной, Т.В. Сафроновой и др. М.: Росмэн, 2007. 661 с.
4. Макаров А.Н. Энергетическое образование в России в 1991–2008 годах и в условиях мирового экономического кризиса // Академия Энергетики. 2009. № 2. С. 30–34.
5. Макаров А.Н. Ученье неучтенное. Не так страшно положение российской науки, как малюют его некоторые эксперты // Поиск. 2010. № 18. С. 9–10.
6. Макаров А.Н. Кувалда не тонет? Промышленники предпочитают обходиться устаревшими технологиями и оборудованием // Поиск. 2011. № 6. С. 17–18.
7. Капица С.П. Сколько людей жило, живет и будет жить на Земле. Очерк теории роста человечества. М.: Наука, 1999. 256 с.
8. Макаров А.Н. Научно-технологическая безопасность России в начале XXI века // Академия Энергетики. 2010. № 2. С. 18–22.
9. Варшавский А. Потрачено с умом. Результативность научного труда в России выше, чем в Америке // Поиск. 2009. № 21. С. 14.
10. Рогов С. Альтернатива примитиву // Поиск. 2010. № 12. С. 6–7.
11. Гладкова Н. Под грузом вузов. Систему профобразования перекосило // Поиск. 2010. № 36. С. 3.

12. Боровская Н. Кредит – пропуск в вуз // Поиск. 2007. № 34–35. С. 16.
13. Попасть в сотню! Минобрнауки планирует поменять всю систему высшего образования // Поиск. 2010. № 40. С. 4.
14. Старт к стандартам. Техническое образование берет курс на международные нормы // Поиск. 2010. № 41. С. 12.
15. Макаров А.Н. Наука и образование в модернизации промышленного комплекса // Академия Энергетики. 2011. № 2. С. 40–46.
16. Макаров А.Н. Анализ эффективности энергомашиностроительных компаний // Академия Энергетики. 2012. № 2. С. 82–89.
17. Макаров А.Н. НИР и сопровождение энергомашиностроительной продукции // Академия Энергетики. 2013. № 3. С. 72–78.

## **IMPACT OF UNIVERSITIES ON HUMAN DEVELOPMENT AND ENERGY CONSUMPTION IN THE WORLD**

*A.N. Makarov*

***Abstract.** The influence of the fundamental laws of physics discovered at universities on the creation of mechanisms, machines, technologies, substances, the industrialization of industrially developed countries, the consumption of fuel and energy resources, the increase in life expectancy and the increase in the population of the Earth is analyzed.*

***Keywords:** universities, industrialization, fuel and energy resources, life expectancy, population of the Earth.*

Об авторе:

МАКАРОВ Анатолий Николаевич – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: [tgtu\\_kafedra\\_ese@mail.ru](mailto:tgtu_kafedra_ese@mail.ru)

About the author:

MAKAROV Anatoly Nikolaevich – Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Electricity and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: [tgtu\\_kafedra\\_ese@mail.ru](mailto:tgtu_kafedra_ese@mail.ru)

## РАЗДЕЛ 2. ТЕПЛООБМЕН И ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ

УДК 669.187:621.186

### ТЕПЛООБМЕН В ВЫСОКОМОЩНЫХ СТОТОННЫХ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧАХ

*А.Н. Макаров, А.В. Крупнов, Ю.М. Павлова*

© Макаров А.Н., Крупнов А.В.,  
Павлова Ю.М., 2023

*Аннотация.* Изложены результаты расчета теплообмена в высокомошной дуговой сталеплавильной печи ДСП-100. Получена зависимость тепловых потоков от заглубления дуг в шлак. Рассмотрено влияние запыленности атмосферы печи на тепловые потоки.

*Ключевые слова:* электрическая дуга, печь, сталь, теплообмен, тепловое излучение, коэффициент полезного действия.

Основными сталеплавильными агрегатами в металлургических компаниях являются дуговые сталеплавильные печи (ДСП) и кислородные конвертеры. Для анализа взаимосвязи теплообмена, высоты слоя шлака, длины дуг, КПД дуг и удельного расхода электроэнергии рассчитали распределение потоков тепловых излучений дуг длиной 425 мм по высоте стен при различном заглублении дуг. Результаты экспериментальных исследований тепловых нагрузок на своды печей приведены в работах [1–3]. В издании [2] исследовано влияние высоты слоя шлака на КПД дуг, а также распределение плотностей потоков тепловых излучений дуг по поверхности стен ДСП в зависимости от высоты слоя шлака. Однако в работе [2] отсутствуют результаты расчетов распределения плотностей потоков тепловых излучений дуг длиной 425 мм по поверхности стен ДСП-100 при полном погружении дуг в ванну металла и шлак, то есть при  $h_3 = 425$  мм. Выполним данные расчеты.

Параметры высокомошной ДСП-100 и ее дуг приведены в статье [1]. На рис. 1 отражены построения, необходимые для расчетов плотностей потоков тепловых излучений дуг на водоохлаждаемые панели стен печи.

Построения осуществляются в масштабе, расчеты выполнены в программах AutoCAD и Excel.

Условные обозначения, используемые на рис. 1:

0–5 – расчетные площадки на поверхности стен, расположенные напротив дуг;

$N_1, N_2$  – перпендикуляры соответственно к оси дуги и расчетной площадке;

$l_{д}, l_{отк}$  – длина дуги и открытой ее части соответственно, м;

$\alpha, \beta$  – углы между лучом  $r$  – кратчайшим расстоянием от расчетной площадки до середины открытой части дуги, и перпендикулярами  $N_2$  и  $N_1$ , град.;

$O_1O_2, O_3O_4$  – оси электрода и печи соответственно.

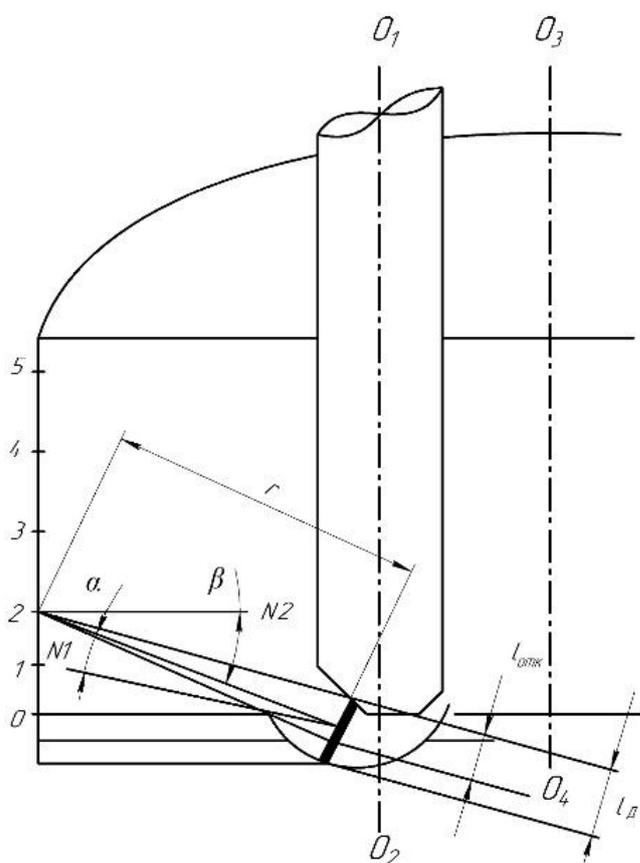


Рис. 1. Схема для расчета потоков тепловых излучений дуг на стены ДСП

Плотность потока теплового излучения каждой из трех дуг, падающего на расчетную площадку на поверхности стен печи, определяли по первому закону теплового излучения газовых объемов дуг [1, 2]:

$$q = \frac{\epsilon_{ДФ} P_{д}}{F e^{kr}} = \frac{\epsilon_{ст} P_{д} \cos\beta \cos\gamma l_{отк}}{p^2 r^2 l_{д}} e^{-kr},$$

где  $\alpha_{ДФ}$  – определяемый по таблицам [2] локальный угловой коэффициент излучения электрической дуги на расчетную площадку площадью  $F$ ;  $b_{ст} = 0,92$  [3];  $P_d$  – мощность дуги,  $P_d = 18$  МВт;  $k$  – коэффициент поглощения пылегазовой атмосферы печи,  $k = 0,7$  [2].

Результаты расчета распределения плотностей потоков тепловых излучений от трех дуг по высоте стен печи по участкам, расположенным напротив дуг, для прозрачной и поглощающей атмосферы печи представлены на рис. 2. Графики характеризуют распределение по высоте стен плотностей потоков тепловых излучений дуг длиной 425 мм, заглубленных в жидкий металл и шлак на высоту 70, 160, 300 и 425 мм. Как видно из рис. 2а, с ростом заглубления дуг в шлак максимальные потоки теплового излучения дуг на участки стен, расположенные на высоте 0,5 м, уменьшаются с 650 кВт/м<sup>2</sup> при  $h_3 = 70$  мм до 262 кВт/м<sup>2</sup> при  $h_3 = 425$  мм в лучепрозрачной среде и с 165 кВт/м<sup>2</sup> при  $h_3 = 70$  мм до 63 кВт/м<sup>2</sup> при  $h_3 = 425$  мм в поглощающей среде, то есть уменьшаются в 2,5–2,6 раза.

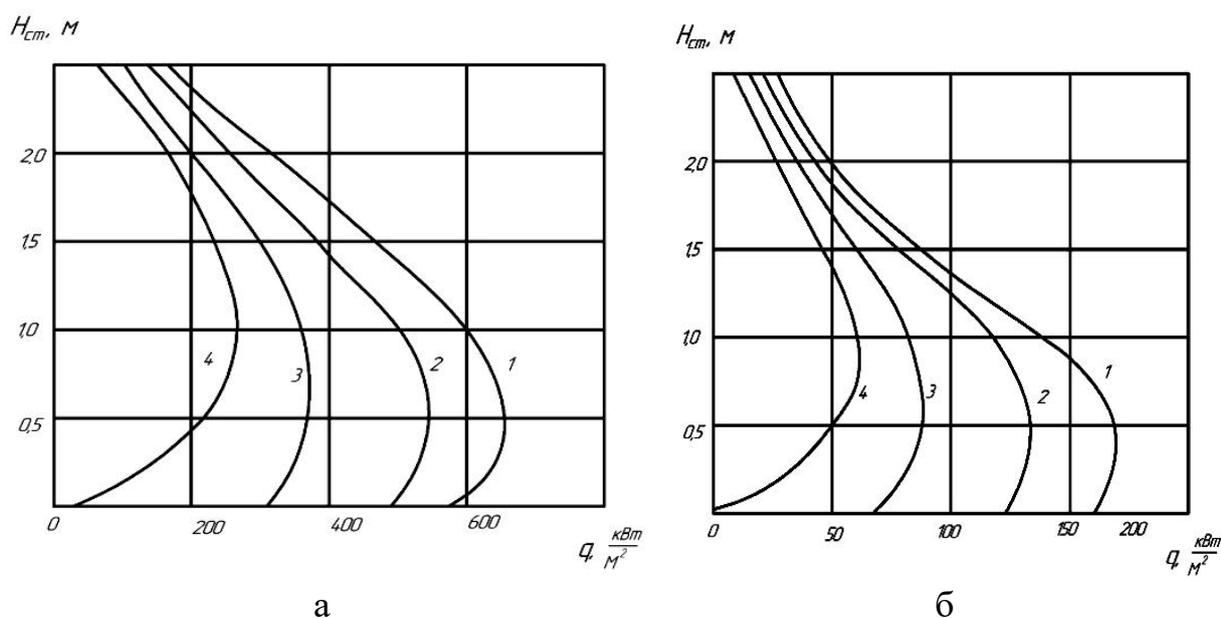


Рис. 2. Распределение плотностей потоков тепловых излучений дуг по высоте стен печи по участкам стен, расположенным напротив дуг:  $l_d = 425$  мм при  $h_3 = 70$  мм (1);  $h_3 = 160$  мм (2);  $h_3 = 300$  мм (3);  $h_3 = 425$  мм (4); прозрачная (а) и поглощающая (б) атмосферы печи

Чем выше расположены расчетные площадки на поверхности стен, тем меньше плотность потоков тепловых излучений дуг на площадки. Плотность тепловых потоков излучений дуг при их незначительном

заглублении, составляющем 70 мм (кривая 1, см. рис. 2а), на высоте 0,5 м равна 650 кВт/м<sup>2</sup>, а на высоте 2,5 м, под сводом, составляет 175 кВт/м<sup>2</sup>, то есть в 3,7 раза меньше. Такая разница плотностей тепловых потоков излучений дуг в нижней и верхней частях стен объясняется тем, что, например, расстояние  $r$  от дуг, расположенных напротив стен, возрастает для площадок на высотах 0,5 и 2,5 м соответственно с 1,9 до 2,8 м, то есть в 1,5 раза, а плотность потоков тепловых излучений дуг, рассчитанная по приведенной выше формуле, уменьшается пропорционально квадрату расстояния  $r$ , то есть в 2,25 раза. Кроме того, для расчетной площадки 5 (см. рис. 1) увеличиваются углы  $\alpha$  и  $\beta$ , а косинусы углов уменьшаются в 1,45 раза, что приводит к суммарному снижению плотностей потоков тепловых излучений от трех дуг на стены на высоте 2,5 м в 3,7 раза по сравнению с тепловыми потоками на высоте 0,5 м.

При заглублении дуг длиной 425 мм в ванну и шлак максимальная плотность потоков тепловых излучений дуг на высоте 0,5 м снижается с 650 кВт/м<sup>2</sup> при  $h_3 = 70$  мм до следующих значений: 545 кВт/м<sup>2</sup> при  $h_3 = 160$  мм; 370 кВт/м<sup>2</sup> при  $h_3 = 300$  мм; 208 кВт/м<sup>2</sup> при  $h_3 = 425$  мм (см. рис. 2а). На высоте стен 2,5 м плотность потоков тепловых излучений дуг снижается с 175 кВт/м<sup>2</sup> при  $h_3 = 70$  мм до 153 кВт/м<sup>2</sup> при  $h_3 = 160$  мм; 98 кВт/м<sup>2</sup> при  $h_3 = 300$  мм и 56 кВт/м<sup>2</sup> при  $h_3 = 425$  мм. Таким образом, при полном заглублении дуг в ванну и шлак плотность потоков тепловых излучений дуг уменьшается приблизительно в три раза по всей высоте стен по сравнению с незначительным заглублением дуг или отсутствием такого заглубления.

Прозрачная атмосфера с коэффициентом поглощения, близким к нулю, и вышечисленные тепловые нагрузки на водоохлаждаемые панели стен могут существовать в печи кратковременно при отключенных инжекторах для вдувания углеродосодержащего порошка и отсутствии продувки ванны металла кислородом. Подавляющую часть времени плавки после расплавления основной массы шихты в печи работают инжектор для вспенивания шлака, рафинировочные кислородные горелки для продувки ванны металла кислородом и поддерживается лучепоглощающая атмосфера. В поглощающей атмосфере максимальные тепловые нагрузки на водоохлаждаемые панели стен на высоте 0,5 м составляют (см. рис. 2б): 165 кВт/м<sup>2</sup> при  $h_3 = 70$  мм; 137 кВт/м<sup>2</sup> при  $h_3 = 160$  мм; 86 кВт/м<sup>2</sup> при  $h_3 = 300$  мм и 51 кВт/м<sup>2</sup> при  $h_3 = 425$  мм.

Тепловые нагрузки на водоохлаждаемые панели в поглощающей атмосфере печи (см. рис. 2б) снижаются по высоте стен и составляют на высоте 2,5 м: 25 кВт/м<sup>2</sup> при  $h_3 = 70$  мм; 17 кВт/м<sup>2</sup> при  $h_3 = 160$  мм; 11 кВт/м<sup>2</sup> при  $h_3 = 300$  мм; 6 кВт/м<sup>2</sup> при  $h_3 = 425$  мм. Из сравнения графиков 1–4 (см. рис. 2а и рис. 2б) следует, что максимальные тепловые

нагрузки на высоте 0,5 м стен уменьшаются в поглощающей атмосфере печи в 4–4,3 раза по сравнению с прозрачной атмосферой. Аналогичные данные получены при экспериментальном исследовании тепловых нагрузок на водоохлаждаемые свод [3] и стены [4] дуговой сталеплавильной печи ДСП-100. В случае лучепрозрачной среды тепловые нагрузки на свод составляют 350–534 кВт/м<sup>2</sup>, при максимальной запыленности тепловые потоки снижаются в 4–4,5 раза до 80–115 кВт/м<sup>2</sup> [3]. Таким образом, расчетные и экспериментальные данные по изменению тепловых нагрузок на водоохлаждаемые панели стен и свода при переходе от лучепрозрачной к запыленной атмосфере печи совпадают. Плотности потоков тепловых излучений на своде увеличиваются неравномерно: с 100–180 кВт/м<sup>2</sup> на периферии, у стен, до 400–550 кВт/м<sup>2</sup> у электродных отверстий в лучепрозрачной среде и с 25–45 кВт/м<sup>2</sup> на периферии до 100–140 кВт/м<sup>2</sup> у электродных отверстий в поглощающей среде вследствие значительного теплового излучения трех электродов на свод печи [5–9].

При полном погружении в шлак дуги в расчетную точку «0» на поверхности стен практически не излучают [2]. Результаты выполненных расчетов, а также расчетов [1] подтверждают, что с ростом заглубления дуг в шлак происходит перераспределение теплового излучения дуг с поверхностей стен, свода на поверхности ванны и шарового сегмента, образуемого в ванне электродинамическими силами дуг [1]. При полном погружении дуг в шлак тепловое излучение дуг на стены и свод не превышает 20 % суммарного теплового излучения дуг, при этом большая часть теплового излучения попадает на поверхности шаровых сегментов, увеличивая КПД дуг до 80 % [2]. Тепловые потоки излучения дуг, падающие на поверхности шаровых сегментов в жидком металле и шлаке, преобразуются в шаровых сегментах в тепловые потоки конвективные и теплопроводности. Из шаровых сегментов в ванну металла и шлак тепло передается интенсивной конвекцией и теплопроводностью соседним слоям жидкого металла и шлака, в том числе слоям, расположенным на откосах печи. Под действием электродинамических сил дуг жидкий металл и шлак выбрасывается из шаровых сегментов на большое расстояние, иногда до откосов стен напротив дуг. Под действием архимедовой гидростатической подъемной силы новые слои жидкого металла и шлака занимают место в шаровых сегментах, процесс их перемещения, перемешивания повторяется. Под действием электродинамической и гидростатической подъемной сил процесс конвективного теплообмена в ванне интенсифицируется, что приводит к ускорению расплавления шихты на откосах и выравниванию температуры металла по объему ванны.

При работе высокомошной печи на коротких дугах длиной 250 мм имеется значительная неравномерность распределения плотностей потоков

тепловых излучений дуг по ванне: тепловые потоки на участки ванны, расположенные напротив дуг, в 6–74 раз превышают тепловые потоки на участки, расположенные между дугами. Такое распределение плотностей потоков тепловых излучений дуг ускоряет расплавление шихты на откосах напротив дуг и замедляет расплавление шихты, находящейся на откосах между дугами.

Расчетами распределения плотностей потоков тепловых излучений дуг по поверхности стен печи установлено следующее. С ростом заглубления дуг длиной 425 мм плотность максимальных тепловых потоков дуг на стены в лучепрозрачной атмосфере уменьшается с 650 кВт/м<sup>2</sup> при незначительном заглублении дуг до 262 кВт/м<sup>2</sup> при полном их заглублении в шлак. В поглощающей атмосфере печи [7, 8] плотность тепловых потоков дуг на стены снижается соответственно с 165 до 63 кВт/м<sup>2</sup>. Максимальные тепловые нагрузки на водоохлаждаемые панели стен от незаглубленных дуг изменяются в диапазоне от 650 кВт/м<sup>2</sup> в лучепрозрачной атмосфере до 165 кВт/м<sup>2</sup> в лучепоглощающей атмосфере печи, то есть снижаются почти в четыре раза. Расчетные и экспериментальные данные по плотностям тепловых потоков излучений дуг на водоохлаждаемые панели стен ДСП-100 совпадают. Максимальные тепловые нагрузки от излучений незаглубленных дуг на водоохлаждаемые панели в лучепрозрачной атмосфере могут привести к термическим повреждениям панелей, поэтому работа на незаглубленных длинных дугах в лучепрозрачной атмосфере печи не только энергозатратна, но и сокращает срок службы панелей [10–12].

### Библиографический список

1. Макаров А.Н. Теплообмен в высокомошных дуговых сталеплавильных печах. Часть I. Расчет потоков теплового излучения дуг на ванну и теплообмен в ванне металла // *Металлург*. 2022. № 7. С. 28–34.
2. Дорофеев Г.А., Зинягин Г.А., Макаров А.Н. Производство стали на основе железа прямого восстановления. Старый Оскол: ТНТ, 2021. 324 с.
3. Сосонкин О.М., Кудрин В.А. Водоохлаждаемый свод электродуговой печи. М.: *Металлургия*, 1985. 144 с.
4. Самохвалов Г.В., Черныш Г.И. Электрические печи черной металлургии. М.: *Металлургия*, 1984. 232 с.
5. Водоохлаждаемые узлы сверхмощных дуговых сталеплавильных печей / М.Г. Кузьмин [и др.] // *Электрометаллургия*. 2014. № 7. С. 8–16.
6. Хумер О. Водоохлаждаемые панели современных сверхмощных дуговых печей // *МРТ Металлургические заводы и технологии*.

7. Нефедов А.В., Нефедова Е.В. Импортозамещающая технология выгрузки пыли из бункеров электросталеплавильного цеха ОАО «Уральская сталь» // Сталь. 2015. № 12. С. 74–76.

8. Электросталеплавильная пыль как дисперсная система / Л.М. Симонян [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. 2010. № 11. С. 68–75.

9. Гудим Ю.А., Овчинников С.Т., Зинуров И.Ю. Потери металла при выплавке стали в дуговых печах и способы их уменьшения // Электromеталлургия. 2010. № 6. С. 11–15.

10. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых сталеплавильных и факельных нагревательных печах, топках паровых котлов, камерах сгорания газотурбинных установок. М. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 452 с.

11. Макаров А.Н. Теплообмен в высокомоощных дуговых сталеплавильных печах. Часть II. Распределение потоков теплового излучения дуг по ванне и стенам // Металлург. 2022. № 9. С. 50–54.

12. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках: учебное пособие для студентов вузов. СПб.: Лань, 2014. 384 с.

## HEAT TRANSFER IN HIGH-POWER HUNDRED-TON ELECTRIC ARC STEELMAKING FURNACES

*A.N. Makarov, A.V. Krupnov, Yu.M. Pavlova*

**Abstract.** *The results of the calculation of heat transfer in a high-power arc steelmaking furnace DSP-100 are presented. The dependence of heat fluxes on the penetration of arcs into the slag is obtained. The influence of the dustiness of the furnace atmosphere on heat flows is considered.*

**Keywords:** *electric arc, furnace, steel, heat transfer, thermal radiation, efficiency.*

Об авторах:

МАКАРОВ Анатолий Николаевич – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники, Тверской государственной технической университет. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

КРУПНОВ Андрей Владимирович – старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственной технической университет. E-mail: AndreTheGianti@yandex.ru

ПАВЛОВА Юлия Михайловна – старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственной технической университет. E-mail: sokolhawk98@gmail.com

About the authors:

MAKAROV Anatoly Nikolaevich – Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Electricity and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

KRUPNOV Andrey Vladimirovich – Senior Lecturer, Department of Electricity and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: AndreTheGianti@yandex.ru

PAVLOVA Yulia Mikhailovna – Senior Lecturer of the Department of Electricity and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: sokolhawk98@gmail.com

УДК 669.187:621.186

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКОВ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КОРОТКИХ ДУГ ПО ВАННЕ МЕТАЛЛА ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ

*А.Н. Макаров, А.Ю. Соколов, М.С. Хрусталева*

© Макаров А.Н., Соколов А.Ю., Хрусталева М.С., 2023

***Аннотация.** Изложены результаты расчета теплообмена в высокоомощной дуговой сталеплавильной печи (ДСП) вместимостью 100 т металла. Описан процесс теплообмена в шаровых сегментах при полном заглублении дуг в ванну металла и шлак.*

***Ключевые слова:** электрическая дуга, печь, сталь, теплообмен, тепловое излучение, коэффициент полезного действия.*

В работе [1] изложена методика расчета тепловых потоков излучения дуг по ванне и шаровому сегменту, образуемому электродинамическим воздействием дуг на ванну и шлак, а также приведены результаты расчета плотностей потоков тепловых излучений длинных дуг по поверхности ванны и в шаровом ее сегменте. Установлено, что потоки теплового излучения дуг на расчетные участки, расположенные на ванне напротив дуг и между ними, в зависимости от расстояния от дуг до участков отличаются в 6–60 раз. Результаты расчетов объясняют ускоренное

расплавление шихты напротив дуг и задержку расплавления шихты, расположенной между дугами. При полном погружении дуг в ванну металла и шлак превосходящая часть теплового излучения дуг попадает на поверхность шарового сегмента в ванне и шлаке.

Тепло, поступающее излучением от электрических дуг на поверхность шарового сегмента, нагревает ее и от поверхности сегмента передается соседним слоям металла и шлака теплопроводностью и конвекцией, интенсифицируемой электродинамическим выдуванием дуг от осей к периферии электродов. При электродинамическом перемещении дуг от осей к периферии электродов дуги выбрасывают из шаровых сегментов на большое расстояние от осей электродов жидкий металл и шлак, поступающие в сегмент под действием архимедовой гидростатической подъемной силы, создавая тем самым мощный конвективный теплообмен металла, шлака. При полном погружении дуг в шлак увеличивается количество шлака, участвующего в конвективном теплообмене, конвективный тепловой поток на ванну металла и шлак возрастает, КПД дуг достигает максимального значения в 78–80 %. Коэффициент полезного действия дуг – это отношение полезной мощности дуг, идущей на расплавление шихты, нагрев жидкого металла и шлака, к мощности дуг. Методика и результаты расчета КПД дуг подробно изложены в работе [2]. Необходимо рассчитать результаты распределения плотностей потоков тепловых излучений коротких дуг по ванне и исследовать взаимосвязь длины дуг, высоты слоя шлака, КПД дуг и удельного расхода электроэнергии в высокомоощных ДСП (рис. 1).

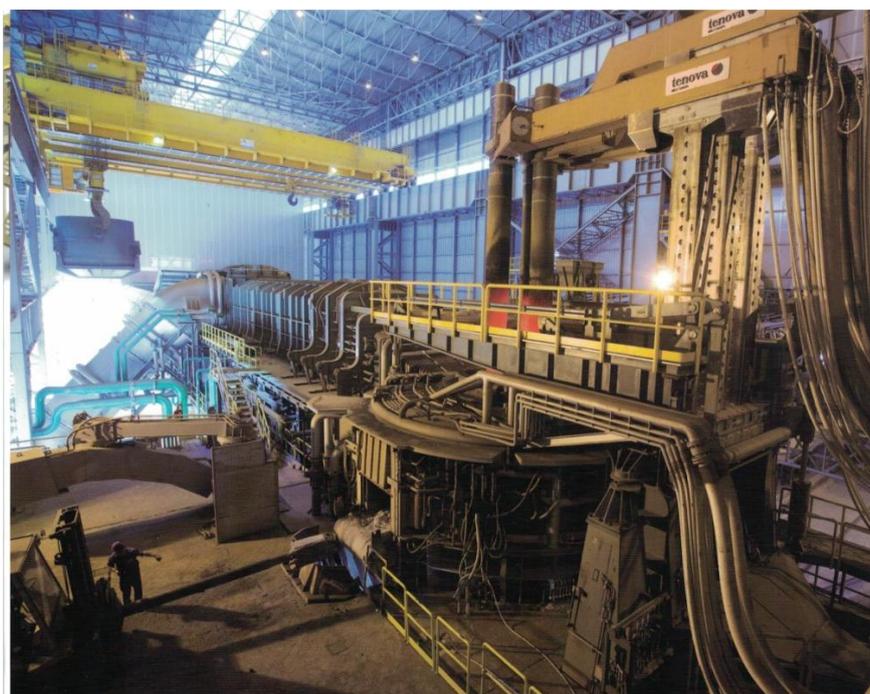


Рис. 1. ДСП

По методике, изложенной в статье [1], рассчитали плотности потоков тепловых излучений коротких дуг, падающих на поверхность ванны печи. Принимали длину дуг 256 мм, высоту слоя шлака 143 и 256 мм, остальные параметры дуг и печи приведены в работе [1]. Результаты расчета распределения плотностей потоков тепловых излучений дуг по диаметру ванны приведены на рис. 2, где графики 1 и 2 характеризуют распределение плотностей потоков при высоте заглибления дуг 143 мм соответственно в прозрачной и поглощающей атмосфере печи. Как видно из рис. 1, при работе на коротких дугах их тепловое излучение практически не достигает откосов и расплавление шихты на откосах происходит вследствие теплопроводности от поверхности ванны, а также теплопроводности и конвекции из шаровых сегментов, образуемых электромагнитным давлением дуг в ванне металла и шлаке, и тепла факелов газокислородных горелок, рафинировочных кислородных горелок, инжекторов углеродосодержащего порошка, устанавливаемых в стенах по периферии ванны.

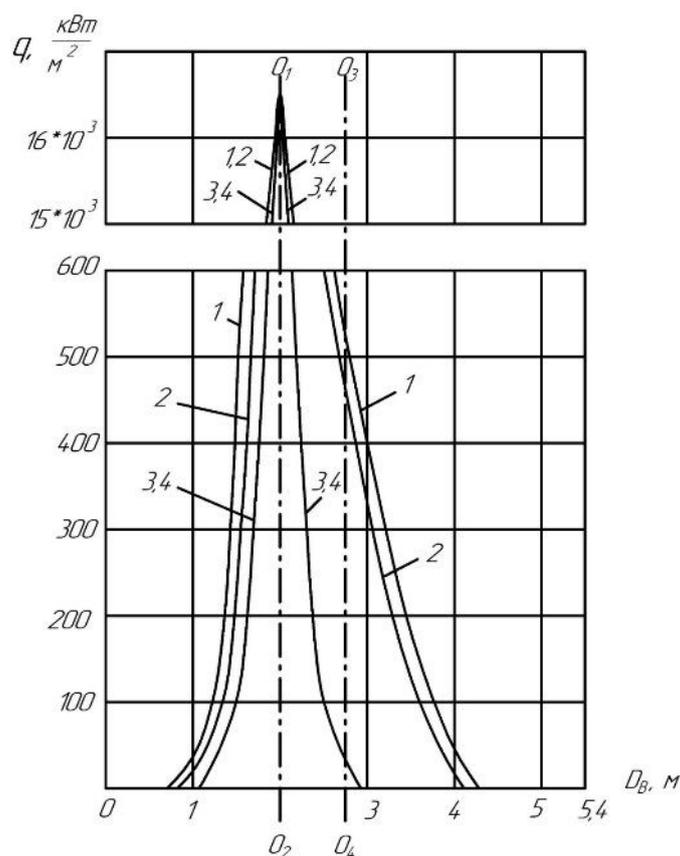


Рис. 2. Распределение плотностей потоков тепловых излучений коротких дуг  $l_{\text{д}} = 256$  мм по диаметру ванны: при  $h_3 = 143$  мм в прозрачной (1) и поглощающей (2) атмосфере печи; при  $h_3 = 256$  мм в прозрачной (3) и поглощающей (4) атмосфере печи (графики 3, 4 совпадают)

При высоте заглибления дуг в металл и шлак 143 мм тепловые потоки излучения дуг в поглощающей среде на участки ванны напротив дуг составляют 12 кВт/м<sup>2</sup> на расстоянии 1 м от стены, 295 кВт/м<sup>2</sup> на расстоянии 1,66 м от стены и 16,56 МВт/м<sup>2</sup> на расстоянии 2 м от стены (под дугой). Тепловые потоки на участки ванны между дугами составляют 0 кВт/м<sup>2</sup> на расстоянии 1 м от стены, 20 кВт/м<sup>2</sup> на расстоянии 1,66 м от стены и 225 кВт/м<sup>2</sup> на расстоянии 2 м от стены. Тепловые излучения на участки ванны, расположенные напротив дуг, превосходят тепловые потоки, падающие на участки, которые расположены между дугами, в 12 раз на расстоянии 1 м от стен, в 15 раз на расстоянии 1,66 м от стен и в 74 раза на расстоянии 2 м от стен. Таким образом, при работе высоко-мощных ДСП как на длинных дугах ( $\ell_d = 425$  мм), так и на коротких дугах ( $\ell_d = 256$  мм) сохраняется значительная неравномерность распределения плотностей потоков тепловых излучений по ванне: тепловые потоки на участки ванны, расположенные напротив дуг, в 6–74 раза превосходят тепловые потоки на участки ванны, расположенные между дугами. Такое распределение плотностей потоков тепловых излучений дуг по ванне приводит к ускоренному расплавлению шихты на откосах напротив дуг и замедленному расплавлению шихты на откосах между дугами. Для выравнивания тепловых потоков и скорости расплавления шихты на периферии ванны газокислородные горелки устанавливаются в водоохлаждаемых панелях стен (как правило, между дугами) [3–10].

График 1 распределения плотностей потоков тепловых излучений дуг по диаметру ванны в лучепрозрачной атмосфере печи повторяет график 2 распределения тепловых потоков по диаметру ванны в поглощающей среде, однако значение плотностей потоков в лучепрозрачной среде превосходит значение плотностей потоков на те же расчетные площадки в поглощающей среде на 20–60 %. На рис. 2 приведены результаты расчетов распределения плотностей потоков тепловых излучений дуг по поверхности ванны при их полном погружении в шлак,  $h_3 = 256$  мм (графики 3, 4). При полном погружении дуг в ванну и шлак дуги практически не излучают на поверхность ванны, а излучают тепло на поверхность шаровых сегментов в ванне металла и шлаке. Тепло из шаровых сегментов передается ванне металла и шлаку теплопроводностью и интенсивным конвективным теплообменом. На дуги действуют аксиальные и радиальные электромагнитные силы. Аксиальные силы вызывают электромагнитное давление дуг на ванну металла и шлак, создавая в них заглибления в виде шаровых сегментов; радиальные электромагнитные силы вызывают радиальные перемещения электрических дуг от оси электродов к поверхности ванны. В процессе

перемещения дуги захватывают жидкий металл и шлак из шаровых сегментов и далеко выбрасывают их на поверхность шлака. Под действием архимедовой гидростатической подъемной силы новые слои жидкого металла и шлака поступают в шаровой сегмент, процесс электромагнитного выбрасывания и перемешивания металла и шлака повторяется, конвективный теплообмен металла, шлака интенсифицируется и возрастает КПД дуг.

### **Библиографический список**

1. Макаров А.Н. Теплообмен в высокомошных дуговых сталеплавильных печах. Часть I. Расчет потоков теплового излучения дуг на ванну и теплообмен в ванне металла // *Металлург.* 2022. № 7. С. 28–34.
2. Дорофеев Г.А., Зинягин Г.А., Макаров А.Н. Производство стали на основе железа прямого восстановления. Старый Оскол: ТНТ, 2021. 324 с.
3. Сосонкин О.М., Кудрин В.А. Водоохлаждаемый свод электродуговой печи. М.: *Металлургия*, 1985. 144 с.
4. Самохвалов Г.В., Черныш Г.И. Электрические печи черной металлургии. М.: *Металлургия*, 1984. 232 с.
5. Водоохлаждаемые узлы сверхмощных дуговых сталеплавильных печей / М.Г. Кузьмин [и др.] // *Электрометаллургия.* 2014. № 7. С. 8–16.
6. Хумер О. Водоохлаждаемые панели современных сверхмощных дуговых печей // *МРТ Металлургические заводы и технологии.*
7. Нефедов А.В., Нефедова Е.В. Импортзамещающая технология выгрузки пыли из бункеров электросталеплавильного цеха ОАО «Уральская сталь» // *Сталь.* 2015. № 12. С. 74–76.
8. Электросталеплавильная пыль как дисперсная система / Л.М. Симонян [и др.] // *Известия вузов. Черная металлургия.* 2010. № 11. С. 68–75.
9. Гудим Ю.А., Овчинников С.Т., Зинуров И.Ю. Потери металла при выплавке стали в дуговых печах и способы их уменьшения // *Электрометаллургия.* 2010. № 6. С. 11–15.
10. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых сталеплавильных и факельных нагревательных печах, топках паровых котлов, камерах сгорания газотурбинных установок. М. – Вологда: *Инфра-Инженерия*, 2022. 452 с.

### **DISTRIBUTION OF THERMAL RADIATION FLUXES OF SHORT ARCS IN THE METAL BATH OF ELECTRIC ARC STEELMAKING FURNACES**

*A.N. Makarov, A.Yu. Sokolov, M.S. Khrustaleva*

***Abstract.** The results of the calculation of heat transfer in a high-power arc steelmaking furnace (EAF) with a capacity of 100 tons of metal are presented. The process of heat exchange in ball segments with complete deepening of the arcs into a bath of metal and slag is described.*

***Keywords:** electric arc, furnace, steel, heat transfer, thermal radiation, efficiency.*

Об авторах:

МАКАРОВ Анатолий Николаевич – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

СОКОЛОВ Андрей Юрьевич – старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

ХРУСТАЛЕВА Мария Сергеевна – студентка, Тверской государственный технический университет. E-mail: masamasa1487@gmail.com

About the authors:

MAKAROV Anatoly Nikolaevich – Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Electricity and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

SOKOLOV Andrey Yuryevich – Senior lecturer of the Department of Electricity and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

KHRUSTALEVA Maria Sergeevna – Student, Tver State Technical University. E-mail: masamasa1487@gmail.com

## ВЗАИМОСВЯЗЬ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ И УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ВЫСОКОМОЩНЫХ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧАХ

*А.Н. Макаров, А.В. Крупнов, Е.П. Алисова*

© Макаров А.Н., Крупнов А.В., Алисова Е.П., 2023

*Аннотация.* Установлена взаимосвязь между длиной дуг, высотой шлака, заглублением дуг в шлак, КПД дуг и удельным расходом электроэнергии в высокомошных дуговых сталеплавильных печах (ДСП) при работе ДСП на дугах длиной 480–490 мм.

*Ключевые слова:* электрическая дуга, печь, сталь, тепловое излучение, расход электроэнергии.

Оценим влияние электротехнологических режимов, ступеней напряжения, длины дуг, высоты слоя шлака на удельный расход электроэнергии в высокомошных ДСП-100, работающих на шихте-металлоломе (рисунок). Расчет ведем по следующим формулам [1–4].  
Напряжение фазное на электродах

$$U_{2\phi} = U_{2л} / \sqrt{3},$$

где  $U_{2\phi}$  – вторичное линейное напряжение электропечного трансформатора, В.

Напряжение на дуге

$$U_d = \sqrt{U_{2\phi}^2 - (I_d x_s)^2} - I_d r_k,$$

где  $x_s$ ,  $r_k$  – сопротивления: индуктивное в эксплуатационном режиме и активное электропечной установки соответственно, Ом; для высокомошной ДСП-100 принимаем  $r_k = 0,4 \cdot 10^{-3}$  Ом,  $x_s = 3,6 \cdot 10^{-3}$  Ом [5];  $I_d$  – ток дуги,  $I_d = 60$  кА.

Длина дуги

$$l_d = \frac{U_d - a}{b},$$

где  $a$  – сумма анодного и катодного падения напряжения,  $a = 20$  В;  $b$  – градиент напряжения в столбе дуги,  $b = 0,8$  В/мм [5].



Металлолом-шихта для ДСП [6]

Линейное напряжение электропечного трансформатора мощностью 80–90 МВА печи ДСП-100 изменяли в диапазоне от 829 до 300 В с шагом 20 В. Получены следующие результаты расчета параметров для нескольких ступеней электропечного трансформатора, в том числе наивысшей  $U_{2л} = 829$  В, а также для тех ступеней, для которых выполнен расчет теплообмена в печи ДСП-100, то есть для  $U_{2л} = 761$  В,  $U_{2л} = 623$  В,  $U_{2л} = 571$  В (таблица).

Параметры вторичного напряжения электропечного трансформатора и дуг печи ДСП-100

$U_{2л}$ , В	829	809	790	761	623	571	980
$U_{2ф}$ , В	479	468	457	440	360	330	566
$U_{д}$ , В	403	391	378	360	260	225	500
$ℓ_{д}$ , мм	479	464	447	425	300	256	625

Ниже для сравнения параметров дуг на высоком напряжении (около 1 000 В) приведен пример расчета параметров дуг при работе на линейном напряжении  $U_{2л} = 980$  В.

В настоящее время высокомоощные ДСП являются плавильными агрегатами, выплавляющими полупродукт с регламентируемым содержанием углерода, серы, фосфора, а рафинировку, то есть доведение химического состава до конкретной марки стали, осуществляют в агрегатах «ковш – печь». Обычно плавку в ДСП осуществляют на двух-

четырёх ступенях напряжения и переключают ступени напряжения электропечного трансформатора не более 2–4 раз за плавку. Рассмотрим возможный электротехнологический режим работы ДСП-100 с трансформатором мощностью 80 или 90 МВА и поддержанием в процессе плавки максимальным КПД дуг  $\eta_d$  и наименьшим прогнозируемым расходом электроэнергии  $G_x$ :

$U_{2л}, В$	829	829	761	761	623	571
$U_{2ф}, В$	479	479	440	440	360	330
$U_d, В$	403	403	360	360	260	225
$I_d, кА$	60	60	60	50	70	70
$P_d, МВт$	24,18	24,18	21,6	18,0	18,2	17,92
$\ell_d, мм$	479	479	425	425	300	256
$h_3, мм$	Дуги горят в колодце	480–510	425–500	425–500	300–360	260–300
$h_3/\ell_d$	–	1,0–1,1	1,0–1,18	1,0–1,18	1,0–1,2	1,0–1,2
$\eta_d$	0,8	0,78–0,79	0,78–0,80	0,78–0,80	0,78–0,80	0,78–0,80
$G_x, кВт·ч/т$	360	365–362	365–360	365–360	365–360	365–360

В ДСП-100 с трансформатором 90 МВА расплавление шихты осуществляют на максимальном линейном напряжении 829 В, мощности каждой из дуг  $P_d = 24$  МВт и длине дуги 479 мм. Трансформатор мощностью 90 МВА позволяет работать с максимальной мощностью трех дуг 72,54 МВт без перегрузки. В процессе расплавления шихты дуги горят в колодцах, КПД дуг составляет в начале процесса 0,93, в середине 0,8, ко времени расплавления 80–85 % шихты КПД дуг уменьшается до 0,72, средний КПД дуг равен 0,8 [1]; прогнозируемый удельный расход электроэнергии 360 кВт·ч/т. Доплавление шихты осуществляют на максимальных длине и мощности дуги (соответственно 479 мм и 72,54 МВт), ванна покрыта слоем шлака высотой 480–510 мм,  $h_3/\ell_d = 1,0–1,1$ ,  $\eta_d = 0,78–0,79$ , прогнозируемый удельный расход электроэнергии 362–365 кВт·ч/т. К окончанию процесса часть шлака скачивают и с целью поддержания высокого КПД дуг 0,78–0,80 и низкого прогнозируемого удельного расхода электроэнергии 360 кВт·ч/т переходят на ступень с параметрами:  $U_{2л} = 623$  В,  $U_{2ф} = 360$  В,  $U_d = 260$  В,  $\ell_d = 300$  мм,  $h_3 = 300–360$  мм.

При дальнейшем возможном сокращении высоты слоя шлака в конце плавки до 200–250 мм и снижении поглотительной способности атмосферы печи при отключенных инжекторах, рафинировочных кислородных фурмах переходят на следующую пониженную ступень напряжения и уменьшенную длину дуги (например,  $U_{2л} = 571$  В,  $U_d = 225$  В,  $\ell_d = 256$  В) или на более низкую ступень трансформатора, что

позволяет сохранять высокий КПД дуг ( $\eta_d = 0,78-0,80$ ) и прогнозировать низкий удельный расход электроэнергии в 360 кВт·ч/т до окончания плавки металла. Таким образом, правильно выбранные электро-технологический и шлаковый режимы позволяют поддерживать на высоком уровне КПД дуг, мощность дуг, производительность ДСП-100 на протяжении всего процесса и достичь прогнозируемого наименьшего удельного расхода электроэнергии  $G_3 = 360$  кВт·ч/т. В ДСП-100 с трансформатором 80 МВА процесс плавки с высоким КПД дуг  $\eta_d = 0,8$  и низким прогнозируемым удельным расходом электроэнергии  $G_3 = 360$  кВт·ч/т аналогичен описанному, с той разницей, что в связи с меньшей мощностью трансформатора расплавление шихты осуществляют на линейном напряжении  $U_{2л} = 761$  В, единичной и суммарной мощности дуг, равной соответственно 21,6–18 и 64,8–54 МВт.

Как видно из приведенных выше данных, длина дуг в высокомошной ДСП-100 при ее работе на наивысшей ступени напряжения ( $U_{2л} = 829$  В) не превышает 479–480 мм, что положительно сказывается на работе печи и позволяет достичь высокого КПД дуг  $\eta_d = 0,78-0,80$  при довольно низком удельном расходе электроэнергии  $G_3 = 360$  кВт·ч/т. Согласно полученным в процессе эксплуатации высокомошных ДСП данным, при длине дуг около 500 мм и высоте слоя шлака свыше 510 мм часть тока дуг замыкается между электродами через шлак, минуя газовый объем дуг и ванну металла [7, 8]. В этом случае ДСП работает по принципу руднотермической печи как дуговая печь и как печь сопротивления прямого действия, в которой ток проходит как через дугу, так и через шихту. Отмечается, что данный режим работы ДСП энергозатратен, так как возрастает удельный расход электроэнергии и увеличивается время работы печи под током [7]. Энергоэффективным способом ввода электрической энергии в ДСП является преобразование электрической энергии в поток теплового излучения в столбах дуг с последующей передачей тепла излучением от дуг шихте, жидкому металлу, шлаку, а также преобразование под действием электромагнитных сил теплового потока излучения дуг в поток теплопроводности и интенсивный конвективный поток в жидком металле и шлаке в шаровом сегменте в ванне. Описание работы высокомошной ДСП-130 как дуговой печи и печи сопротивления при превышении высотой слоя шлака длины дуг  $l_d = 500-580$  мм приведено также в работах [8–10], где отмечено, что в этом случае часть тока замыкается через шлак, не проходя через дуги и металл.

Таким образом, вспенивание шлака в высокомошных печах ДСП-100 до высоты его слоя свыше 510 мм нецелесообразно, так как в этом случае высокомошная ДСП-100 работает как дуговая печь и печь сопротивления прямого действия, эффективность нагрева ванны металла и шлака тепловым излучением дуг, перемешивание и конвективный поток в ванне

металла уменьшаются, удельный расход электроэнергии и время плавки увеличиваются. Очевидно, что работа высокомошных ДСП на дугах длиной до 480–490 мм позволяет вспенивать шлак высотой до 500 мм, работать с КПД дуг  $\eta_d = 0,78–0,80$ , проводить процесс с достаточно низким удельным расходом электроэнергии 360 кВт·ч/т.

Этот вывод подтверждается практикой эксплуатации высокомошных ДСП (в частности, печей ДСП-120 [11]). Параметры и электро-технологические режимы высокомошных печей ДСП-100 и ДСП-120 имеют близкие значения [1]. ДСП-120 работает на ломе в качестве шихты и имеет следующие характеристики и параметры:

производительность 1 млн т;

масса металла на выпуске 120 т;

мощность трансформатора 100 МВА;

$I_d = 62$  кА;

максимальное вторичное линейное напряжение  $U_{2л\max} = 980$  В;

мощность каждой из трех дуг  $P_d = 20–25$  МВт;

$U_d = 403–322$  В;

$l_d = 478–378$  мм.

Длина дуг в ДСП-120 не превышает предельного значения высоты вспененного шлака 510 мм, при котором начинается смешанный (дуговой и сопротивления) режим работы печи, дуги заглублены в шлак и работают с максимальным КПД  $\eta_d = 0,78–0,80$ , поэтому удельный расход электроэнергии в действующей ДСП-120 составляет низкое значение:  $G_s = 356$  кВт·ч/т [10]. Такая печь не работает на высшей ступени напряжения  $U_{2\max} = 980$  В, поскольку в этом случае, как показано выше, напряжение на дугах составило 500 В, а длина дуг – 625 мм (см. таблицу). Работа на дугах длиной 625 мм экономически невыгодна, так как такие дуги невозможно полностью погрузить в шлак, высота которого должна превышать 625 мм. При высоте слоя шлака 625 мм возможны частые отключения электропечного трансформатора максимально токовой защитой, печь работает как дуговая и как печь сопротивления, эффективность ввода тепла в ванну дугами и КПД дуг снижаются, удельный расход электроэнергии возрастает.

В процессе эксплуатации устройств для вспенивания шлака в ДСП накопился опыт использования устройств, опыт заглубления дуг в шлак. В начале 2000-х гг. на некоторых высокомошных ДСП-100 дуги не были полностью заглублены в шлак в течение открытого периода плавки [12] и КПД дуг составлял величину  $\eta_d = 0,66–0,67$ , а удельный расход электроэнергии  $G_s = 405–410$  кВт·ч/т [11]. В настоящее время большинство находящихся в России высокомошных дуговых сталеплавильных печей ДСП-100 работают большую часть времени плавки с полным заглублением

дуг в ванну металла и шлак, их КПД  $\eta_d = 0,78-0,80$ , а удельный расход электроэнергии составляет 360–380 кВт·ч/т [1,5].

Печь ДСП-130 характеризуется следующими параметрами: массой металла на выпуске 130 т, производительностью 1 млн т, мощность трансформатора 110 МВА,  $I_d = 60$  кА,  $U_{2л} = 1\ 200-810$  В, мощностью каждой из дуг  $P_d = 24-27$  МВт,  $U_d = 443-365$  В,  $\ell_d = 530-430$  мм. ДСП-130 работает на максимальной активной мощности трех дуг, равной около 80 МВт, на дугах длиной 530 мм, которые невозможно полностью погрузить в шлак, так как высота слоя шлака в печи ДСП-130 не превышала 510 мм [7]. При отношении высоты заглибления к длине дуг  $h_z/\ell_d = 510/530 = 0,96$  по графику [1] находим средний за плавку КПД дуг  $\eta_d = 0,74$ , которому соответствует удельный расход электроэнергии  $G_s = 390-386$  кВт·ч/т. Реальный средний удельный расход электроэнергии на действующей ДСП-130 составил 400–388 кВт·ч/т [7]. Таким образом, прогнозируемый удельный расход электроэнергии, полученный расчетным путем, и реальный удельный расход электроэнергии на действующих высокомоощных ДСП при различных значениях длины дуг, высоты слоя шлака, заглиблении дуг в шлак совпадают или отличаются не более чем на 2–5 %, что подтверждает высокую сходимость расчетных и экспериментальных данных.

Выполненными исследованиями установлена взаимосвязь между длиной дуг, высотой слоя шлака, заглиблением дуг в шлак, КПД дуг и удельным расходом электроэнергии в высокомоощных ДСП. При работе таких печей на ломе в качестве шихты на дугах длиной до 480–490 мм, полностью заглибленных в слой шлака, высотой до 510 мм средний за плавку КПД дуг достигает максимального значения (0,78–0,80), а удельный расход электроэнергии – наименьшего значения (360 кВт·ч/т).

### Библиографический список

1. Дорофеев Г.А., Зинягин Г.А., Макаров А.Н. Производство стали на основе железа прямого восстановления. Старый Оскол: ТНТ, 2021. 324 с.
2. Никольский Л.Е., Смоляренко В.Д., Кузнецов Л.Н. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей. М.: Металлургия, 1981. 344 с.
3. Меркер Э.Э., Черменев Е.А. Электроплавка металлизированных окатышей в дуговой печи. Старый Оскол: ТНТ, 2019. 320 с.
4. Шишириков М.В., Сосонкин О.М. Ресурсосбережение и резервы повышения эффективности выплавки стали в ДСП // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2015. № 3. С. 70–79.
5. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках: учебное пособие для студентов вузов. СПб.: Лань, 2014. 384 с.

6. Российский производитель строительно-дорожной и специальной техники // UMG. URL: <https://umg-sdm.com> (дата обращения: 25.11.2022).
7. Теоретические основы и технология выплавки стального полупродукта в конвекторах и ДСП под магнезиальными шлаками / А.А. Бабенко [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 7. С. 491–498.
8. Температурный режим шлака сверхмощной ДСП и технологические параметры плавки / О.Ю. Шешуков [и др.] // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2010. № 1. С. 29–31.
9. Вспенивание шлаков в процессе плавки в дуговой печи / М. Петер [и др.] // Черные металлы. 2000. № 3. С. 26–33.
10. Производство стали на агрегате ковш – печь. Донецк: ООО «Юго-Восток, ЛТД» / Д.А. Дюдкин [и др.]. 300 с.
11. Энергосбережение в современной дуговой сталеплавильной печи ДСП-120 / И.В. Глухов [и др.] // Сталь. 2020. № 5. С. 21–23.
12. Внедрение системы интенсификации плавки в ДСП-100 ООО «УральСталь» / В.А. Спириин [и др.] // Электрометаллургия. 2005. № 9. С. 7–9.

## RELATIONSHIP OF ELECTROTECHNOLOGICAL MODES AND SPECIFIC ELECTRICITY CONSUMPTION IN HIGH-POWER ELECTRIC ARC STEELMAKING FURNACES

*A.N. Makarov, A.V. Krupnov, E.P. Alisova*

***Abstract.** The relationship between the length of the arcs, the height of the slag, the deepening of the arcs into the slag, the efficiency of the arcs and the specific consumption of electricity in high-power arc steelmaking furnaces (EAF) when working on arcs with a length of 480-490 mm is established.*

***Keywords:** electric arc, furnace, steel, thermal radiation, power consumption.*

Об авторах:

МАКАРОВ Анатолий Николаевич – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: [tgtu\\_kafedra\\_ese@mail.ru](mailto:tgtu_kafedra_ese@mail.ru)

КРУПНОВ Андрей Владимирович – старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: [AndreTheGianti@yandex.ru](mailto:AndreTheGianti@yandex.ru)

АЛИСОВА Екатерина Петровна – студентка кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

About the authors:

МАКАРОВ Anatoly Nikolaevich – Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Electricity and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

KRUPNOV Andrey Vladimirovich – Senior Lecturer, Department of Electricity and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: AndreTheGianti@yandex.ru

ALISOVA Ekaterina Petrovna – Student of the Department of Electricity and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

УДК 669.187:621.186

## **ВЗАИМОСВЯЗЬ КПД ДУГ И УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ВЫСОКОМОЩНЫХ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧАХ**

***А.Н. Макаров, А.В. Крупнов, В.В. Окунева***

© Макаров А.Н., Крупнов А.В., Окунева В.В., 2023

***Аннотация.** Установлена взаимосвязь между длиной дуг, высотой шлака, КПД дуг и удельным расходом электроэнергии высокомошных дуговых сталеплавильных печей (ДСП) при работе на дугах длиной 400–430 мм, высоте заглубления дуг в ванну и шлак 425–500 мм. Показано, что прогнозируемый, полученный расчетным путем, и реальный удельный расход электроэнергии, зависящие от длины дуг, высоты слоя шлака, заглубления дуг в шлак, КПД дуг, практически совпадают.*

***Ключевые слова:** электрическая дуга, печь, сталь, тепловое излучение, расход электроэнергии.*

В России в дуговых сталеплавильных электропечах выплавляют 36–38 % стали, из которой на прокатных станках изготавливают стальной лист, швеллер, уголок и другой профильный прокат, а также стальную арматуру, проволоку, рельсы, трубы (рис. 1) и другую продукцию.



а



б



в



г



д



е

Рис. 1. Стальная продукция: лист (а); уголок (б); арматура (в); проволока (г); трубы (е)

Электрические дуги являются основными источниками тепла в высокомоощных ДСП – на их долю приходится 55–65 % тепла, введенного в печь [1, 2]. На долю газокислородных горелок (ГКГ), инжекторов углеродосодержащего порошка, экзотермических реакций окисления металлов приходится 35–45 % тепла, поступающего в печь [3–7]. Указанные источники тепла имеют следующие значения КПД, %: инжекторы угольного порошка – 28–36; ГКГ – 45–55; дуги – 65–80; экзотермические реакции окисления металлов – 100 [6].

Окислять, сжигать металл в ДСП экономически невыгодно [8–11]; ГКГ эффективны при расплавлении твердой шихты, а при работе на жидкую ванну их КПД снижается до 25 %; КПД инжекторов как источников тепла невысок, поэтому единственным эффективным источником тепла на протяжении всего процесса плавки являются электрические дуги. Для расчета и выбора рациональных энерготехнологических режимов работы высокомоощных ДСП необходимо установить и исследовать взаимосвязь параметров дуг (тока, напряжения, длины, мощности, КПД), высоты слоя шлака и удельного расхода электроэнергии ДСП.

В работе [1] представлены расчеты зависимости КПД дуг печи от высоты их заглубления в ванну металла и шлак в диапазоне 0–500 мм при соотношении  $h_3/\ell_d = 0–1,2$ . На основании полученных результатов построена зависимость  $\eta_d = f(h_3/\ell_d)$ . Воспользуемся ею для построения графика зависимости удельного расхода электроэнергии от длины дуг, заглубления дуг в ванну металла, шлак, КПД дуг ДСП-100.

На рис. 2 (график 1) воспроизведена зависимость  $\eta_d = f(h_3/\ell_d)$  [1].

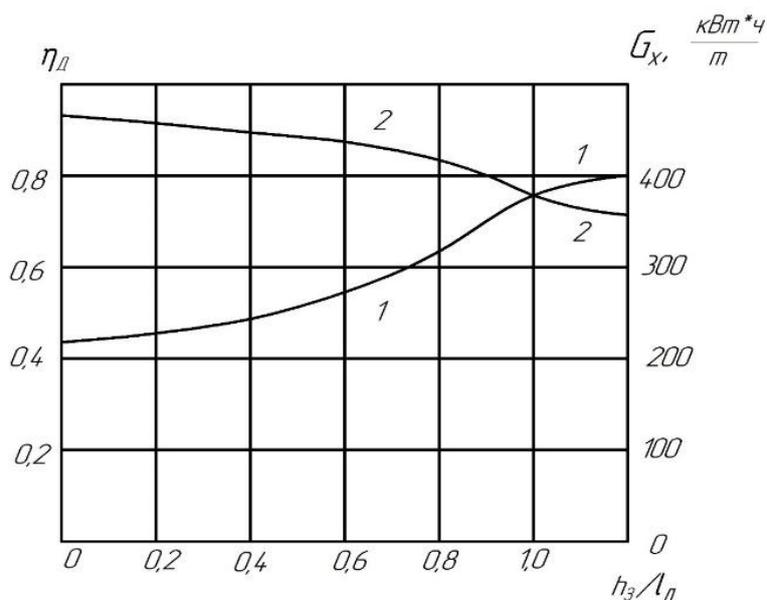


Рис. 2. Зависимость КПД дуг (1) и удельного расхода электроэнергии (2) современных высокомоощных ДСП-100 от заглубления дуг в ванну металла и шлак

По данному графику можно определить КПД дуг печи (параметры печи и дуг изложены в [1–6]) при любой их длине и заглублении в ванну металла и шлак. Например, для дуг длиной 425 мм имеем следующие значения КПД в зависимости от их заглубления в ванну металла и шлак:

$$h_3 = 468 \text{ мм}, h_3/\ell_d = 1,1, \eta_d = 0,78;$$

$$h_3 = 425 \text{ мм}, h_3/\ell_d = 1,0, \eta_d = 0,76;$$

$h_3 = 340$  мм,  $h_3/\ell_D = 0,8$ ,  $\eta_D = 0,64$ ;  
 $h_3 = 300$  мм,  $h_3/\ell_D = 0,71$ ,  $\eta_D = 0,58$ ;  
 $h_3 = 160$  мм,  $h_3/\ell_D = 0,38$ ,  $\eta_D = 0,48$ .

В российских металлургических компаниях используется несколько десятков высокомошных ДСП-100 мощностью электропечного трансформатора 80–90 МВА с вторичным линейным напряжением 829–300 В. В [1] расчетами и экспериментальными данными доказано, что между удельным расходом электроэнергии и средним КПД дуг существует обратно пропорциональная связь: при каждом увеличении за плавку среднего КПД дуг на 1 % удельный расход электроэнергии печью уменьшается на 0,75–1 %. Методика расчета среднего за плавку КПД дуг приведена в учебном пособии [5]. Рассчитаем и построим зависимость удельного расхода электроэнергии от среднего за плавку КПД дуг высокомошных дуговых сталеплавильных печей ДСП-100. Расчеты проводим для высокомошных дуговых сталеплавильных печей ДСП-100, работающих в одинаковых энерготехнологических режимах:

шихта – металлолом;  
удельная мощность электропечного трансформатора 800–900 кВА/т;  
расход кислорода 20–30 м<sup>3</sup>/т;  
расход природного газа 5–10 м<sup>3</sup>/т;  
расход угольного порошка 5–10 кг/т;  
продолжительность плавки 50–60 мин;  
масса выплавляемой стали 100 т;  
угар металла 6–8 %.

В работе [5] рассчитан средний за плавку КПД дуг высокомошной дуговой сталеплавильной печи ДСП-100, работающей в вышеописанном энерготехнологическом режиме. Исследуемая высокомошная печь ДСП-100 работает в рациональных энергетическом и шлаковом режимах с заглубленными в шлак дугами и высоким средним за плавку КПД дуг,  $\eta_D = 0,8$ , которому соответствует удельный расход электроэнергии  $G_{\text{Э}} = 360$  кВт·ч [5]. Так как снижению среднего КПД дуги на 1 % соответствует увеличение удельного расхода электроэнергии на 1 %, то удельный расход электроэнергии печью при любом значении среднего за плавку КПД дуг можно определить по формуле

$$G_x = G_{\text{Э}} + (\eta_{0,8} - \eta_x)G_{\text{Э}},$$

где  $G_x$  – расчетный удельный расход электроэнергии печи, кВт·ч/т;  
 $\eta_{0,8}$  – средний за плавку КПД дуги  $\eta_D = 0,8$  печи ДСП-100, которому соответствует удельный расход электроэнергии  $G_{\text{Э}} = 360$  кВт·ч/т;  $\eta_x$  – средний за плавку КПД дуг печи.

Например, рассчитанный средний за плавку КПД дуг печи ДСП-100 составляет  $\eta_d = 0,7$ , рассчитанный по вышеприведенной формуле удельный расход электроэнергии составит:

$$G_x = G_{\Sigma} + (\eta_{0,8} - \eta_x) G_{\Sigma} = 360 + (0,8 - 0,7)360 = 396 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т.}$$

Аналогичным образом рассчитали удельный расход электроэнергии ДСП-100 для любого взятого значения среднего за плавку КПД дуг (см. рис. 2, график 1). Результаты расчета свели в таблицу.

Взаимосвязь среднего за плавку КПД дуг и удельного расхода электроэнергии высокоомощной ДСП-100

$\eta_d$	0,8	0,7	0,6	0,5	0,45
$G_x, \text{кВт}\cdot\text{ч/т}$	360	396	432	468	486

По результатам расчета взаимосвязи удельного расхода электроэнергии и среднего за плавку КПД дуг ДСП-100 построили график 2 (см. рис. 2). Как видно из рисунка, с уменьшением средних за плавку КПД дуг и высоты слоя шлака удельный расход электроэнергии увеличивается. При работе печи после расплавления основной массы шихты в открытый период плавки и до выпуска металла на полностью погруженных в шлак дугах,  $h_3/\ell_d = 1,2$ , средний за плавку КПД дуг достигает максимального значения  $\eta_d = 0,8$ , а удельный расход электроэнергии минимален:  $G = 360 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$ . В том случае, если после расплавления шихты до выпуска металла печь работает на частично погруженных в шлак дугах и  $h_3/\ell_d = 0,8$ , то средний за плавку КПД дуг снижается до  $\eta_d = 0,64$ , а удельный расход электроэнергии возрастает до  $G_x = 421 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$ . При работе печи после расплавления шихты до выпуска металла со средним показателем  $h_3/\ell_d = 0,6$ , при котором дуги наполовину открыты и наполовину экранированы шлаком, средний за плавку КПД дуг уменьшается до значения  $\eta_d = 0,53$ , а удельный расход электроэнергии увеличивается до  $G_x = 446 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$ . Отношение высоты заглубления дуг в металл и шлак к длине дуг  $h_3/\ell_d$  регулируется как высотой слоя шлака, так и длиной дуг, ступенью напряжения электропечного трансформатора. Как видно из рис. 2 (график 1), средний за плавку КПД дуг имеет минимальное значение  $\eta_d = 0,45$  при полностью открытых длинных дугах и  $h_3/\ell_d \approx 0$ , а удельный расход электроэнергии в этом случае максимален:  $G_x = 488 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$ .

Среднее за плавку значение КПД дуг ДСП-100 не может быть меньше 0,45 по следующим причинам. В течение времени расплавления шихты дуги горят в колодцах (рис. 3а) и в начале расплавления  $\eta_d = 0,93$  [1]. В процессе расплавления высота шихты в печи уменьшается (рис. 3б), часть теплового излучения дуг попадает на верхнюю часть водоохлаждаемых панелей стен и на панели свода, КПД дуг уменьшается.

К середине расплавления шихты КПД дуг  $\eta_d = 0,8$ . К концу процесса вся шихта расплавляется, 40 % теплового излучения дуг попадает на водоохлаждаемые панели стен и свода, КПД дуг снижается до  $\eta_d = 0,6$ . В открытый период плавки в зависимости от степени напряжения электропечного трансформатора, длины дуг, высоты слоя шлака и соотношения  $h_3/\ell_d$  КПД дуг может снижаться до 0,45 при отсутствии слоя шлака, но вследствие горения дуг, происходящего часть времени плавки в колодцах и часть времени на ванну металла в шлаке, средний за плавку КПД дуг практически составляет 45–55 % и более.

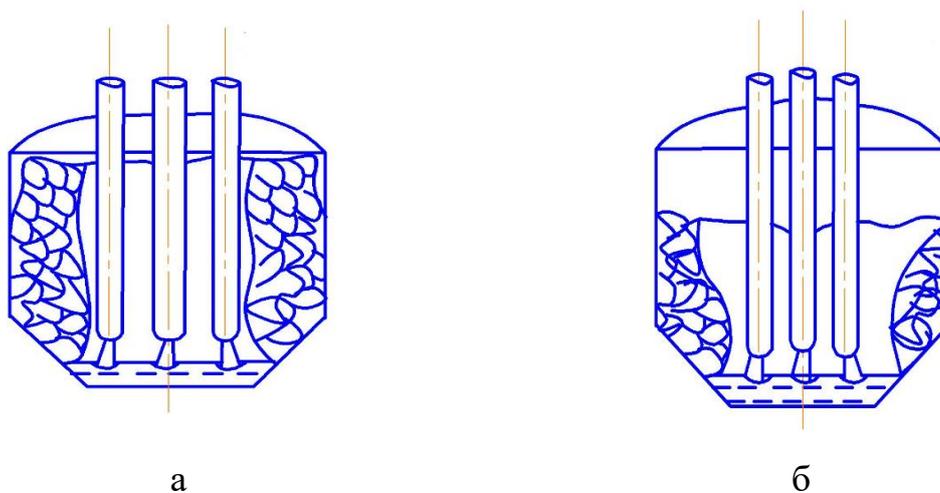


Рис. 3. Изменение положения шихты и КПД дуг в процессе расплавления шихты: начало процесса,  $\eta_d = 0,93$  (а); середина, расплавилось 45–50 % шихты,  $\eta_d = 0,80$  (б)

### Библиографический список

1. Дорофеев Г.А., Зинягин Г.А., Макаров А.Н. Производство стали на основе железа прямого восстановления. Старый Оскол: ТНТ, 2021. 324 с.
2. Никольский Л.Е., Смоляренко В.Д., Кузнецов Л.Н. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей. М.: Металлургия, 1981. 344 с.
3. Меркер Э.Э., Черменев Е.А. Электроплавка металлизированных окатышей в дуговой печи. Старый Оскол: ТНТ, 2019. 320 с.
4. Шишимиров М.В., Сосонкин О.М. Ресурсосбережение и резервы повышения эффективности выплавки стали в ДСП // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2015. № 3. С. 70–79.
5. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках: учебное пособие для студентов вузов. СПб.: Лань, 2014. 384 с.
6. Теоретические основы и технология выплавки стального полупродукта в конвекторах и ДСП под магнезиальными шлаками

/ А.А. Бабенко [и др.] // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 7. С. 491–498.

7. Температурный режим шлака сверхмощной ДСП и технологические параметры плавки / О.Ю. Шешуков [и др.] // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2010. № 1. С. 29–31.

8. Вспенивание шлаков в процессе плавки в дуговой печи / М. Петер [и др.] // Черные металлы. 2000. № 3. С. 26–33.

9. Производство стали на агрегате ковш – печь / Д.А. Дюдкин [и др.]. Донецк: ООО «Юго-Восток, ЛТД», 2003. 300 с.

10. Энергосбережение в современной дуговой сталеплавильной печи ДСП-120 / И.В. Глухов [и др.] // Сталь. 2020. № 5. С. 21–23.

11. Внедрение системы интенсификации плавки в ДСП-100 ООО «УральСталь» / В.А. Спириин [и др.] // Электрометаллургия. 2005. № 9. С. 7–9.

## RELATIONSHIP OF ARC EFFICIENCY AND SPECIFIC ELECTRICITY CONSUMPTION IN HIGH-POWER ELECTRIC ARC STEELMAKING FURNACES

*A.N. Makarov, A.V. Krupnov, V.V. Okuneva*

**Abstract.** *The relationship between the length of the arcs, the height of the slag, the efficiency of the arcs and the specific power consumption of high-power arc steelmaking furnaces (EAF) when working on arcs with a length of 400-430 mm, the depth of the arcs in the bath and slag 425–500 mm is established. It is shown that the predicted, calculated, and real specific power consumption, depending on the length of the arcs, the height of the slag layer, the penetration of the arcs into the slag, the efficiency of the arcs, practically coincide.*

**Keywords:** *electric arc, furnace, steel, thermal radiation, power consumption.*

Об авторах:

МАКАРОВ Анатолий Николаевич – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники, Тверской государственной технической университет. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

КРУПНОВ Андрей Владимирович – старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственной технической университет. E-mail: AndreTheGianti@yandex.ru

ОКУНЕВА Виктория Валерьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственной технической университет. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

About the authors:

MAKAROV Anatoly Nikolaevich – Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Electricity and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

KRUPNOV Andrey Vladimirovich – Senior Lecturer, Department of Electricity and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: AndreTheGianti@yandex.ru

OKUNEVA Viktoria Valerievna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electricity and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

УДК 669.187:621.186

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ПОТОКОВ ТЕПЛОВЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ ДУГИ НА СТЕНЫ ПЕЧИ ДСППТ-25 И НА ВАННУ МЕТАЛЛА

*А.Н. Макаров, В.В. Лебедев*

© Макаров А.Н., Лебедев В.В., 2023

***Аннотация.** Приведены результаты расчета теплообмена в дуговой сталеплавильной печи постоянного тока емкостью 25 т (ДСППТ-25) на стены печи и на ванну металла при разных заглублениях дуги в металл и шлак (40 и 100 мм).*

***Ключевые слова:** электродуговая сталеплавильная печь, тепловое излучение, электрическая дуга, теплообмен.*

В настоящее время в мире до 40 % стали производят в дуговых сталеплавильных печах (ДСП). Во всех отраслях машиностроения Российской Федерации в литейном производстве используется около тысячи ДСП (рис. 1).

По методике [2] рассчитаны плотности потоков тепловых излучений на стены печи и ванну металла в ДСППТ-25. Схема для расчета потоков тепловых излучений дуги представлена на рис. 2.



Рис. 1. ДСП вместимостью 6 т металла [1]

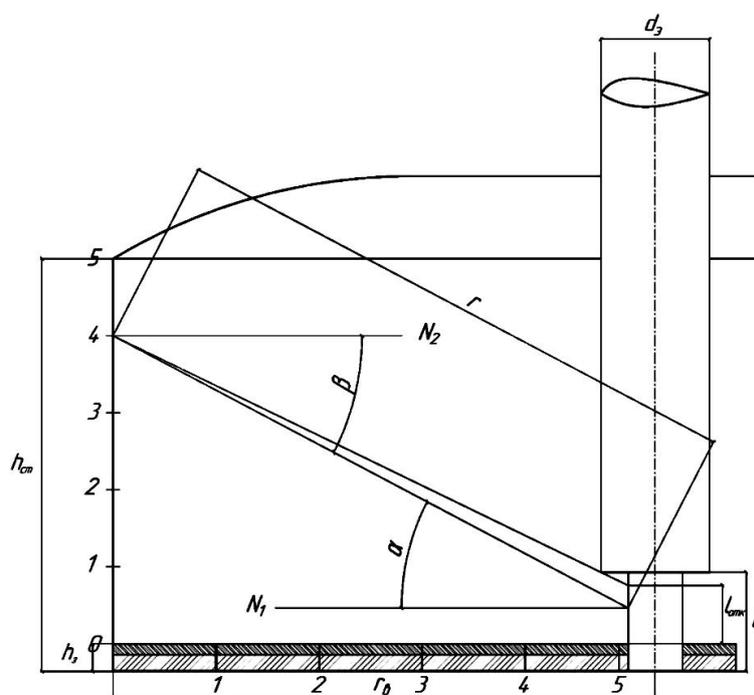


Рис. 2. Схема для расчета потоков тепловых излучений дуги

Исходные данные для расчетов ( $h_{ст}$  – высота стен печи;  $r_в$  – радиус ванны;  $h_з$  – высота заглибления дуги в металл и шлак;  $l_д$  – длина дуги;  $P_д$  – мощность дуги;  $\alpha_{ст}$  – коэффициент излучения дуги;  $d_э$  – диаметр электрода) приведены ниже.

#### Параметры ДСППТ-25

$h_{ст}$ , мм	$r_в$ , мм	$h_з$ , мм	$l_д$ , мм	$P_д$ , кВт	$d_э$ , мм	$\alpha_{ст}$ , град	
1 500	2 670	40	100	360	12 300	400	0,94

Формула для расчета теплового потока на стену печи имеет вид

$$q = \frac{\epsilon_{\text{СТ}} P_{\text{Д}} \cos\beta \cos\alpha l_{\text{ОТК}}}{p^2 r^2 l_{\text{Д}} e^{k.r}}$$

Формула для расчета теплового потока на ванну металла следующая:

$$q = \frac{\epsilon_{\text{СТ}} P_{\text{Д}} \sin^2\alpha l_{\text{ОТК}}}{2 p^2 r_{\text{В}} l_{\text{Д}}^2 e^{k.r}},$$

где  $q$  – плотность потока теплового излучения дуги на расчетную площадку, кВт/м<sup>2</sup>;  $l_{\text{ОТК}}$  – открытая часть дуги, излучающая тепловой поток на расчетную площадку в расчетные точки, мм;  $\alpha$  – угол между нормалью  $N_1$  и лучом  $r$ , проведенным из центра видимой части дуги в расчетную точку, град;  $\beta$  – угол, под которым открытая часть дуги излучает в расчетную точку, град;  $r$  – расстояние от открытой части дуги до расчетной точки, м;  $k$  – коэффициент поглощения газовой среды внутриванного пространства,  $k = 0,7$ .

Расчет плотности потоков теплового излучения на стены ДСПИТ-25 и на ванну металла производился для шести точек при разном заглублении дуги в металл и шлак (40 и 100 мм) для среды с коэффициентом поглощения  $k = 0,7$  и для лучепрозрачной среды (рис. 3).

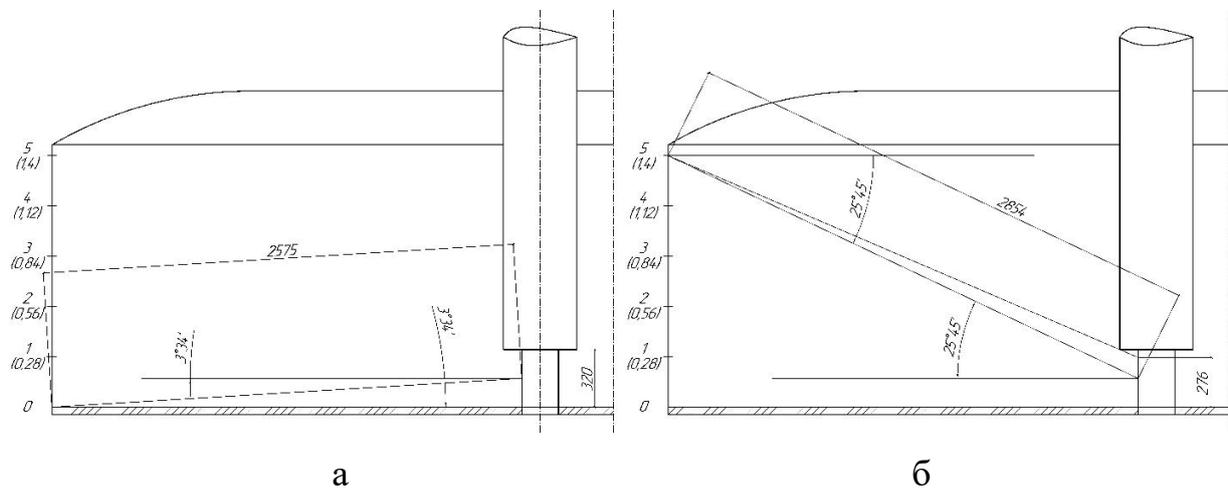
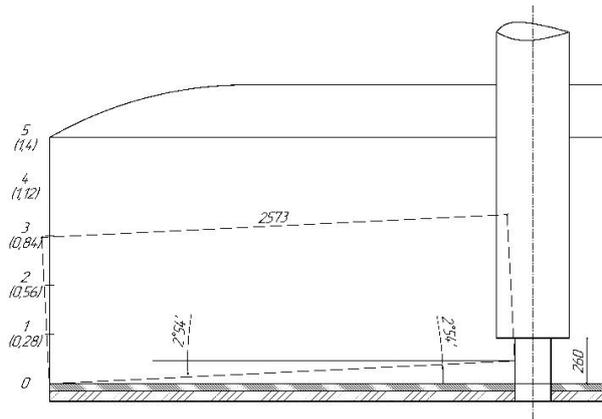
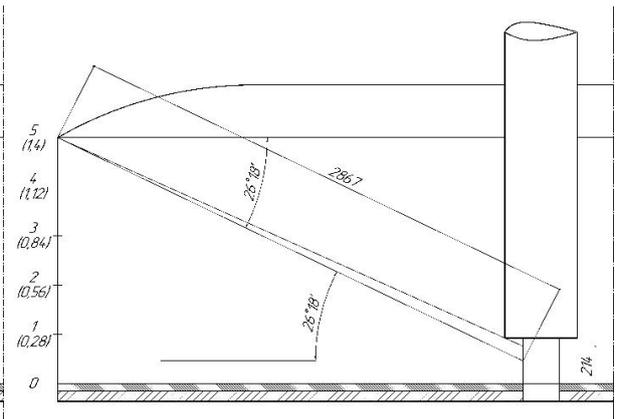


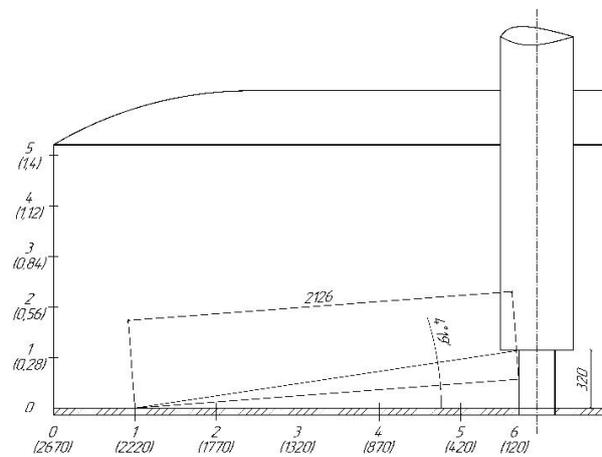
Рис. 3. Схема для расчета потоков тепловых излучений дуги в ДСПИТ-25 при длине дуги  $l_{\text{Д}} = 360$  мм: на стену при  $h_{31} = 40$  мм в расчетные точки 0 (а) и 5 (б); на стену при  $h_{32} = 100$  мм в расчетные точки 0 (в) и 5 (г); на ванну металла при  $h_{31} = 40$  мм в расчетные точки 1 (д) и 6 (е); на ванну металла при  $h_{32} = 100$  мм в расчетные точки 1 (ж) и 6 (и)



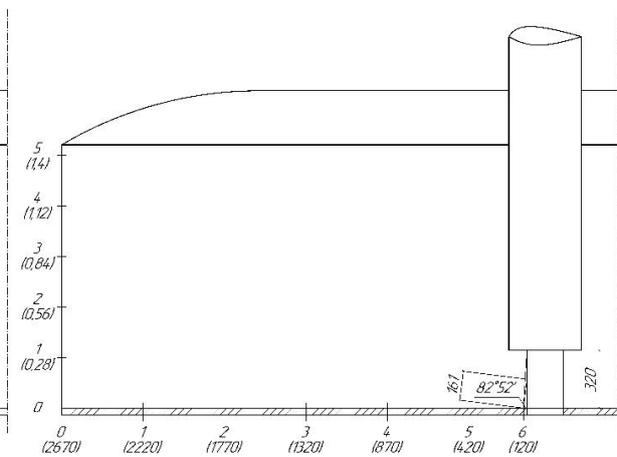
В



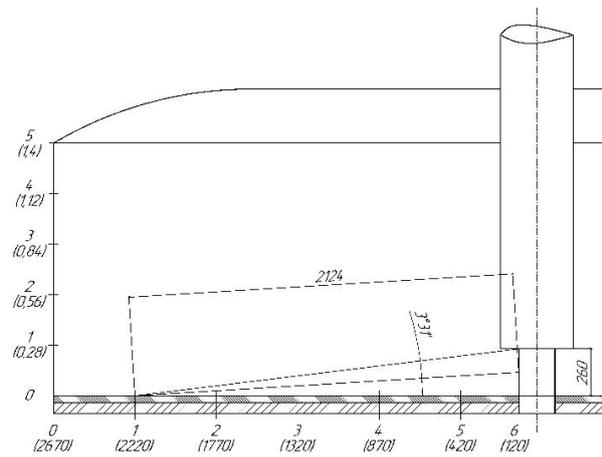
Г



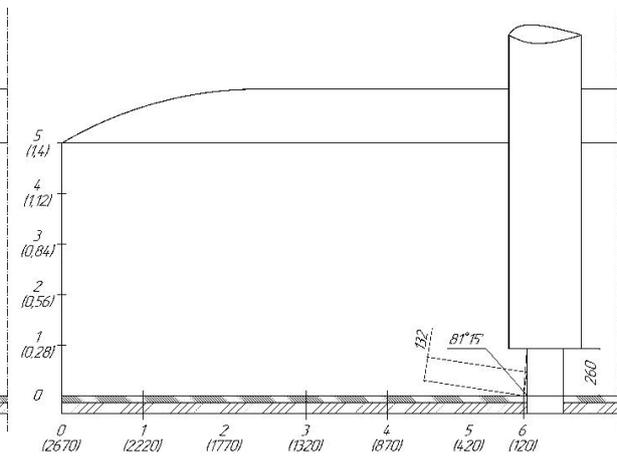
Д



е



Ж



И

Рис. 3. Продолжение

Результаты расчетов в виде графиков распределения плотности потока теплового излучения дуги по высоте стен представлены на рис. 4, 5.

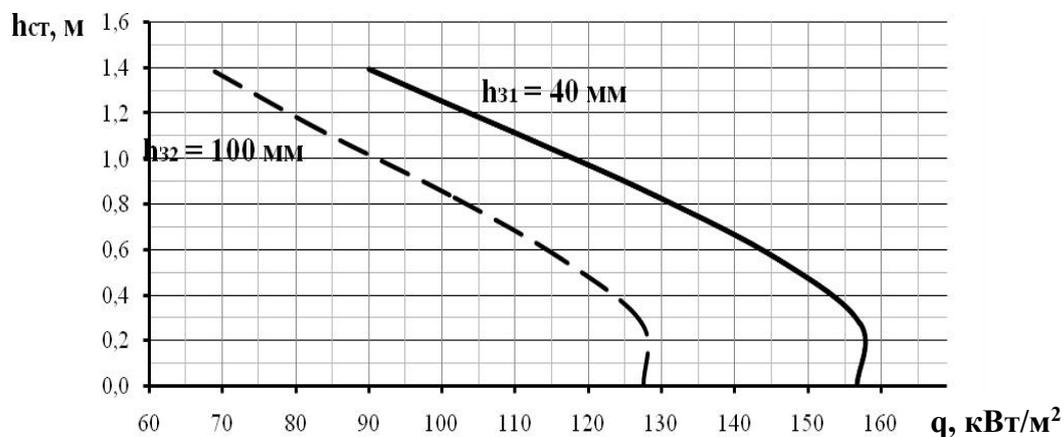


Рис. 4. Распределение плотности потока теплового излучения дуги по высоте стен ДСППТ-25 в лучепрозрачной атмосфере электропечи

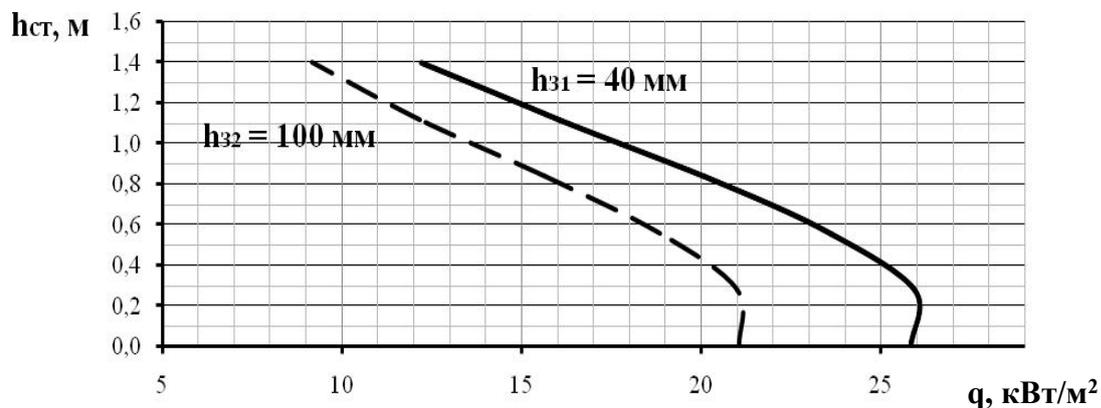


Рис. 5. Распределение плотности потока теплового излучения дуги по высоте стен ДСППТ-25 в поглощающей атмосфере электропечи

Результаты расчетов в виде графиков распределения плотности потока теплового излучения дуги на ванну металла представлены на рис. 6, 7.

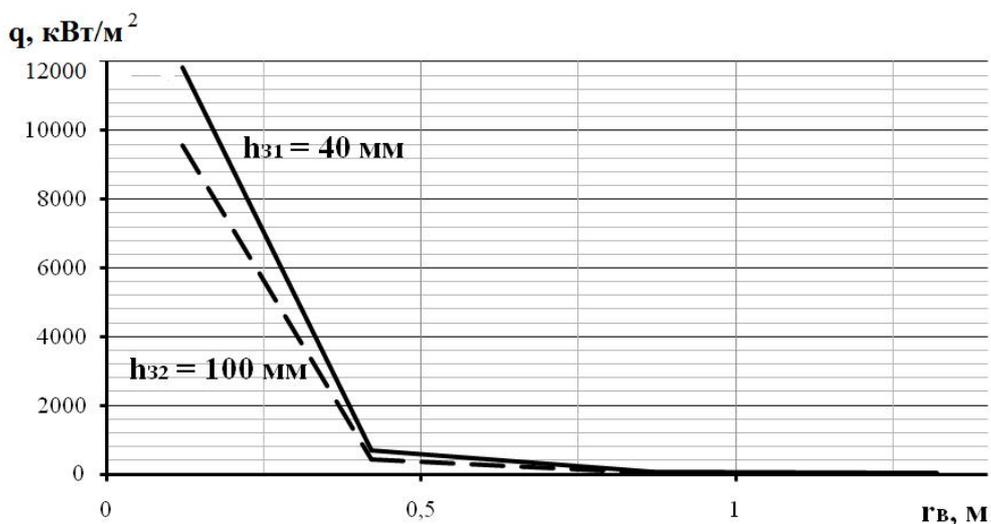


Рис. 6. Распределение плотности потока теплового излучения дуги на ванну металла ДСППТ-25 в лучепрозрачной атмосфере электропечи

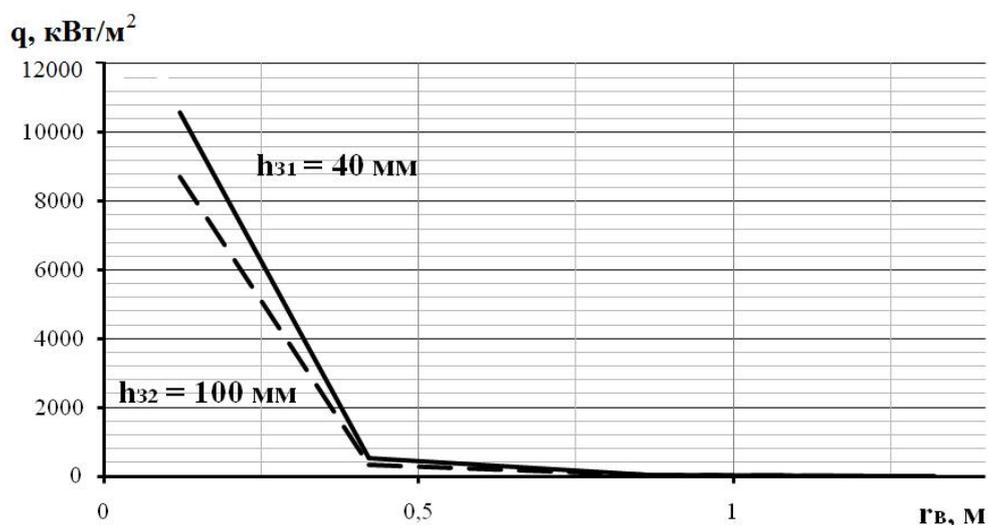


Рис. 7. Распределение плотности потока теплового излучения дуги на ванну металла ДСППТ-25 в поглощающей атмосфере электропечи

На основании проведенных расчетов было установлено, что при увеличении заглубления дуги в металл и шлак плотности потоков тепловых излучений дуг уменьшаются в 1,2–1,3 раза по всей высоте стен печи.

При увеличении заглубления дуги в металл и шлак плотности потоков тепловых излучений дуг на ванну металла уменьшаются в 1,6 раза вблизи столба дуги и в два раза в дальней точке. Это связано с тем, что с возрастанием заглубления дуги уменьшается ее открытая часть. Однако по оси дуги на ванне металла тепловые потоки дуг одинаковы, так как мощность дуг во всех расчетах одинакова.

При переходе от лучепрозрачной среды к поглощающей плотность потока теплового излучения на стены уменьшается в шесть раз в нижней точке и в семь раз в верхней.

При переходе от лучепрозрачной среды к поглощающей плотность потока теплового излучения на ванну металла уменьшается в 1,2 раза вблизи столба дуги и в 4,4 раза в дальней точке.

Материалы исследования могут быть использованы при выборе электротехнологических режимов работы ДСППТ-25.

### Библиографический список

1. Энергоресурсосбережение в промышленности: сборник научно-практических трудов / под ред. А.Н. Макарова. Вып. 8. Тверь: ТвГТУ, 2020. 232 с.

2. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых сталеплавильных и факельных нагревательных печах, топках паровых котлов, камерах сгорания газотурбинных установок: монография. М. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 452 с.

3. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках. СПб.: Лань, 2014. 384 с.

### RESULTS OF CALCULATION OF THERMAL RADIATION FLUXES OF THE ARC OF THE DSPPT-25 FURNACE ON WALLS AND ON METAL BATH

*A.N. Makarov, V.V. Lebedev*

**Abstract.** *The results of the calculation of heat transfer in a 25-ton direct current (DC) arc furnace (DSPPT-25) to the furnace walls and to the metal bath at different arc depths into metal and slag (40 and 100 mm) are presented.*

**Keywords:** *electric arc steelmaking furnace, thermal radiation, electric arc, heat exchange.*

Об авторах:

МАКАРОВ Анатолий Николаевич – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники, Тверской государственной технической университет. E-mail: [tgtu\\_kafedra\\_ese@mail.ru](mailto:tgtu_kafedra_ese@mail.ru)

ЛЕБЕДЕВ Виктор Витальевич – студент кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственной технической университет. E-mail: [shnuagele@mail.ru](mailto:shnuagele@mail.ru)

About the authors:

MAKAROV Anatoly Nikolaevich – Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: [tgtu\\_kafedra\\_ese@mail.ru](mailto:tgtu_kafedra_ese@mail.ru)

LEBEDEV Victor Vitalievich – Student of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: shnuagele@mail.ru

УДК 669.187:621.186

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ПОТОКОВ ТЕПЛОВЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ ДУГИ НА СТЕНЫ И ВАННУ МЕТАЛЛА ПЕЧИ ДСППТ-12

*А.Н. Макаров, Е.П. Алисова*

© Макаров А.Н., Алисова Е.П., 2023

*Аннотация.* В статье изложены результаты расчета плотностей потоков теплового излучения дуги по высоте стен дуговой сталеплавильной печи постоянного тока вместимостью 12 т металла (ДСППТ-12) при различной высоте слоя шлака.

*Ключевые слова:* электродуговая сталеплавильная печь, тепловое излучение, электрическая дуга, теплообмен.

По разработанной методике [1] рассчитали распределение плотностей потоков тепловых излучений дуг по ванне металла и стенам дуговой сталеплавильной печи постоянного тока ДСППТ-12 при различной высоте слоя шлака. Расчетные данные (расшифровка обозначений) приведены ниже:

№ параметра	Паспортные данные ДСП	Значение параметра
1	Тип печной установки	ДСППТ-12
2	$h_{ст}$	1 365
3	$r_B$ , мм	1 370
4	$h_3$ , мм	40   100
5	$l_{дп}$ , мм	413
6	$P_{дп}$ , кВт	7 000
7	$I_{дп}$ , кА	20
8	$U_{дп}$	350
9	$d_{зп}$ , мм	300
10	$\alpha_{ст}$	0,94
11	$k$	0   0,7
12	$S$ , кВА	9 600

Использованы следующие обозначения:

$h_{ст}$  – высота стен печи;

$r_b$  – радиус ванны ДСППТ-12;

$h_3$  – высота заглибления дуг в металл;

$l_d$  – длина дуги;

$P_d$  – мощность дуги;

$I_d$  – ток дуги;

$U_d$  – напряжение на дуге;

$d_э$  – диаметр электрода;

$\alpha_{ст}$  – коэффициент, показывающий, какая часть электрической мощности дуги выделяется в столбе дуги (коэффициент излучения дуги);

$k$  – коэффициент ослабления среды внутрипечного пространства;

$S$  – полная мощность.

Схема для расчета потоков тепловых излучений дуги в ДСППТ-12 приведена на рис. 1. На рис. 2 показаны необходимые построения для выполнения расчетов.

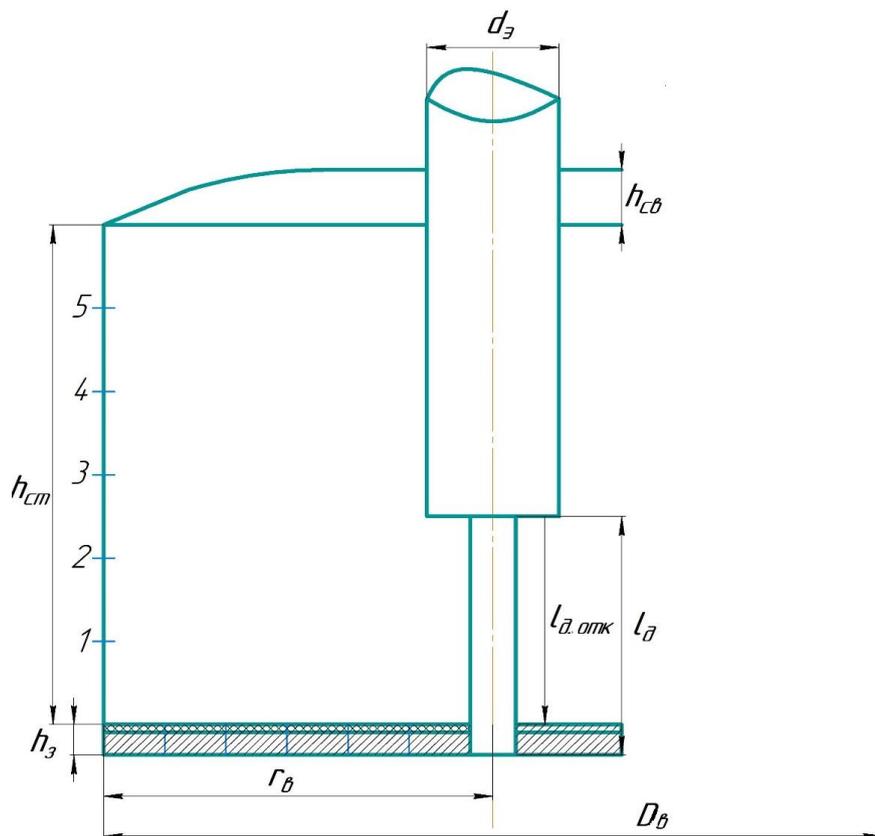


Рис. 1. Схема для расчета потоков тепловых излучений дуги на поверхности нагрева в ДСППТ-12:  $d_э$  – диаметр электрода;  $h_{св}$  – высота свода печи;  $h_{ст}$  – высота стен печи;  $h_3$  – высота заглибления дуги в металл и шлак;  $l_d$  – длина дуги;  $l_{д.отк}$  – длина открытой части дуги;

$r_B$  – радиус ванны

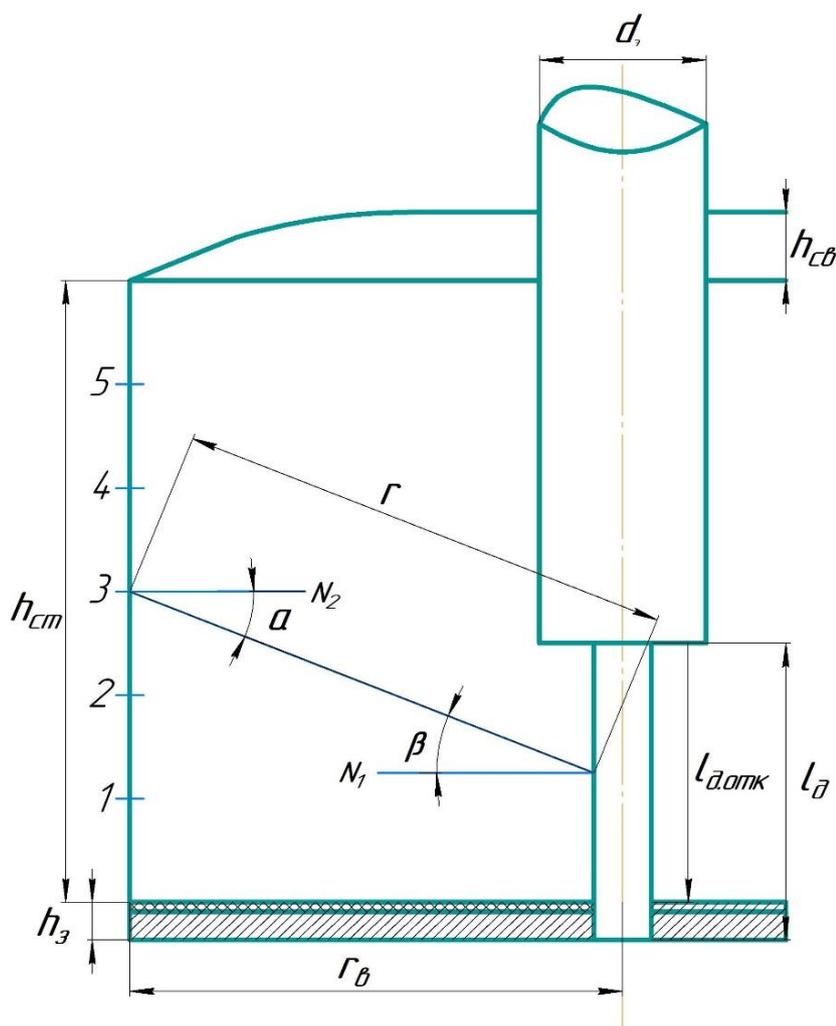


Рис. 2. Схема для расчета потоков тепловых излучений дуги на стены ДСППТ-12:  $r$  – расстояние от середины открытой части дуги до расчетной точки;  $\beta$  – угол между нормалью  $N_1$  и направлением излучения в расчетную точку;  $\alpha$  – угол между нормалью  $N_2$  и направлением излучения в расчетную точку

Плотность теплового потока излучения дуги на стены и свод определяется соответственно по формулам [1–3]:

$$q = \frac{\sigma_{CT} P_{Dmax} \cos\beta \cos\alpha l_{Dотк}}{p^2 r^2 l_D^2 e^{kr}}; \quad (1)$$

$$q = \frac{\sigma_{CT} P_{Dmax} \sin\beta^2 l_{отк}}{2 p^2 r l_D^2 e^{kr}}. \quad (2)$$

Расчет плотности потоков теплового излучения на стены ДСППТ-12 был выполнен для шести точек, расположенных на высоте 0; 0,25; 0,5; 0,75;

1,0; 1,265 м для  $k = 0$  и  $k = 0,7$ ; плотность потоков теплового излучения на ванну металла рассчитывалась также для шести точек. Примеры построений для четырех расчетных точек на ванне при  $h_3 = 40$  мм представлены на рис. 3, 4.

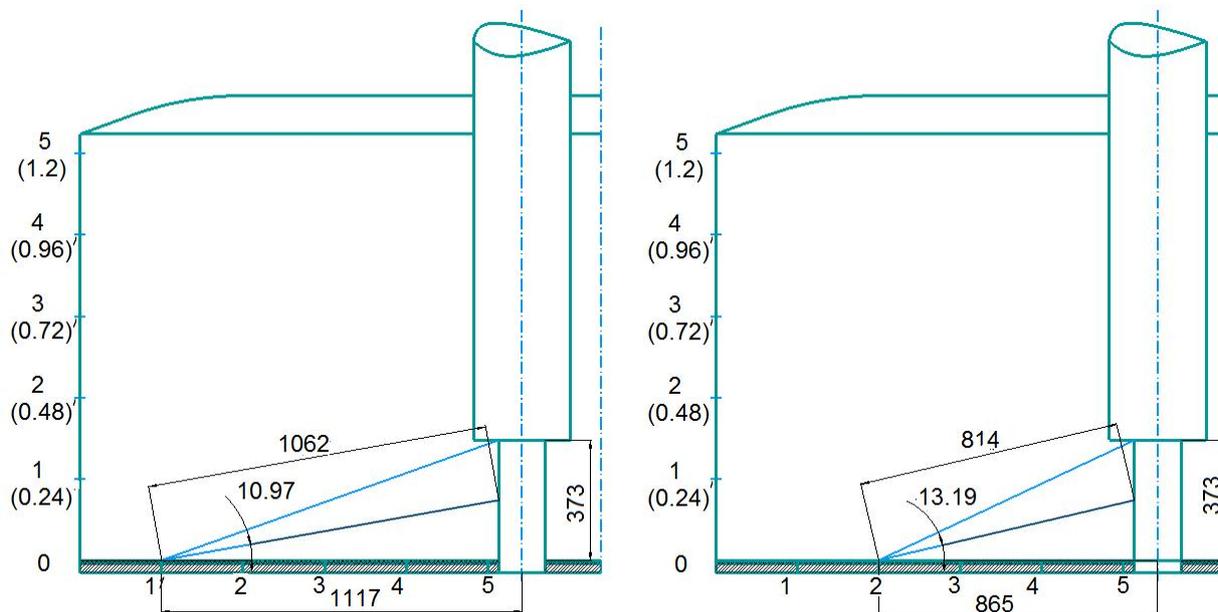


Рис. 3. Расчет потока теплового излучения дуги на ванну металла в точки 1 и 2 при  $h_3 = 40$  мм

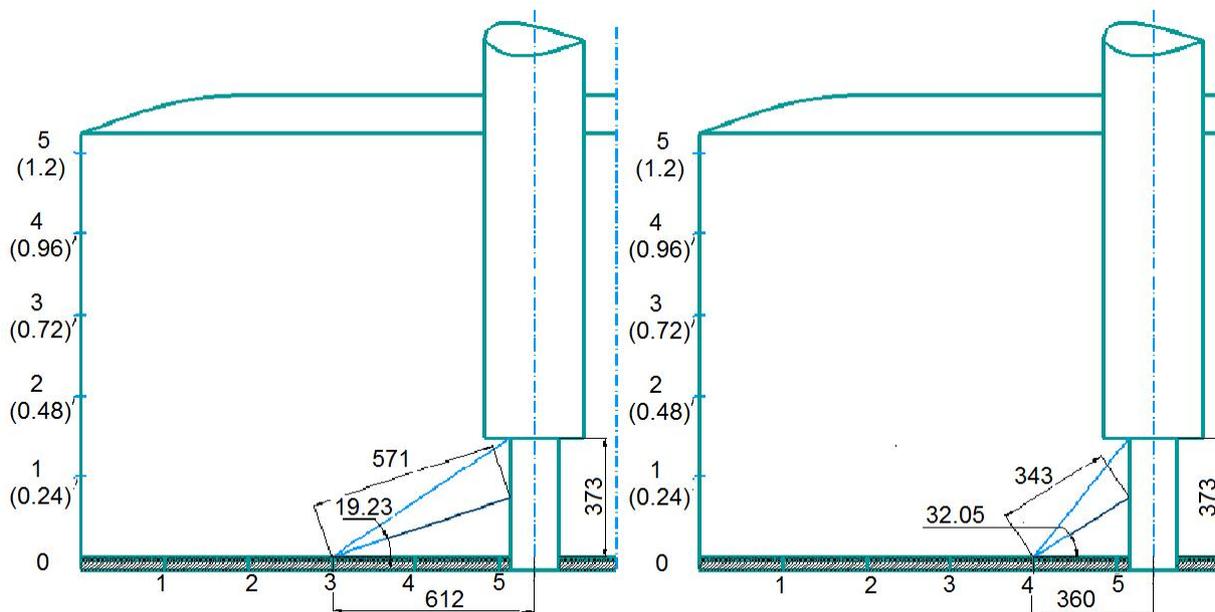


Рис. 4. Расчет потока теплового излучения дуги на ванну металла в точки 3 и 4 при  $h_3 = 40$  мм

На основании полученных результатов были построены графики, иллюстрирующие зависимость распределения потоков излучения по высоте стен и по радиусу ванны металла печи (рис. 5–7).

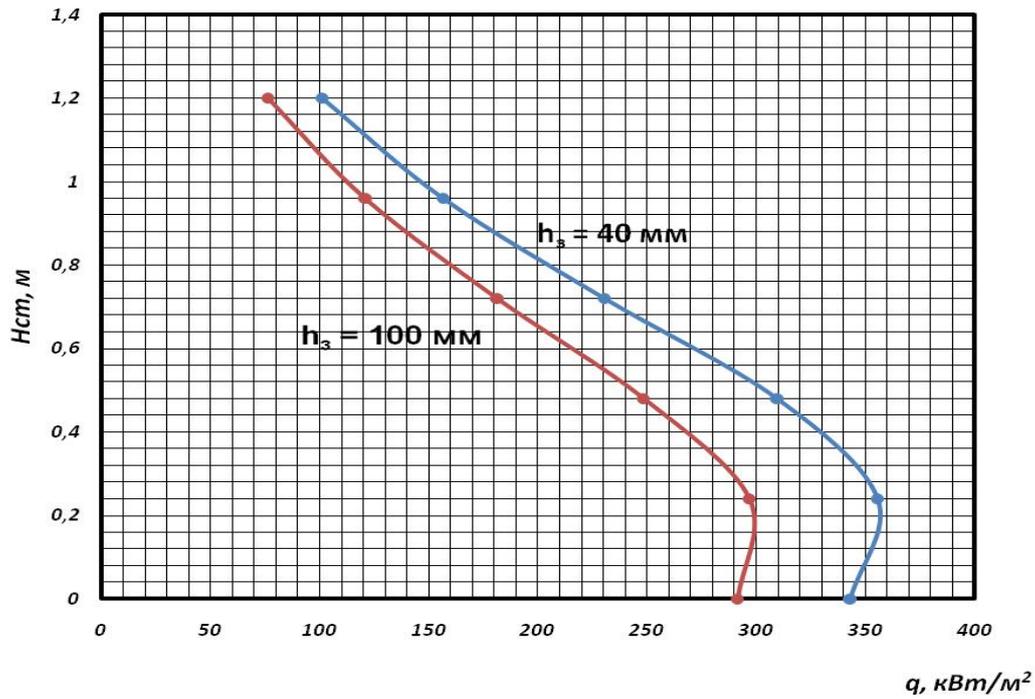


Рис. 5. Зависимость плотности теплового потока дуги от высоты стен в прозрачной среде ( $k = 0$ )

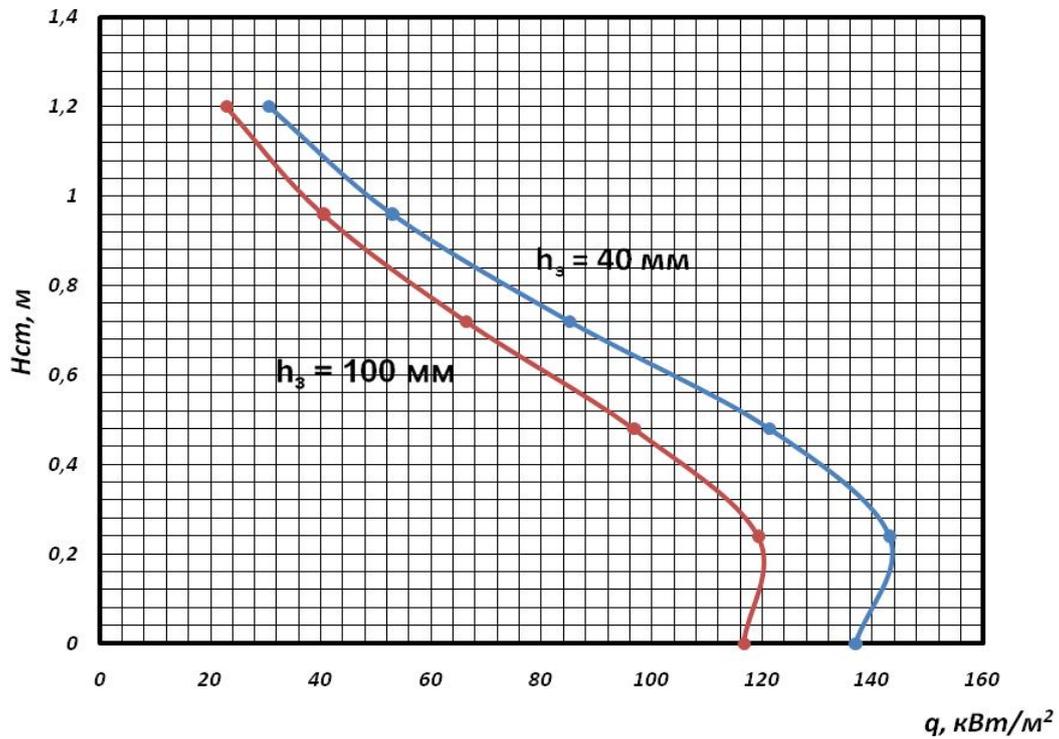


Рис. 6. Зависимость плотности теплового потока дуги от высоты стен в запыленной среде ( $k = 0,7$ )

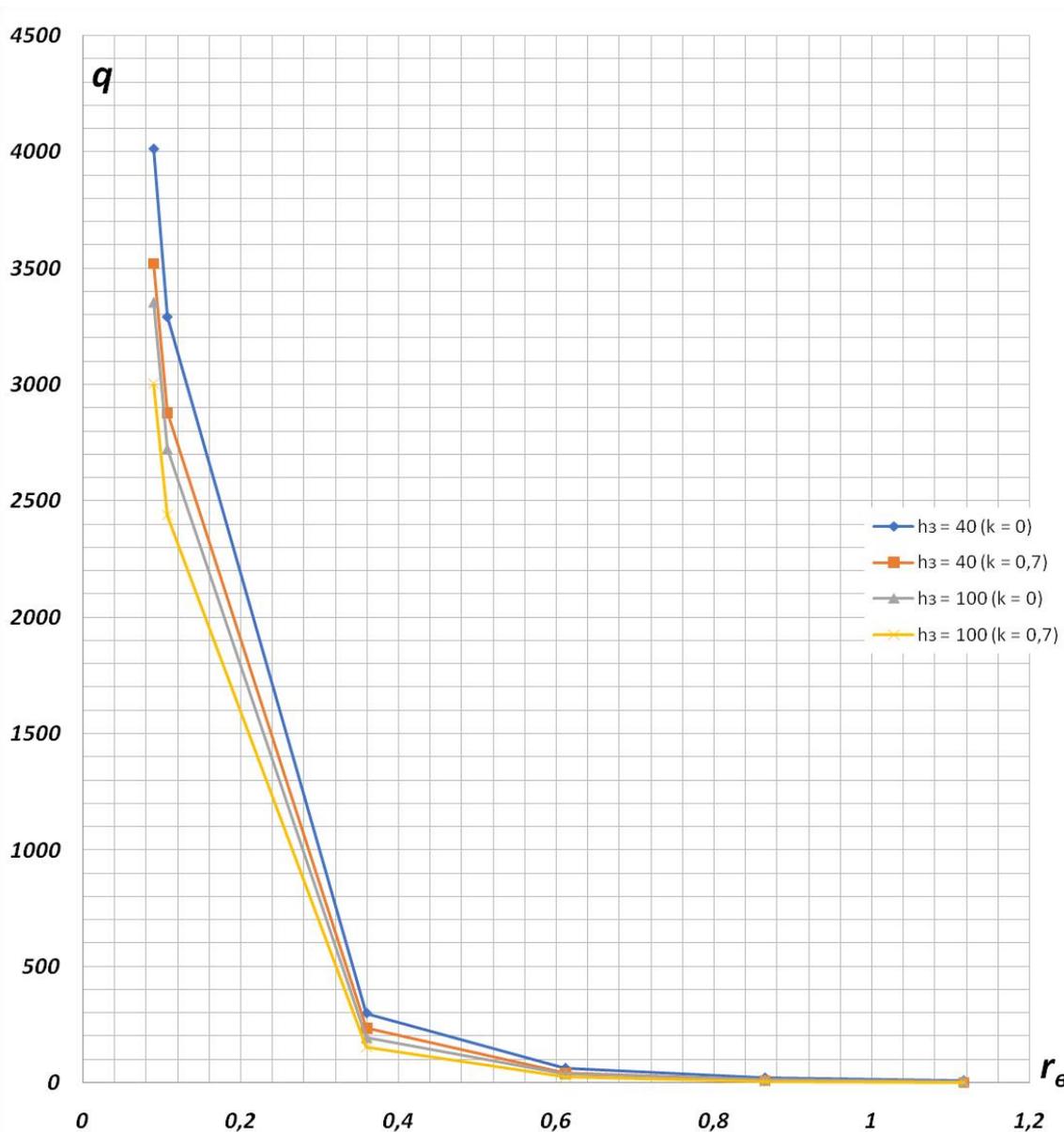


Рис. 7. Зависимость плотности тепловых потоков дуги от радиуса ванны печи при  $h_3 = 40$  мм и  $h_3 = 100$  мм

На основании проведенных расчетов (см. рис. 5–7) было установлено, что при увеличении заглубления дуг в металл и шлак плотности потоков тепловых излучений дуг уменьшаются в 1,2–1,3 раза по всей высоте стен печи. С ростом заглубления дуги в шлак тепловые потоки на расстоянии 0,5 м от дуги на ванне металла уменьшаются в 1,3–2,0 раза. При переходе от лучепрозрачной к поглощающей среде плотность потока теплового излучения на ванну металла уменьшается в 0,8 раза вблизи столба дуги и в 0,6 раза в дальней точке, а плотность потока теплового излучения на стены уменьшается в 2,5 раза в нижней и в 3,3 раза в верхней точке стен.

### Библиографический список

1. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках: учебное пособие. СПб.: Лань, 2014. 384 с.

2. Макаров А.Н., Окунева В.В., Алисова Е.П. Геометрическая и физическая модель дуги, горящей в дуговых сталеплавильных печах // Энергоресурсосбережение в промышленности: материалы научно-практической конференции 4–5 марта 2022 года, Тверь / под ред. А.Н. Макарова. Тверь: ТвГТУ, 2022. Вып. 10. С. 28–36.

3. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых сталеплавильных и факельных нагревательных печах, топках паровых котлов, камерах сгорания газотурбинных установок: монография. М. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 452 с.

## THE RESULTS OF THE CALCULATION OF THE THERMAL RADIATION FLUXES OF THE ARC ON THE WALLS AND THE METAL BATH DSPPT-12 FURNACES

*A.N. Makarov, E.P. Alisova*

**Abstract.** *This article presents the results of calculating the densities of the thermal radiation fluxes of the arc along the height of the walls of a 12-ton DC arc steelmaking furnace (DSPPT-12) at different heights of the slag layer.*

**Keywords:** *electric arc steelmaking furnace, thermal radiation, electric arc, heat exchange.*

Об авторах:

МАКАРОВ Анатолий Николаевич – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: [tgtu\\_kafedra\\_ese@mail.tu](mailto:tgtu_kafedra_ese@mail.tu)

АЛИСОВА Екатерина Петровна – студентка кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: [tgtu\\_kafedra\\_ese@mail.tu](mailto:tgtu_kafedra_ese@mail.tu)

About the authors:

MAKAROV Anatoly Nikolayevich – Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Electricity and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: [tgtu\\_kafedra\\_ese@mail.tu](mailto:tgtu_kafedra_ese@mail.tu)

ALISOVA Ekaterina Petrovna – Student of the Department of Electricity and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: [tgtu\\_kafedra\\_ese@mail.tu](mailto:tgtu_kafedra_ese@mail.tu)

УДК 669.187:621.186

# РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ПЛОТНОСТИ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ ОТ ДУГ НА ВАННУ МЕТАЛЛА В ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ EXCEL

*Н.В. Милютин, А.Н. Макаров*

© Милютин Н.В., Макаров А.Н., 2023

**Аннотация.** В статье анализируется распределение тепловых лучей от электрической дуги на ванну дуговой сталеплавильной печи (ДСП). Разработан алгоритм расчета плотности тепловых излучений для любой точки ванны металла с помощью программы Microsoft Office Excel. Предложенный алгоритм уменьшает погрешность построений и дает преимущество в скорости над общепринятым способом расчета.

**Ключевые слова:** электродуговая сталеплавильная печь, тепловое излучение, электрическая дуга, математическая модель, алгоритм расчета.

Рассмотрим алгоритм расчета плотности тепловых потоков на ванну металла от дуг в электродуговых сталеплавильных печах, разработанный на основе законов, открытых профессором А.Н. Макаровым. Новый алгоритм значительно уменьшает погрешности при построении распределения тепловых потоков от дуг на ванну металла, а также позволяет получить более подробную информацию о тепловых процессах, происходящих на поверхности ванны металла, за счет использования множества точек для графического отображения плотности тепловых потоков от дуг на ванну металла. Рассматриваемый алгоритм предполагает использование программной среды. Для примера используется программа Microsoft Office Excel как наиболее известная среди пользователей. Тепловой поток от электродуги на ванну металла рассчитывается с помощью формулы [1]:

$$q = \frac{\alpha_{ст} P_d \sin^2 \beta l_{отк}}{2 p^2 r l_d^2} e^{-kr}, \quad (1)$$

где  $q$  – плотность потока теплового излучения дуги на расчетную площадку, кВт/м<sup>2</sup>;  $\alpha_{ст}$  – доля мощности, выделяющаяся в столбе дуги;  $P_d$  – мощность дуги, кВт;  $k$  – коэффициент поглощения газовой среды внутрипечного пространства;  $l_{отк}$  – открытая часть дуги, излучающая поток теплового излучения на расчетную площадку в расчетные точки, мм;  $r$  – расстояние от середины открытой части дуги до расчетной точки, мм;  $\beta$  – угол, под которым открытая часть дуги излучает в расчетную точку, град;  $l_d$  – длина дуги, м.

Принцип расчета следующий: графически выбираются точки на плоскости ванны металла для определения таких геометрических показателей, как расстояние от середины открытой части дуги до точки, угол между тепловым лучом и ванной металла, и для выбранных точек рассчитывается плотность тепловых излучений.

Отличия нового алгоритма от стандартного:

1) графически выбирается только начальная точка, остальные будут рассчитаны автоматически;

2) алгоритм предоставляет возможность взять столько точек, сколько требуется, причем в любых местах за кратчайший отрезок времени.

Алгоритм расчета основан на геометрических аспектах распределения тепловых излучений от дуг к поверхности ванны металла. Необходимые построения показаны на рис. 1.

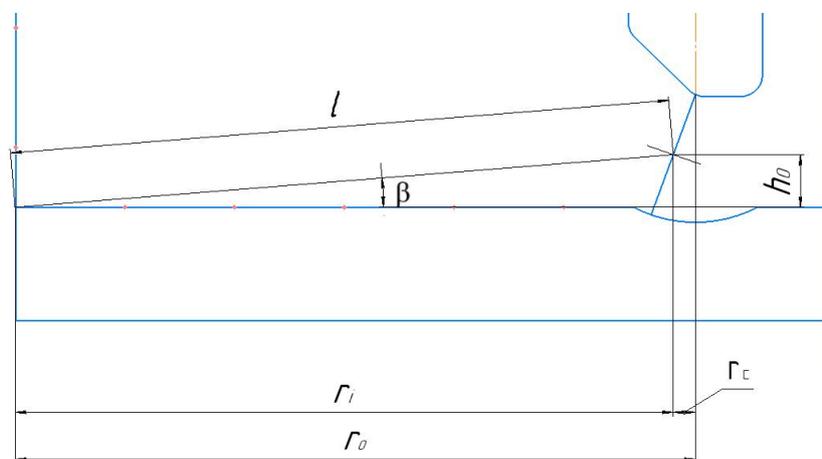


Рис. 1. Геометрические построения для расчета среднего теплового излучения от дуги:  $r_0$  – расстояние от начала дуги на электроде до расчетной точки;  $r_i$  – расстояние от середины открытой части дуги до расчетной точки по горизонтали;  $l$  – расстояние от середины открытой дуги до расчетной точки;  $h_0$  – расстояние от середины открытой части дуги до ванны металла;  $r_c$  – расстояние от начала дуги до середины открытой ее части по горизонтали

При изменении положения расчетной точки на плоскости ванны металла величины  $r_c$  и  $h_0$  будут оставаться постоянными при неизменном положении электрода. При приближении расчетной точки к дуге угол теплового излучения на ванну будет увеличиваться за счет уменьшения расстояния по горизонтали до середины открытой дуги. Для данного случая запишем:

$$\left. \begin{aligned} r_0 &= r_i + r_c, \\ h_0 &= \text{const}, \\ r_c &= \text{const}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Пользуясь системой (2) и данными рис. 1, получаем следующую систему уравнений для расчета угла  $\beta$  для любой расчетной точки плоскости ванны металла:

$$\left. \begin{aligned} \sin\beta_i &= \frac{h_o}{l_i}, \\ \cos\beta_i &= \frac{r_{oi}}{l_i}, \\ \operatorname{tg}\beta_i &= \frac{h_o}{r_{oi}}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Поскольку  $r_c = \text{const}$ ,  $h_o = \text{const}$ , после преобразования и подстановки формул (2) и (3) получим:

$$\left. \begin{aligned} r_c &= r_0 - \frac{h_o}{\operatorname{tg}\beta_0}, \\ r_{oi} &= \frac{h_o}{\operatorname{tg}\beta_i} + r_c, \\ l_i &= \frac{h_o}{\sin\beta_{ic}}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

С помощью выведенной системы уравнений можно рассчитать все параметры тепловых потоков и радиус-векторов от дуги к основным расчетным точкам на плоскости ванны металла, после чего параметры используются в формуле (1). Алгоритм поэтапного расчета представлен в табл. 1.

Таблица 1

Алгоритм расчета плотности тепловых потоков на ванну металла

№	Действие	Описание	Формула
1	2	3	4
1	Построение первой точки	Производится построение излучения от дуг к крайней точке у стены ДСП	Отсутствует
2	Расчет постоянных величин	Рассчитываются расстояния от начала дуги до середины ее открытой части по горизонтали и расстояния от середины открытой части до ванны	$r_c = r_0 - \frac{h_o}{\operatorname{tg}\beta_0}$ , где $h_o$ определяется из построений на рис. 1

№	Действие	Описание	Формула
1	2	3	4
		металла с шагом 1	

1	2	3	4
3	Определение углов	Выбирается диапазон расчетных углов, начиная от $\beta_0$ и заканчивая предельным углом, который может соответствовать точке ванны металла, граничащей с лункой, а также определяется шаг для расчетных углов	$\beta \in [\beta_0; \beta_{\text{lim}}];$ $\Delta\beta = \frac{B_{\text{lim}} - B_0}{n}$
4	Расчет геометрических размеров	Согласно полученным в п. 3 данным рассчитываются расстояния от средней точки дуги по горизонтали до расчетных точек и длины лучей. Расчеты производятся в программе Microsoft Office Excel	$r_{oi} = \frac{h_o}{\text{tg}\beta_i} + r_c;$ $l_i = \frac{h_0}{\sin\beta_i}$
5	Итоговый расчет теплового излучения	На основании полученных в п. 3 и 4 геометрических данных рассчитываются плотности тепловых излучений на ванну металла	$q = \frac{\sigma_{\text{ст}} P_{\text{д}} \sin^2 \beta l_{\text{отк}}}{2 p^2 r l_{\text{д}}^2} e^{-kr}$

В качестве примера по рассматриваемому алгоритму рассчитана плотность теплового излучения от дуг до ванны металла ДСП вместимостью 180 т (ДСП-180) для тока дуги в 65 кА, напряжения дуги 498 В, длины дуги 598 мм и заглубления дуги, равного 70 мм. Принятый в расчетах коэффициент задымления среды составляет 0,7.

Таблицы 2, 3 отражают расчеты по стандартному и по новому алгоритму.

Таблица 2

Результаты расчета по стандартному алгоритму

Точка	$\beta$	$L_{отк}, м$	$r, м$	$L, м$	$q, кВт/м^2$
1	4,7	0,561	3	3,1	0,396 682
2	5,5	0,561	2,51	2,6	0,914 161
3	7	0,561	2,01	2,1	2,619 073
4	9,3	0,561	1,52	1,6	8,581 812
5	13,85	0,561	1,029	1,1	39,224 24
6	26,27	0,561	0,56	0,6	342,161 3

Таблица 3

Результаты расчета по новому алгоритму

Точка	$\beta$	$L_{отк}, м$	$r, м$	$L, м$	$q, кВт/м^2$
1	4,7	0,561	3,003 771	3,1	0,395 139
2	4,9	0,561	2,881 449	2,977 248	0,487 646
3	5,1	0,561	2,768 732	2,864 101	0,594 787
4	5,3	0,561	2,664 532	2,759 472	0,717 825
5	5,5	0,561	2,567 922	2,662 431	0,858 037
6	5,7	0,561	2,478 101	2,572 18	1,016 718
7	6	0,561	2,354 615	2,448 049	1,292 225
8	6,3	0,561	2,242 911	2,335 699	1,616 668
9	6,7	0,561	2,109 562	2,201 49	2,133 135
10	7,4	0,561	1,910 967	2,001 386	3,297 696
11	7,7	0,561	1,836 936	1,926 709	3,910 153
12	8,7	0,561	1,627 148	1,714 765	6,515 846
13	9,7	0,561	1,460 766	1,546 223	10,117 93
14	10,7	0,561	1,325 62	1,408 914	14,882 03
15	11,7	0,561	1,213 7	1,294 828	20,970 49
16	12,7	0,561	1,119 522	1,198 48	28,541 42
17	13,7	0,561	1,039 201	1,115 984	37,747 97
18	14,7	0,561	0,969 909	1,044 513	48,737 67
19	15,7	0,561	0,909 539	0,981 959	61,651 86
20	16,7	0,561	0,856 489	0,926 721	76,625 19
21	17,7	0,561	0,809 52	0,877 556	93,785 15
22	18,7	0,561	0,767 655	0,833 491	113,251 6
23	19,7	0,561	0,730 119	0,793 748	135,136 5
24	20,7	0,561	0,696 285	0,757 7	159,543 5
25	21,7	0,561	0,665 641	0,724 836	186,567 2
26	22,7	0,561	0,637 767	0,694 733	216,293 8

Из приведенных в табл. 2 и 3 результатов следует: в новом алгоритме используется больше точек, что способствует более точному определению характеристик тепловых потоков по ванне металла сталеплавильной печи. При сравнении расчетных значений плотностей тепловых потоков при одних и тех же углах в стандартном и новом алгоритме видно, что они приблизительно равны, следовательно, новый алгоритм не дает погрешности. Другие преимущества предлагаемого метода рассмотрим на графике, представленном на рис. 2.

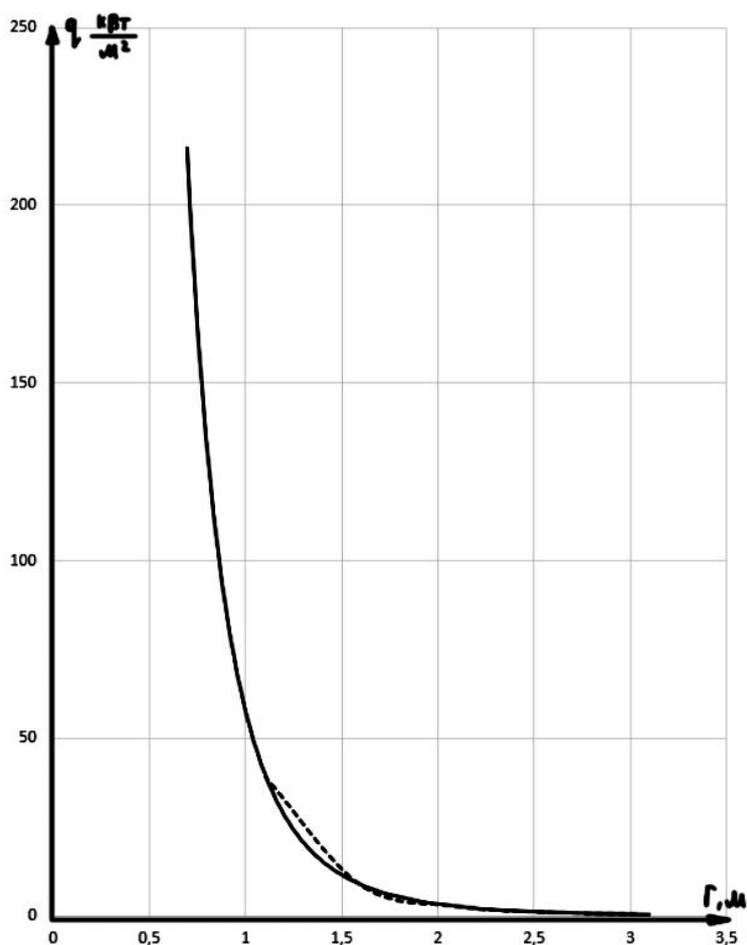


Рис. 2. График распределения плотностей тепловых потоков на ванну металла от дуг, полученного с помощью нового (сплошная линия) и стандартного (штриховая линия) алгоритмов

Как видно из рис. 2, многие расчетные точки, определенные с помощью нового и стандартного алгоритмов расчета, совпадают, за исключением области наибольшего изменения функции. Расхождение в этой области объясняется тем, что в старом методе взято меньшее количество точек и некоторые из них не попали в расчетную область. Представим основные преимущества и недостатки разработанного алгоритма.

*Преимущества:*

1. Высокая скорость расчетов. Благодаря использованию программной среды и общих формул для определения основных геометрических величин, затраты времени на расчет теплового излучения на ванну металла сокращаются в 10–20 раз.

2. Высокая точность расчетов, обеспечиваемая большим количеством точек.

3. Универсальность. Новый алгоритм подходит для печей любых габаритов и мощностей.

*Недостаток* нового алгоритма связан с возможностью его реализации исключительно с помощью ЭВМ. Вручную проще и быстрее определять плотности тепловых потоков старым методом расчета.

Таким образом, современный алгоритм расчета теплового излучения дуги на ванну металла имеет ряд преимуществ и рекомендуется для выполнения расчетов в программной среде EXCEL с использованием формул (1)–(4).

### **Библиографический список**

1. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках. СПб.: Лань, 2014. 384 с.

2. Макаров А.Н. Влияние конструктивного исполнения на энергоэффективность дуговых сталеплавильных печей обычной конструкции и Consteel // Металлург. 2018. № 10. С. 13–15.

3. Макаров А.Н., Свенчанский А.Д. Оптимальные тепловые режимы дуговых сталеплавильных печей. М.: Энергоатомиздат, 1992. 96 с.

4. Макаров А.Н. Расчет и анализ энергетических параметров плавков в дуговых сталеплавильных печах обычной конструкции и Consteel // Металлург. 2018. № 9. С. 30–36.

### **CONSTRUCTION OF AN ALGORITHM FOR CALCULATING THE INCREASED ACCURACY OF THE HEAT FLUX DENSITY PER METAL BATH IN ARC STEELMAKING FURNACES OF ANY SIZE USING THE EXCEL SOFTWARE ENVIRONMENT**

*N.V. Milyutin, A.N. Makarov*

*Abstract.* The article analyzes the distribution of heat rays from an electric arc on the bath of an arc steelmaking furnace (chipboard). An algorithm for calculating the density of thermal radiation for any point of the metal bath

*using the Microsoft Office Excel program has been developed. The proposed algorithm reduces the error of the constructions and gives an advantage in speed over the generally accepted method of calculation.*

**Keywords:** *electric arc steelmaking furnace, thermal radiation, electric arc, mathematical model, calculation algorithm.*

Об авторах:

Милютин Никита Владимирович – ассистент кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: [nik.milyutin@yandex.ru](mailto:nik.milyutin@yandex.ru)

Макаров Анатолий Николаевич – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: [tgtu\\_kafedra\\_ese@mail.ru](mailto:tgtu_kafedra_ese@mail.ru)

About the authors:

Milyutin Nikita Vladimirovich – Assistant of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: [nik.milyutin@yandex.ru](mailto:nik.milyutin@yandex.ru)

Makarov Anatoly Nikolaevich – Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: [tgtu\\_kafedra\\_ese@mail.ru](mailto:tgtu_kafedra_ese@mail.ru)

УДК 669.187:621.186

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ НА ИЗЛУЧЕНИЕ ОТ ДУГ В ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ ВМЕСТИМОСТЬЮ 90 ТОНН**

***Н.В. Милютин, А.Н. Макаров***

© Милютин Н.В., Макаров А.Н., 2023

**Аннотация.** *Анализируется зависимость тепловых потерь на излучение на плоскости печи и электрода от длины и радиуса дуги. Сделан вывод о том, что при увеличении длины дуги абсолютное значение тепловых потерь возрастает до определенного момента времени плавки металла, а радиус дуги не оказывает существенного влияния на величину тепловых потерь.*

*Ключевые слова:* электродуговая сталеплавильная печь, тепловое излучение, электрическая дуга, алгоритм расчета, тепловые потери.

Актуальность исследования факторов, влияющих на потери излучения дуги на внутренние поверхности печи и электродов в дуговых сталеплавильных печах (ДСП), обусловлена тем, что потери приводят к снижению энергоэффективности печи. В статье рассматривается влияние длины и радиуса дуги на потери излучения дуги на внутренние поверхности печи и электродов и на время плавления металла. В основу анализа взяты показатели работы ДСП вместимостью 90 т (ДСП-90) [1–3].

Исследование потерь дуги на излучение на поверхности дуговой печи и электрода в зависимости от длины и радиуса дуги направлено на решение задачи повышения энергоэффективности процессов плавления. На потребление электроэнергии печью из питающей сети оказывают влияние два фактора: длительность плавления металла и мощность электрических дуг.

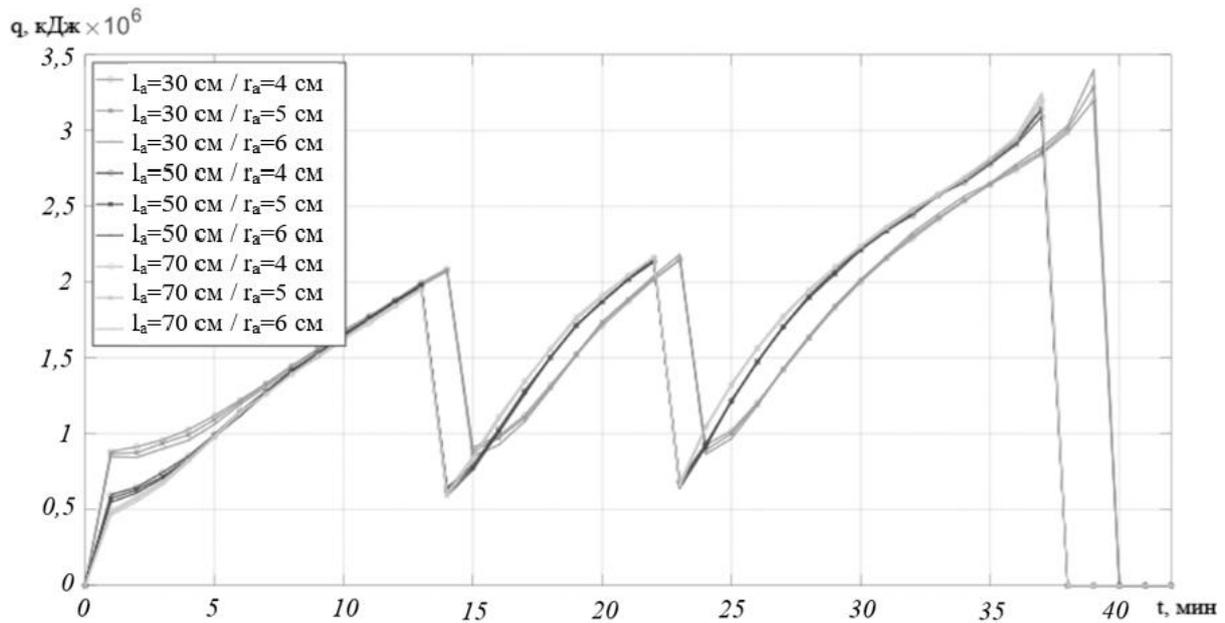
В статье анализируются тепловые потери дуги на излучение на поверхности печи и электродов и рассмотрены возможные пути их снижения. Потери дуги на излучение, а также полезную энергию (излучение дуги на твердый и жидкий металл) разложим на несколько составляющих в виде распределения теплового излучения дуги на стены, свод печи, электрод и ванну металла. Получим уравнения:

$$\begin{aligned} Q_{\text{ген}} &= Q_{\text{тм}} + Q_{\text{жм}}; \\ \Delta Q &= Q_{\text{к}} + Q_{\text{с}} + Q_{\text{эг}} + Q_{\text{эв}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $Q_{\text{ген}}$  – полезная энергия;  $Q_{\text{тм}}$  – тепловое излучение на твердый металл;  $Q_{\text{жм}}$  – тепловое излучение на жидкий металл;  $\Delta Q$  – тепловые потери;  $Q_{\text{к}}$ ,  $Q_{\text{с}}$ ,  $Q_{\text{эг}}$ ,  $Q_{\text{эв}}$  – потери на крышу, стены, горизонтальную и вертикальную плоскости электрода соответственно.

В процессе плавки стали в ДСП-90 длина дуг изменяется в диапазоне от 30 до 70 см, а их радиус – в пределах от 4 до 8 см. Влияние размеров дуг на процесс плавления оценивалось на примере использования дуг длиной 30, 50 и 70 см и радиусом длиной 4, 5 и 6 см. Потери на излучение дуги в процессе плавления 90 т металла в зависимости от длины и радиуса дуги в функции времени представлены на рисунке.

Как видно из графика, наибольшие потери соответствуют дуге с радиусом 6 см и наименьшими длиной (30 см) и мощностью. Влияние радиуса дуги на тепловые потери минимально (при одной и той же длине дуг потери при различных радиусах дуг совпадают).



### Динамические потери энергии дуги

в зависимости от ее длины и радиуса:  $q$  – потери дуги на излучение на стены, свод печи и электроды;  $t$  – время плавки 90 т металла;  $l_a$  – длина дуги (см);  $r_a$  – радиус дуги (см)

Время работы ДСП с использованием дуг длиной 50 и 70 см в среднем на 2 мин меньше, чем при использовании дуги длиной 30 см, а чем меньше время работы печи, тем меньше абсолютные потери на излучение на поверхности печи и электродов.

Влияние радиуса дуги на абсолютные потери на излучение на стены и электроды ДСП представлено в таблице.

### Числовые показатели потерь на излучение в ДСП-90

№	Длина дуги, см	Радиус дуги, см	Абсолютные потери, МДж	Средние потери, МДж	Отклонение, %
1	30	4	75,927	75,718	0,28
2		5	75,623		0,13
3		6	75,606		0,15
4	50	4	68,747	68,713	0,05
5		5	68,712		0,00
6		6	68,681		0,05
7	70	4	69,619	69,601	0,03
8		5	69,601		0,00
9		6	69,584		0,02

Из приведенных в таблице данных видно, что отклонение потерь энергии при изменении радиуса дуги стремится к нулю при любых рассматриваемых длинах дуг, а при 50- и 70-сантиметровых дугах практически равно нулю. Зависимость средних абсолютных потерь от длины дуги носит нелинейный характер и для исследованных режимов работы печи минимальна при длине дуги 50 см.

#### **Выводы:**

1) потери на излучение на поверхности печи и электродов приблизительно равны при одних и тех же длинах дуг и разных их радиусах;

2) с увеличением длины дуги время плавки металла сокращается в среднем на 2 мин, что уменьшает средние абсолютные потери на излучение на поверхности печи и электродов;

3) абсолютная величина потерь на излучение на поверхности печи и электродов имеет нелинейный характер и требует дополнительного исследования, но при длинных дугах (70 см в данном исследовании) этот показатель возрастает.

Задача оптимизации режимов работы ДСП за счет уменьшения потерь на излучение на поверхности печи и электродов, исходя из выводов 2 и 3, следующая: нахождение оптимальной длины дуги, при которой время плавления металла и потребляемая мощность из питающей сети дуговой сталеплавильной печи будут минимальными. Влияние радиуса дуги на тепловые потери не выявлено.

#### **Библиографический список**

1. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках. СПб.: Лань, 2014. 384 с.

2. Johannes Gerhardt Bekker, Ian Keith Craig, Petrus Christiaan Pistorius. Modeling and Simulation of an Electric Arc Furnace Process // ISIJ International. 1999. Vol. 39. Issue 1. Pp. 23–32. URL: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.39.23> (дата обращения: 15.04.2023).

3. Vito Logar, Dejan Dovžan, Igor Škrjanc. Modeling and Validation of an Electric Arc Furnace. Part 1. Heat and Mass Transfer // ISIJ International. 2012. Vol. 52. Issue 3. Pp. 402–412.

#### **NUMERICAL STUDY OF HEAT LOSSES IN AN ARC STEEL FURNACE WITH A CAPACITY OF 90 TONS**

*A.N. Makarov, N.V. Milyutin*

*Abstract.* The dependence of heat losses on radiation on the plane of the furnace and electrode on the length and radius of the arc is analyzed. It is concluded that with an increase in the arc length, the absolute

*value of heat losses increases up to a certain point in the melting time of the metal, and the arc radius does not significantly affect the amount of heat losses.*

**Keywords:** *electric arc steelmaking furnace, thermal radiation, electric arc, calculation algorithm.*

Об авторах:

Милютин Никита Владимирович – ассистент кафедры электро-снабжения и электротехники, Тверской государственной технической университет. E-mail: [nik.milyutin@yandex.ru](mailto:nik.milyutin@yandex.ru)

Макаров Анатолий Николаевич – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники, Тверской государственной технической университет. E-mail: [tgtu\\_kafedra\\_ese@mail.ru](mailto:tgtu_kafedra_ese@mail.ru)

About the authors:

Milyutin Nikita Vladimirovich – Assistant of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: [nik.milyutin@yandex.ru](mailto:nik.milyutin@yandex.ru)

Makarov Anatoly Nikolaevich – Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: [tgtu\\_kafedra\\_ese@mail.ru](mailto:tgtu_kafedra_ese@mail.ru)

УДК 669.187:621.186

## **ВЗАИМОСВЯЗЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО, ШЛАКОВОГО РЕЖИМОВ И ТЕПЛООБМЕНА В ВЫСОКОМОЩНЫХ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ**

### **ЧАСТЬ I. ВЛИЯНИЕ ШЛАКОВОГО РЕЖИМА НА ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ДУГ НА СТЕНЫ**

*А.Н. Макаров, А.В. Крупнов, А.Ю. Соколов*

© Макаров А.Н., Крупнов А.В.,  
Соколов А.Ю., 2023

**Аннотация.** *В статье изложена методика расчета тепловых потоков излучения дуг на стены и представлены результаты исследования теплообмена в высокомошной дуговой сталеплавильной печи вместимостью 100 т металла (ДСП-100). Показано влияние высоты слоя*

шлака и запыленности атмосферы печи на плотности тепловых потоков от трех дуг на водоохлаждаемые панели стен. Исследовано влияние шлакового режима на тепловое излучение на ванну металла, взаимосвязь шлакового режима с КПД дуг и удельным расходом электроэнергии.

**Ключевые слова:** электрическая дуга, дуговая сталеплавильная печь, теплообмен, тепловое излучение.

## Введение

Основным источником тепловой энергии, расходуемой на расплавление металла, в электродуговых сталеплавильных печах являются электрические дуги. В современных высокомоощных ДСП для интенсификации плавки применяют газокислородные горелки, инжекторы для вдувания углеродосодержащего порошка, которые выступают дополнительным источником тепловой энергии от экзотермических реакций и реакций окисления элементов шихты. В балансе тепловой энергии, поступающей в печь, 55–65 % приходится на электрические дуги и 35–45 % на долю средств интенсификации [1, 2]. Подведенная к дугам электрическая энергия преобразуется в тепловую энергию; последняя передается шихте излучением, доля которого в тепловой энергии достигает 92–96 %, а также конвекцией и теплопроводностью (4–8 %) [2–5].

Для выяснения влияния шлакового режима на теплообмен в высокомоощных ДСП-100, взаимосвязи с КПД дуг произведен расчет распределения плотности потоков тепловых излучений дуг по высоте стен в лучепрозрачной и загазованной атмосфере печи при неизменной длине дуги. Величину заглубления дуг в ванну металла и шлак приняли 100 мм, 230 мм, 360 мм, 450 мм. Параметры ДСП и электрического режима приведены ниже:

$D_{в}$ , м	$d_{р}$ , м	$h_{ст}$ , м	$d_{э}$ , мм	$\gamma$ , град.	$U_{д}$ , В	$I_{д}$ , кА	$P_{д}$ , МВт	$l_{д}$ , мм	$U_{2Л} / U_{2Ф}$ , В
5,4	1,4	2,5	600	35	360	50	18	425	829–300 / 479–173

## Построение модели для расчета

Определение плотностей потоков тепловых излучений от дуг на поверхности стен основано на методике, изложенной в [1]. На рис. 1 представлены необходимые построения в программе «КОМПАС» для расчетов, выполняемых в масштабе в MS Excel.



перпендикуляром  $N1$  – к оси дуги, проведенном в начало луча  $r$  на дуге, град.;  $\beta$  – угол между нормалью  $N2$  к поверхности стен в расчетную точку и лучом  $r$ , град.;  $\Theta$  – угол электродинамического отклонения оси дуги от оси электрода, определяется по методике, представленной в учебном пособии [1].

### **Определение заглубления в ванну металла и отклонения дуги от оси электрода**

Величина заглубления дуги для этих печей составляет 1,3 мм/кА и может быть определена по формуле [3]:

$$h_m = 1,3 \cdot I_d, \text{ мм},$$

где  $I_d$  – ток электрической дуги, протекающий во вторичной цепи ДСП, кА. Получаем высоту заглубления дуги в ванну металла:

$$h_m = 1,3 \cdot 50 = 65 \text{ мм}.$$

Для построения отклонения дуги от оси электрода нужно определить радиус шаровой поверхности сегмента, мм:

$$r_c = l_d, \text{ мм},$$

где  $l_d$  – длина дуги, мм.

Получим

$$r_c = 425 \text{ мм}.$$

Дуга отклоняется от оси электрода на расстояние АВ, мм, которое можно приближенно определить по выражению

$$l_{AB} = \frac{l_{AD}}{\sqrt{2}}, \text{ мм}.$$

На рис. 2 представлена модель пространства печи для определения плотности тепловых потоков, построенная для ДСП-100 с учетом электромагнитного выдувания электрической дуги.

Плотность потока теплового излучения от каждой дуги на расчетную площадку, расположенную на поверхности стен ДСП, находится по формуле

$$q = \frac{\varphi_{DF} P_d}{F e^{kr}} = \frac{\alpha_{CT} P_d \cos \alpha \cos \beta l_{OTK}}{\pi^2 r^2 l_d} e^{-kr}, \text{ кВт/м}^2,$$

где  $\varphi_{DF}$  – локальный угловой коэффициент излучения электрической дуги на расчетную площадку [1, 3];  $F$  – расчетная площадка, м<sup>2</sup>;  $\alpha_{CT}$  – доля мощности дуги, выделяющаяся в столбе дуги [3];  $P_d$  – мощность дуги, кВт;  $k$  – коэффициент поглощения газовой атмосферы печи [1, 3].

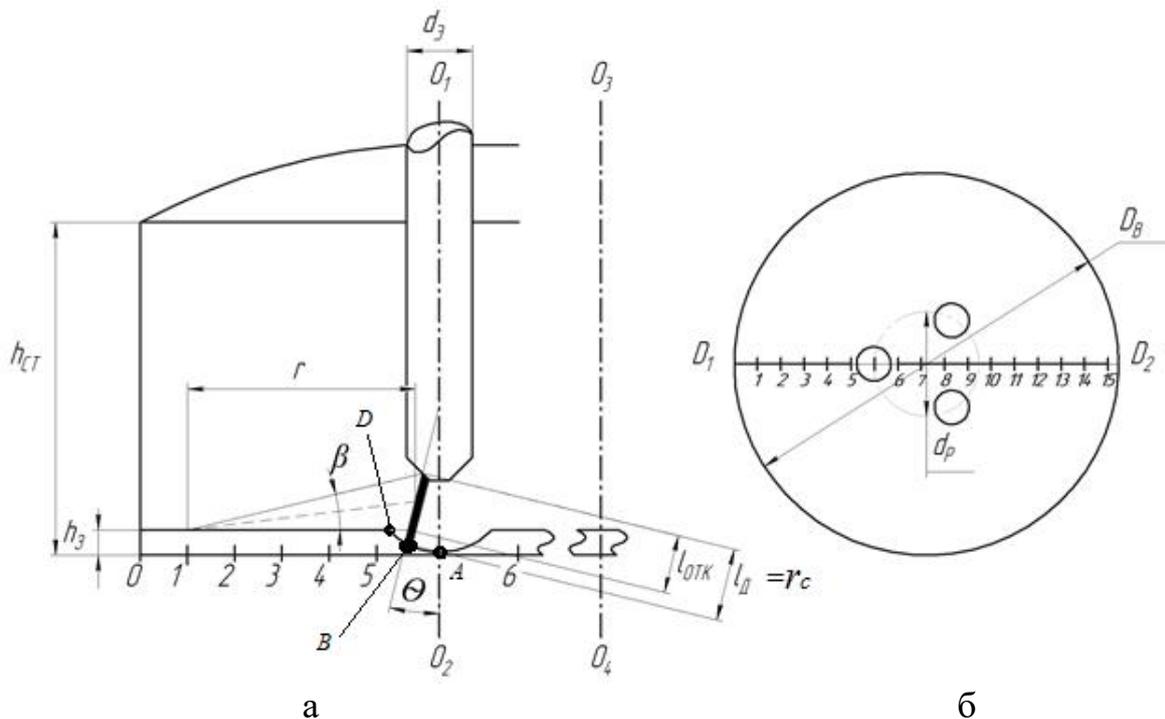


Рис. 2. Модель для расчета потоков тепловых излучений дуг на поверхность ванны металла (а); взаиморасположение электродов, ванны металла, стен и расчетных площадок (б) (масштаб уменьшен)

В атмосфере печи находятся взвеси твердых и жидких частиц, причем плотность пылегазовой смеси меняется от 5 до 50 г/м<sup>3</sup> [6–8]. Поэтому для полной картины анализ проведен как для лучепрозрачной, так и для запыленной атмосферы печи. Запыленность атмосферы печи учтена в формуле плотности потока теплового излучения коэффициентом поглощения газовой атмосферы печи, который может изменяться в пределах от 0 до 1,4 [1]. В расчете принято среднее значение коэффициента  $k = 0,7$ .

### Методика проведения расчетов

Плотность теплового потока для расчетной точки определяется следующим образом:

1. Из расчетной точки на стене, например из точки 3 (см. рис. 1в), проводим к видимой части дуги две линии, одна из которых опускается на видимое начало дуги (рядом с электродом), а вторая – на видимое окончание дуги (рядом с ванной металла). Получаем длину открытой части дуги  $l_{OTK}$ .

2. Находим середину открытой части дуги и проводим линию в расчетную точку 3. Определяем длину полученной линии  $r$ .

3. Проводим нормали к расчетной точке на стене  $N1$  и к полученному центру открытой части дуги  $N2$ .

4. Из полученного построения определяем углы  $\alpha$  и  $\beta$ .

5. По формуле плотности потока теплового излучения вычисляем плотность потока теплового излучения для лучепрозрачной среды печи:  $k = 0$ , а также для загазованной среды:  $k = 0,7$ .

6. Повторяем построения и расчет для выбранной точки для двух остальных дуг.

7. Суммируем полученные значения плотностей потока теплового излучения для расчетной точки, то есть определяем суммарное тепловое воздействие от трех дуг на расчетную площадку.

### Результаты расчетов

Для выявления влияния высоты слоя шлака на плотность тепловых потоков излучения на стены печи ДСП-100 приняты следующие значения заглубления дуг в металл и шлак при длине дуги 425 мм:

$h_3 = 100$  мм – дуга заглублена в металл и шлак на 23,5 % от своей длины;

$h_3 = 230$  мм – дуга заглублена в шлак на 54 % от своей длины;

$h_3 = 360$  мм – дуга заглублена в шлак на 84,7 % от своей длины;

$h_3 = 450$  мм – дуга заглублена на всю высоту, а уровень шлака поднят на 25 мм над дугой.

На рис. 3 представлены результаты расчетов распределения плотностей тепловых потоков излучений от трех дуг по высоте стен напротив дуг в лучепрозрачной атмосфере при  $k = 0$  и задымленной атмосфере печи при  $k = 0,7$ .

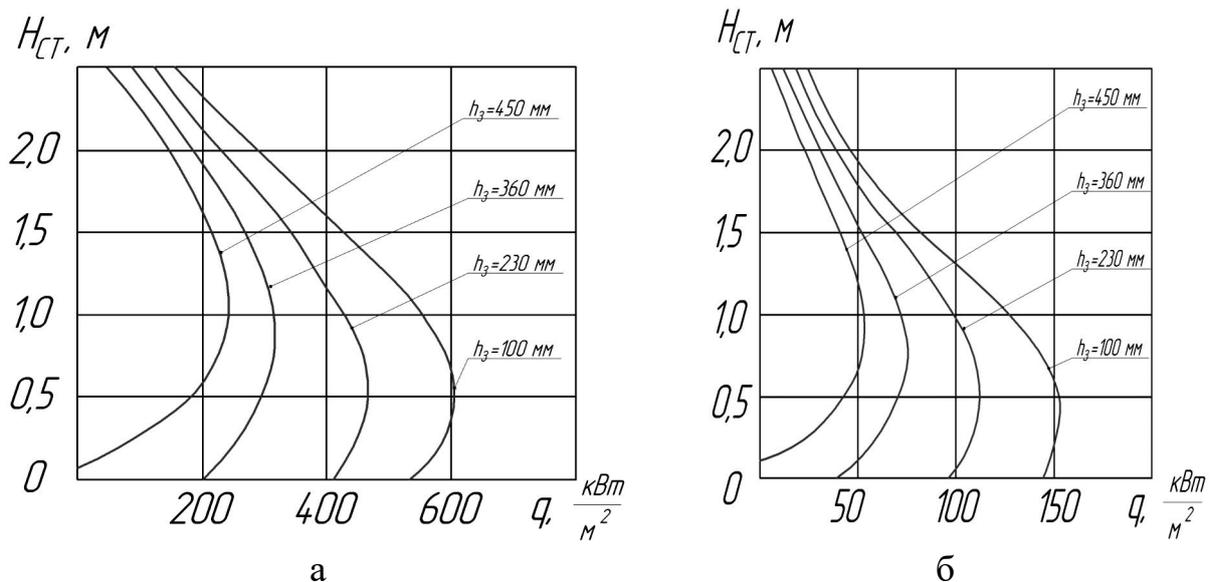


Рис. 3. Распределение плотностей потоков тепловых излучений дуг по высоте стен на участки, расположенные напротив дуг, в лучепрозрачной (а) и задымленной (б) атмосфере печи

### Обсуждение результатов расчета

Плотность потоков тепловых излучений дуг длиной 425 мм на высоте 0,5 м с ростом заглубления дуг в ванну металла и шлака изменяется следующим образом:

$$h_3 = 100 \text{ мм} - 605 \text{ кВт/м}^2 \text{ при } k = 0 \text{ и } 153 \text{ кВт/м}^2 \text{ при } k = 0,7;$$

$$h_3 = 230 \text{ мм} - 464 \text{ кВт/м}^2 \text{ при } k = 0 \text{ и } 112 \text{ кВт/м}^2 \text{ при } k = 0,7;$$

$$h_3 = 360 \text{ мм} - 293 \text{ кВт/м}^2 \text{ при } k = 0 \text{ и } 70 \text{ кВт/м}^2 \text{ при } k = 0,7;$$

$$h_3 = 450 \text{ мм} - 182 \text{ кВт/м}^2 \text{ при } k = 0 \text{ и } 42 \text{ кВт/м}^2 \text{ при } k = 0,7.$$

Плотность потоков тепловых излучений дуг на высоте 2,5 м с ростом заглубления дуг в ванну металла и шлака изменяется следующим образом:

$$h_3 = 100 \text{ мм} - 155 \text{ кВт/м}^2 \text{ при } k = 0 \text{ и } 25 \text{ кВт/м}^2 \text{ при } k = 0,7;$$

$$h_3 = 230 \text{ мм} - 123 \text{ кВт/м}^2 \text{ при } k = 0 \text{ и } 18 \text{ кВт/м}^2 \text{ при } k = 0,7;$$

$$h_3 = 360 \text{ мм} - 87 \text{ кВт/м}^2 \text{ при } k = 0 \text{ и } 12 \text{ кВт/м}^2 \text{ при } k = 0,7;$$

$$h_3 = 450 \text{ мм} - 46 \text{ кВт/м}^2 \text{ при } k = 0 \text{ и } 7 \text{ кВт/м}^2 \text{ при } k = 0,7.$$

Сопоставление значений показывает, что плотности тепловых потоков излучений дуг при заглублении на 450 и 100 мм различаются приблизительно в 3,4 раза по всей высоте стен печи.

Согласно полученным результатам, наибольшее значение тепловых потоков наблюдается на высоте стен 0,5–1,0 м. Максимальная плотность потока теплового излучения имеет место в лучепрозрачной среде (см. рис. 3а) и составляет 605 кВт/м<sup>2</sup> при заглублении дуги в метал и шлак на 100 мм, плотность теплового потока снижается до 240 кВт/м<sup>2</sup> при высоте слоя шлака 450 мм. В запыленной атмосфере печи (см. рис. 3б) при заглублении дуг на 100 мм значение теплового потока равно 153 кВт/м<sup>2</sup>, что меньше аналогичного показателя в лучепрозрачной среде в 3,9 раза. При заглублении дуг на 450 мм максимальная плотность потока теплового излучения дуг составляет 54 кВт/м<sup>2</sup>, что в 4,4 раза меньше, чем в лучепрозрачной среде.

При увеличении высоты слоя шлака происходит перераспределение плотностей тепловых потоков излучения дуг по высоте стен: на высоте от 0 до 0,5 м значение этого показателя уменьшается, а на высоте 1,0–1,5 м – увеличивается (см. рис. 3). Максимальное значение плотности теплового потока излучения дуг смещается с высоты 0,5 м на высоту 1 м. Тепловой поток излучения дуг в расчетной точке 0 на поверхности стен практически отсутствует при высоте заглубления 450 мм. Это явление связано с уменьшением открытой части дуги  $l_{отк}$  (см. рис. 1в).

Лучепрозрачная атмосфера с близким к нулю значением коэффициента поглощения и полученные тепловые нагрузки на водоохлаждаемые панели стен могут существовать в печи кратковременно при отключенных газокислородной фурме и инжекторах угольного порошка. Большую часть времени в печи работают средства интенсификации плавки, фурма, инжекторы и поддерживается запыленная (лучепоглощающая) атмосфера. Интенсивное пылеобразование наступает

при интенсивной продувке жидкой ванны кислородом и работе всех инжекторов угольного порошка.

Рост заглибления дуг в шлак приводит к перераспределению потоков теплового излучения дуг с поверхностей стен, свода на поверхности ванны и шарового сегмента, образуемого в ванне электродинамическими силами. Полное заглибление дуг в шлак снижает тепловое излучение на стены и свод, увеличивая тепловое излучение дуг на поверхности шаровых сегментов, что приводит к увеличению КПД дуг до 75–80 % [3].

### **Заключение**

Проведенное исследование влияния величины высоты слоя шлака на теплообмен, а также на плотности тепловых потоков излучений дуг на стены высокоомощной ДСП-100 позволило сделать следующие выводы. Увеличение заглибления дуг в металл и шлак со 100 до 450 мм снижает по всей высоте стен плотности теплового потока излучений дуг приблизительно в 3,4 раза. Максимальные значения плотности теплового потока излучений дуг на стены составляют: 605 кВт/м<sup>2</sup> при заглиблении дуг в металл и шлак на 100 мм в лучепрозрачной среде и 153 кВт/м<sup>2</sup> в запыленной среде; 240 и 54 кВт/м<sup>2</sup> соответственно при заглиблении на 450 мм.

Максимальные тепловые нагрузки дуг сокращают срок службы водоохлаждаемых панелей стен, при этом увеличиваются потери энергии в печи с охлаждаемой водой, следовательно, работа на незаглибленных дугах в лучепрозрачной атмосфере печи экономически нецелесообразна [6, 7].

### **Библиографический список**

1. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках. СПб.: Лань, 2014. 384 с.
2. Макаров А.Н. Теплообмен в высокоомощных дуговых сталеплавильных печах. Часть I. Расчет потоков теплового излучения дуг на ванну и теплообмен в ванне металла // Металлург. 2022. № 7. С. 28–34.
3. Дорофеев Г.А., Зинягин Г.А., Макаров А.Н. Производство стали на основе железа прямого восстановления. Старый Оскол: ТНТ, 2021. 324 с.
4. Сосонкин О.М., Кудрин В.А. Водоохлаждаемый свод электродуговой печи. М.: Металлургия, 1985. 144 с.
5. Самохвалов Г.В., Черныш Г.И. Электрические печи черной металлургии. М.: Металлургия, 1984. 232 с.
6. Водоохлаждаемые узлы сверхмощных дуговых сталеплавильных печей / М.Г. Кузьмин [и др.] // Электрометаллургия. 2014. № 7. С. 8–16.

7. Хумер О. Водоохлаждаемые панели современных сверхмощных дуговых печей. МРТ Metallургические заводы и технологии. 1997. № 8. С. 6–14.

8. Электросталеплавильная пыль как дисперсная система / Л.М. Симонян [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2010. № 11. С. 68–75.

## **THE RELATIONSHIP OF ELECTRICAL, SLAG MODES AND HEAT EXCHANGE IN HIGH-POWER ELECTRIC ARC STEELMAKING FURNACES**

### **PART I. THE EFFECT OF THE SLAG REGIME ON THE THERMAL RADIATION OF ARCS ON WALLS**

*Makarov A.N., Krupnov A.V., Sokolov A.Y.*

***Abstract.** The method of calculating the heat fluxes of arc radiation on the walls and the results of the study of heat transfer in a high-power electric arc steelmaking furnace DSP-100 are described. The influence of the height of the slag layer and the dustiness of the furnace atmosphere on the density of heat flows from three arcs on water-cooled wall panels is shown. The influence of the slag regime on thermal radiation on the metal bath, the relationship of the slag regime with the efficiency of arcs and the specific consumption of electricity is investigated.*

***Keywords:** electric arc, arc steelmaking furnace, heat exchange, thermal radiation.*

Об авторах:

МАКАРОВ Анатолий Николаевич – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники, Тверской государственной технической университет. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

КРУПНОВ Андрей Владимирович – старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственной технической университет. E-mail: AndreTheGianti@yandex.ru

СОКОЛОВ Андрей Юрьевич – старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственной технической университет. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

About the authors:

MAKAROV Anatoly Nikolaevich – Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Electricity and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

KRUPNOV Andrey Vladimirovich – Senior Lecturer, Department of Electricity and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: AndreTheGianti@yandex.ru

SOKOLOV Andrey Yuryevich – Senior lecturer of the Department of Electricity and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

УДК 669.187:621.186

## **ВЗАИМОСВЯЗЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО, ШЛАКОВОГО РЕЖИМОВ И ТЕПЛООБМЕНА В ВЫСОКОМОЩНЫХ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ**

### **ЧАСТЬ II. ВЛИЯНИЕ ШЛАКОВОГО РЕЖИМА НА ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ДУГ НА ВАННУ МЕТАЛЛА**

*А.Н. Макаров, А.В. Крупнов, А.Ю. Соколов*

© Макаров А.Н., Крупнов А.В.,  
Соколов А.Ю., 2023

***Аннотация.** Изложена методика расчета тепловых потоков излучения дуг на ванну металла, приведены результаты исследования теплообмена в высокомошной дуговой сталеплавильной печи вместимостью 100 т металла (ДСП-100). Показано влияние высоты слоя шлака и запыленности атмосферы печи на плотности тепловых потоков излучения от трех дуг на ванну металла и КПД дуг.*

***Ключевые слова:** электрическая дуга, дуговая сталеплавильная печь, теплообмен, тепловое излучение.*

В первой части статьи изложена методика определения плотностей тепловых потоков излучения дуг по высоте стен ДСП, представлены и проанализированы результаты расчета плотностей тепловых потоков излучения от дуг длиной 425 мм при заглублении дуг в металл и шлак на 100, 230, 360 и 450 мм.

Продолжением исследования влияния высоты слоя шлака на теплообмен в высокомошных сталеплавильных печах, на взаимосвязь высоты слоя шлака с удельным расходом электроэнергии и КПД дуг является изучение влияния высоты слоя шлака на распределение плотности тепловых потоков излучений дуг на ванну металла в лучепрозрачной и запыленной атмосфере печи при неизменной длине дуги.

**Построения для расчета**

Определение плотностей потоков тепловых излучений от дуг на ванну металла основано на методике, изложенной в источнике [1]. На рис. 1 представлены необходимые построения в графической программе для расчетов, выполняемые в масштабе в табличном процессоре. Параметры печи, принятые в первой части статьи, остались без изменения.

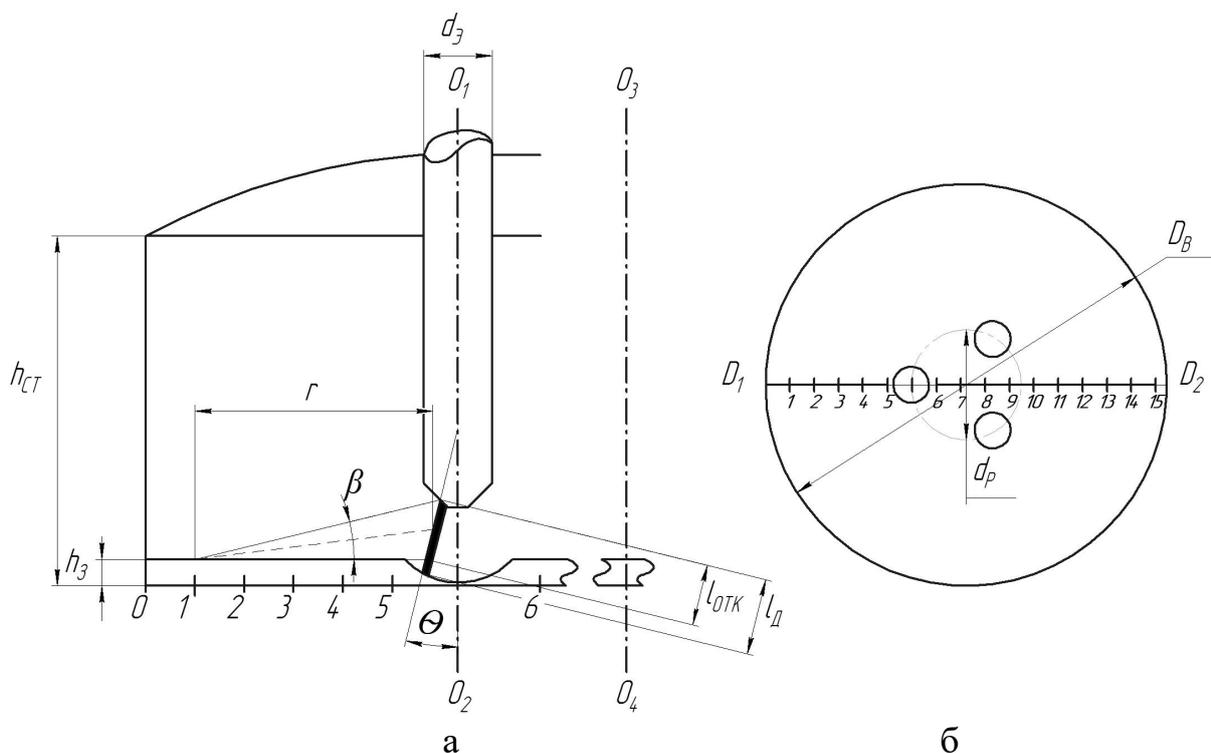


Рис. 1. Модель для расчета потоков тепловых излучений дуг на поверхность ванны металла (а); взаиморасположение электродов, ванны металла, стен и расчетных площадок (б) (масштаб уменьшен);

$h_{ст}$  – высота стен ДСП, м;  $d_3$  – диаметр электрода, м;  
 $h_з$  – высота заглибления дуги в металл и шлак, мм;  $D_в$  и  $d_р$  – диаметр ванны и распада электродов соответственно, м; 0–15 – расчетные площадки на поверхности ванны металла;  $l_д$  – длина дуги, мм;  $l_{отк}$  – длина открытой части дуги, излучающей тепловой поток на расчетную площадку, мм;  
 $r$  – луч, расстояние от дуги до расчетной площадки на поверхности ванны, м;  $\beta$  – угол, под которым излучает открытая часть дуги на расчетную площадку, град.;  $\Theta$  – угол электродинамического отклонения оси дуги от оси электрода, определяемый по методике [1];  
 $O_1O_2$  – ось симметрии электрода;  $O_3O_4$  – ось симметрии печи;  
 $D_1D_2$  – ось симметрии ванны металла

Плотность потока теплового излучения от каждой дуги на расчетные площадки 0–15, расположенные на поверхности ванны металла по оси симметрии  $D_1D_2$ , определяли по выражению

$$q = \frac{\varphi_{ДФ} P_{д}}{F e^{k r}} = \frac{\alpha_{СТ} P_{д} \sin^2 \beta l_{ОТК}}{2\pi^2 r l_{д}^2} e^{-k r}, \text{ кВт/м}^2,$$

где  $\varphi_{ДФ}$  – локальный угловой коэффициент излучения электрической дуги на расчетную площадку [1, 3];  $F$  – расчетная площадка, м<sup>2</sup>;  $\alpha_{СТ}$  – доля мощности дуги, выделяющаяся в столбе дуги [3];  $P_{д}$  – мощность дуги, кВт;  $k$  – коэффициент поглощения газовой атмосферы печи [1, 3].

В расчетах по вышеприведенной формуле учитываем влияние коэффициента поглощения газовой атмосферы печи: для лучепрозрачной среды  $k = 0$ , для запыленной среды  $k = 0,7$ .

### Методика проведения расчетов

Плотности теплового потока для расчетной точки определяется следующим образом:

1. Из расчетной точки на ванне металла, например из точки 1, проводят к видимой части дуги две линии, одна из которых проводится на начало дуги на электроде, а вторая – на видимое из точки 1 окончание дуги. Получаем длину открытой части дуги  $l_{ОТК}$ .

2. Находим середину открытой части дуги и проводим линию в расчетную точку 1. Определяем длину полученной линии  $r$ .

3. Из построения определяем угол  $\beta$ .

4. По приведенной выше формуле находим плотность потока теплового излучения для лучепрозрачной среды печи ( $k = 0$ ) и для загазованной среды ( $k = 0,7$ ).

5. Повторяем построения и расчет для выбранной точки для двух остальных дуг.

6. Суммируем полученные значения плотностей потока теплового излучения для расчетной точки, а именно определяем суммарное тепловое воздействие от трех дуг на расчетную площадку на ванне металла.

### Результаты расчетов

В соответствии с приведенной методикой построена для каждой расчетной площадки модель и определены плотности потоков тепловых излучений, падающих от каждой дуги на расчетную площадку. Полученные результаты от трех дуг просуммированы. Таким образом, найдены значения плотности потока теплового излучения для всех шестнадцати расчетных площадок от трех дуг по оси  $D_1D_2$  для лучепрозрачной и запыленной состояний атмосферы печи (рис. 2).

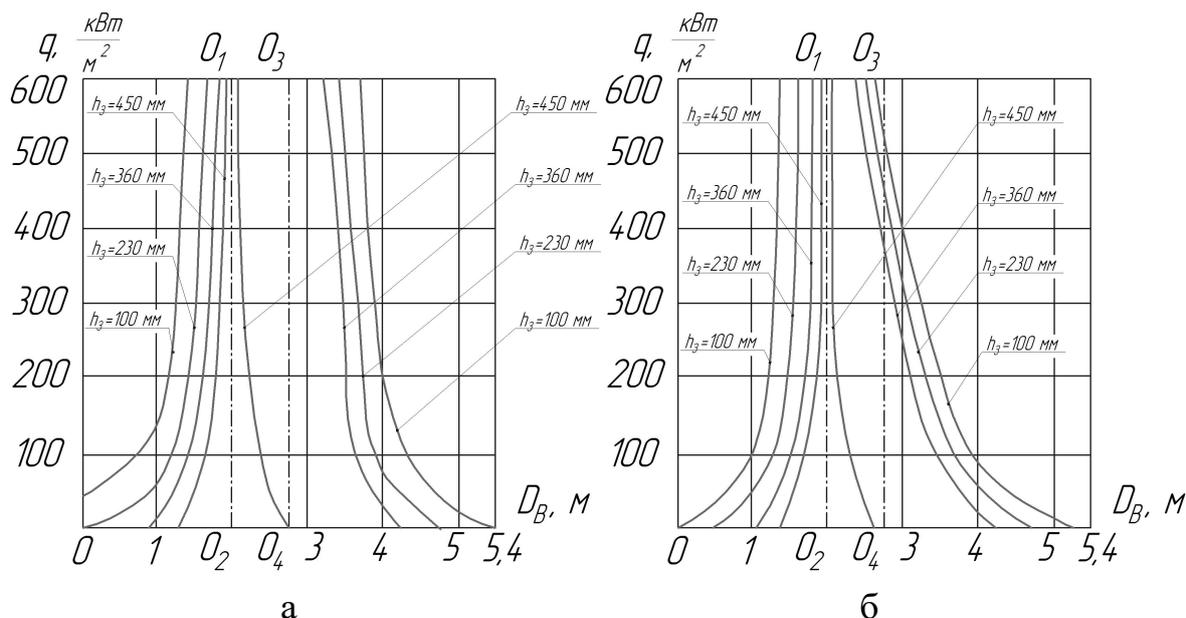


Рис. 2. Распределение плотностей потоков тепловых излучений дуг по поверхности ванны в лучепрозрачной (а) и запыленной (б) атмосфере печи

На оси координат  $D_B$  (см. рис. 2) точка 0 соответствует началу координат оси (см. рис. 1б), а значение координаты 5,4 соответствует концу ее координат.

### Обсуждение результатов расчета

Выявлено, что для площадок на поверхности ванны, расположенных вблизи дуги, запыленность атмосферы почти не оказывает влияния –  $\lim_{r \rightarrow 0} e^{-k r} = 1$ ; параметры в формуле (1) будут принимать значения  $\lim_{r \rightarrow 0} (\sin \beta) = 1$ ,  $l_{\text{ОТК}} / l_{\text{Д}} = 1$ .

Например, для площадки на поверхности ванны на расстоянии 51 мм от оси дуги получено

$$q = \frac{\alpha_{\text{СТ}} P_{\text{Д}} \sin^2 \beta l_{\text{ОТК}}}{2\pi^2 r l_{\text{Д}}^2} e^{-k r} = \frac{0,92 \cdot 18\,000 \cdot 1^2 \cdot 0,425}{2\pi^2 \cdot 0,051 \cdot 0,425^2} e^{-0,7 \cdot 0,051} = 37,4 \text{ МВт/м}^2.$$

Максимальные потоки теплового излучения дуг находятся на поверхности ванны в сегменте, сформированном электродинамическими силами дуги. Высота шлака, запыленность газовой атмосферы не влияют на максимальные потоки теплового излучения дуг на поверхность ванны в сегменте.

Результаты расчетов на графиках (см. рис. 2) показывают, что тепловые потоки излучения от трех дуг, падающие на расчетные площадки перед дугой (см. расчетные точки 0–5 на рис. 1), больше тепловых потоков между дугами (см. расчетные точки 6–15 на рис. 1). Полученные значения

плотности тепловых потоков на ванну металла перед дугами объясняют высокую скорость расплавления шихты, расположенной напротив дуг, по сравнению со скоростью расплавления шихты, находящейся между дугами. Практика эксплуатации высокомошных ДСП подтверждает, что вблизи стен на откосах между электродами шихта расплавляется медленнее. После выпуска жидкого металла на некоторых плавках на откосах между электродами обнаруживаются куски нерасплавленной шихты. Для выравнивания тепловых потоков по периферии ванны металла на стенах располагают газокислородные горелки и инжекторы для вдувания углеродсодержащего порошка.

Результаты расчетов тепловых потоков излучения дуг при  $h_3 = 100$  мм для лучепрозрачной и запыленной атмосферы приведены на рис. 2. Тепловые потоки в запыленной атмосфере в 2–3 раза меньше, чем в лучепрозрачной среде. Результаты расчетов (рис. 2) показывают, что увеличение высоты заглибления дуг в шлак экранирует откосы стен от теплового излучения дуг: на расстоянии 1 м от стен напротив дуги значения тепловых потоков составляют 58 и 9 кВт/м<sup>2</sup> при заглиблении дуг в шлак на 230 и 360 мм соответственно (рис. 2а). С ростом заглибления неравномерность потока теплового излучения увеличивается. При заглиблении дуг на 450 мм существенно уменьшаются тепловые потоки в области ванны между дугами, так как последние полностью экранированы слоем шлака и вся их тепловая энергия выделяется вблизи дуги и под электродом.

Тепловая энергия передается от дуг излучением. При полном заглиблении дуг происходит преобразование теплового потока излучения дуг в конвективный тепловой поток в ванне металла. Механизм данного преобразования следующий. Под действием электродинамической силы [6, 13] дуга перемещается со скоростью 30–100 м/с, выбрасывая к стенам жидкий металл и шлак из углубления (лунки) в ванне металла с частотой 50 Гц, то есть 50 раз в секунду. Под действием архимедовой силы новые слои жидкого металла и шлака занимают место удаленных и процесс повторяется. Перемещение жидкого металла и шлака из лунки носит турбулентный характер (скорость движения жидкости составляет 30–100 м/с), поэтому поток теплового излучения дуг преобразуется в лунке в интенсивный конвективный поток в жидком металле и шлаке.

В соответствии с методикой, изложенной в источнике [1], определены КПД дуг в зависимости от высоты заглибления дуг в ванну металла и шлак. При работе открытых дуг на ванну металла ДСП-100 КПД дуг равен 45 %, расход электроэнергии составляет 486 кВт·ч/т [6]. Расчетом получены следующие взаимосвязи между шлаковым режимом, КПД дуг  $\eta_d$  и удельным расходом электроэнергии  $G_{\Sigma}$ :

$$\begin{aligned} &\text{при } h_3 = 100 \text{ мм } (h_3 / l_d = 100 / 425 = 0,24) \eta_d = 46 \%, G_{\Sigma} \approx 486 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}; \\ &\text{при } h_3 = 230 \text{ мм } (h_3 / l_d = 230 / 425 = 0,54) \eta_d = 53 \%, G_{\Sigma} \approx 450 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}; \end{aligned}$$

при  $h_3 = 360$  мм ( $h_3 / l_d = 360 / 425 = 0,85$ )  $\eta_d = 69$  %,  $G_{\Sigma} \approx 418$  кВт·ч/т;  
 при  $h_3 = 450$  мм ( $h_3 / l_d = 450 / 425 = 1,06$ )  $\eta_d = 76$  %,  $G_{\Sigma} \approx 376$  кВт·ч/т.  
 По результатам расчета построены зависимости  $\eta_d = f(h_3 / l_d)$ ,  
 $G_{\Sigma} = f(h_3 / l_d, \eta_d)$ , представленные на рис. 3.

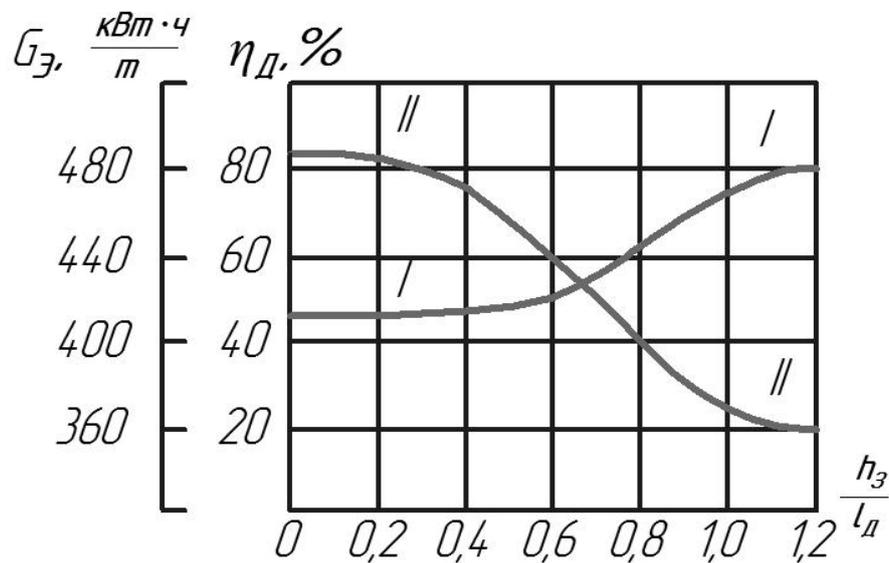


Рис. 3. Зависимость КПД дуг (I) и удельного расхода электроэнергии (II) в ДСП-100 от заглубления дуг в ванну металла и шлак

Из-за интенсивного конвективного теплообмена, постоянной замены перегретых слоев металла и шлака менее нагретыми слоями в зоне под дугой только малая часть выделенной тепловой энергии расходуется на испарение металла и шлака. Полученный аналитический результат подтверждается практикой эксплуатации [12]: угар металла под дугами составляет 8,6 %, угар металла вследствие продувки ванны кислородом достигает 91,4 %.

### Заклучение

Установлена существенная неравномерность распределения плотности тепловых потоков излучения по ванне металла. Тепловые потоки, падающие на ванну металла перед дугами, больше тепловых потоков, падающих на ванну металла между дугами, что объясняет различную скорость расплавления шихты в указанных зонах ванны металла на действующих высокомоштных ДСП. Пиковое значение теплового излучения, составляющее 37,4 кВт/м<sup>2</sup>, приходится на зону под электродами и не зависит от заглубления дуг в металл и шлак и запыленности атмосферы печи.

Увеличение высоты слоя шлака влияет на теплообмен: происходит перераспределение тепловых потоков излучения дуг с поверхностями стен, свода, ванны металла на поверхность шарового сегмента, формируемого электродинамическими силами дуг в ванне металла и шлаке. Дуги

электродинамическими силами перемешивают металл и шлак, вследствие чего происходит преобразование теплового потока излучения дуг в интенсивный конвективный теплообмен в ванне металла и шлака.

Погружение дуг в шлак приводит к росту КПД дуг до величины 75–80 %, при котором удельный расход электроэнергии минимален и составляет 360 кВт·ч/т при работе печи на твердой шихте (металлоломе).

### **Библиографический список**

1. Дорофеев Г.А. , Зинягин Г.А. , Макаров А.Н. Производство стали на основе железа прямого восстановления. Старый Оскол: ТНТ, 2021. 324 с.
2. Никольский Л.Е. , Смоляренко В.Д. , Кузнецов Л.Н. Тепловая работа дуговых сталеплавильных печей. М.: Metallurgy, 1981. 344 с.
3. Егоров А.В. Электроплавильные печи черной металлургии. М.: Metallurgy, 1985. 280 с.
4. Огороков Н.В. Дуговые сталеплавильные печи. М.: Metallurgy, 1971. 347 с.
5. Дуговые сталеплавильные печи: состояние, проблемы / А.Г. Кузьменко [и др.] // Электromеталлургия. 2012. № 3. С. 2–7.
6. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных металлургических печах и энергетических установках. СПб.: Лань, 2014. 384 с.
7. Перспективы развития электросталеплавильного комплекса – электропечей и ковшовых печей для производства стали / А.Г. Кузьменко [и др.] // Электromеталлургия. 2012. № 11. С. 2–11.
8. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981. 417 с.
9. Блох А.Т., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением: справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 432 с.
10. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. М.: Мир, 1975. 934 с.
11. Меркер Э.Э., Черменев Е.А. Электроплавка металлизированных окатышей в дуговой печи. Старый Оскол: ТНТ, 2019. 320 с.
12. Шишимиров М.В., Сосонкин О.М. Ресурсосбережение и резервы повышения эффективности выплавки стали в ДСП // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2015. Т. 15. № 3. С. 70–79.
13. О влиянии формы электрода и параметров дуги на заглубление в ванну металла в дуговых сталеплавильных печах / А.Н. Макаров [и др.] // Промышленная энергетика. 2014. № 10. С. 10–15.

### **THE RELATIONSHIP OF ELECTRICAL, SLAG MODES AND HEAT EXCHANGE IN HIGH-POWER ELECTRIC ARC STEELMAKING FURNACES**

## PART II. THE EFFECT OF THE SLAG REGIME ON THERMAL RADIATION OF ARC ON METAL BATH

*A.N. Makarov, A.V. Krupnov, A.Y. Sokolov*

***Abstract.** A method for calculating the heat fluxes of radiation from arcs to a metal bath is presented, and the results of a study of heat transfer in a high-power arc steel-smelting furnace with a capacity of 100 tons of metal (ASF-100) are presented. The influence of the height of the slag layer and the dust content of the furnace atmosphere on the density of heat fluxes of radiation from three arcs to the metal bath and the efficiency of the arcs is shown.*

***Keywords:** electric arc, arc steelmaking furnace, heat exchange, thermal radiation.*

Об авторах:

МАКАРОВ Анатолий Николаевич – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

КРУПНОВ Андрей Владимирович – старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: AndreTheGianti@yandex.ru

СОКОЛОВ Андрей Юрьевич – старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

About the authors:

MAKAROV Anatoly Nikolaevich – Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Electricity and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

KRUPNOV Andrey Vladimirovich – Senior Lecturer of the Department of Electricity and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: AndreTheGianti@yandex.ru

SOKOLOV Andrey Yuryevich – Senior Lecturer of the Department of Electricity and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

### РАЗДЕЛ 3. ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

## РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОЙ ПОДСТАНЦИИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРУЮЩЕГО КОМПЛЕКСА РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

*М.Д. Шубин, Л.С. Араратьян, Ю.М. Павлова*

© Шубин М.Д., Араратьян Л.С.,  
Павлова Ю.М., 2023

*Аннотация.* В статье представлен способ разработки цифровой подстанции на основе моделирующего комплекса реального времени. Приведен концепт ее модели и конечный результат в виде полной архитектуры, рассмотрены сложности применения существующего стандарта, цели и перспективы внедрения комплекса реального времени на подстанции.

**Ключевые слова:** цифровая подстанция, автоматизация, моделирующий комплекс, реальное время, МЭК 61850, экспериментальный стенд.

В современной энергосистеме постоянно происходит естественный процесс внедрения автоматизации, связанный с возрастанием сложности и скорости проведения операций.

Информационные технологии сейчас развиваются быстрыми темпами, тем самым двигая автоматизацию вперед. В качестве попытки усовершенствования процесса управления электроэнергетическими объектами был сформирован систематизированный подход к описанию объекта управления, разработаны новые способы для обмена данными. Помимо этого, произошло развитие инжиниринга в электроэнергетике. В результате был создан стандарт МЭК 61850 [1, 2]. Станции с системой управления на основе указанного стандарта получили название «цифровые» за счет вида данных, передаваемых на ней.

Данный стандарт был выпущен в 2003 г. и уже много раз редактировался, однако за все время было создано лишь небольшое количество цифровых подстанций, а в России – только некоторые проекты [3–6]. Это связано со сложностью реализации системы. Кроме того, доказать выгодность проекта довольно трудно. В перспективе стоимость

принятого решения по стандарту должна окупаться, но только вследствие успешного и широкого внедрения технологии после тестирования качественных пилотных проектов. В нашей работе представлено возможное решение проблем, которые могут появиться при введении технологии.

Стандарт, указанный выше, создавался с целью устранить следующие трудности, возникающие при внесении систем управления в работу подстанций:

- 1) большой объем работ, приводящий к снижению надежности (зачастую по вине ответственного персонала);
- 2) сложность систем с множеством поставщиков оборудования из-за необходимости учитывать каждого при управлении данными;
- 3) трудность масштабирования системы управления;
- 4) труднодоступные способы обеспечения резерва и его высокая цена.

Объект управления требует унификации описания. Унификация является основой стандарта, который делится на три большие группы:

- 1) структурное описание подстанции и оборудования с учетом свойств и функций;
- 2) способы передачи информации по средствам управления;
- 3) описание двух предыдущих пунктов на основе специализированных требований и синтаксических правил языка разметки.

Унификация в будущем облегчит задачу настройки систем взаимодействия между техникой разных производителей. Так как способы работы и структура будут одинаковы, появится возможность заменять одни устройства другими.

Благодаря унификации быстро достигаются следующие цели:

- 1) повышение автоматизации составляющих системы: проектирования, наладки, эксплуатации, надежности;
- 2) снижение сложности структуры, приводящее к уменьшению стоимости преобразования системы на основе унификации;
- 3) легкость создания и внедрения новых способов управления, в том числе инновационных;
- 4) резервирование путей передачи измерений при уменьшении числа устройств.

На рис. 1 представлен предпочтительный план широкого распространения цифровых подстанций. Сначала в качестве наилучшей модели предстоящей системы управления издается стандарт. Затем появляются устройства, способные использовать модель стандарта. После этого возникают инжиниринговые компании, которые могут использовать их для проектирования устройств и систем и внедрять новые разработки в процесс управления. В итоге формируются пилотные проекты, а по ним – требования, которые должны быть учтены при эксплуатации новых систем управления.



Рис. 1. Сценарий внедрения цифровых подстанций

Создание норм и правил, а также их полноценной базы способствует внедрению цифровых подстанций в широких масштабах, что приводит к возникновению конкуренции между компаниями и, как следствие, к снижению стоимости систем на основе стандарта. Помимо этого, появляются перспективы развития таких систем управления, их нормативной базы и надежного функционала.

Однако на данный момент ситуация складывается следующим образом (рис. 2). Оборудование создано, инжиниринговые компании найдены, но проектов недостаточно для полноценного внедрения (и даже для анализа процессов, которые воспроизводятся в цифровой подстанции) [3–6]. Большая часть существующих проектов вполне работоспособна, но им не хватает полного списка документов. Из-за этого невозможно назначить ответственное лицо, которое отвечало бы за аварии новых систем. Нормативная база уже начала разрабатываться, но не хватает полноценного опыта большего количества клиентов при реальной эксплуатации, а без достаточного опыта данные документы будут неуместны.

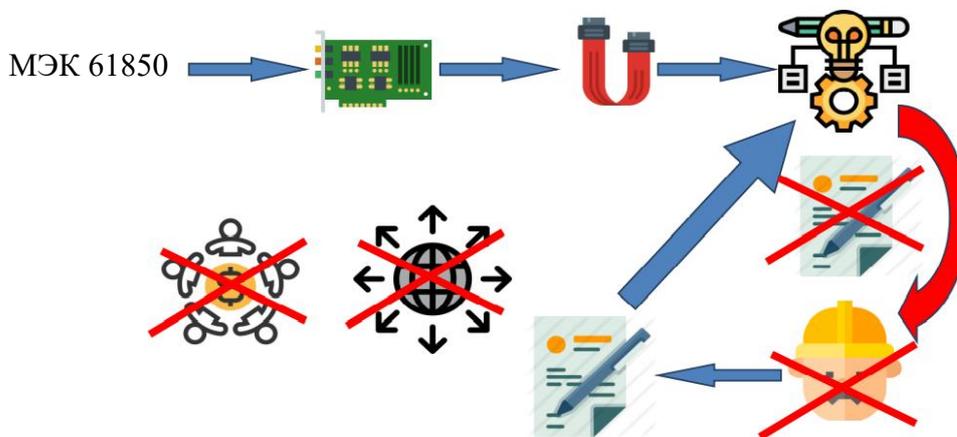


Рис. 2. Внедрение цифровых подстанций в настоящее время

Внедрение новых разработок в энергосистему с высокой долей вероятности будет вызывать аварийные ситуации, поэтому опасения компаний небезосновательны. Сначала желательно убедиться в надежности внедренных проектов. Для этого используются моделирующие комплексы реального времени, которые в настоящее время начинают активно применяться в электроэнергетике [7, 8]. Современные электронно-вычислительные машины позволяют быстро решать системы дифференциально-алгебраических уравнений, а количество уравнений в энергосистеме ограничено лишь конструктивной производительностью машины, то есть числом процессоров. Данной скорости вычислений хватает, чтобы осуществлять процесс моделирования в реальном времени, предполагающего решение систем дифференциально-алгебраических уравнений на основе численного интегрирования с шагом расчета – интервалом времени между текущим и последующим состоянием модели:

$$x_{m+1} = x_m + f(x_m) \cdot \Delta t,$$

где  $x_{m+1}$  – состояние системы в момент времени  $m + 1$ ;  $x_m$  – состояние системы в момент времени  $m$  (перед моментом времени  $m + 1$ );  $f(x_m)$  – набор функций, описывающих систему при переходе ее из состояния  $x_m$  в  $x_{m+1}$ ;  $\Delta t$  – шаг расчета.

Реальное время расчета меньше  $\Delta t$ . Например, при наличии функций, описывающих систему в текущем состоянии, оно рассчитывается через 30 мкс. Представление расчета в реальном времени в данном случае будет возможно, если результат будет получен менее чем за 30 мкс. Комплексы, моделирующие состояние системы в реальном времени, основаны на этом принципе.

Моделирующий комплекс реального времени является базой, на которой будут создаваться интерфейсы и программы для тестирования, проверки и обслуживания систем управления на основе стандарта МЭК 61850. Эти программы планируется использовать в условиях, достаточно близких к реальным, но без вреда для существующей энергосистемы. Концепт разработки представлен на рис. 3. В ней моделируются условия, соответствующие процессам, происходящим в первой части подстанции, на самой подстанции и в смежной сети. При этом система на МЭК 61850 основана на реально существующем оборудовании с действующими, заверенными в паспорте параметрами. В таких системах управления передача информации осуществляется двумя способами:

- 1) передача аналоговых сигналов, содержащих информацию о токе и напряжении, на усилитель с преобразованием до величин реальных трансформаторов тока и напряжения с их дальнейшим поступлением на преобразователь аналоговых сигналов (ПАС) части системы управления подстанцией;

2) передача пакетных данных сигналов, значений измеряемых тока и напряжения, а также других параметров с помощью виртуальных преобразователей дискретных сигналов (ПДС) и приборов адресной сигнализации (ПАС) (и те, и другие представляют собой модули комплекса реального времени), которые основаны на стандарте МЭК 61850, по технологии Ethernet через локальную вычислительную сеть системы управления подстанцией.

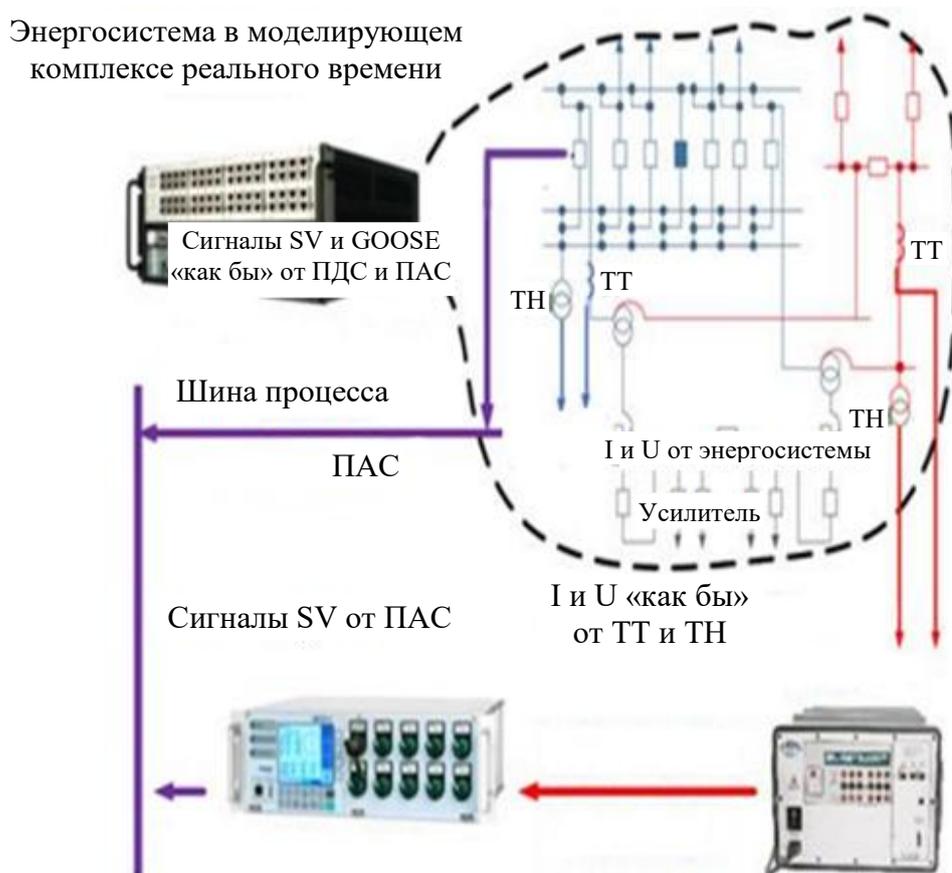


Рис. 3. Концепт применения моделирующего комплекса реального времени для цифровых подстанций: ТТ – трансформатор тока; ТН – трансформатор напряжения

В результате системы на стандарте МЭК 61850 можно использовать для моделирования всех процессов и режимов системы без риска для реального оборудования. При этом проверить определенное событие можно очень быстро и тем самым создать перспективы для будущих разработок, учитывая даже те ситуации, шанс появления которых достаточно низкий.

Конечное планируемое содержание системы можно представить, поделив ее на две составляющие:

1. Стенд, где проводятся исследования измерений, а также находятся моделирующий комплекс реального времени, усилители-преобразователи

и интеллектуальные электронные устройства. Здесь же содержится автоматизированное рабочее место оператора, который управляет системой подстанции и измерительными комплексами. Данный комплекс должен быть синхронизирован по времени с работой преобразователей ПАС и ПДС.

2. Программно-технический комплекс цифровой подстанции с устройствами релейной защиты и автоматики, контроллеры присоединений, ПДС, ПАС, счетчики электроэнергии, регистраторы аварийных событий, подключенные к шине процесса. При этом контроллеры, устройства релейной защиты и автоматики и регистраторы подключены к шине станции. Это требуется для передачи информации между собой и на верхний уровень SCADA-системы, которая обеспечивает работу различных систем в реальном времени [7, 8].

Представленная в работе технология на основе стандарта МЭК 61850 создается для автоматизации процесса управления операциями на подстанции, но она может развиваться в различных направлениях [7, 8]:

1. Инжиниринг пилотных проектов. Новые проекты (тем более такого масштаба) всегда вызывают огромные риски у инвесторов и предпринимателей. Моделирующий комплекс реального времени является методом безопасного тестирования и разработки подстанции на основе новейших технологий с цифровой основой системы управления по стандарту МЭК 61850. Он снижает вероятность возможных аварий на объекте и количество несчастных случаев.

2. Обучение персонала. Технология помогает обучать служащих навыкам работы с цифровыми данными подстанции, которые будут приближены к реальным условиям работы с учетом конкретных областей объекта управления.

3. Исследование надежности системы управления. Проведенное моделирование позволяет изучать ситуации штатной работы подстанции, аварийные режимы, надежность системы и степень ее резервирования, необходимость в разветвленной сети коммуникаций в условиях, близких к реальным, с учетом архитектуры построения. Большую важность для будущих разработок имеют и тесты влияния отдельных функций на систему в целом, задержку передачи данных и пр.

4. Разработка нормативной документации. Приближение работы моделирующего комплекса к реальным условиям функционирования платформы на подстанции может послужить базой для создания нормативных документов по проектированию и эксплуатации таких технологий.

## Библиографический список

1. Status on the First IEC 61850 Based Protection and Control, Multi-Vendor Project in the United States / J. Holbach [et al.] // 60th Annual Conference for Protective Relay Engineers. New Jersey: IEEE, 2007. P. 283–306.
2. IEC 61850 at work. Five Case Studies // ABB Review Special Report. 2010. № 8. URL: [https://library.e.abb.com/public/f5a850dcbd4c17d7c1257784003aa915/52-56%20SA054\\_72dpi.pdf](https://library.e.abb.com/public/f5a850dcbd4c17d7c1257784003aa915/52-56%20SA054_72dpi.pdf) (дата обращения: 03.03.2023).
3. Опыт применения оборудования компании «Релематика» на цифровом полигоне Нижегородской ГЭС. URL: <http://digitalsubstation.com/blog/2018/05/10/opyt-primeneniya-oborudovaniya-kompanii-relematika-na-tsifrovom-poligone-nizhegorodskoj-ges/> (дата обращения: 03.03.2023).
4. Вторые испытания цифровой станции на Нижегородской ГЭС. URL: <http://digitalsubstation.com/blog/2016/02/26/vtorye-ispytaniya-tsifrovoy-stantsii-na-nizhegorodskoj-ges/> (дата обращения: 03.03.2023).
5. Введена в работу первая в России цифровая подстанция высокого класса напряжения. URL: <http://digitalsubstation.com/blog/2018/04/23/vvedena-v-rabotu-pervaya-v-rossii-tsifrovaya-podstantsiya-vysokogo-klassa-napryazheniya/> (дата обращения: 03.03.2023).
6. Подстанция «Медведевская»: детали. URL: <http://digitalsubstation.com/blog/2018/07/03/podstantsiya-medvedevskaya-detali/> (дата обращения: 03.03.2023).
7. Колобродов Е.Н., Наволочный А.А. Технологии цифрового моделирования электроэнергетических систем в режиме реального времени // Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем: сборник докладов IV Международной научно-технической конференции. Екатеринбург: Российский национальный комитет CIGRE, 2013. URL: [https://www.studmed.ru/kolobrodov-e-n-navolochnyu-a-a-tehnologii-cifrovogo-modelirovaniya-elektroenergeticheskikh-sistem-v-rezhime-realnogo-vremeni\\_f54f6848492.html](https://www.studmed.ru/kolobrodov-e-n-navolochnyu-a-a-tehnologii-cifrovogo-modelirovaniya-elektroenergeticheskikh-sistem-v-rezhime-realnogo-vremeni_f54f6848492.html) (дата обращения: 03.03.2023).
8. Форсайт П., Кюффель Р., Питерс С. Применение цифровых симуляторов реального времени в энергетических компаниях // Релейщик. 2014. № 2. С. 34–37.

## DEVELOPMENT OF A DIGITAL SUBSTATION BASED ON A REAL-TIME MODELING COMPLEX

*M.D. Shubin, L.S. Araratyan, Yu.M. Pavlova*

*Abstract.* The article presents a method for developing a digital substation based on a real-time modeling complex, the concept of its model and the final result in the form of a complete architecture, the difficulties of applying the

*existing standard, the goals and prospects of implementing a real-time complex at a substation.*

**Keywords:** *digital substation, automation, real time, modeling complex, IEC 61850, experimental stand.*

Об авторах:

ШУБИН Михаил Дмитриевич – студент 4-го курса кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственной технической университет. E-mail: Mikhail-shubin@bk.ru

АРАРАТЪЯН Любовь Сергеевна – старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственной технической университет. E-mail: liuba.araratyan@yandex.ru

ПАВЛОВА Юлия Михайловна – старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственной технической университет. E-mail: sokolhawk98@gmail.com

About the authors:

SHUBIN Mikhail Dmitrievich – 4<sup>th</sup> Year Student of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: Mikhail-shubin@bk.ru

ARARATYAN Lubov Sergeevna – Senior Lecturer of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: liuba.araratyan@yandex.ru

PAVLOVA Yulia Mikhailovna – Senior Lecturer of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: sokolhawk98@gmail.com

УДК 621.311

## **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СЕТЬ (УМНЫЕ СЕТИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ)**

*А.А. Горев, Л.С. Араратьян, Ю.М. Павлова*

© Горев А.А., Араратьян Л.С.,  
Павлова Ю.М., 2023

*Аннотация.* Статья посвящена новой, активно развивающейся технологии Smart Grid (интеллектуальной электрической сети). Рассмотрены основные принципы, особенности и плюсы данной

*технологии, ее основные параметры. Исследовано влияние Smart Grid на развитие российской энергетики.*

**Ключевые слова:** умные сети, модернизированные сети, надежность, умная энергетика, Smart Grid, интеллектуальные сети, развитие энергетики.

Умные сети электроснабжения (англ. Smart Grid) – это новые, улучшенные сети передачи электроэнергии, использующие информационные и коммутационные сети для сбора информации и анализа полученной и потребленной электроэнергии. Данная технология позволяет автоматически увеличивать эффективность и надежность электроэнергетических систем и сетей, а также оптимизировать распределение электроэнергии, увеличивать пропускную способность и устойчивость работы указанных систем и сетей [1].

Smart Grid можно охарактеризовать следующими принципами:

- 1) управлением производством и потреблением электроэнергии;
- 2) повышением эффективности работы систем электроснабжения;
- 3) снижением стоимости и потребления электроэнергии;
- 4) интеллектуальным поиском решения проблемы передачи информации и электроэнергии.

С учетом вышесказанного к электроэнергетическим системам и сетям предъявляются новые требования, которые в первую очередь связаны с информационно-коммуникационными технологиями, позволяющими вывести на новый уровень управление производством, передачей и потреблением электроэнергии [2].

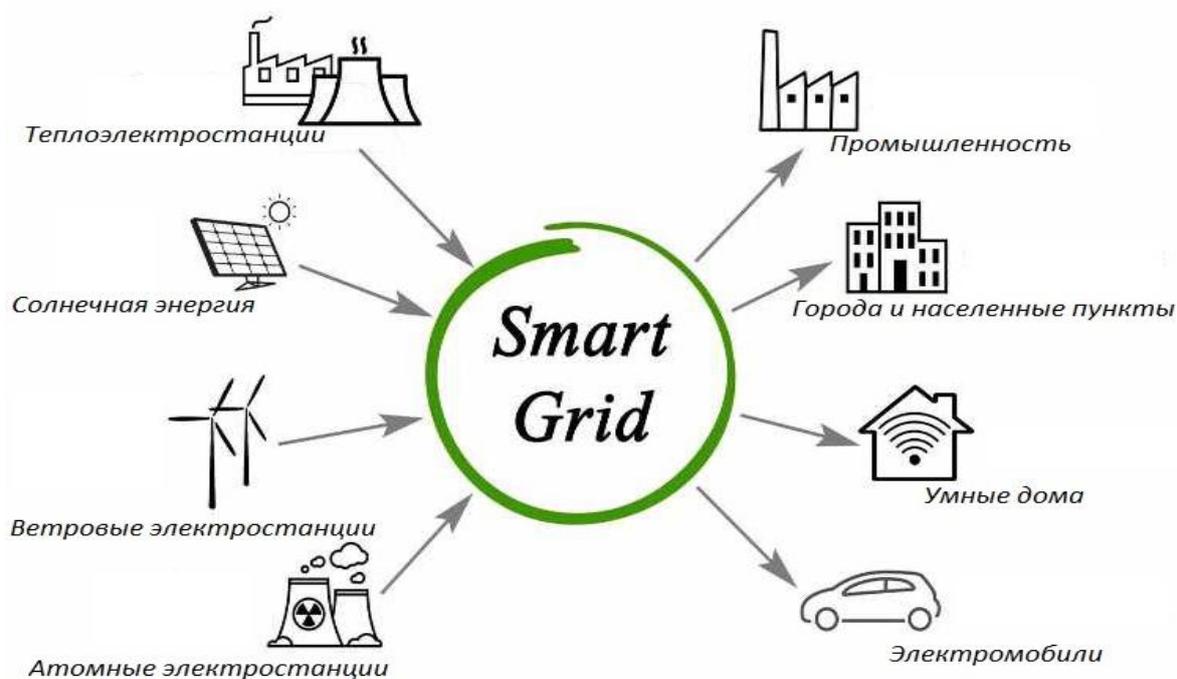
Чтобы технология Smart Grid продемонстрировала свою эффективность на территории России, необходимо практически полное изменение топологии сетей, а также замена иерархической структуры управления электроснабжением на мультиагентную. В нашей стране данная технология выступает в качестве концепции интеллектуальной активно-адаптивной сети, у которой можно выделить признаки [3]:

- 1) большое количество датчиков и элементов, отвечающих за состояние и измерение параметров сети;
- 2) налаженная система сбора и обработки информации;
- 3) средства управления элементами сети и оборудованием предприятия;
- 4) автоматическая система текущего состояния системы и прогнозирования ее работы.

Интеллектуальная сеть (рисунок) представляет собой совокупность элементов электрической сети и систем управления, подключенных к генерирующим источникам и потребителям энергии:

линий электропередач с системами контроля их состояния и возможностью изменения их характеристик;

энергетического оборудования с регулируемыми параметрами;  
хранилищ энергии;  
современных цифровых устройств защиты и автоматики;  
систем управления подстанциями;  
систем учета электроэнергии и мощности;  
диагностических комплексов;  
программного и технического обеспечения.



Структурная модель Smart Grid

Основными элементами управления электрической сетью являются [4]:  
устройства, обеспечивающие быстрое изменение мощности электрической сети;

устройства компенсации реактивной мощности;

устройства, ограничивающие токи короткого замыкания;

устройства постоянного тока;

оборудование со сверхпроводящими параметрами;

технические средства, обеспечивающие управляемость электрической сети и во многом определяющие интеллектуальный уровень инфраструктуры электроснабжения.

Необходимость усовершенствования существующих электроэнергетических систем и сетей и внедрения Smart Grid определяется следующими аспектами:

1. Умные сети необходимы для автоматизированного управления и технологического контроля работы всех энергосистем, в том числе единой энергетической системы РФ.

2. Smart Grid дает возможность автоматически устранять аварийные режимы, а также предотвращать аварии.

3. Умные сети способны обеспечить частичный переход на систему возобновляемых (регенеративных) источников энергии, что, в свою очередь, разгрузит основную систему электроснабжения.

4. За счет сокращения потерь электроэнергии в сетях на 25 % снизится потребность в строительстве дополнительных предприятий, генерирующих электроэнергию.

5. Уменьшение строительства новых объектов энергетики будет способствовать эффективности экономики в целом.

6. Smart Grid внесет большой вклад в развитие экономики, улучшение экологии и поспособствует внедрению новейших технологий.

7. Умные сети являются катализатором экономического роста.

Программа разработки и внедрения умных сетей уже реализуется в Европе, США, Китае и других странах. Использование зарубежного опыта – это не простое копирование, а осознанное применение лучших практических проекций в отечественной деятельности электроснабжения, большой опыт для нас и нашей энергетики в целом. Для надежной работы такой системы количество многофункциональных модулей, обрабатывающих информацию, должно быть сокращено до минимума. Информация, которую получает Smart Grid, должна сразу поступать по сети на очень мощные серверы, обрабатываться, анализироваться компьютерными центрами и пересылаться на используемые объекты. Основная функциональность Smart Grid должна обеспечиваться на программном уровне.

Таким образом, использование в российской энергетике Smart Grid положительно скажется на энергетике и экономике страны. Применение зарубежного опыта по использованию данных технологий позволит избежать масштабных ошибок на этапе разработки проектов и их использования. Реализация данных инновационных технологий и созданных на их базе разработок должна быть адаптирована к российским условиям функционирования. В конечном счете использование технологии Smart Grid повысит эффективность работы отечественной электроэнергетики и всей экономики РФ [5].

### **Библиографический список**

1. Гомонов К.Г. Перспективы и экономическая эффективность внедрения интеллектуальных энергосетей в России и в мире // Вестник РУДН. Серия: Экономика. 2015. № 2. С. 25–35.

2. Зайцев А.И. Развитие электроэнергетических систем на базе концепции Smart Grid // Электротехнические комплексы и системы управления. 2013. № 1. С. 71–76.

3. Костров Д. «Умные сети электроснабжения» (Smart Grid) и проблемы с кибербезопасностью // Информационная безопасность. 2014. № 3. URL: <https://lib.itsec.ru/articles2/in-ch-sec/umnye-seti-elektrosnabzheniya-smart-grid-i-problemy-s-kiberbezopasnostyu> (дата обращения: 20.11.2022).

4. Smart Grid, или умные сети электроснабжения. URL: [http://www.eneca.by/ru\\_smartgrid0/](http://www.eneca.by/ru_smartgrid0/) (дата обращения: 20.11.2022).

5. Гаврилович Е.В., Данилов Д.И., Шевченко Д.Ю. «Умные сети» Smart Grid – перспективное будущее энергетической отрасли // Молодой ученый. 2016. № 28.2 (132.2). С. 55–59.

## INTELLIGENT ELECTRIC GRID (SMART POWER NETWORKS)

*A.A. Gorev, L.S. Araratyan, Yu.M. Pavlova*

***Abstract.** The article is devoted to the new actively developing technology Smart Grid (intelligent electrical network). The main principles, features and advantages of this technology, its main parameters are considered. The influence of Smart Grid on the development of Russian energy is investigated.*

***Keywords:** smart grids, upgraded grids, reliability, smart energy, Smart Grid, energy development.*

Об авторах:

ГОРЕВ Андрей Андреевич – студент 4-го курса, Тверской государственной технической университет. E-mail: [andrey.gorev08@mail.ru](mailto:andrey.gorev08@mail.ru)

АРАРАТЪЯН Любовь Сергеевна – доцент кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственной технической университет. E-mail: [liuba.araratyan@yandex.ru](mailto:liuba.araratyan@yandex.ru)

ПАВЛОВА Юлия Михайловна – старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственной технической университет. E-mail: [sokolhawk98@gmail.com](mailto:sokolhawk98@gmail.com)

About the authors:

GOREV Andrey Andreevich – 4<sup>th</sup> Year Student, Tver State Technical University. E-mail: [andrey.gorev08@mail.ru](mailto:andrey.gorev08@mail.ru)

ARARATYAN Lyubov Sergeevna – Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: [liuba.araratyan@yandex.ru](mailto:liuba.araratyan@yandex.ru)

PAVLOVA Yulia Mikhailovna – Senior Lecturer of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: [sokolhawk98@gmail.com](mailto:sokolhawk98@gmail.com)

## ЦИФРОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА ДЛЯ СОВРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРОСЕТЕВОГО КОМПЛЕКСА

*А.С. Жуков, С.В. Маринова*

© Жуков А.С., Маринова С.В., 2023

*Аннотация.* В статье рассмотрены причины внедрения цифровых трансформаторов тока (ЦТТ), описаны особенности различных конструкций ЦТТ, сделаны выводы о перспективности их внедрения.

*Ключевые слова:* цифровизация, оптические трансформаторы тока, цифровая трансформация.

### **Введение**

Сегодня цифровая подстанция – одна из наиболее обсуждаемых в энергетическом сообществе тем. Под цифровизацией подстанции понимается реализация систем автоматизации с информационным обменом по протоколу МЭК 61850 (стандарт «Сети и системы связи на подстанциях»), а также организация объектов с цифровыми каналами передачи данных в диспетчерские центры и (или) между оборудованием.

Одним из направлений создания цифровых подстанций является развитие информационных технологий, используемых во вторичных системах подстанций. Внедрение цифровых трансформаторов тока (ЦТТ) полностью соответствует концепции цифровизации электросетевого комплекса.

### **Причины внедрения цифровых трансформаторов тока**

Традиционные трансформаторы тока (ТТ), построенные на принципе электромагнитной индукции, несмотря на столетний опыт в области создания и эксплуатации, имеют недостатки, которые невозможно устранить:

насыщение сердечника электромагнитного ТТ апериодической составляющей тока короткого замыкания и отсутствие передачи информации о первичном токе в первые периоды аварийного переходного процесса (погрешности трансформации тока электромагнитными ТТ достигают в этом режиме 90 %);

проблемы с изоляцией и, как следствие, высокая аварийность;

взрыво- и пожароопасность трансформаторов с масляной изоляцией (нехарактерна для элегазовых ТТ) [6].

Главная проблема заключается в работе ТТ в переходных режимах. Существующие ТТ в меньшей степени подвержены влиянию насыщения магнитопровода, однако сам принцип функционирования трансформатора

подразумевает работу с данным физическим явлением, то есть полностью убрать его невозможно.

В связи с тем, что в отношении традиционных ТТ уже нельзя предложить ничего нового для повышения их эффективности, разрабатываются и применяются ТТ, в основу которых заложены другие физические принципы.

В последние годы все больше внимания в электроэнергетике уделяется волоконно-оптическим датчикам, количество публикаций о которых составляет около 44 % из числа публикаций о датчиках в электроэнергетике [11].

Требования к использованию ЦТТ изложены в стандартах организации ПАО «Россети» [3–5]. Кроме этого, при новом строительстве и реконструкции цифровых подстанций 110 кВ [1] предпочтение отдается цифровым измерительным ТТ и трансформаторам напряжения.

### **Виды и особенности цифровых трансформаторов тока**

Основным отличием ЦТТ является передача сигнала в цифровой форме. Однако подход к созданию и передаче сигналов может значительно отличаться. Выделяют различные ТТ с применением магнитных и оптических эффектов.

*Магнитотранзисторные преобразователи* используются в ТТ на основе магнитных эффектов. Магнитотранзистор (МТ) представляет собой биполярный транзистор, структура и режим работы которого нацелены на получение наибольшей чувствительности тока коллектора  $I_k$  к магнитному полю. Полезный сигнал проявляется в коллекторном токе при воздействии на МТ магнитного поля.

Наибольший интерес представляют МТ с дифференциальной структурой, полезным сигналом для такого типа МТ будет служить разность коллекторных токов.

Основной недостаток – чувствительность транзистора к электромагнитным помехам, что серьезно ограничивает применение данного типа преобразователей.

*Магнитодиодный преобразователь* представляет собой полупроводниковый элемент с р-п-переходом и невыпрямляющими контактами. Между контактами находится область полупроводника с высоким электрическим сопротивлением и преобладанием собственного типа проводимости.

Магнитодиодный эффект проявляется в диодах с длинной базой и заключается в резком изменении электрического сопротивления диода, включенного в прямом направлении, при воздействии поперечного магнитного поля. В результате воздействия поля эффект магнитосопротивления увеличивается в несколько сотен раз.

В преобразователях на основе поясов Роговского используются принципы, аналогичные традиционным ТТ с металлическим магнитопроводом. Главное отличие состоит в том, что катушка катушки Роговского осуществляется на немагнитный сердечник с целью избавления от влияния насыщения материала; таким образом добиваются линейности характеристики.

В традиционных ТТ вторичный ток пропорционален первичному, однако для катушек Роговского данное соотношение неверно, так как вторичный ток в преобразователях подобного типа – это масштабированная производная от тока первичной обмотки. Для устройств релейной защиты и автоматики, если их используют в работе, аналоговые сигналы промышленной частоты необходимо сначала отделить от сигнала датчиков тока. Микропроцессорные устройства должны иметь конструктивные возможности принимать сигналы подобного типа.

В настоящее время указанный тип ЦТТ часто используется в так называемых гибридных схемах с применением действующих ТТ.

Преимущества магниторезонансных преобразователей на основе поясов Роговского:

- возможность использования метода бегущей волны для систем релейной защиты и автоматики;

- возможность комбинирования с существующими элементами;

- небольшие вес и габариты;

- электробезопасность и экологичность;

- легкость и быстрота монтажа;

- угол между вторичным напряжением и первичным током  $90^\circ$ .

К недостаткам магниторезонансных преобразователей относят следующие особенности:

- катушки Роговского усиливают высокие частоты с линейной зависимостью между выходным сигналом катушки и частотой, вызывая усиление гармоник по гармоническому ряду;

- для обнаружения броска тока намагничивания при включении трансформатора необходимо применять более сложные алгоритмы.

Наибольшее распространение в ЦТТ получили структуры с использованием волоконно-оптических датчиков.

Оптические преобразователи тока можно разделить на несколько групп:

- на основе эффекта Фарадея;

- базе интерферометрических принципов;

- основе волоконных решеток и др.

Основное практическое применение нашли преобразователи на базе эффекта Фарадея, для которых характерны поляриметрический и скорометрический эффекты преобразования.

В измерительном оптическом трансформаторе тока (ОТТ) используется поляризметрический оптический эффект: если вещество находится в магнитном поле и через него проходит свет, то плоскость поляризации света поворачивается. Применение данного эффекта позволяет сделать выходной сигнал независимым от температурных колебаний и механических вибраций, а также значительно повысить точность измерений.

Оптический ТТ, основанный на поляризметрическом эффекте (рис. 1) состоит из чувствительной части, содержащей несколько витков оптоволокна, намотанных на токопровод и защищенных оболочкой из немагнитных материалов, а также из оптоэлектронного блока, соединенного с чувствительным элементом. Оптоэлектронный блок генерирует монохроматический циркулярно поляризованный световой сигнал, который меняет плоскость поляризации при прохождении через чувствительную часть и снова поступает в оптоэлектронный блок на оптический вход. Там, на фазовом детекторе, из светового сигнала он преобразуется в электрический, удобный для измерений [7].

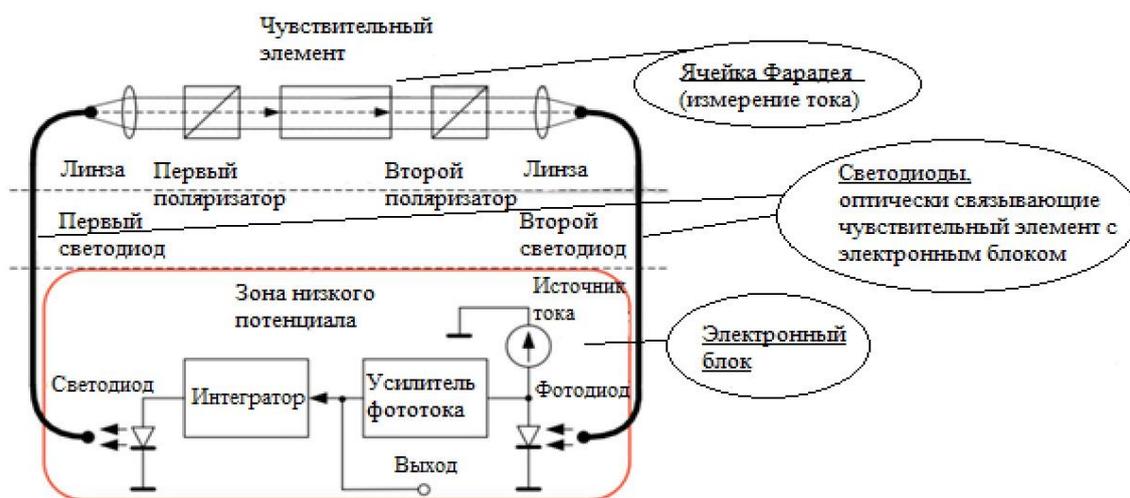


Рис. 1. Структурная схема измерительного преобразователя тока

Трансформатор тока, в котором используется скорометрический эффект, представляет собой волоконно-оптический датчик тока, работающий по принципу, согласно которому магнитное поле не вращает линейно поляризованную световую волну, а изменяет скорости световых волн с круговой поляризацией в чувствительном волокне, намотанном на проводник с током. Зачастую легче точно измерить изменения скорости света, чем изменения состояния поляризации. Основная причина заключается в том, что при использовании схемы измерения скорости не нужно конструировать чувствительную область из отожденного волокна, с которым трудно работать в производственных условиях по причине его хрупкости [10].

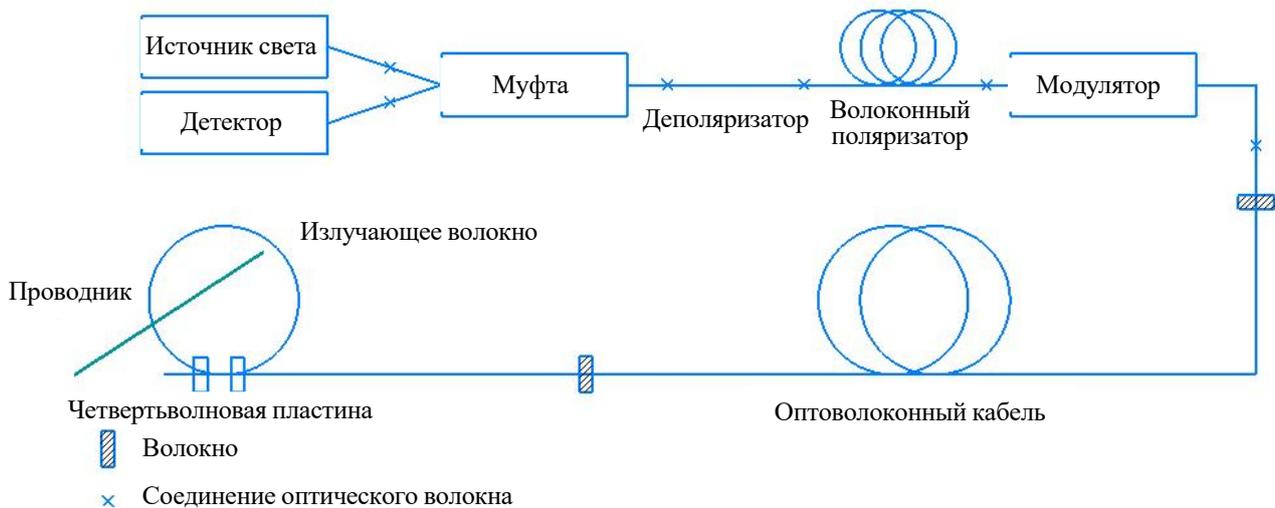


Рис. 2. Оптическая схема ОТТ

Основная идея заключается в том, что разница во времени пролета измеряется как фазовый сдвиг между двумя интерферирующими световыми волнами. При этом модулятор, помещенный в начале волокна с постоянными магнитами, преобразует информацию о фазовом сдвиге в высокочастотную несущую. Сигнал на фотодетекторе подвергается цифровой демодуляции, а управляющие сигналы возвращаются как к источнику света, так и к модулятору. Единственная физическая величина, влияющая на разницу во времени пролета двух световых волн, – это магнитное поле, действующее на сенсорную головку посредством эффекта Фарадея.

Преимуществами ОТТ (по сравнению с их электромагнитными аналогами) являются:

- возможность измерения переменного (до 100 кА) и постоянного или импульсного (до 600 кА) тока разных уровней напряжений (до 800 кВ);

- регулируемый масштабный коэффициент;

- широкая полоса пропускания сигналов (до 10 кГц), позволяющая производить полный анализ качества электроэнергии в части гармоник (до 100 гармоник) и переходных процессов (для защиты);

- возможность интеграции в существующие измерительные и информационные системы;

- отсутствие петли гистерезиса, магнитного насыщения и остаточного намагничивания;

- пожаро-, взрыво- и электробезопасность;

- высокая помехоустойчивость;

- низкая чувствительность к вибрациям и колебаниям температуры;

- малый вес (10 % от веса традиционных ТТ) и габариты, легкая утилизация;

- возможность использования на передвижных подстанциях;

- экологичность при производстве.

Главное преимущество – это высокие метрологические характеристики. Погрешность ЦТТ показана на рис. 3.

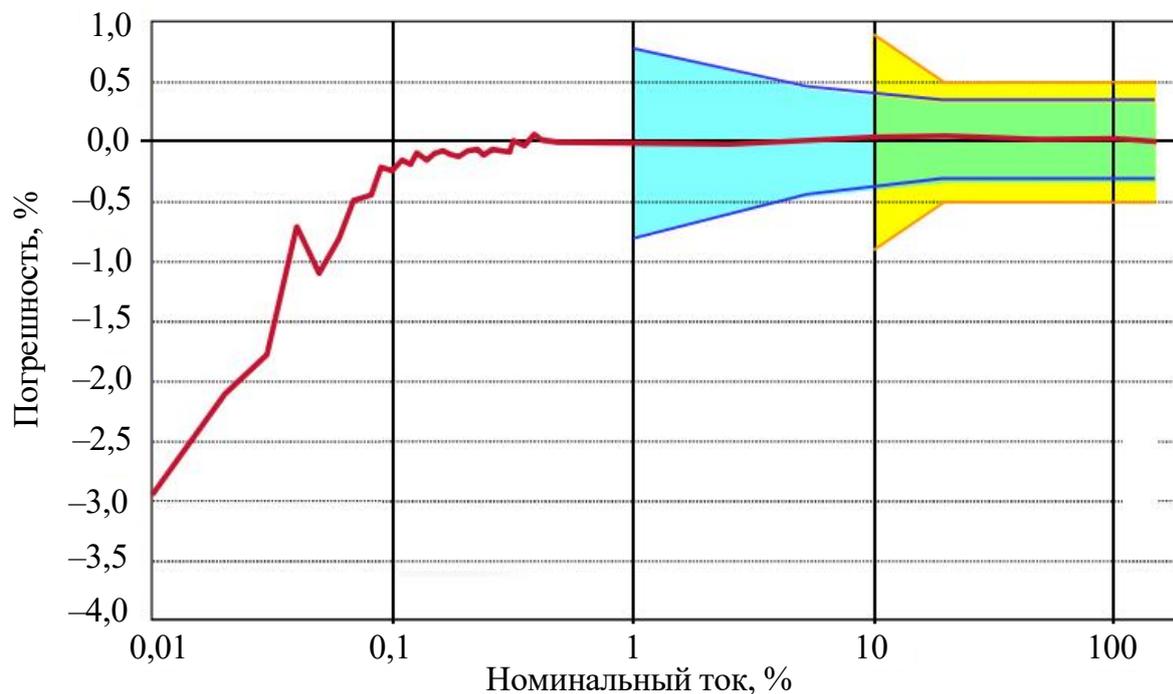


Рис. 3. Зависимость токовой погрешности ЦТТ от номинального тока

Из рис. 3 видно, что метрологические характеристики ЦТТ стабильны на всем диапазоне измерений, оговоренных действующим ГОСТ 7746-2015 [2], особенно в области малых значений. Метрологическим характеристикам традиционно уделяется особое внимание как в Правилах устройства электроустановок [12], так и в указанном ГОСТе [2].

Ограничением применения ОТТ на данный момент являются такие факторы, как высокая стоимость и отсутствие норм проектирования подобных систем с учетом опыта эксплуатации данных устройств. Однако ввиду развития оптических измерительных систем замена традиционных аналоговых средств измерений на цифровые неизбежна [7].

### **Отечественный опыт производства**

Над решениями цифрового учета электроэнергии давно работают ведущие мировые компании (ABB, Siemens, General Electric и Artech). Появление на рынке ОТТ продукции российского производства стало логичным ответом на вызовы, стоящие перед отечественными энергетическими компаниями и предприятиями, особенно в условиях импортозамещения высокотехнологичного оборудования.

Один из российских производителей цифровых трансформаторов – АО «Профотек» (Москва). Предприятие владеет всей цепочкой производства (начиная от создания оптоволоконных и уникальных алгоритмов обработки данных и заканчивая выпуском серийных приборов). Среди

средств измерения, выпускаемых предприятием, – ТТ электронные оптические на 20, 110 и 500 кВ, номинальный первичный ток от 400 А до 190 кА. Класс точности 0,05; 0,1; 0,2.

Другой производитель ЦТТ – ООО НПО «Цифровые измерительные трансформаторы» (Иваново). В состав преобразователей переменного и постоянного тока входят малогабаритный ТТ, пояс Роговского, датчик постоянного тока. Малогабаритный ТТ предназначен для передачи информации устройствам коммерческого учета электроэнергии, а пояс Роговского и датчик постоянного тока – устройствам релейной защиты и автоматики [8]. Устройство имеет исполнение для различных классов напряжения, оснащено аналоговыми и цифровыми выходами.

ООО «НПП Марс-Энерго» (Санкт-Петербург) – еще один производитель отечественных оптических измерительных трансформаторов для цифровой подстанции. Компания производит ЦТТ на напряжения 0,4–35 кВ комбинированного типа (оптический трансформатор тока и напряжения КРИСМАРС-СТ/VT). Основу составляет датчик тока с использованием поляриметрического метода эффекта Фарадея. Прибор имеет как аналоговый, так и цифровой выход [9].

### **Заключение**

В соответствии с концепцией «Цифровая трансформация 2030» в России сформировано производство ЦТТ. Началось внедрение цифровых технологий, получен первый опыт эксплуатации цифровых систем и их взаимодействия друг с другом.

Цифровой измерительный сигнал, вырабатываемый оптическим трансформатором, позволяет создавать системы измерений и защиты с совершенно новыми качествами.

Требуется, несмотря на бурное развитие цифровых измерительных систем, активная работа по созданию предварительных национальных стандартов, разработке стандартов для цифровых подстанций, материалов и методов технического обслуживания нового оборудования, а также подготовке персонала соответствующей квалификации. Такие препятствия актуальны для любых новых технологий. Очевидно, что создание цифровых подстанций является главным и наиболее перспективным трендом в современной электроэнергетике.

### **Библиографический список**

1. О единой технической политике в электросетевом комплексе: Положение ПАО «Россети». URL: [https://rosseti-lenenergo.ru/upload/\\_about/tehnikeskay\\_politika/polozheniya\\_pao\\_rosseti\\_o\\_edino\\_y\\_tehnikeskoy\\_politike\\_v\\_elektrosetevom\\_komplekse\\_utverzhdenuyu\\_sovetom\\_direktorov\\_pao\\_lenenergo\\_protokol\\_ot\\_20.12.2019\\_\\_26.pdf](https://rosseti-lenenergo.ru/upload/_about/tehnikeskay_politika/polozheniya_pao_rosseti_o_edino_y_tehnikeskoy_politike_v_elektrosetevom_komplekse_utverzhdenuyu_sovetom_direktorov_pao_lenenergo_protokol_ot_20.12.2019__26.pdf) (дата обращения: 24.03.2023).

2. ГОСТ 7746-2015. Трансформаторы тока. Общие технические условия. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200136399> (дата обращения: 24.03.2023).

3. СТО 34.01-21-004-2019. Цифровой питающий центр. Требования к технологическому проектированию цифровых питающих подстанций напряжением 110–220 кВ и узловых цифровых подстанций напряжением 35 кВ. URL: [https://standartgost.ru/g/СТО\\_34.01-21-004-2019](https://standartgost.ru/g/СТО_34.01-21-004-2019) (дата обращения: 24.03.2023).

4. СТО 34.01-21-005-2019. Цифровая электрическая сеть. Требования к проектированию цифровых распределительных электрических сетей 0,4–220 кВ. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293730/4293730673.pdf> (дата обращения: 24.03.2023).

5. СТО 56947007-29.240.10.299-2020. Цифровая подстанция. Методические указания по проектированию ЦПС. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293722/4293722799.pdf> (дата обращения: 24.03.2023).

6. Лебедев В.Д., Филатова Г.А., Нестерихин А.Е. Измерительные преобразователи тока для цифровых устройств релейной защиты и автоматики. URL: [http://ispu.ru/files/ispu\\_pubs/Lebedev\\_Filatova\\_Nesterihin\\_Izmeritelnye\\_preobrazovateli\\_toka..pdf](http://ispu.ru/files/ispu_pubs/Lebedev_Filatova_Nesterihin_Izmeritelnye_preobrazovateli_toka..pdf) (дата обращения: 24.03.2023).

7. Базыль И.М., Дударенко А.Д. Использование оптических трансформаторов тока // Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. № 12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ispolzovanie-opticheskikh-transformatorov-toka> (дата обращения: 24.03.2023).

8. Назначение цифровых трансформаторов тока ЦТТН – 6(10), 35, 110 кВ. URL: <https://digitrans.ru/ctt/> (дата обращения: 24.03.2023).

9. Измерительные преобразователи тока. URL: <https://www.mars-energo.ru/catalog/opticheskie-izmeritelnyie-transformatoryi/opticheskie-izmeritelnye-preobrazovateli-toka.html> (дата обращения: 24.03.2023).

10. Применение оптических преобразователей тока на высоких напряжениях. URL: <https://www.poweronline.com/doc/be-our-guest-optical-current-transducers-for-0001> (дата обращения: 24.03.2023).

11. Liehr S. Optical Measurement of Currents in Power Converters: Master's Degree Project in Electrical Measurement Technology. URL: [https://www.researchgate.net/publication/237212593\\_Optical\\_Measurement\\_of\\_Currents\\_in\\_Power\\_Converters](https://www.researchgate.net/publication/237212593_Optical_Measurement_of_Currents_in_Power_Converters) (дата обращения: 24.03.2023).

12. Правила устройства электроустановок. М.: Энас, 2005. 552 с.

## DIGITAL OPTICAL CURRENT TRANSFORMERS FOR MODERN POWER GRID COMPLEX

*A.S. Zhukov, S.V. Marinova*

***Abstract.** The article discusses the reasons for implementations of digital optical current transformers (DOCT), describes the features of DOCT of various designs, conclusions are made about the prospects of their implementation.*

***Keywords:** digitalization, optical current transformers, digital transformation.*

Об авторах:

ЖУКОВ Алексей Сергеевич – магистрант 1-го курса кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственной технической университет. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

МАРИНОВА Светлана Васильевна – старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственной технической университет. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

About the authors:

ZHUKOV Alexey Sergeevich – 1<sup>st</sup> Year Master's Student of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

MARINOVA Svetlana Vasilevna – Senior Lecturer of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: tgtu\_kafedra\_ese@mail.ru

УДК 621.314

## НОВЕЙШИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПО ЛИНИЯМ ПОСТОЯННОГО ТОКА. МИРОВОЙ ОПЫТ И МЕСТО РОССИИ

*А.П. Чуруткин, Л.С. Араратьян, Ю.М. Павлова*

© Чуруткин А.П., Араратьян Л.С.,  
Павлова Ю.М., 2023

***Аннотация.** В статье представлен обзор новейших технологий передачи электрической энергии по линиям постоянного тока с акцентом на мировом опыте и роли России в данной области. Рассмотрены*

особенности линии постоянного тока, их основные схемы, а также динамика развития в мире и планы на развитие в России.

**Ключевые слова:** постоянный ток, линии электропередач, технологии передачи.

На сегодняшний день технико-экономическое и социальное развитие многих стран, а также увеличивающийся спрос на электрическую энергию вызывают необходимость передачи энергии в наиболее отдаленные и менее доступные населенные пункты. В нынешних тенденциях для передачи больших объемов электроэнергии на далекие расстояния высоковольтные линии постоянного тока могут оказаться значительно экономнее, чем линии переменного. В зависимости от способа преобразования тока и значения напряжения можно добиться уменьшения потерь на каждые 1 000 км до 3 %.

Работа линий электропередач (ЛЭП) постоянного тока основывается на принципе выпрямления переменного тока (с помощью выпрямителей) в постоянный для передачи энергии на большие расстояния с последующим обратным преобразованием в переменный ток. Преобразование одного вида тока в другой происходит посредством преобразовательной подстанции – выпрямительной подстанции на питающем конце электропередачи и инверторной подстанции на переменном конце. На рис. 1 изображена ЛЭП постоянного тока [1].

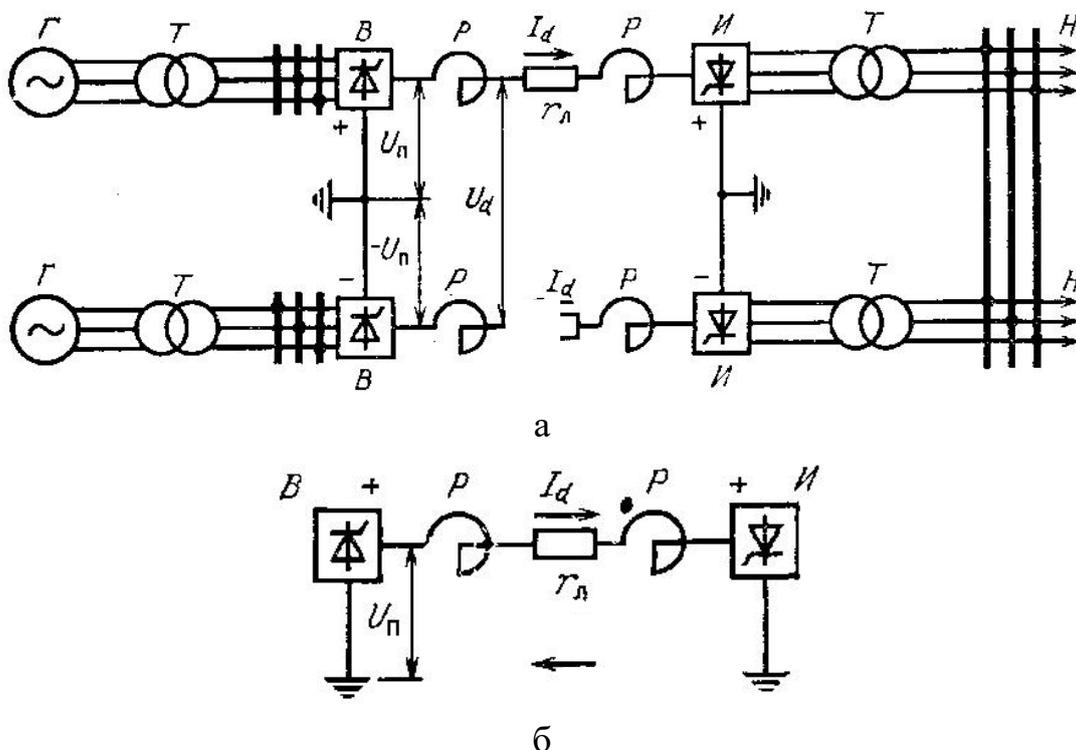


Рис. 1. Линия передачи постоянного тока: нормальный режим (а); послеаварийный режим (б)

Новейшие ЛЭП постоянного тока базируются на технологиях, разработанных компанией ASEA. Полупроводники являются основой инвертирования и выпрямления. В современных преобразовательных подстанциях функцию выпрямления выполняет тиристор (в старых это делали ртутные выпрямители).

Принцип действия тиристора такой же, как у диода с управляемым электродом, который по команде включается и обрезает часть синусоиды. В результате получаем постоянный ток (рис. 2) [2]. После выпрямления напряжение проходит через фильтры, чтобы сгладить его и улучшить гармонический состав. Инвертирование постоянного тока в переменный происходит подобным образом.

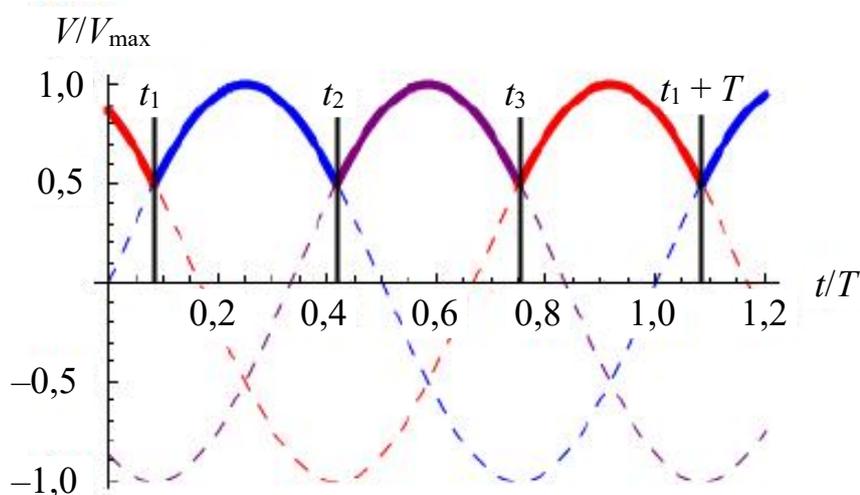


Рис. 2. Преобразование переменного тока в постоянный

Линии постоянного тока используются не только для передачи на большие расстояния, но и для пересечения морских проливов (например, линия Baltic Cable между Швецией и Германией протяженностью 250 км) или соединения энергосистем, работающих в несинхронном режиме либо на разной частоте.

В основном выделяют пять схем, по которым может быть выполнена линия постоянного тока:

- монополярную,
- биполярную,
- вставку постоянного тока,
- мульти терминальную,
- трехполярную.

В монополярной схеме один полюс выпрямителя и один полюс инвертора заземляются, а второй, электрический потенциал которого ниже или выше заземленного, подключен к ЛЭП (рис. 3). Современные монополярные схемы воздушной линии имеют пропускную способность около 1 500 МВт.

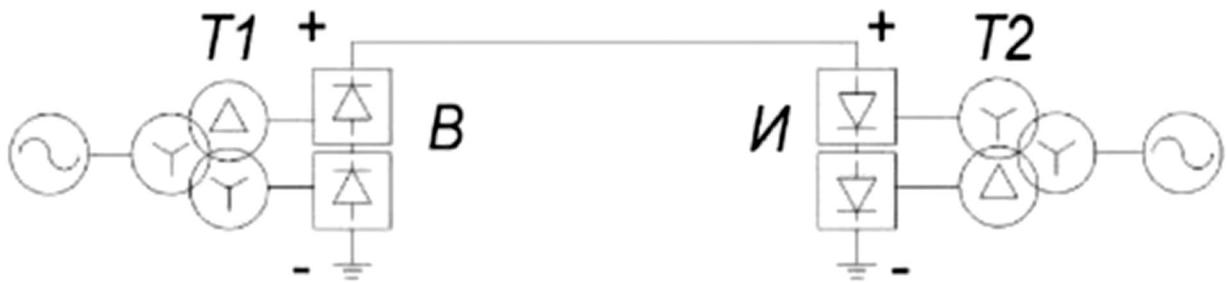


Рис. 3. Монополярная схема

В биполярной схеме (см. рис. 1а) используются два проводника, находящиеся под высокими напряжениями, противоположной полярности. По заземленному выводу протекают маленькие токи, что уменьшает потери. В случае короткого замыкания система начинает работать по монополярной схеме (см. рис. 1б) и передает только половину номинальной мощности.

Во вставке постоянного тока выпрямитель и инвертор расположены на одной подстанции, а линия отсутствует (рис. 4). Данные вставки применяют в случаях связи энергетических систем двух стран при необходимости использования напряжения разной частоты (например, такая вставка на сегодняшний день соединяет энергосистемы России и Финляндии).

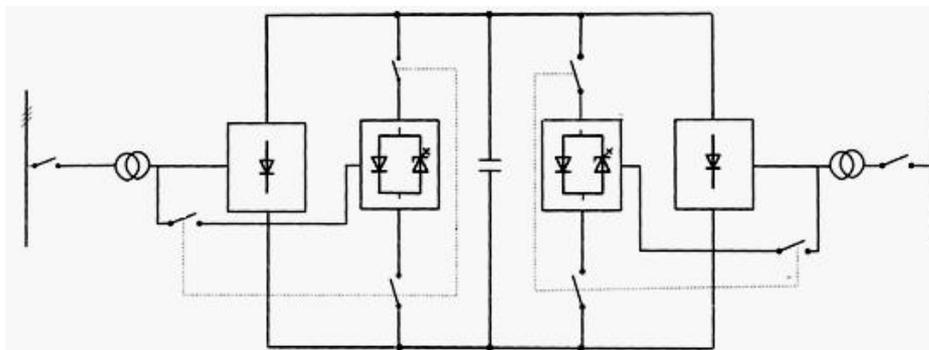


Рис. 4. Вставка постоянного тока

Мультитерминальные схемы довольно редко соединяют более двух пунктов. Выделяют последовательные, параллельные и гибридные конфигурации мультитерминальных схем. В мире на сегодняшний день существуют две такие линии, например крупнейшая мультитерминальная линия постоянного тока Quebec-New England, открытая в 1992 г., мощностью 2 000 МВт.

Принцип работы трехполярной линии схож с биполярной схемой, за исключением появления третьего проводника (рис. 5), который работает параллельно в монополярном режиме и имеет реверсные вентили. Действуя в обратной полярности, эти вентили уменьшают значение тока в линии, периодически меняя его полярность. С помощью уменьшения зна-

чения тока увеличивается пропускная способность линии из-за уменьшения среднеквадратичного нагрева [3].

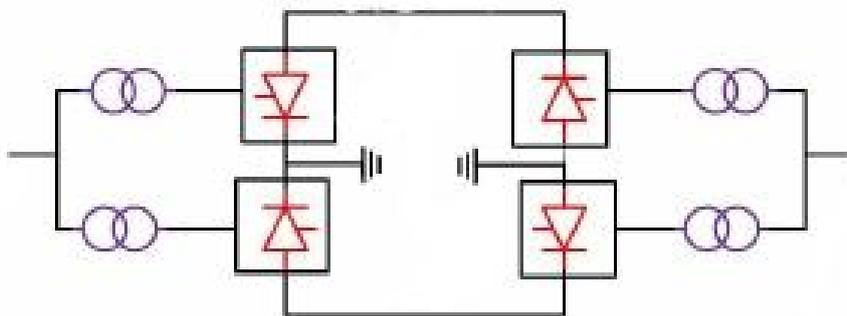


Рис. 5. Трехполярная линия

Передача постоянного тока высокого напряжения начала свое развитие с 50-х гг. XX в. С 2010 г. число проектов передач и вставок постоянного тока в мировой энергетике заметно возросло (рис. 6).

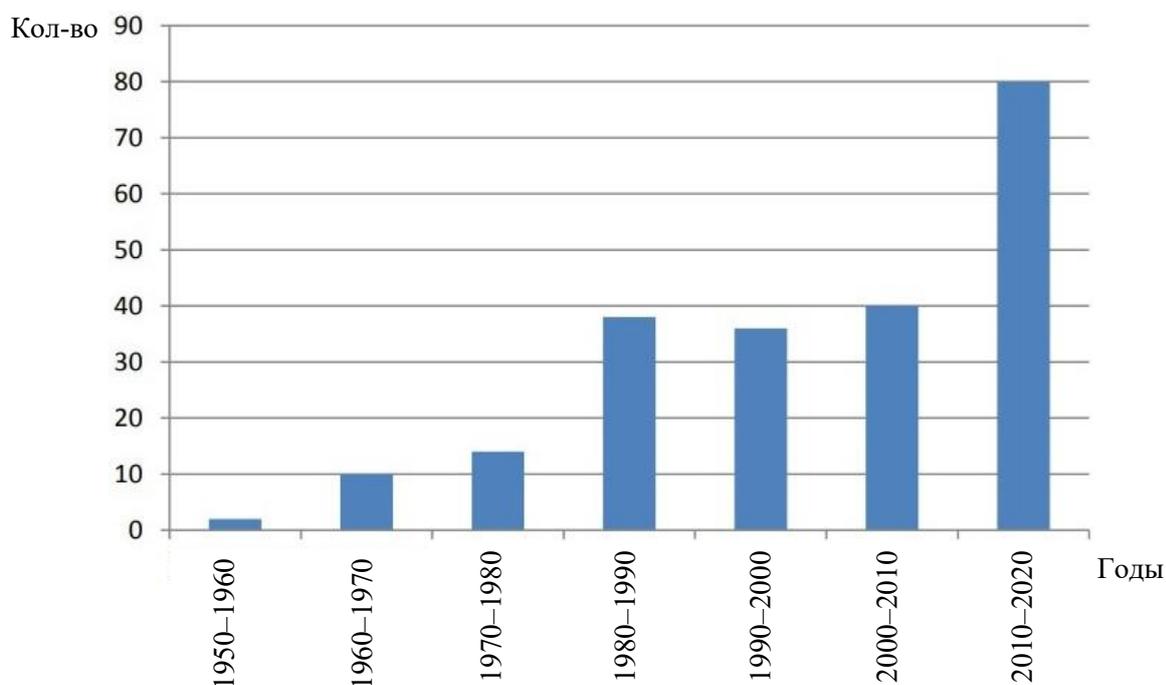


Рис. 6. Число проектов передач и вставок постоянного тока в мировой энергетике по десятилетиям

Из графика видно (см. рис. 6), что приблизительно в 1950–1990 гг. в эксплуатацию было введено около 100 объектов и около 40 в первом десятилетии XXI в. [4].

До 2020 г. было запланировано завершить строительство еще 80 объектов постоянного тока [5]. В Европе предполагается, что до 2030 г. на электропередачу постоянного тока будет приходиться около 25 % общей пропускной способности [4].

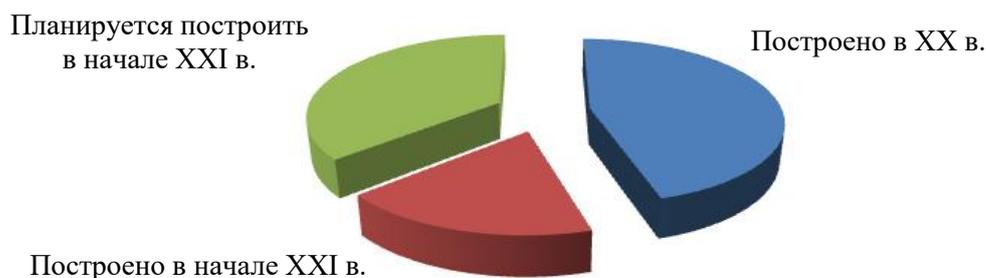


Рис. 7. Динамика изменения количества объектов постоянного тока в XX–XXI вв.

На рис. 8 изображены системы высоковольтных линий электропередач постоянного тока в западной части Европы (простая линия – существующие; штрихпунктирная – строящиеся; пунктирная – предложенные) [5].

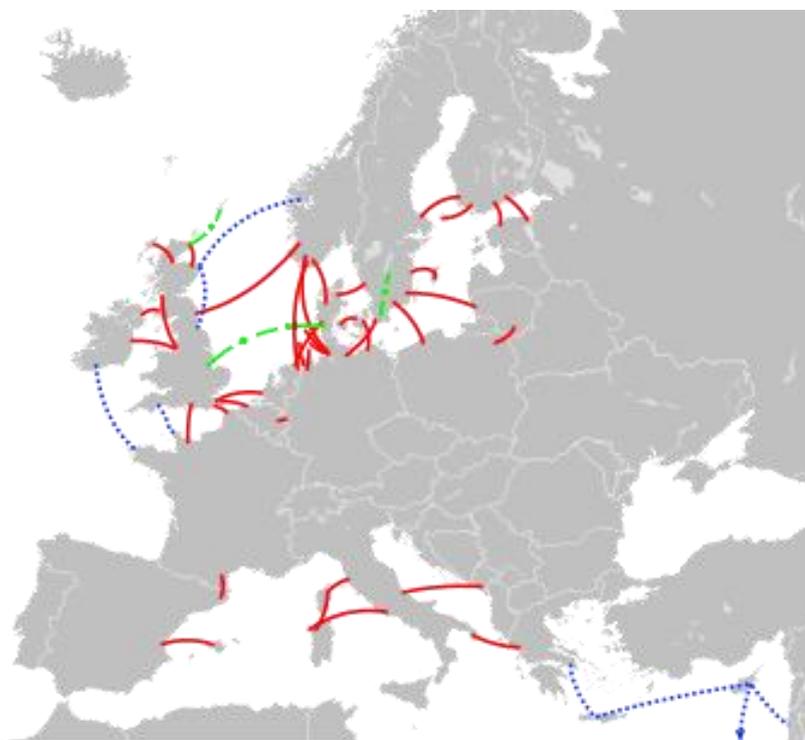


Рис. 8. Системы высоковольтных линий электропередач постоянного тока в западной части Европы

Система передачи электроэнергии постоянным током в России развивается до сих пор. Впервые линия постоянного тока на территории РФ (бывшего СССР) была создана в начале 50-х гг. XX в. при строительстве ВКЛ ППТ Кашира – Москва. В начале XXI в. получили реализацию два проекта: в 2002 г. модернизирована подстанция «Выборгская», а в 2015 г. завершено строительство линии постоянного тока на подстанции «Могоча». Предполагается также построить линию постоянного тока, соединяющую ЛАЭС-2 и подстанцию «Выборгская» [5].

В документе «Энергетическая стратегия России на период до 2035 года» к приоритетным технологиям было отнесено оборудование, обеспечивающее эффективную передачу электроэнергии на дальние расстояния для ЛЭП переменного и постоянного тока на высокое и ультравысокое напряжение, вследствие этого Россия сможет образовать новые и укрепить старые связи с зарубежными энергетическими системами стран Востока (Ирана, Турции, Монголии, Республики Корея, Китая) посредством передачи постоянного тока.

В 2025 г. планируется начать строительство линии передачи постоянного тока 750 кВ пропускной способностью 3 000 МВт и протяженностью 1 850 км. Эта линия предназначена для увеличения пропускной способности межсистемных сечений – между Уралом, Средней Волгой, Центром. В период с 2021 по 2030 г. планируется построить сооружение передачи постоянного тока 500 кВ Сибирь – Тюмень с пропускной способностью 200 МВт и протяженностью около 900 км [4].

Актуальность развития технологий передачи постоянного тока высокого напряжения для энергетики РФ обусловлена особенностями Единой энергетической системы (ЕЭС) России как крупнейшей электроэнергетической системы, включая особенности работы технологически изолированных электроэнергетических систем РФ и внешние условия, которые связаны с функционированием энергосистем зарубежных стран и государственных объединений, которые граничат с РФ.

В заключение можно сказать, что на сегодняшний день перспективы развития поставок постоянного тока в ЕЭС России зависят от факторов:

- значительной протяженности территории страны;
- отдаленности крупных объектов генерации от нагрузки;
- наличия слабых связей между крупными региональными объединениями;
- острой проблемы с ограничением токов короткого замыкания в крупных городах;
- необходимости преодоления водных преград для электроснабжения некоторых территорий или нефтяных оффшорных платформ;
- развития сферы возобновляемых источников энергии;
- значительного износа и старения электрооборудования;
- высоких потерь в распределительных сетях.

### **Библиографический список**

1. Идельчик В.И. Электрические системы и сети: учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 592 с.
2. ABB – from pioneer to world leader. URL: [https://library.e.abb.com/public/08ee51494cabdd21c1257507004cec34/59-64%204M831\\_ENG72dpi.pdf](https://library.e.abb.com/public/08ee51494cabdd21c1257507004cec34/59-64%204M831_ENG72dpi.pdf) (дата обращения: 25.11.2022).

3. Ушаков В.Я. Электроэнергетические системы и сети: учебное пособие для бакалавриата и магистратуры. М.: Юрайт, 2016. 446 с.

4. Краткая техническая информация по теме «Концепция развития электропередач и вставок постоянного тока в ЕЭС России». СПб.: ОАО «НИИПТ», 2016. 27 с.

5. Лозина Н., Мазуров М. Передача постоянного тока. Перспективы применения // Новости электротехники. 2007. № 4 (46). URL: <http://news.elteh.ru/arh/2007/46/06.php> (дата обращения: 25.11.2022).

## THE LATEST TECHNOLOGIES FOR THE TRANSMISSION OF ELECTRICAL ENERGY VIA DC LINES. WORLD EXPERIENCE AND RUSSIA'S PLACE

*A.P. Churutkin, L.S. Araratyan, Y.M. Pavlova*

***Abstract.** The article presents an overview of the latest technologies for the transmission of electric energy via DC lines with an emphasis on world experience and the role of Russia in this field. The features of the DC line, their main schemes, as well as the dynamics of development in the world and plans for development in Russia were considered.*

***Keywords:** direct current, power lines, direct current transmission technologies.*

Об авторах:

ЧУРУТКИН Артем Павлович – студент 4-го курса кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: [tema.churutkin2001@gmail.com](mailto:tema.churutkin2001@gmail.com)

АРАРАТЬЯН Любовь Сергеевна – старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: [liuba.araratyan@yandex.ru](mailto:liuba.araratyan@yandex.ru)

ПАВЛОВА Юлия Михайловна – старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: [sokolhawk98@gmail.com](mailto:sokolhawk98@gmail.com)

About the authors:

CHURUTKIN Artem Pavlovich – 4<sup>th</sup> Year Student of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: [tema.churutkin2001@gmail.com](mailto:tema.churutkin2001@gmail.com)

ARARATYAN Lyubov Sergeevna – Senior Lecturer of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: [liuba.araratyan@yandex.ru](mailto:liuba.araratyan@yandex.ru)

PAVLOVA Yulia Mikhailovna – Senior Lecturer of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University.  
E-mail: sokolhawk98@gmail.com

УДК 621.316.1.05

## НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ БЕСПРОВОДНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

*Ю.М. Павлова, Л.С. Араратьян, А.А. Горев, А.В. Павлов*

© Павлова Ю.М., Араратьян Л.С.,  
Горев А.А., Павлов А.В., 2023

*Аннотация.* Статья посвящена новой технологии беспроводного электричества. Рассмотрена история развития беспроводной передачи электроэнергии. Приведены примеры беспроводной передачи энергии близкого и среднего радиуса.

*Ключевые слова:* беспроводное электричество, беспроводная энергия, беспроводная передача, беспроводная технология.

Передача электрической энергии является сложной и важной функцией современной энергетики. Существуют принципы передачи переменного тока по одно-, двух- и трехпроводной линии. Беспроводное электричество – это способ передачи электричества без использования проводов и кабелей. Беспроводная электроэнергия – сравнительно новая и быстро развивающаяся технология.

В настоящее время перед учеными стоит задача эффективной, надежной и безопасной передачи энергии. Беспроводная передача электричества связана с открытием Майклом Фарадеем явления электромагнитной индукции. С помощью экспериментов ученый установил, что переменное магнитное поле, порождаемое электрическим током, может вызывать электрический ток в другом проводнике.

На практике только Никола Теста смог воплотить идею передачи электричества на расстояние. Беспроводная передача электроэнергии представляет собой развивающуюся технологию, вызывающую повышенный интерес и спрос. Ее внедрение обеспечивает мобильность и быстроту, малую стоимость передачи, позволит отказаться от кабельных сетей [1].

Беспроводная передача энергии на короткие расстояния может быть достигнута с помощью электромагнитной индукции (рис. 1). Этот подход требует наличия магнитного поля в качестве среды передачи с исполь-

зованием магнитной связи между передающей и принимающей катушками для передачи энергии. С помощью трансформаторной связи первичная и вторичная катушки могут генерировать наведенные токи, которые формируют переменное электрическое поле в среде, так что мощность может передаваться через большинство неметаллических материалов, а энергия – от передатчика к приемнику [2].

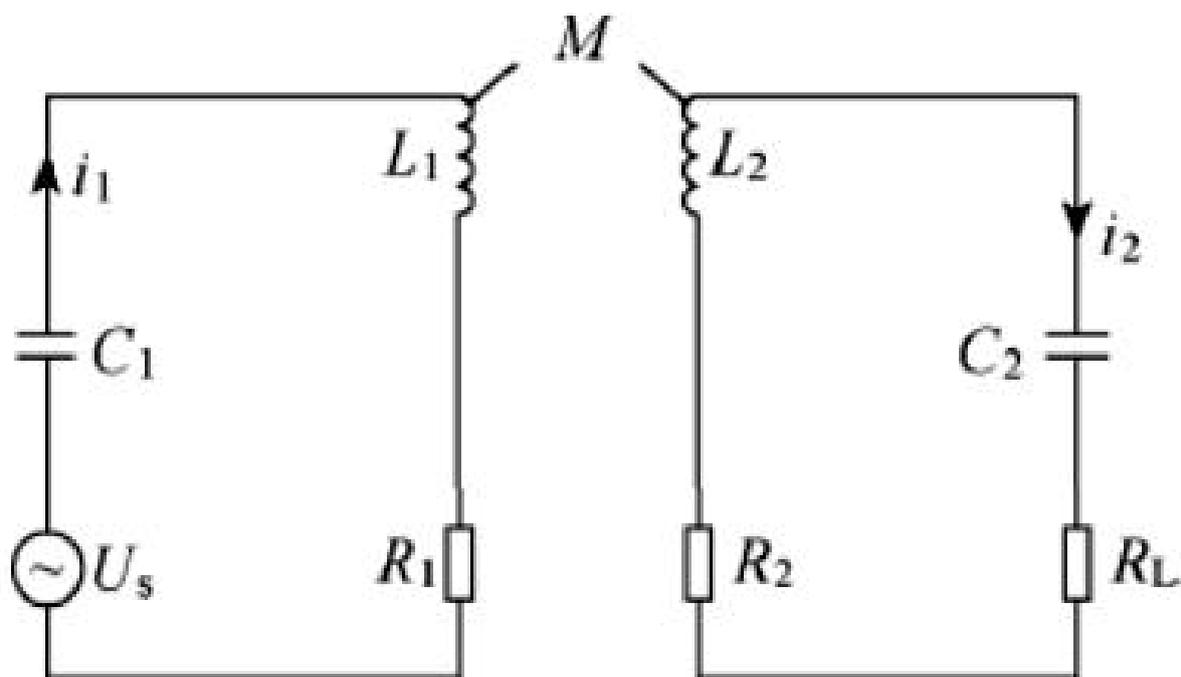


Рис. 1. Эквивалентная схема системы беспроводной передачи энергии

Преимуществами такого типа передачи выступают простая структура, относительно низкая стоимость, безопасная и надежная технология. К недостаткам можно отнести расстояние передачи мощности не более 10 см и использование, как правило, в электронных устройствах небольшой мощности. На данный момент распространенным применением является индуктивная зарядка электрических зубных щеток, универсальных беспроводных зарядных устройств и других электронных устройств малой мощности (рис. 2).

В настоящее время широко используемый трансформатор работает по принципу электромагнитной индукции и состоит из сердечника и двух катушек (первичной и вторичной). Когда переменное напряжение подается на первичную катушку, сердечник генерирует магнитное поле переменного тока, в результате чего вторичная катушка генерирует переменное напряжение той же частоты, а затем мощность передается от входной цепи к выходной.



Рис. 2. Универсальное беспроводное зарядное устройство для смартфона

Как известно, электромагнитные волны, диапазон частот которых составляет от 75 кГц до 10 ГГц, называются радиоволнами. Их можно использовать для передачи радио- и телевизионных программ, ведения факсимильной связи, но их способность передавать электрическую энергию ограничена. Обычно электромагнитные волны в свободном пространстве в процессе передачи энергии излучаются во всех направлениях, трудно концентрируются и имеют плохую ориентацию. Таким образом, эффективность источника питания является проблемой [3].

При беспроводной передаче энергии среднего радиуса действия используется принцип электромагнитно-резонансной, или радиочастотной электромагнитной, связи. Расстояние передачи такого типа может быть в 8 раз больше в радиусе, чем в индукционной катушке. Он использует приемную антенну и стартовую площадку с той же электромагнитной частотой, что и частота приемной антенны, чтобы вызвать электромагнитный резонанс и генерировать сильную электромагнитную связь для передачи электроэнергии на средние расстояния. Вся система передачи энергии среднего радиуса состоит из двух модулей: один представляет собой устройство, которое можно подключить к розетке, а другой – приемник, который можно встраивать в электронные устройства (рис. 3) [4].

Удаленная беспроводная передача энергии происходит посредством микроволн, лазеров и других форм энергии для передачи на большие расстояния. Помехоустойчивость микроволн и лазера высока; благодаря эффективной регулировке, выпрямителю и другим способам они могут быть переданы на дистальный конец приемного устройства для обеспечения передачи мощности на большие расстояния. Инфраструктура этого способа дорогая, его можно использовать для крупномасштабной передачи энергии на большие расстояния, поэтому зачастую он применяется в космических технологиях, например для передачи энергии

искусственных спутников, космических станций и между космическими кораблями.



Рис. 3. Принципиальная схема беспроводной системы электропитания

Теоретически, чем короче длина радиоволны, тем лучше ее ориентация и меньше дисперсия, поэтому ее можно использовать в виде микроволн или лазера для передачи электрической энергии на большие расстояния. Это может иметь большое значение для развития и применения новой энергии при решении будущих проблем нехватки энергии.

Многие страны продолжают проводить исследования в указанной области. В 1968 г. американский инженер Питер Глейзер предложил концепцию космической солнечной энергетики. Его видение состоит в том, чтобы построить базу солнечной энергии в космическом пространстве, возвращая микроволновую энергию обратно на Землю. В 1979 г. НАСА и Министерство энергетики США совместно предложили план создания спутниковой базы солнечной системы SPS (сокращение от Solar Power Satellite). Эта система представляет собой спутник солнечной энергии на геостационарной орбите, где энергия Солнца примерно в 1,4 раза больше, чем на Земле. Прогнозируется, что солнечные элементы SPS могут нагружать выходную мощность постоянного тока 10 ГВт, выходную мощность батареи через микроволновый генератор для преобразования электроэнергии от антенны передачи энергии на поверхность Земли с помощью микроволн (2,45 ГГц) в виде беспроводной передачи. При размещении на Земле приемной антенны, состоящей из дипольной антенны половинной длины волны, выпрямительного диода, фильтра нижних частот и обходных конденсаторов, можно получить электрическую мощность примерно до 5 ГВт. В настоящее время метод построения систем электроснабжения, характеристики излучения антенны,

управление ориентацией микроволновых передающих устройств, характеристики распространения микроволнового излучения в пространстве и системы безопасности для обеспечения отказоустойчивости – это технические вопросы, которые предстоит решить в будущем [5].

Беспроводная система передачи энергии обладает многими уникальными свойствами, которые практически гарантируют ей роль важного и, вероятно, решающего элемента в развитии космоса. По мнению ряда исследователей, этими уникальными свойствами обычно выступают следующие пять:

- 1) энергия может передаваться со скоростью света;
- 2) направление передачи энергии можно быстро изменить;
- 3) между источником энергии и точкой потребления не требуется никакой нагрузки ни в виде проводов, ни в виде транспортных средств;
- 4) энергия не теряется при ее переносе через космический вакуум и мало теряется в атмосфере Земли на более длинных микроволновых волнах;
- 5) перенос энергии между точками не зависит от разницы в гравитационном потенциале между этими точками.

Технология беспроводной передачи энергии может применяться во многих электрических устройствах и передавать мощность и энергию со скоростью света без использования проводов или другой среды. Космический вакуум можно рассматривать как сверхпроводящую среду. Поскольку при распространении микроволновой энергии в космосе (например, с геосинхронной орбиты на Землю) нет никаких потерь, это делает возможным создание некоторых новых устройств, таких как спутник солнечной энергии.

Для передачи электроэнергии с Земли в космос, использования в электродвигателях с высоким удельным импульсом, перехода с низкой околоземной на высокую околоземную орбиту и даже на геостационарную орбиту и обратно необходимо заложить в технологии новые возможности. Свойство, при котором передача энергии между точками не будет зависеть от разницы в гравитационном потенциале между этими точками, делает все перечисленное возможным. Эта способность может в 20 раз уменьшить массу химического топлива, которое пришлось бы доставлять с Земли на низкую околоземную орбиту через гравитационный барьер с большими затратами [6].

Поскольку технология беспроводной передачи энергии продолжает развиваться и совершенствоваться, в будущем мы можем рассчитывать на избавление от проводов питания мобильных телефонов, камер, ноутбуков и других мобильных устройств, чтобы пользоваться беспроводной связью в аэропортах, на вокзалах, в отелях и т. д. В долгосрочной перспективе технология имеет широкий спектр потенциальных применений.

## Библиографический список

1. Способы беспроводной передачи электроэнергии. URL: <http://elektrik.info/main/fakty/918-sposoby-besprovodnoy-peredachi-elektroenergii.htm> (дата обращения: 15.11.2022).
2. Ларионов Д.В. Беспроводная передача энергии // Молодой ученый. 2018. № 4. URL: <https://moluch.ru/archive/230/53420/> (дата обращения: 15.11.2022).
3. Беспроводная передача энергии – Wireless power. URL: [https://wikiboard.ru/wiki/Wireless\\_power\\_transfer](https://wikiboard.ru/wiki/Wireless_power_transfer) (дата обращения: 15.11.2022).
4. Технологии беспроводной зарядки. Часть 1. Теоретические основы и способы аппаратной реализации / Сяо Лу, Пинг Ванг, Дусит Ниято, Донг Ин Ким, Чжу Хан; пер. А. Гречишников // Беспроводные технологии. 2017. № 3. URL: <https://wireless-e.ru/wp-content/uploads/4856.pdf> (дата обращения: 15.11.2022).
5. Данилова Т. Беспроводное будущее и беспощадная физика // В мире. 2021. № 7. URL: [https://atomicexpert.com/wireless\\_future\\_and\\_ruthless\\_physics](https://atomicexpert.com/wireless_future_and_ruthless_physics) (дата обращения: 15.11.2022).
6. Беспроводная передача энергии из космоса. URL: <https://naukatehnika.com/besprovodnaya-peredacha-energii-s-kosmicheskix-apparatov.html> (дата обращения: 15.11.2022).

## NEW TECHNOLOGIES OF WIRELESS ELECTRICITY

*Yu.M. Pavlova, L.S. Araratyan, A.A. Gorev, A.V. Pavlov*

***Abstract.** The article is devoted to the new technology of wireless electricity. The history of the development of wireless transmission of electricity is considered. Examples of wireless transmission of energy of close and medium range are given.*

***Keywords:** wireless electricity, wireless energy, wireless transmission, wireless technology.*

Об авторах:

ПАВЛОВА Юлия Михайловна – старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: [sokolhawk98@gmail.com](mailto:sokolhawk98@gmail.com)

АРАРАТЯН Любовь Сергеевна – доцент кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: [liuba.araratyan@yandex.ru](mailto:liuba.araratyan@yandex.ru)

ГОРЕВ Андрей Андреевич – магистрант 1-го курса, Тверской государственный технический университет. E-mail: [andrey.gorev08@mail.ru](mailto:andrey.gorev08@mail.ru)

ПАВЛОВ Александр Вячеславович – магистрант 1-го курса, Тверской государственный технический университет. E-mail: sokolhawk98@gmail.com

About the authors:

PAVLOVA Yulia Mikhailovna – Senior Lecturer of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: sokolhawk98@gmail.com

ARARATYAN Lyubov Sergeevna – Senior Lecturer of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: liuba.araratyan@yandex.ru

GOREV Andrey Andreevich – 1<sup>st</sup> Year Master's Student, Tver State Technical University. E-mail: andrey.gorev08@mail.ru

PAVLOV Alexander Vyacheslavovich – 1<sup>st</sup> Year Master's Student, Tver State Technical University. E-mail: sokolhawk98@gmail.com

УДК 621.438

## ПРИМЕНЕНИЕ ВОДОРОДА КАК ТОПЛИВА ДЛЯ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ

*А.А. Бойченко*

© Бойченко А.А., 2023

***Аннотация.** В статье рассмотрены преимущества водорода как топлива в сравнении с традиционными углеводородами. Представлены существующие проекты применения газотурбинных установок с частичным или стопроцентным содержанием водорода в качестве топлива, а также приведены основные характеристики газотурбинной установки при работе на разных видах топлива.*

***Ключевые слова:** водородная энергетика, газотурбинная установка, выбросы, газовая турбина, декарбонизация.*

Пока страны первого и второго мира бросают все силы на разработку технологий зеленой энергетики, готовясь к крупномасштабному переходу энергетического сектора на декарбонизацию, некоторые крупные производители энергетического оборудования разрабатывают газовые турбины, которые могут работать на топливе с большим содержанием водорода – самого распространенного и легкого элемента, не имеющего запаха и нетоксичного. Помимо этого, водород имеет самую высокую энергоемкость

среди обычных видов топлива по весу, следовательно, его можно использовать в качестве энергоресурса не только для производства электроэнергии в промышленных масштабах, но и как топливо для транспорта (несмотря на то, что он не встречается в природе свободно и должен извлекаться). На данный момент существует несколько способов получения водорода:

- 1) паровая конверсия метана;
- 2) газификация угля;
- 3) электролиз воды;
- 4) пиролиз
- 5) частичное окисление;
- 6) биотехнология [1].

Однако водород все же считается слабым звеном в энергетическом переходе, поскольку ключевые технологии его производства с использованием возобновляемой электроэнергии, такие как электролизеры и топливные элементы с протонообменной мембраной, очень дорогие. Несмотря на это, развитие технологий применения водорода продолжается, так как указанный недостаток нивелируется экологическими преимуществами за счет отсутствия монооксида углерода (CO), диоксида углерода (CO<sub>2</sub>), оксидов серы (SO<sub>x</sub>), несгоревших углеводородов и дыма [2]. Выбросы двигателей на водороде относительно малы и состоят из воды и оксидов азота, оказывающих влияние на окружающую среду в значительно меньшей степени, чем у существующих двигателей.

Основная технология, которая ознаменует окончательный переход на водородную энергетику, – водородная турбина. В последнее время заметны усилия некоторых компаний в разработке газовых турбин, полностью работающих на водороде. Определенных успехов добились инженеры Mitsubishi Hitachi Power System (MHPS), GE Power, Siemens Energy и Ansaldo Energia [3]. Многим отечественным производителям в настоящее время известно о работе энергомашиностроительной компании и конструкторского бюро [4].

С 1970 г. MHPS запустила 29 газотурбинных установок с содержанием водорода в топливе в диапазоне от 30 до 90 %. Испытания длились более 3,5 млн рабочих часов. Ключевой задачей, с которой столкнулась компания, было снижение высоких выбросов оксида азота (NO<sub>x</sub>), связанных со сжиганием водорода, без ущерба для эффективности. Поскольку водород имеет более высокую скорость воспламенения по сравнению с природным газом, в MHPS также стремились уменьшить риск обратного воспламенения в смесях с более высоким содержанием водорода. Одним из решений была разработка диффузионной камеры сгорания, в которой топливо впрыскивается в воздух. Камера сгорания снижает содержание NO<sub>x</sub> в выхлопе с помощью впрыскивания пара или воды, но сохраняет стабильное горение, даже если концентрация водорода в

топливе достигает 90 %. Эта технология, работающая при содержании водорода 30 %, может обеспечить выходную мощность, эквивалентную 700 МВт (в режиме комбинированного цикла с температурой на входе в турбину 1 600 °С), а также сократить выбросы углерода примерно на 10 % по сравнению с обычной парогазовой установкой.

В настоящее время MHPS осуществляет пилотный проект по переводу одного из трех блоков электростанции комбинированного цикла мощностью 1,3 ГВт в Нидерландах (рис. 1) на использование возобновляемого водорода. В проекте в Гронингене предусматривается модификация газовой турбины M701F мощностью 440 МВт. Технология сжигания будет усовершенствована, чтобы диапазон  $\text{NO}_x$  оставался тем же, что и у электростанции, работающей на природном газе, но при этом сжигалось 100 % водорода без впрыска пара или воды [3].

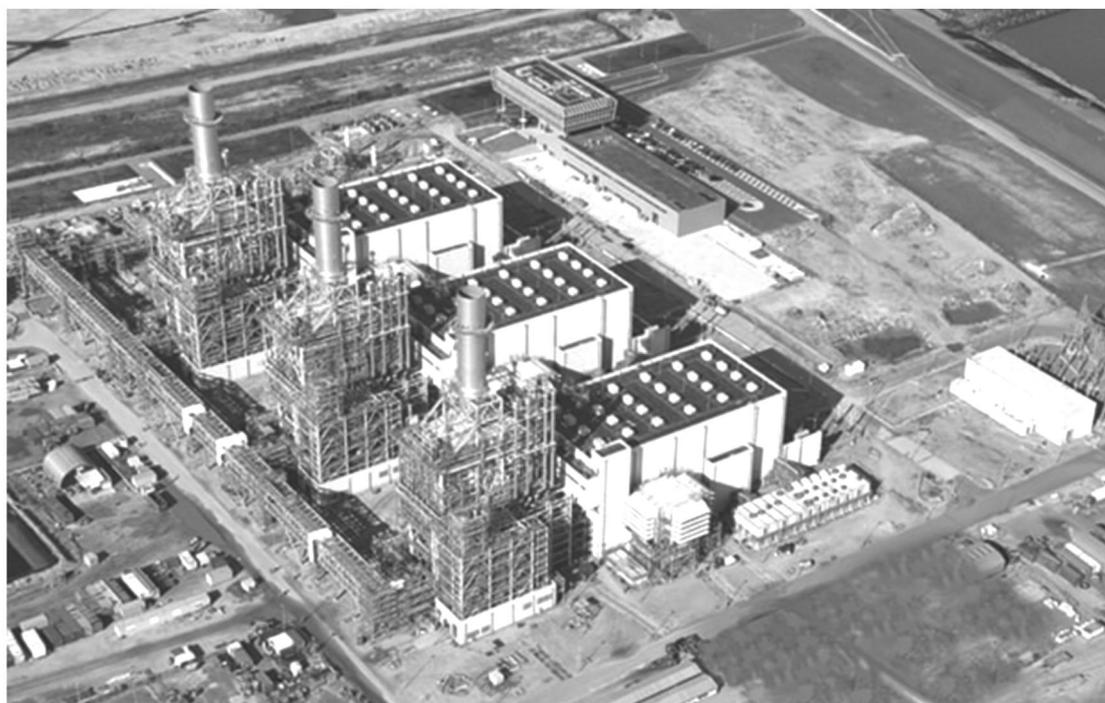


Рис. 1. Электростанция в Нидерландах

Другая компания объединяет свой уникальный парк газовых и паровых турбин, электролизеров и тепловых насосов и превращает его в уникальное оптимизированное решение для электростанций. Водородная электростанция может быть построена в соответствии с конкретными требованиями и допускает комбинации моделей газовых турбин в зависимости от требуемой мощности. Водородная электростанция состоит из газовой турбины, работающей на водороде, например SGT5-9000HL, SGT-800 или SGT-400 (рис. 2), электролизеров со сжатием и хранением водорода, системы управления всеми компонентами, включая возобновляемые источники энергии [5].

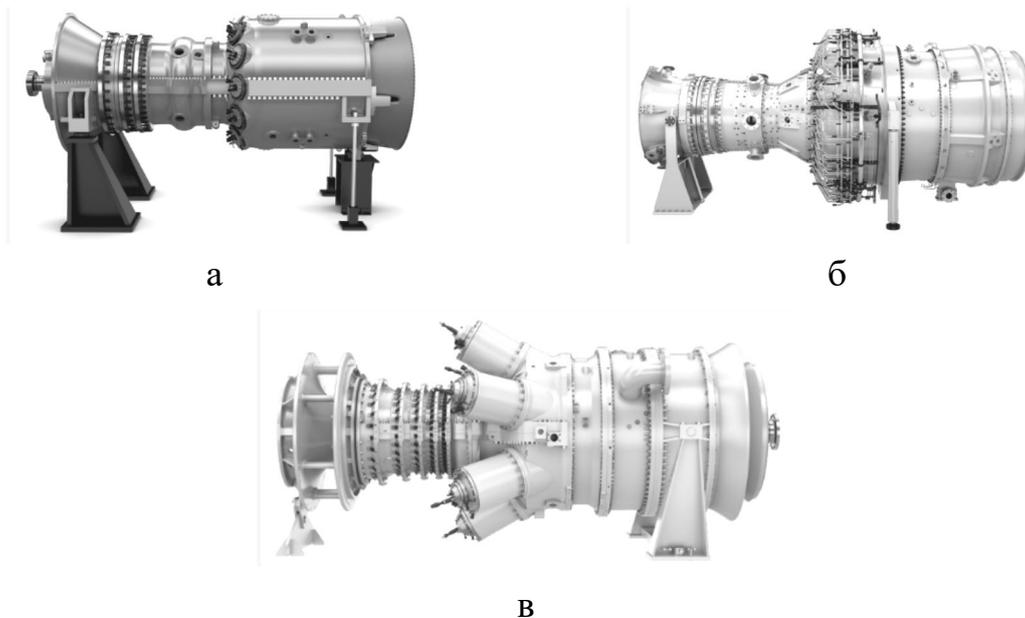


Рис. 2. Модели газовых турбин:  
SGT5-9000HL (а); SGT-800 (б); SGT-400 (в) [5]

Физические свойства водорода отличаются от других видов топлива (даже в сравнении с природным газом). Сжигание водорода является сложной задачей. Другая компания разработала три различных варианта системы сжигания  $H_2$  (рис. 3).

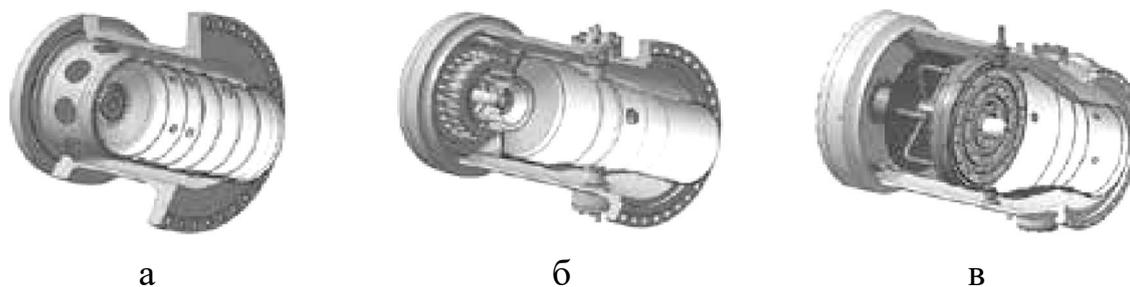
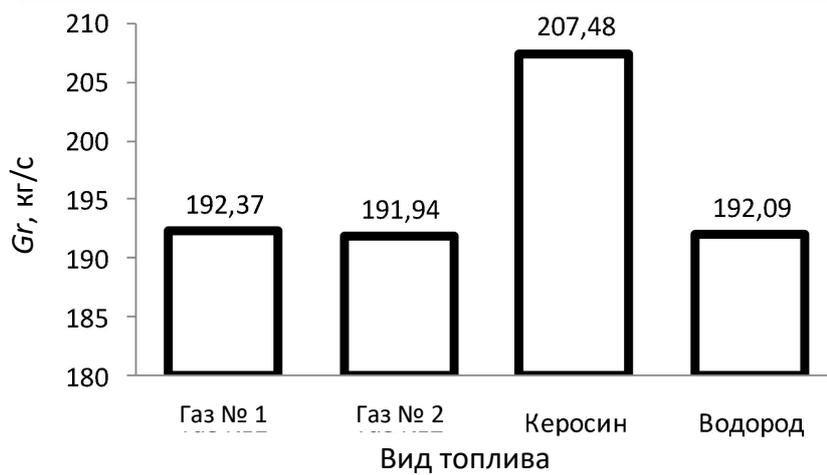
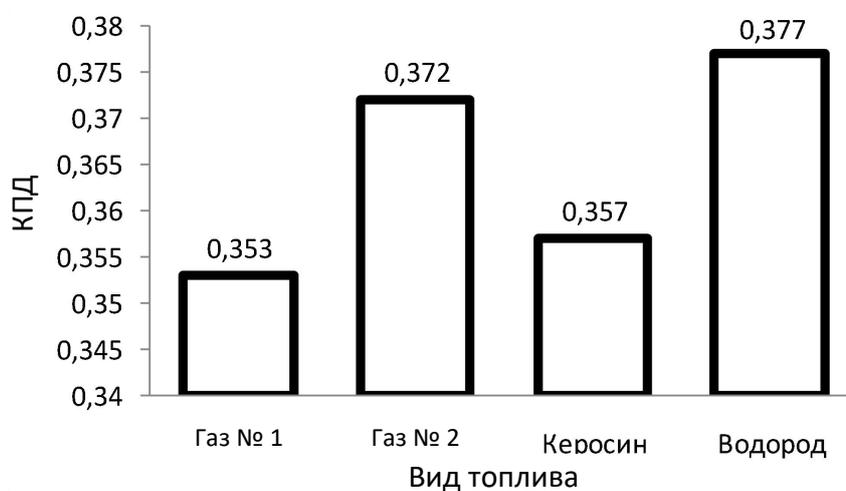


Рис. 3. Различные системы сжигания водорода: диффузионное пламя (а);  
дополнительная горелка (б); горелка микромикс (в) [6]

В работе [7] сравнили возможности применения водорода и других видов топлива в качестве основного для снижения выбросов и улучшения характеристик работы газотурбинной установки. В ходе изучения получены основные характеристики газотурбинной установки при работе на разном топливе (рис. 4). Авторы исследования утверждают, что применение водорода в качестве топлива для газовых турбин позволяет не только сократить расход на подготовку топлива, но и минимизировать выбросы и улучшить характеристики работы установки.



а

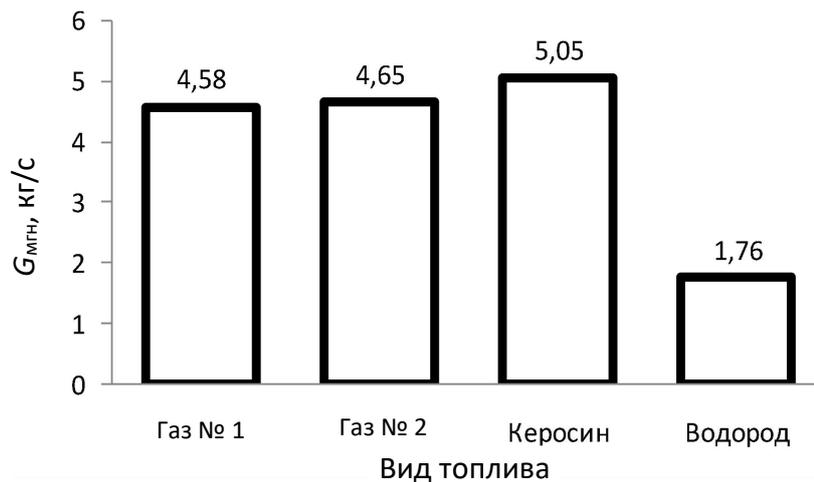


б



в

Рис. 4. Основные характеристики двигателя при работе на разных видах топлива: суммарный расход воздуха на входе в двигатель (а); КПД двигателя в зависимости от вида топлива (б); суммарный часовой расход топлива (в); мгновенный расход топлива (г) [7]



Г

Рис. 4. Продолжение [7]

Таким образом, углеводородное топливо для электростанций является мощным загрязнителем окружающей среды оксидами углерода и серы. При использовании в качестве топлива водорода отсутствуют выбросы окиси углерода и серы и значительно улучшается экологическая ситуация в городах и странах.

### Библиографический список

1. Marin G.E., Mendeleev D.I., Osipov B.M. A study on the operation of a gas turbine unit using hydrogen as fuel // Journal of Physics: Conference Series. 2021. № 1891 (1). P. 012055.

2. Алфаяд А.Г.Х. Возможность применения водорода как топлива для будущей работы газовой турбины // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2022. № 4. С. 18–24. URL: <https://s.applied-research.ru/pdf/2022/4/13373.pdf> (дата обращения: 23.11.2022).

3. High-Volume Hydrogen Gas Turbines Take Shape. URL: <https://www.powermag.com/high-volume-hydrogen-gas-turbines-take-shape/> (дата обращения: 23.11.2022).

4. В России будет разработана первая газотурбинная установка на метано-водородном топливе. URL: <https://www.metalinfo.ru/ru/news/121957> (дата обращения: 23.11.2022).

5. Siemens Energy Offerings Company. URL: <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-generation/power-plants/hydrogen-power-plants.html> (дата обращения 23.11.2022)

6. Enhancement of fuel flexibility of industrial gas turbines by development of innovative hydrogen combustion systems / T.M. Nurettin, M. Ashikaga, H. Atsushi, F. Harald // Gas for energy. 2018. Vol. 1. P. 1–5.

7. Марьин Г.Е., Осипов Б.М., Ахметшин А.Р. Исследование применения водорода в качестве топлива для улучшения энергетических и экологических показателей работы газотурбинных установок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. № 2 (23). С. 84–92.

## THE USE OF HYDROGEN AS FUEL FOR A GAS TURBINE

*A.A. Boychenko*

**Abstract.** *The article discusses the advantages of hydrogen as a fuel in comparison with traditional hydrocarbons, shows existing projects for the use of gas turbine installations with partial or one hundred percent hydrogen content as fuel, and also provides the main characteristics of a gas turbine installation when operating on different types of fuel.*

**Keywords:** *hydrogen energy, gas turbine installation, gas turbine, decarbonization.*

Об авторе:

БОЙЧЕНКО Андрей Алексеевич – магистрант 2-го курса кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственной технической университет. E-mail: bojchenko99@mail.ru

About the author:

BOYCHENKO Andrey Alekseevich – 2<sup>nd</sup> Year Master's Student of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: bojchenko99@mail.ru

УДК 621.311.22

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

*Н.С. Рыжов, А.И. Карнавский, Л.С. Араратьян*

© Рыжов Н.С., Карнавский А.И.,  
Араратьян Л.С., 2023

**Аннотация.** *Статья посвящена анализу перспективных направлений развития работы тепловых электростанций (ТЭС) в настоящее время и в ближайшем будущем. Описаны недостатки в работе ТЭС, а также способы их решения. Приведены данные по выработке электроэнергии странами-лидерами и различные нюансы, связанные с эксплуатацией ТЭС в зависимости от их местоположения.*

**Ключевые слова:** экологичность, тепловые электростанции, ТЭС, электроэнергия, отходы, паровые турбины.

Развитие электроэнергетики в России берет свое начало с 1896 г. Первым глобальным проектом в истории является постройка первой электростанции ГЭС-1 (рис. 1) с установленной мощностью 76 МВт, эксплуатируемой до сих пор [1].



Рис. 1. ГЭС-1

В настоящее время в эксплуатацию введены четырнадцать крупнейших действующих тепловых электростанций (ТЭС) в различных субъектах России: Сургутская ГРЭС-1, Сургутская ГРЭС-2, Рефтинская ГРЭС, Костромская ГРЭС, Пермская ГРЭС, Рязанская ГРЭС, Киришская ГРЭС, Конаковская ГРЭС, Ириклинская ГРЭС, Конаковская ГРЭС, Ставропольская ГРЭС, Березовская ГРЭС, Новочеркасская ГРЭС, Заинская ГРЭС и Нижневартовская ГРЭС.

На февраль 2022 г. ТЭС являются непосредственным лидером по выработке электроэнергии (всего произведено 58 410,3 млн кВт · ч, или 56,1 % от всей электроэнергии страны). Помимо выработки электроэнергии, одна из разновидностей ТЭС – теплоэлектроцентраль (ТЭЦ) – обеспечивает потребителей теплом для обогрева помещений и горячей водой, что служит существенным преимуществом перед другими видами электростанций, учитывая то, что в России 80 % теплоснабжения является централизованным. В крупных и малых городах, в зависимости от региона, имеются свои особенности местности и климатические условия, исходя из которых возникает необходимость размещения наиболее подходящей электростанции для удовлетворения потребностей жителей [3].

Наиболее весомые факторы для электроснабжения – бесперебойность поставок и эффективность производства электроэнергии. Принцип выработки электроэнергии ТЭС построен на преобразовании тепловой энергии (сгорания топлива) в электрическую. В работе ТЭС используются такие ресурсы, как уголь, природный газ (пропан, метан), реже водород,

биогаз, сланцевый газ, нефть, торф и дизельное топливо. Наличие в России большого количества данных топливно-энергетических ресурсов позволяет обеспечить наибольшую эффективность в выработке электроэнергии, а небольшая себестоимость топлива и возможность его транспортировки железнодорожным или автомобильным транспортом почти в любой регион положительно сказываются на бесперебойности работы на резервном топливе.

Постройка ТЭС может осуществляться в любой местности, чему способствует небольшая занимаемая площадь. Местоположение станции никак не влияет на выработку электроэнергии (в отличие от ветряных электростанций и гидроэлектростанций, работа которых обусловлена погодными факторами).

В настоящее время странами – лидерами по выработке электроэнергии за год, по данным British Petroleum, являются Китай, США, Индия, Россия и Япония (рис. 2) [4].

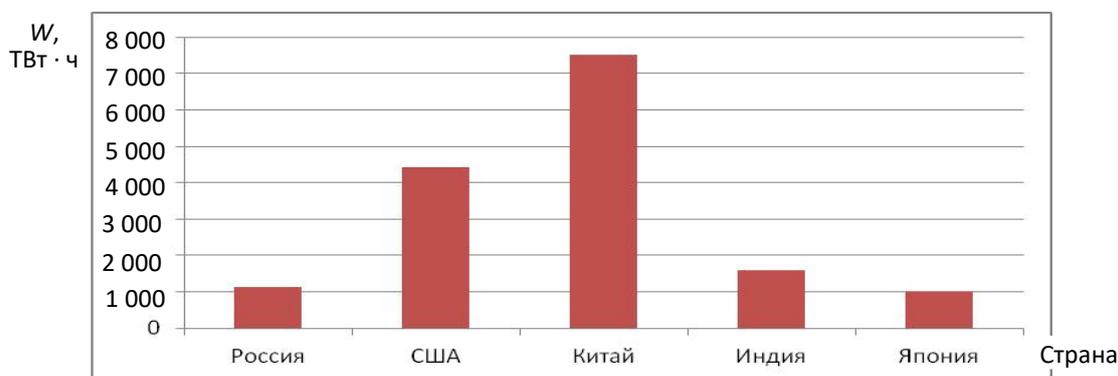


Рис. 2. График годовой выработки электроэнергии  $W$

Как и в России, в странах-лидерах основной источник выработки электроэнергии – это ТЭС (рис. 3).

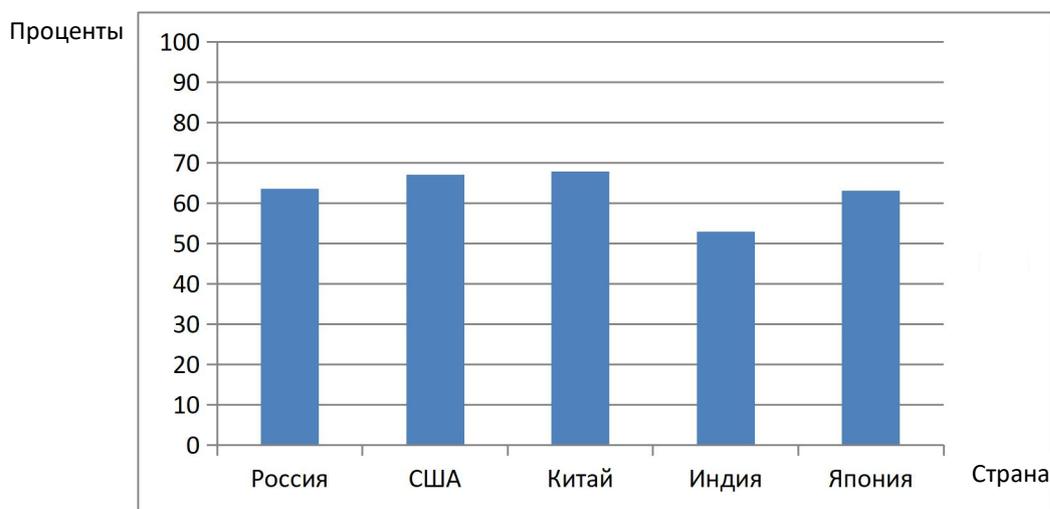


Рис. 3. График выработки электроэнергии ТЭС

Однако не каждая страна использует все возможности, которые может дать ТЭС. В США во всех многоквартирных домах присутствует котельная, иногда каждая квартира отапливается отдельно (топят там преимущественно дизельным топливом). Холодная вода поступает в дома по централизованному принципу и нагревается на месте, поэтому отсутствует потеря тепла при транспортировке. При этом, учитывая, что каждый житель многоквартирного дома будет использовать горячую воду в одно время, могут возникнуть проблемы с качеством воды. Она может быть недостаточно теплой или даже холодной, в силу того что, поступая на верхние этажи, успеваешь остыть, а часть горячей воды уходит на нужды жителей с нижних этажей. Это является острой проблемой жителей верхних этажей, но, поскольку в квартирах в основном преобладает индивидуальное воздушное отопление, данная проблема возникает не всегда. Теплоэлектроцентраль все же используется, но в исключительных случаях, а именно в тех штатах, где температура может опускаться до  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  и ниже.

В Китае центральное отопление присутствует только на севере страны, где температура доходит до  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , в других частях отопление батарей до недавнего времени производилось дровами. В результате зимой в атмосферу выбрасывалось большое количество углекислого газа, что негативно сказывалось на экологии страны, поэтому власти страны запретили такой способ обогрева.

В Индии, учитывая большую выработку электроэнергии ТЭС, отсутствует ТЭЦ, которая не только производит электроэнергию, но и является источником тепловой энергии в централизованных системах теплоснабжения для обогрева жилищных помещений и промышленных предприятий. Основным способом обогрева – электрические обогреватели.

В Японии в силу того, что она является островным государством и имеет ограниченные ресурсы, пригодные для использования в качестве топлива, нет центрального отопления из-за его дорогого содержания. Из-за особенности проектировки домов, которые строят из расчета сейсмической устойчивости, возникает проблема подведения коммуникаций и трасс теплоснабжения.

Поскольку ТЭС служат основой выработки электроэнергии, на них необходимо обращать особое внимание как в плане эксплуатации, так и в плане обслуживания. Для начала рассмотрим, что собой представляет ТЭС (рис. 4). Принцип работы станции заключается в том, что вода в парогенераторе нагревается до температуры кипения и испаряется, образуется насыщенный пар, который поступает по паропроводу в паровую турбину. Турбина приводит вал генератора во вращение, за счет этого механическая энергия преобразуется в электрическую энергию [2].

Основными проблемами ТЭС являются их низкая экологичность, низкая эффективность преобразования тепловой энергии в электрическую при сжигании топлива и неспособность быстро изменять выдаваемую мощность в сеть.

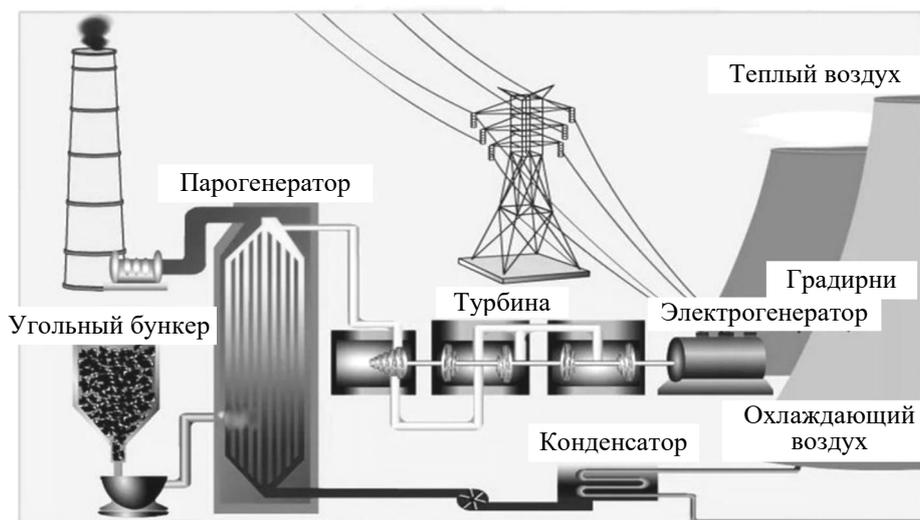


Рис. 4. Схема работы ТЭС

Уже на начальном этапе добычи энергоресурсов мы сталкиваемся с выбросами вредных веществ в атмосферу, например на угледобывающих рудниках; пыль, оксид азота и углекислый газ выделяются при взрывных работах. В конечном счете при сжигании топлива непосредственно на станции в атмосферу попадает огромное количество вредных веществ, вступающих в реакцию, разрушающих озоновый слой и тем самым наносящих непоправимый ущерб экосистеме.

Все процессы для поддержания работы ТЭС требуют большого количества воды, ее основные задачи – это охлаждение конденсаторов паровых турбин и восполнение потерь носителя тепловой энергии. Помимо этого, небольшая часть воды расходуется на промывку золоотвалов и прочего оборудования. Вода для промывки содержит в себе химические элементы, которые попадают в сточные воды и нарушают экосистему водоемов. Сбрасывание теплой воды в другой водоем вызывает тепловое загрязнение. Опасность этого загрязнения заключается в том, что увеличение температуры водоема влечет за собой ускорение химических реакций, увеличение расхода кислорода местной фауной, сокращение популяции водорослей, плохое размножение рыб.

Большой проблемой также являются отходы, производимые при эксплуатации, такие как зола и шлак. Как правило, данные отходы не утилизируют, а хранят на специальных полигонах, что делает почву на месте полигона неплодородной. Кроме того, со временем ветер подхватывает токсичные испарения от отходов и разносит их по округе, что образует мертвую зону вокруг полигона. Со временем почва накапливает вредные вещества, а талые воды и дожди уносят эти вещества в ближайшие водоемы [6].

Решение экологических проблем предполагает экологизацию всего технологического процесса и значимых звеньев организации, в том числе

проведение экологического производственного контроля, экологическое нормирование, формирование топливного баланса, эффективные технологии сжигания топлива, оценку характеристик ТЭС и их регулирование.

Проблема низкой эффективности преобразования тепловой энергии в электрическую обоснована тем, что ТЭС работают на различном топливе, которое в силу своих свойств напрямую влияет на КПД станций. Больше всего выбросов приходится на ТЭС, работающие на угле. Их КПД варьируется в пределах 35–40 % в перспективе, а повышение КПД на 10–15 % позволит понизить стоимость выработки электроэнергии и сократить количество вредных выбросов в атмосферу. Для достижения этой цели необходимы современные энергоустановки, а именно энергоблоки, рассчитанные на суперсверхкритические параметры пара, гибридные энергоустановки с совмещенными газовыми и паровыми циклами и высокооборотные газовые турбины [5].

### Библиографический список

1. ГЭС-1. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/ГЭС-1> (дата обращения: 12.12.2022).
2. Принцип работы и типы ТЭЦ, устройство ТЭС. URL: <https://altenergiya.ru/poleznye-statii/princip-raboty-i-tipy-tec-ustrojstvo-tes.html> (дата обращения: 12.12.2022).
3. Единая энергетическая система России: промежуточные итоги. URL: [https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/ups-review/2022/ups\\_review\\_0222](https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/ups-review/2022/ups_review_0222) (дата обращения: 12.12.2022).
4. Список стран по выработке электроэнергии. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Список\\_стран\\_по\\_производству\\_электроэнергии](https://ru.wikipedia.org/wiki/Список_стран_по_производству_электроэнергии) и (дата обращения: 12.12.2022).
5. Эффективные технологии для тепловой энергетики. URL: <https://issek.hse.ru/trendletter/news/141133080.html> (дата обращения: 12.12.2022).
6. Экологические проблемы и последствия использования тепловых электростанций энергетики. URL: <https://greenologia.ru/eko-problemy/teplovye-elektrostantsii.html> (дата обращения: 12.12.2022).

### POTENTIAL OF HEATING POWER STATION DEVELOPMENT

*N.S. Ryzhov, A.I. Karnavsky, L.S. Araratyan*

**Abstract.** *The article is devoted to the analysis of promising areas of development in the operation of thermal power plants (TPP), currently and in the near future. Disadvantages in the operation of TPP are described, as well as ways to solve them. The data on the generation of electricity by the leading*

*countries and various nuances related to the operation of TPP, depending on their location, are presented.*

**Keywords:** *environmental friendliness, thermal power plants, TPP, electricity, waste, steam turbines.*

Об авторах:

РЫЖОВ Николай Сергеевич – студент 4-го курса кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственной технической университет. E-mail: n.s.ryzhov@mail.ru

АРАРАТЯН Любовь Сергеевна – доцент кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственной технической университет. E-mail: liuba.araratyan@yandex.ru

КАРНАВСКИЙ Артем Игоревич – студент 3-го курса кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственной технической университет. E-mail: artemkarnavskiyy@gmail.com

About the authors:

RYZHOV Nikolai Sergeevich – 4<sup>th</sup> Year Student of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: n.s.ryzhov@mail.ru

ARARATYAN Lyubov Sergeevna – Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: liuba.araratyan@yandex.ru

KARNAVSKIY Artem Igorevich – 3<sup>rd</sup> Year Student of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: artemkarnavskiyy@gmail.com

УДК 621.311

## **УМЕНЬШЕНИЕ ПОТЕРЬ ВЕТРОКОЛЕСА ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ**

*А.А. Зуйков, А.Ю. Русин*

© Зуйков А.А., Русин А.Ю., 2023

*Аннотация. В статье приведен расчет лопастей ветроколеса с применением характеристик действующей Адыгейской ветряной электростанции. Основной идеей работы является уменьшение потерь мощности при прохождении ветра через лопасти ветроэнергетической установки.*

**Ключевые слова:** ветряная электростанция, ветроэнергетическая установка, лопасть, длина, быстроходность, ветроколесо, высота установки, мощность, генератор.

### **Введение**

Мощность ветроэнергетической установки (ВЭУ) напрямую зависит от множества факторов:

высоты установки,  
диаметра ротора,  
длины, ширины и количества лопастей,  
быстроходности,  
количества оборотов.

Помимо этого, для стабильной выработки мощности следует учитывать два фактора, связанные друг с другом: потери и быстроходность ВЭУ. Следовательно, главной задачей данной статьи является нахождение баланса между этими двумя составляющими.

### **Начало расчетов**

Поскольку в ветряных электростанциях (ВЭС) ветроколесо горизонтально-осевого типа, мы будем производить расчеты именно для него.

Начинать следует с выбора генератора и лопастей. Данный фактор выступает ключевым, так как лопасти должны иметь возможность раскрутить связанный с генератором винт, чтобы он раскрутил сам генератор.

Для более наглядного сравнения приведем основные характеристики ВЭУ [1]:

Высота башни, м	Диаметр ротора, м	Масса гондолы (без ротора), т	Масса генератора, т	Масса без башни, т	Мощность генератора, МВт
100	100	17	55	120	2,5

Поскольку все расчеты делаются на основе действующей ВЭС, исходя из указанных выше данных, мощность генератора составит 2,5 МВт.

### **Расчет лопастей**

Чтобы перейти к расчету лопастей, следует выбрать среднегодовую скорость ветра. Для этого воспользуемся картой ветряных потоков (рис. 1) [5].



Рис. 1. Карта ветров России

Адыгейская ВЭС находится в Шовгеновский районе, средняя скорость ветра для данной местности составляет 4,5–20 м/с [3, 4].

После того как исходные данные были заданы, следующий этап – выбор параметров лопастей. Стоит обратить внимание на то, что объем выдаваемой мощности зависит от количества лопастей, а также от их длины и показателя быстроходности. Все это характеризуется числом оборотов ветроколеса.

На Адыгейской ВЭС ветроколесо имеет три лопасти. Обычно такое количество является основным, так как такой подход можно назвать золотой серединой в балансе между количеством оборотов и выдаваемой мощностью.

Выбор количества лопастей можно произвести по формуле [2, 3]

$$n = \frac{80}{Z^2}; \quad (1)$$

$$n = \frac{80}{5^2} = 3,2 \text{ шт.},$$

где  $Z$  – быстроходность ВЭУ (для трех лопастей  $Z = 5$ ).

Далее расчеты для нахождения величины хорды (расстояния между носом и концом лопасти (рис. 2)) и установочного угла будут предварительными.

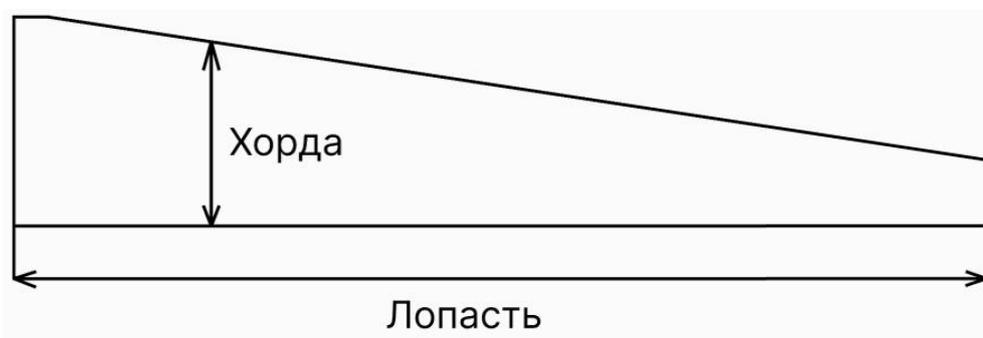


Рис. 2. Графическое изображение лопасти

Число оборотов ротора определяется следующим образом [2, 3]:

$$\omega = \frac{60 Z v}{\pi D}; \quad (2)$$

$$\omega = \frac{60 \cdot 5 \cdot 10}{3,14 \cdot 100} = 9,5 \text{ об/мин},$$

где  $v$  – скорость ветра, м/с.

Найти длину основы хорды можно по формуле [3]

$$b = \frac{16 \pi R \left(\frac{R}{r \cdot 0,75}\right)}{9 Z^2 n}; \quad (3)$$

$$b = \frac{16 \cdot 3,14 \cdot 50 \left(\frac{50}{50 \cdot 0,75}\right)}{9 \cdot 5^2 \cdot 3} = 4,96 \text{ м},$$

где  $R$  – радиус ротора, м;  $r$  – расстояние от оси вращения до точки на лопасти, м (узкое кольцо).

Длина хорды на конце линии вычисляется по выражению [3]:

$$b_k = \frac{16 \pi R \left(\frac{R}{r}\right)}{9 Z^2 n}; \quad (4)$$

$$b_k = \frac{16 \cdot 3,14 \cdot 50 \left(\frac{50}{50}\right)}{9 \cdot 5^2 \cdot 3} = 3,72 \text{ м}.$$

Число Рейнольдса для тела, двигающегося в ламинарном потоке, определяется следующим образом [3]

$$R_e = 68 \cdot 500 \cdot V \cdot Z \cdot b; \quad (5)$$

$$R_e = 68 \cdot 500 \cdot 0,75 \cdot 10 \cdot 5 \cdot 4,96 = 12 \cdot 741 \cdot 000;$$

$$R_e = 68 \cdot 500 \cdot V \cdot Z \cdot b_k; \quad (6)$$

$$R_e = 68 \cdot 500 \cdot 10 \cdot 5 \cdot 3,72 = 12 \cdot 741 \cdot 000,$$

где  $V$  – максимальная скорость ветра, м/с.

Поскольку полученное значение больше минимального требования ( $R_e \geq 200 \cdot 000$ ), значит, оно удовлетворяет требованиям.

Затем находится длина лопасти [3]:

$$L = R = \frac{D}{2}; \quad (7)$$

$$L = \frac{100}{2} = 50 \text{ м}.$$

Установочный угол лопасти в начале и конце определяется по формуле [3]

$$\beta_n = \arctg \frac{2 R}{3 r Z} - \alpha; \quad (8)$$

$$\beta_n = \arctg \frac{2}{3} \frac{50}{50} - 5 = \arctg(0,13) - 5 = -4,87,$$

где  $\alpha$  – угол действия лопасти (равен  $5^\circ$ ).

Полученные расчетные данные (предварительные) для ВЭУ приведены ниже:

Быстроходность $Z$ , модули	Кол-во лопастей $n$ , шт.	Частота вращения $\omega$ , об/мин	Длина хорды в начале $b_n$ , м	Длина хорды в конце $b_k$ , м	Длина лопасти $L$ , м	Установочный угол в начале $\beta_n$ , град.	Установочный угол в конце $\beta_k$ , град.
5	3	19,1	4,96	3,72	50	4,87	4,82

На основе полученных характеристик проводим расчеты, которые помогут снизить потери и увеличить выдаваемую мощность.

Поскольку применяется тот же электрогенератор и высота и диаметр ротора остаются неизменными, нужно найти ометаемую площадь ветроколеса. Для этого определим активную мощность, которая будет подаваться на ветроколесо. На основе ранее представленных данных находим активную мощность [3]:

$$P_{\text{аэр}} = \frac{P_{\text{эКВ}}}{k_{\text{КИЭВ}}} = \frac{2\,500}{0,593} = 41\,215 \text{ кВт},$$

где  $k_{\text{КИЭВ}}$  – коэффициент использования энергии ветра.

Из выражения для определения мощности выразим формулу для нахождения ометаемой ротором площади:

$$P_{\text{аэр}} = \frac{\rho S v^3}{2};$$

$$S = \frac{P_{\text{аэр}}}{\rho v^3} = \frac{41\,215}{1,20 \cdot 10^3} = 8\,586 \text{ м}^2,$$

где  $\rho$  – плотность воздуха;  $S$  – ометаемая площадь ротора,  $\text{м}^2$ .

Поскольку диаметр ротора важен для быстроходности, произведем перерасчет заданных параметров, так как они могут повлиять на выдаваемую мощность [2, 3]:

$$D = \sqrt{4 \frac{S}{\pi}} = \sqrt{4 \frac{8\,586}{3,14}} = 104,6 \text{ м}.$$

Из расчета видно, что полученные значения практически не отличаются от заданных, поэтому принимаем тот факт, что генератор был подобран верно.

Далее определяем число быстроходности, а также количество лопастей ветроколеса по формуле (1) [2, 3]:

$$n = \frac{80}{5^2} = 3,2 \text{ шт.}$$

Количество лопастей и число быстроходности принимается тем же, поскольку увеличение или уменьшение данных параметров значительно скажется на выдаваемой мощности ветроколеса. При данном подходе наиболее эффективно будет изменить ширину лопастей, а также рассчитать их угол наклона.

Далее определим число оборотов ротора (см. формулу (2)) [2, 3]:

$$\omega = \frac{60 \cdot 5 \cdot 10}{3,14 \cdot 104,6} = 18,3 \text{ об/мин.}$$

Найдем длину основы хорды (см. формулу (3)) [2, 3]:

$$b = \frac{16 \cdot 3,14 \cdot 52,3 \cdot \frac{52,3}{52,3 \cdot 0,60}}{9 \cdot 5^2 \cdot 3} = 6,5 \text{ м.}$$

Длину хорды на конце линии вычислим по формуле (4) [2, 3]:

$$b_k = \frac{16 \cdot 3,14 \cdot 52,3 \cdot \frac{52,3}{52,3}}{9 \cdot 5^2 \cdot 3} = 3,9 \text{ м.}$$

Число Рейнольдса для тела, двигающегося в ламинарном потоке (см. формулы (5), (6)) [2, 3]:

$$R_e = 68 \cdot 500 \cdot 0,75 \cdot 10 \cdot 5 \cdot 5,2 = 13 \cdot 357 \cdot 500;$$

$$R_e = 68 \cdot 500 \cdot 10 \cdot 5 \cdot 3,9 = 13 \cdot 357 \cdot 500.$$

Поскольку полученное значение больше минимального требования ( $R_e \geq 200 \cdot 000$ ), значит, оно удовлетворяет требованиям. Это позволяет произвести более уточненные расчеты длины хорды (см. формулу (7)) [2, 3]:

$$L = \frac{104,6}{2} = 52,3 \text{ м.}$$

Далее определяется установочный угол лопасти (см. формулу (8)) [2, 3]:

$$\beta_n = \arctg \frac{2 \cdot 52,3}{3 \cdot 52,3 \cdot 5} - 5 = \arctg(0,13) - 5 = 2,59;$$

$$\beta_k = \arctg \frac{2 \cdot 52,3}{3 \cdot 0,75 \cdot 52,3 \cdot 5} - 5 = \arctg(0,18) - 5 = 5,08.$$

Полученные расчетные данные для ВЭУ с учетом уточненного диаметра ротора ветряной турбины приведены ниже:

Быстроходность $Z$ , модули	Количество лопастей $n$ , шт.	Частота вращения $\omega$ , об/мин	Длина хорды в начале $b_n$ , м	Длина хорды в конце $b_k$ , м	Длина лопасти $L$ , м	Установочный угол в начале $\beta_n$ , град.	Установочный угол в конце $\beta_k$ , град.
5	3	18,3	6,5	3,9	52,3	4,87	4,78

### Заключение

Сравнивая табличные данные, можно увидеть, что частота вращения снизилась практически на один оборот, но данный фактор не является существенным, поскольку за счет этого была увеличена длина лопастей, что позволяет снизить потери проходящего потока ветра на конце лопасти. При этом все проведено без потерь в быстроходности и с возможностью сохранения оптимального количества лопастей, что соответствует поставленной задаче.

### Библиографический список

1. Ветер энергоперемен. URL: [https://atomicexpert.com/novawind\\_rosatom](https://atomicexpert.com/novawind_rosatom) (дата обращения: 20.07.2022).
2. Пигот Х. Расчет лопастей для ветряков. URL: [https://rosinmn.ru/VETRO\\_bladeDesign.htm](https://rosinmn.ru/VETRO_bladeDesign.htm) (дата обращения: 20.07.2022).
3. Погода в Шовгеновском районе. URL: <https://ru.meteocast.net/forecast/ru/shovgenovskiy/> (дата обращения: 20.07.2022).
4. Скорость ветра по республике Адыгея. URL: <https://energywind.ru/recomendacii/karta-rossii/yug/respublika-adyigea> (дата обращения: 20.07.2022).
5. СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\*. URL: <https://sargorstroy.ru/raznoe-2/vetrovaya-nagruzka-sp-sp-20-13330-2011-nagruzki-i-vozddejstviya-aktualizirovannaya-red-akczija-snip-2-01-07-85.html> (дата обращения: 20.07.2022).

## REDUCING WINDWHEEL LOSS OF A WIND POWER PLANT

*A.A. Zujkov, A.Yu. Rusin*

**Abstract.** *This article will provide a calculation of the blades of a wind wheel using the characteristics of the existing Adygea wind farm. The main idea of this article is to reduce power losses when the wind passes through the blades of a wind turbine.*

**Keywords:** *wind power station, wind turbine, blade, length, speed, wind wheel, installation height, power, generator.*

Об авторах:

ЗУЙКОВ Александр Алексеевич – магистрант кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: zuikovalexander@mail.ru

РУСИН Александр Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: alexrusin@inbox.ru

About the authors:

ZUJKOV Aleksandr Alekseevich – Master’s Student of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: zuikovalexander@mail.ru

RUSIN Aleksandr Yur’evich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: alexrusin@inbox.ru

УДК 621.311

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ РОССИИ

*А.М. Панкулинец, Л.С. Араратьян, А.В. Крупнов*

© Панкулинец А.М., Араратьян Л.С.,  
Крупнов А.В., 2023

**Аннотация.** *Статья посвящена развитию гидроэнергетики в России, ее анализу и определению преимуществ и недостатков. Помимо этого, обозначены перспективы развития гидроэнергетики, основные планы и направления.*

*Ключевые слова:* гидроэнергетика, ресурсы, ГЭС, гидроэлектростанции, запасы, мощность.

Гидроэнергетика представляет собой один из компонентов гидросферы, которые определяют эффективное антропогенное и техногенное применение водных ресурсов в границах одного водохозяйственного комплекса материка. Россия обладает существенным потенциалом использования вод, что делает гидроэнергетику перспективным направлением. В нашей стране находится около 9 % мировых гидроэнергетических запасов. Россия расположена на втором месте после Китая по обеспеченности гидроэнергетическими ресурсами, то есть США, Канада и Бразилия находятся позади нее. Более 20 % мирового запаса вод расположено на территории России и размещены в реках, озерах, болотах и ледниках. При этом освоено только около 20 % общего количества водных ресурсов РФ.

На сегодняшний день в России работают 196 гидроэлектростанций (ГЭС), при этом 15 ГЭС имеют мощность 1 000 МВт, свыше 103 ГЭС – мощность 10 МВт и более, две гидроаккумулирующие электростанции (Загорская гидроаккумулирующая электростанция (ГАЭС) и ГАЭС каскада Кубанских ГЭС) и Зеленчукская ГЭС-ГАЭС. Наиболее мощные ГЭС [8]:

Саяно-Шушенская	6,4 ГВт
Красноярская	6 ГВт
Братская	4,5 ГВт
Усть-Илимская	3,84 ГВт
Богучанская	3 ГВт

В России реки преимущественно относятся к равнинным или полугорным типам, что значительно уменьшает возможности для возведения на высоких перепадах высот ГЭС с маленькими водохранилищами и большой выработкой электроэнергии [1, с. 194].

Сегодня мировая экономика и энергетика быстро изменяются, в том числе под давлением политических факторов, отчего документы стратегического планирования, даже созданные недавно, устаревают, поэтому Комитет Государственной Думы по энергетике в ближайшее время планирует предложить дополнения к документу «Энергетическая стратегия России до 2050 года» (Энергетической стратегии). Для электроэнергетики в перечень важнейших задач входят обеспечение надежности энергоснабжения, упрощение доступа к инфраструктуре электроэнергетики и поддержка низкоуглеродной генерации. Особо актуальным становится развитие гидроэнергетики, так как это не только низкоуглеродный, но также устойчивый и технологически самостоятельный вид генерации. Отметим также, что все необходимое генерирующее оборудование производится в

России. Отрасль гидроэнергетики обеспечивает хорошие условия для роста экономики страны, развития и освоения территорий, создает комплексные эффекты в экономике, экологии и социальной сфере. В обновленной Энергетической стратегии необходимо установить целевую долю низкоуглеродных источников и гидроэнергетики в целом, задачи по развитию инфраструктуры и меры поддержки государством реализации проектов сооружения объектов гидроэнергетики и обеспечения рентабельности инвестиций. Особое внимание также следует уделить развитию малой гидроэнергетики, в том числе с точки зрения спроса.

В перспективе вероятны два способа применения ГЭС:

1) создание ГЭС малой мощности (0,1–10 МВт), которые используют природное речное течение;

2) использование энергии морских приливов и волн.

Малая гидроэнергетика считается экологически чистым направлением. Россия имеет нужную профильную инфраструктуру, научно-исследовательские центры, связи с производителями оборудования для станций и строительными компаниями. При возведении малых ГЭС не требуется больших водохранилищ, поэтому нет необходимости переселять людей, чтобы использовать земли. Общая мощность малых ГЭС на сегодняшний день превышает 1,3 ГВт.

Малая гидроэнергетика в России имеет большой потенциал, но пока данный сектор недостаточно оценен инвесторами. Помимо этого, на пути широкого строительства малых ГЭС существует ряд других препятствий:

отсутствие соответствующих законов, а также четко обозначенных государственных целей и приоритетов развития возобновляемых источников энергии (ВИЭ);

слабый уровень инвестиций и недостаточная государственная поддержка программ развития ВИЭ;

отсутствие финансовых стимулов для капиталовложений (налоговых льгот, дотационного финансирования), неудовлетворительный механизм стимулирования развития и возврата вложенных средств;

отсутствие необходимых научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок, а также производственных кадров.

Необходимо понять, что в нашей стране есть все необходимые ресурсы и возможности для широкого использования ВИЭ. Для этого в первую очередь необходимо реализовать следующие мероприятия:

1) разработать государственную программу развития ВИЭ (национальный проект) с предоставлением необходимых средств ее реализации;

2) довести имеющиеся образцы изделий и технологий до производства при государственной поддержке;

3) продумать план поэтапного финансирования проектов по разработке современных технологий в направлении возобновляемой эколого-

гически чистой энергетики и энергосбережения, привлечь крупные энергетические и металлургические холдинги;

4) внести изменения в правовую базу, регулирующую энергетический комплекс России, для соответствующего стимулирования развития ВИЭ и энергосбережения;

5) разработать меры поощрения для потребителей, использующих возобновляемую энергию, в виде дотаций и налоговых льгот;

6) увеличить количество бюджетных мест для молодых кадров в образовательных учреждениях по соответствующим специальностям;

7) перевести сферы производства и ЖКХ на использование имеющихся энергосберегающих технологий и ВИЭ.

Как уже говорилось, в России реки преимущественно относятся к равнинным или полугорным типам, следовательно, строительство малых и микроГЭС будет обходиться в разы дешевле и быстрее по срокам за счет того, что из процесса убраны затраты на изучение и освоение территорий в местах строительства. Кроме того, меньший объем занимаемых территорий значительно уменьшает вред для экологии. Стоит также учесть то, что для реализации ГЭС необходима закупка импортных дорогих агрегатов, в то время как все необходимое для малых и микроГЭС производится в России и обходится в разы дешевле. За время строительства крупной ГЭС (10–12 лет) можно построить и ввести в эксплуатацию от 6 до 12 малых ГЭС (время строительства малых и микроГЭС составляет примерно от нескольких месяцев до пары лет, в зависимости от гидроэкологических условий и мощности). Сроки окупаемости микроГЭС от 2 до 12 лет, что, несомненно, выгодно для инвесторов (по сравнению с крупными ГЭС; 15–20 лет).

В заключение можно сказать, что малые ГЭС определенно имеют огромные перспективы для развития при техническом потенциале малых рек в 357 млрд кВт · ч/год. Такие неоспоримые преимущества микроГЭС, как низкая себестоимость электроэнергии, минимальное влияние на окружающую среду, небольшие эксплуатационные затраты, короткие сроки ввода в эксплуатацию, делают их еще привлекательнее для развития. Однако наличие препятствующих факторов (отсутствие нормативных баз и законов, слабые инвестиции, недостаточное количество профессиональных кадров и отсутствие финансового стимулирования) очень сильно тормозит процесс развития.

### **Библиографический список**

1. Мировая энергетика и переход к устойчивому развитию / Л.С. Бекаев [и др.]. Новосибирск: Наука, 2000. 300 с.

2. Ерахтин Б.М., Ерахтин В.М. Строительство гидроэлектростанций в России. М.: Ассоциация строительных вузов, 2007. 732 с.

3. Кирпичникова И.М., Малюгина А.А. Оценка энергетической эффективности возобновляемой энергетики // Наука ЮУрГУ: материалы 67-й Научной конференции / отв. за вып. С.Д. Ваулин. Челябинск: ЮУрГУ, 2015. С. 1137–1142.

4. Гидроэнергетика: учебник для студентов вузов / В.И. Обрезков [и др.]; под ред. В.И. Обрезкова. М.: Энергоиздат, 2019. 608 с.

5. Рассел Дж. Гидроэнергетика. М.: VSD, 2020. 998 с.

6. Трещалов Г. Альтернативная гидроэнергетика. М.: Lambert Academic Publishing, 2020. 161 с.

7. Возобновляемые источники энергии. URL: <http://www.rushydro.ru/activity/vic/> (дата обращения: 20.11.2022).

## PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF HYDROPOWER IN RUSSIA

*A.M. Pankulinets, L.S. Araratyan, A.V. Krupnov*

**Abstract.** *The article is devoted to the development of hydropower in Russia, its analysis with the identification of advantages and disadvantages. The prospects for the development of hydropower, the main plans and directions are also outlined.*

**Keywords:** *hydropower, resources, hydroelectric power plants, hydroelectric power plants, reserves, capacity.*

Об авторах:

ПАНКУЛИНЕЦ Андрей Михайлович – студент 4-го курса кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: [pankulinets@mail.ru](mailto:pankulinets@mail.ru)

АРАРАТЪЯН Любовь Сергеевна – доцент кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: [liuba.araratyan@yandex.ru](mailto:liuba.araratyan@yandex.ru)

КРУПНОВ Андрей Владимирович – старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: [A.V.Krupnov@yandex.ru](mailto:A.V.Krupnov@yandex.ru)

About the authors:

PANKULINETS Andrey Mikhailovich – 4<sup>th</sup> Year Student of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: [pankulinets@mail.ru](mailto:pankulinets@mail.ru)

ARARATYAN Lyubov Sergeevna – Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: [liuba.araratyan@yandex.ru](mailto:liuba.araratyan@yandex.ru)

KRUPNOV Andrey Vladimirovich – Senior Lecturer of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University.  
E-mail: AV.Krupnov@yandex.ru

УДК 621.311.17:004

## ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАКРЫТИЯ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

*Ф.Ф. Шайхутдинова, Л.С. Араратьян, Ю.М. Павлова*

© Шайхутдинова Ф.Ф., Араратьян Л.С.,  
Павлова Ю.М., 2023

*Аннотация.* В статье исследованы вопросы применения чистой энергии и влияния атомной энергии на окружающую среду. Выполнен анализ главных способов вывода энергоблоков из эксплуатации и указаны факторы, сдерживающие развитие атомной энергетики. Рассмотрен главный вопрос об утилизации строительных и радиоактивных отходов при выводе энергоблоков из эксплуатации, изучены перспективы применения информационного моделирования при выводе из эксплуатации энергоблоков атомных электростанций.

**Ключевые слова:** чистая энергия, ликвидация, отходы, захоронение, информационное моделирование, атомная электростанция.

У незнающих людей термин «атомные электростанции» (АЭС) иногда вызывает страх, однако, разобравшись в данной терминологии и немного углубившись в тему, можно убедиться в том, что изначальное представление об АЭС было неверным.

На сегодняшний день хорошо развито использование чистой энергии. При этом стоит отметить, что абсолютно чистой энергии еще не придумали и огромное количество ресурсов необходимо для воспроизведения самых экологически чистых на сегодняшний день солнечных батарей.

Потребности человека безграничны, и на данный момент чистая энергия не в силах в полной мере удовлетворить их, поскольку человечество поздно задумалось о ее развитии. Чтобы не допустить превращения планеты в огромный парник и не довести до глобального энергетического голода, необходимо уже сейчас задуматься о будущем.

Борцы за экологическое состояние окружающей среды говорят о том, что нужно прекратить использовать атомную энергию. Однако человечество неспособно на данном этапе в полной мере исключить исполь-

зование мирного атома, так как заменяющего его источника энергии большой мощности, не приносящего вред окружающей среде, еще не существует.

Многие аналитики считают, что перспектив у чистой энергетики в ближайшее время нет. По данным МАГАТЭ, к 2030 г. мощность атомных станций возрастет не менее чем на 17 % и не более чем на 94 % [5].

Существуют факторы, сдерживающие развитие атомной энергетики:

1. Население, которое активно выступает за охрану окружающей среды. В данном случае людьми движет страх перед ядерной аварией и последствиями, к которым она может привести. К таким авариям относят аварии на АЭС Three Mile Island (Три-Майл-Айленд) в США и на Чернобыльской АЭС в СССР. В результате аварий в окружающую среду были выброшены газообразные радиоактивные продукты и аэрозоли.

2. Сравнительно малые запасы урана, которого хватит приблизительно на 85 лет. Однако при внедрении реакторов на быстрых нейтронах с применением замкнутого цикла АЭС будут снабжены ядерным топливом на срок до 6 000 лет [1].

3. Захоронение отработанного ядерного топлива экономически невыгодно, поскольку сам процесс является достаточно трудоемким и затратным. Этапы транспортировки и длительного хранения тоже финансово затратны.

4. Увеличивается, несмотря на улучшение способов переработки отходов, площадь места захоронения радиоактивных отходов.

5. Имеются сложности вывода из эксплуатации, демонтажа. Возрастает число вышедших из эксплуатации энергоблоков на различных АЭС [2].

Существует ряд решений, применяемых на АЭС:

1. Замена традиционного стержневого армирования железобетонных конструкций на внешнее, листовое (с использованием стального листа и в качестве несъемной опалубки). При этом появляется возможность применения автоматической сварки, а также производства огромных монтажных блоков [3].

2. Широкое использование блочного монтажа строительных конструкций (хорошо знакомый способ распределения некоторой части работы по всей территории предприятия) [4].

3. Комплектно-блочное изготовление и монтаж оборудования. Электрооборудование и трубопроводы с кабелями изначально проходят монтаж на жесткой раме, габариты которой примерно равны габаритам транспортного средства. Монтаж оборудования проводится в специально оборудованном помещении.

4. Использование совмещенного монтажа. На данном этапе монтаж оборудования производится в одно время со строительными работами. Такой способ помогает сэкономить до полугода. Штатный способ через

транспортный шлюз требует больше времени и даже тормозит другие виды работ.

Одним из радикальных способов защиты окружающей среды от воздействия радиоактивных отходов является закрытие АЭС.

Полная ликвидация строительных объектов не представляет трудности, однако с АЭС дело обстоит иначе, поскольку закрытие предприятия, которое способно в больших масштабах нанести непоправимый вред окружающей среде и здоровью человека, чревато губительными последствиями.

Первостепенной задачей является безопасность окружающей среды и человека. Наряду с этим важно исключить проблему захоронения радиоактивных отходов.

МАГАТЭ выделило три главных способа вывода энергоблоков из эксплуатации (рисунок), которые были приняты многими странами, использующими ядерную энергию [5].



Концептуальные подходы к выводу энергоблоков АЭС из эксплуатации

С технической точки зрения конверсия не относится к способу вывода энергоблока из эксплуатации, однако может рассматриваться как один из этапов.

Ликвидацию можно осуществить двумя способами:

- 1) немедленный демонтаж: проводится обезвреживание всей компоновки энергоблока атомных электростанций, в которых содержатся радиоактивные вещества;
- 2) отложенный демонтаж: энергоблок оставляют на длительное сохранение под надзором.

Захоронение энергоблока происходит путем помещения радиоактивных элементов в сооружение из бетона или в герметичную зону, и хранятся эти элементы до того момента, пока степень радиоактивности не снизится до безопасного значения [5].

При закрытии АЭС можно применить технологии информационного моделирования, а именно BIM-модель.

Вся документация по проектированию и конструированию АЭС изначально составлялась и хранилась на бумажных носителях. Чтобы изменить данную ситуацию, необходимо найти такой способ хранения документации (базу данных), которая позволит хранить ее на электронных носителях, что обеспечит надежное информационное сопровождение мер и способов защит по закрытию энергоблоков АЭС. При этом в базе данных информация должна постоянно обновляться на каждом этапе вывода энергоблока из эксплуатации [6].

Термин «база данных по выводу из эксплуатации блока АЭС» принят в нормативных документах Ростехнадзора и руководящих документах концерна «Росэнергоатом». Говоря о данном термине, мы имеем в виду хранение данных, которые впоследствии пригодятся будущим специалистам, занимающимся закрытием АЭС на всех ее стадиях. Такая база данных поспособствует хранению и передаче всей информации из поколения в поколение и будет иметь огромное значение в улучшении энергоэффективности и последующем снижении затрат.

В процессе вывода энергоблока из эксплуатации выстраивается при правильной организации структуры и непрерывном обновлении базы данных хранилище последних сведений по предприятию для предстоящей стадии – закрытию. Однако поскольку часть энергообъектов создавалась в 1970-е гг., данные находятся на бумажных носителях, что заставляет сомневаться в существовании удовлетворяющих требованиям электронного фонда данных энергообъектов.

Разработка и использование информационного моделирования приведет к уменьшению издержек и поможет в определении наиболее безопасного способа закрытия АЭС.

Следовательно, BIM-модель – это база данных, в которой хранится вся информация по энергообъекту, применяемая как на этапе проектирования и строительства энергообъекта, так и в процессе эксплуатации и при выводе из нее.

ВМ-модель способствует решению таких вопросов, как определение источников радиационных заражений, организация пространственно-распределенного источника в зданиях энергообъекта и стадий вывода из эксплуатации энергоблоков [7].

В заключение хотелось бы отметить, что на сегодняшний день основным направлением усовершенствования отрасли атомной энергетики является цифровизация на этапах проектирования, строительства, интегрирования методов работы с информацией на всех этапах формирования энергообъекта.

Применение информационного моделирования энергоблоков при выводе их из эксплуатации сокращает время на поиск и предоставление требуемых документов, способствует автоматизации выявления количества радиоактивных отходов и последующему применению предварительно переработанного бетона.

### Библиографический список

1. Хмелевский А.Г. Мировые ресурсы ядерного топлива // Атомная техника за рубежом. 2010. № 1. С. 16–21.
2. Кузнецов В. Поминки по АЭС влетят в копеечку // Мировая энергетика. 2005. № 4. С. 100–101.
3. Маяновский М.С. Разработка и внедрение некоторых усовершенствований в ядерной энергетике Японии // Атомная техника за рубежом. 2012. № 10. С. 17–26.
4. Феник Б.С. Опыт сооружения 111 очереди АЭС «Козлодуй» в Народной республике Болгарии: обзорная информация. М.: Информэнерго, 1990. Вып. 1. 56 с.
5. Информационное моделирование закрытия АЭС. URL: <https://energypolicy.ru/informaczionnoe-modelirovanie-zakrytiya-aes/energetika/2021/11/01/> (дата обращения: 10.12.2022).
6. Sharov K.G., Martirosov A.S. The dry mortar consumption calculation automation in the finishing work organization // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 13. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/913/3/032042/pdf> (дата обращения: 11.02.2023).
7. Epifanov R.P., Shilova L.A. Development of an algorithm for creating an insulation solution for a building within the construction area // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 13. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/913/3/032074/pdf> (дата обращения: 11.02.2023).

## INFORMATION MODELING OF THE CLOSURE OF NUCLEAR POWER PLANTS

*F.F. Shaikhutdinova, L.S. Araratyan, Yu.M. Pavlova*

***Abstract.** The article discusses the issues of the use of clean energy and the impact of nuclear energy on the environment. The analysis of the main ways of decommissioning power units was carried out and the factors hindering the development of nuclear energy were indicated. The main issue of the disposal of construction and radioactive waste during the decommissioning of power units is considered, as well as the prospects for the use of information modeling during the decommissioning of nuclear power units are considered.*

***Keywords:** clean energy, liquidation, waste, burial, information modeling, nuclear power plant.*

Об авторах:

ШАЙХУТДИНОВА Фардия Фаридовна – студентка кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: fardias6.06.9@gmail.com

АРАРАТЪЯН Любовь Сергеевна – старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: liuba.araratyan@yandex.ru

ПАВЛОВА Юлия Михайловна – старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: sokolhawk98@gmail.com

About the authors:

SHAIKHUTDINOVA Fardiya Faridovna – Student of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: fardias6.06.9@gmail.com

ARARATYAN Lyubov Sergeevna – Senior Lecturer of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: liuba.araratyan@yandex.ru

PAVLOVA Yulia Mikhailovna – Senior Lecturer of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: sokolhawk98@gmail.com

## ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ УСТАНОВКИ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ПРИВОДА НА ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАСОСАХ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

*Н.М. Ганчев, А.Ю. Русин*

© Ганчев Н.М., Русин А.Ю., 2023

*Аннотация.* В статье изложены преимущества и недостатки частотного регулирования как способа борьбы с повышенными расходами энергии на питание основных насосов. Отмечено, что установка высоковольтного частотно-регулируемого привода (ВЧРП) позволяет снизить расходы энергии на собственные нужды, а также дает возможность энергоблокам работать в режиме суточного маневрирования. Однако такое решение имеет свои минусы и может повлиять на надежность оборудования атомных электростанций. Описан принцип работы ВЧРП.

*Ключевые слова:* энергосбережение, атомная электростанция, суточное маневрирование, высоковольтный частотно-регулируемый привод, собственные нужды.

Частотно-регулируемый привод – система управления частотой вращения ротора электродвигателя, основу которой составляет частотный преобразователь (представляет собой выпрямитель, преобразующий переменный ток промышленной частоты в постоянный, и инвертор, преобразующий постоянный ток в переменный требуемой частоты и амплитуды). Выходные тиристоры или биполярные транзисторы преобразователя обеспечивают необходимый ток для питания электродвигателя [1].

Так, путем изменения частоты и амплитуды трехфазного напряжения, поступающего на электродвигатель, меняется и скорость его вращения. Это необходимо для обеспечения работы насосов атомных электростанций (АЭС) в маневренных режимах, которые потенциально рассматриваются прежде всего как энергосберегающее мероприятие.

Основные технологические насосы АЭС с самыми распространенными на данный момент энергоблоками с водо-водяными энергетическими реакторами (ВВЭР) питаются с различных секций питания собственных нужд номинальным напряжением 6 кВ. В нашей статье под такими агрегатами мы будем иметь в виду:

1. Главные циркуляционные насосы (ГЦН). Предназначены для прокачки теплоносителя через ядерный реактор к парогенераторам по четырем циркуляционным петлям.

2. Циркуляционные насосы блочной насосной станции (ЦН БНС). Предназначены для охлаждения пара в конденсаторах турбины.

3. Конденсатные электронасосы 1-й ступени (КЭН 1 ст.). Служат для прокачки основного конденсата через блочную обессоливающую установку и подогреватели низкого давления смешивающего типа.

4. Конденсатные электронасосы 2-й ступени (КЭН 2 ст.). Предназначены для прокачки основного конденсата через подогреватели низкого давления поверхностного типа в деаэраторы.

Частотное регулирование приведенных насосных агрегатов позволит плавно и синхронно изменять их производительность и тем самым снизить затраты энергии на их питание, а следовательно, и на собственные нужды АЭС. На данный момент все перечисленные агрегаты работают на номинальной нагрузке.

Для реализации такого технического решения понадобится высоковольтный частотно-регулируемый привод (ВЧРП) (рис. 1).

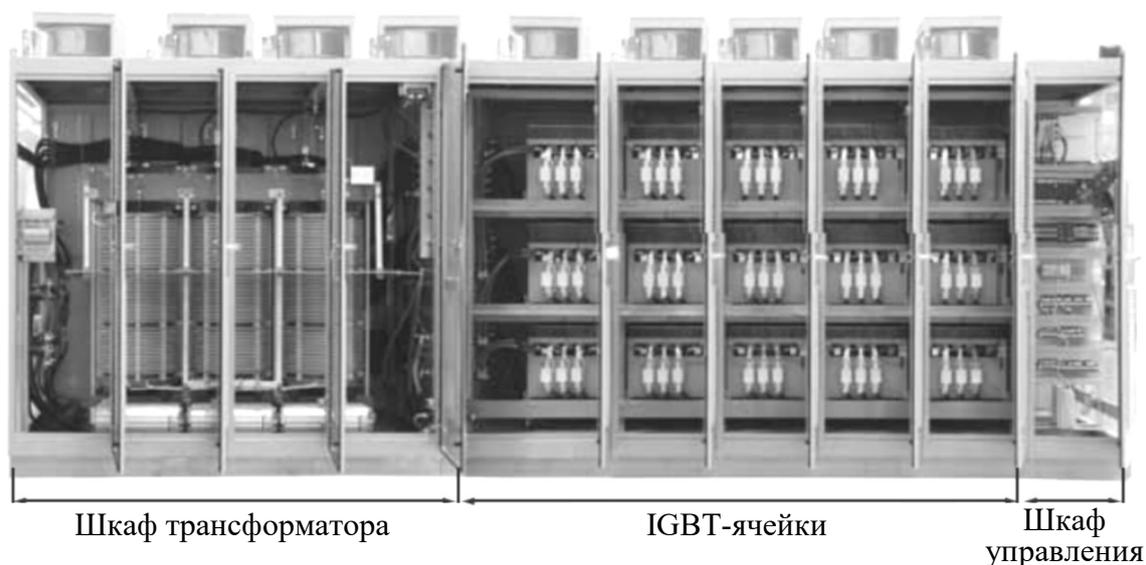


Рис. 1. Внешний вид ВЧРП

Принцип действия ВЧРП основан на преобразовании электрической энергии трехфазной сети переменного тока напряжением 6 кВ (50 Гц) в трехфазное напряжение с переменными составляющими напряжения и частоты. Методы соотношения  $U / f$  могут быть различны для разных агрегатов. Высоковольтный преобразователь частоты выполнен на базе силовых модулей с IGBT-транзисторами (биполярными транзисторами с изолированным затвором) по технологии многоуровневого преобразования. При работе исключены коммутационные перенапряжения на электродвигателе, а также отсутствуют ограничения по длине кабеля. Подключение идет напрямую к электродвигателю, что является существенным преимуществом.

Силовая схема преобразователя состоит из многообмоточного трансформатора, ячеек с силовыми IGBT-модулями и ячейки управления с промышленным компьютером. Входной изолирующий трансформатор первичной обмотки (соединение звездой) подключается к трехфазной сети 6 кВ. Трансформатор изготовлен в сухом исполнении, имеет воздушное принудительное охлаждение, обладает продолжительным ресурсом и не требует специального обслуживания. Вторичные обмотки соединены по схеме треугольника. Каждая группа вторичных обмоток отличается фазным смещением трансформируемого напряжения. Такое техническое решение позволяет уменьшить влияние преобразователя частоты на питающую сеть, так как при многоимпульсной схеме выпрямления из сети потребляется ток с минимальными искажениями. Коэффициент мощности преобразователя 6 кВ по входу не менее 0,96 [2].

Принципиальная схема структуры ВЧРП приведена на рис. 2. С точки зрения энергосбережения техническое переоснащение основных технологических насосов АЭС с ВВЭР таким ВЧРП позволит выйти на принципиально новые режимы работы энергоблоков.

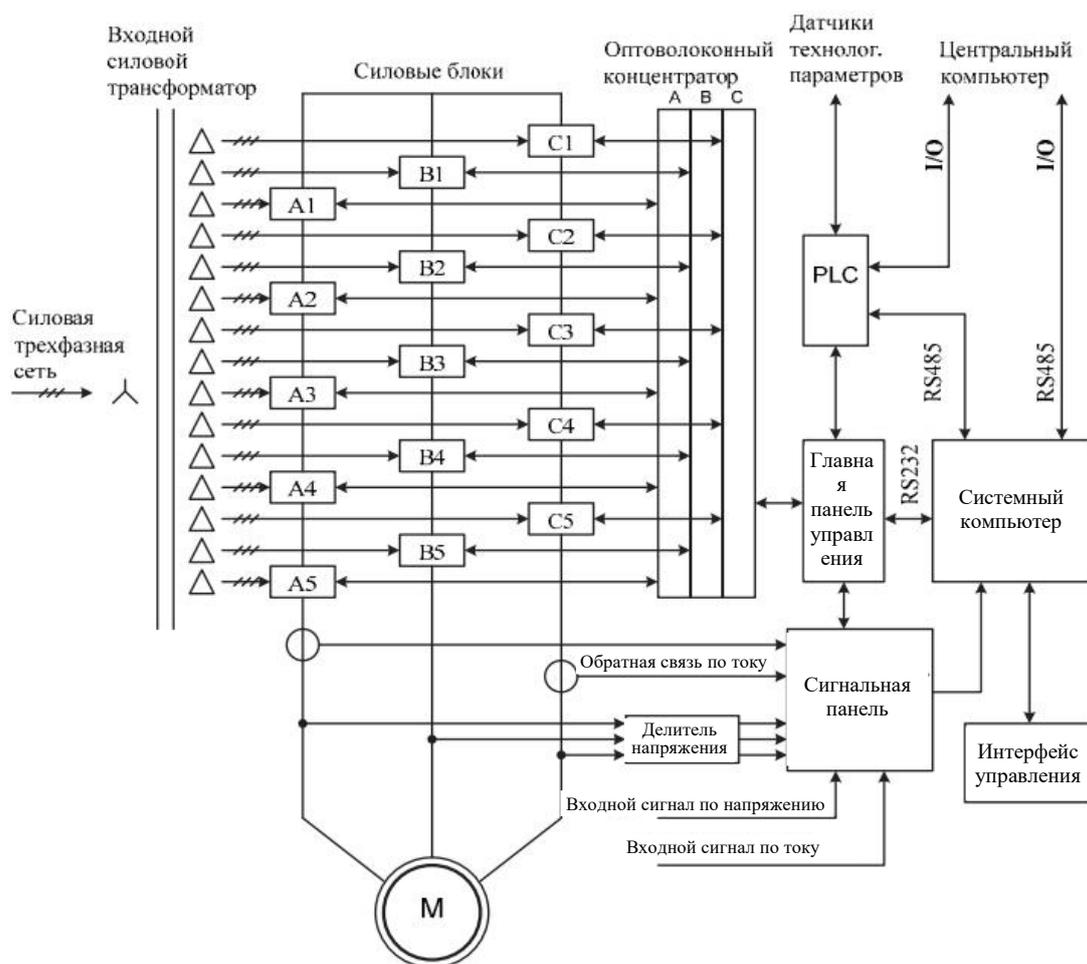


Рис. 2. Принципиальная схема структуры ВЧРП

Автоматическое частотное регулирование ГЦН, ЦН БНС, КЭН 1 ст., КЭН 2 ст. открывает возможность суточного маневрирования, когда в непиковые часы не требуется работа турбогенераторов на номинальной мощности. Производительность насосных агрегатов будет изменяться в зависимости от того, какую нагрузку несет энергоблок. Тем самым упадут расходы на собственные нужды АЭС: лишь для обеспечения работы одного энергоблока необходимо обеспечить высоковольтным питанием четыре ГЦН, четыре ЦН БНС, три КЭН 1 ст. (один из них в резерве), пять КЭН 2 ст. (один из них в резерве); при снижении мощности по диспетчерским ограничениям или плановых/внеплановых разгрузках потребление меньше. На рис. 3 показан график производительности ГЦН.

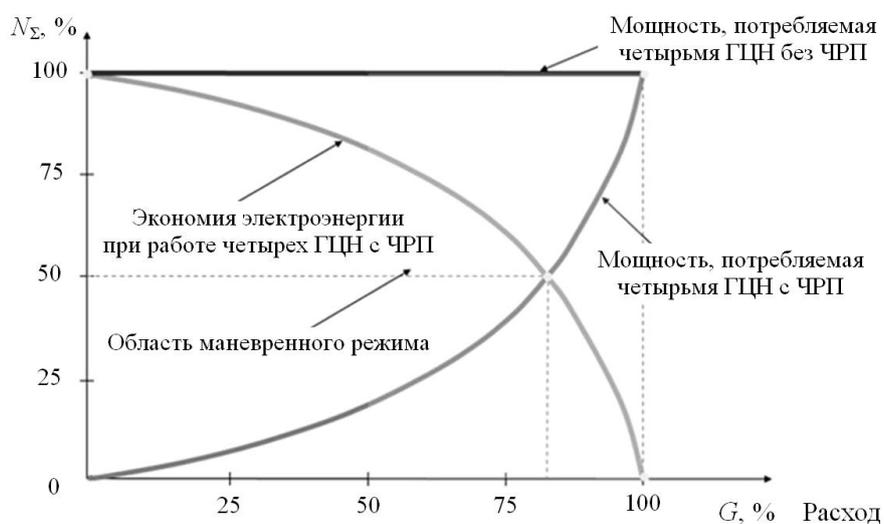


Рис. 3. График производительности ГЦН

Однако при очевидном преимуществе установки ВЧРП с целью энергосбережения существуют недостатки, которые необходимо учитывать при дальнейшем рассмотрении возможности технического переоснащения основных технологических насосов. Следует помнить, что при суточных изменениях нагрузки будет требоваться разгрузка реакторных установок, для которых предпочтительна работа на номинальной мощности. При вводе отрицательной реактивности происходит возрастание значения ксенонового отравления, что негативно влияет на энерго-распределение в активной зоне. Необходимо также учитывать, что маневренность реактора снижается по мере выгорания топлива за счет постепенного вывода борной кислоты из теплоносителя [3].

Недостатком установки ВЧРП также может стать трудоемкий монтаж или его невыполнимость (в зависимости от проекта энергоблока). Даже энергоблоки одного поколения могут сильно отличаться размещением технологических узлов и агрегатов, поэтому возможность установки и подключения к автоматизированной системе управления технологическим процессом АЭС должна рассматриваться индивидуально.

## Библиографический список

1. Осипов О.И. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод: учебное пособие. М.: МЭИ, 2004. 80 с.
2. Промышленная группа «Приводная техника». URL: <https://privod.ru> (дата обращения: 22.11.2022).
3. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта / С.А. Андрущечко [и др.]. М.: Логос, 2010. 604 с.

### ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF INSTALLING A HIGH-VOLTAGE FREQUENCY-CONTROLLED DRIVE ON THE MAIN PROCESS PUMPS OF NUCLEAR POWER PLANTS

*N.M. Ganchev, A.Yu. Rusin*

**Abstract.** *The advantages and disadvantages of frequency control as a way to combat increased energy consumption for powering the main pumps are described. It is noted that due to the installation of a high-voltage frequency-controlled drive (HFCD), it becomes possible to reduce energy costs for their own needs, as well as the possibility of operating power units in the daily maneuvering mode. However, such a solution has its drawbacks and may affect the reliability of nuclear power plant equipment. The principle of operation of the HFCD is described.*

**Keywords:** *energy saving, nuclear power plant, daily maneuvering, high-voltage frequency-controlled drive, own needs.*

Об авторах:

ГАНЧЕВ Никита Максимович – магистрант кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственной технической университет. E-mail: [nikita.ganchev2014@yandex.ru](mailto:nikita.ganchev2014@yandex.ru)

РУСИН Александр Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственной технической университет. E-mail: [alexrusin@inbox.ru](mailto:alexrusin@inbox.ru)

About the authors:

GANCHEV Nikita Maximovich – Master’s Student of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: [nikita.ganchev2014@yandex.ru](mailto:nikita.ganchev2014@yandex.ru)

RUSIN Aleksandr Yur’evich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: [alexrusin@inbox.ru](mailto:alexrusin@inbox.ru)

## ВЛИЯНИЕ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ ФОРМЫ КРИВОЙ НАПРЯЖЕНИЯ НА КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

*В.В. Масленников, А.Ю. Русин*

© Масленников В.В., Русин А.Ю., 2023

***Аннотация.** Статья посвящена показателям качества электроэнергии, среди которых особое внимание уделено несинусоидальности напряжения. Описаны негативные последствия наличия высших гармонических составляющих напряжения. Представлен анализ негативного влияния вентильных преобразователей на несинусоидальность напряжения.*

***Ключевые слова:** несинусоидальность напряжения, несимметрия, гармоники.*

Показатели качества электрической энергии очень важны. От качества этой энергии зависят эффективность работы промышленного оборудования и надежность системы электроснабжения в целом. Все показатели качества электроэнергии нормируются, их значения приведены в стандартах.

Основными показателями качества электроэнергии являются:

- 1) отклонение напряжения;
- 2) отклонение частоты;
- 3) размах колебания напряжения;
- 4) размах колебания частоты;
- 5) коэффициент несинусоидальности формы кривой напряжения;
- 6) коэффициент несимметрии напряжения основной частоты [2, 3].

Отклонение напряжения от синусоидальной функции характеризуется специальным коэффициентом синусоидальности, который рассчитывается по выражению

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{v=2} U_v^2}}{U_1} 100 \% \approx \frac{\sqrt{\sum_{v=2} U_v^2}}{U_{\text{НОМ}}} 100 \%,$$

где  $U_v$  – действующее значение напряжения  $v$ -й гармоники;  $U_1$  – действующее значение первой, или основной, гармоники.

Максимальное значение коэффициента несинусоидальности принимается равным 5 %. Превышение этого значения в месте подключения любого приемника электроэнергии недопустимо [4].

В случае разности между фазными или линейными напряжениями возникает несимметрия напряжений. При этом могут не быть равны как амплитуды напряжений, так и углы сдвига фаз между ними.

Несимметрия напряжений характеризуется коэффициентом обратной последовательности напряжения  $K_{2U}$ , равным отношению напряжения обратной последовательности  $U_2$  к номинальному напряжению  $U_{ном}$ :

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_{ном}} 100 \% .$$

Нормированное значение коэффициента  $\varepsilon_2$  равно 2 % [4].

Показатели качества напряжения не должны превышать нормированные значения. Если это происходит, возникают многочисленные отрицательные последствия:

- 1) уменьшение скорости вращения электродвигателей;
- 2) увеличение технологических потерь в системе электроснабжения;
- 3) недоотпуск промышленной продукции;
- 4) нарушение технологических процессов;
- 5) рост потребления электроэнергии;
- 6) повышение вероятности отказов и, соответственно, снижение надежности работы электрооборудования.

### **Несинусоидальность формы кривой напряжения и тока**

При работе ряда оборудования в электрической цепи протекает ток, отличный от синусоидального и содержащий высшие гармоники. При этом напряжение также начинает отклоняться от синусоидального.

К такому оборудованию относятся электродуговые сталеплавильные печи, сварочные агрегаты и тиристорные преобразователи частоты.

Несинусоидальные режимы отрицательно сказываются на работе многих систем. Могут возникать отказы в работе устройств релейной защиты, автоматики, телемеханики и связи. Режимы работы силового электрооборудования также ухудшаются: усиливается его износ и сокращается срок службы. Это приводит к снижению надежности системы электроснабжения.

Если показатели несинусоидальности в сети превышают допустимые, следует принимать меры для их уменьшению, то есть выполнить следующие действия:

- рассчитать электромагнитную совместимость источников высших гармоник и нагрузок;
- найти значения высших гармоник;
- установить фильтры высших гармоник для снижения их уровня [1].

Если синусоидальная функция удовлетворяет условию Дирихле, ее можно разложить на составляющие. Такими составляющими будут постоянная составляющая и бесконечное количество синусоидальных функ-

ций (гармоник). Основной гармоникой называется та, у которой период равен периоду несинусоидальной функции. Высшими гармониками называются все остальные синусоидальные функции.

Согласно теореме Фурье, мгновенное значение функции  $f(\omega t)$  может быть представлено тригонометрическим рядом:

$$f(\omega t) = A_0 + \sum_{v=1}^n (a_v \cos v\omega t + b_v \sin v\omega t),$$

где  $A_0$  – постоянная составляющая;  $v$  – номер гармоники;  $a, b$  – коэффициенты ряда Фурье;  $n$  – номер последней из учитываемых гармоник.

Коэффициенты ряда Фурье определяются по формулам:

$$a_v = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos(v\omega t) d\omega t,$$

$$b_v = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin(v\omega t) d\omega t.$$

Амплитуду  $v$ -й гармоники находят по формуле

$$A_v = \sqrt{a_v^2 + b_v^2},$$

а начальную фазу  $v$ -й гармоники – по выражению

$$\varphi_v = \arctg \frac{b_v}{a_v}.$$

Токи высших гармоник приводят к искажению формы кривой напряжения.

## **Основные источники высших гармоник**

### ***Вентильные преобразователи***

Мощные полупроводниковые выпрямители часто применяются в современной промышленности: в сетях электрофицированного транспорта, в производстве алюминия, в ряде технологических процессов химических производств и во многих других сферах [5].

Многие выпрямители имеют трехфазные мостовые схемы. Если рассматривать более мощные преобразователи со сложными схемами, то можно увидеть, что большинство из них также строятся на основе мостовых схем.

Функция тока, протекающего по мостовому преобразователю (рисунки), типична для этих преобразователей, при соединении первичной обмотки трансформатора преобразователя в звезду.



где  $U_d$  – средние значения выпрямленного напряжения под нагрузкой;  $U_{d0}$  – средние значения выпрямленного напряжения в режиме холостого хода.

Анализ экспериментальных данных показывает, что при работе мостового преобразователя, кроме канонических гармоник ( $\nu = 5, 7, 11, 13, 17, 19, \dots$ ), возникают и аномальные ( $\nu = 2, 3, 4, 6, 8, \dots$ ). Аномальные гармоники возникают из-за несимметрии системы управления, но обычно имеют незначительные значения и их можно не учитывать.

Трехфазный мостовой выпрямитель является базовой схемой для построения более сложных схем, используемых в электроприводе:

- 1) скомпенсированного вентильного электропривода;
- 2) асинхронного вентильного каскада;
- 3) тиристорного электропривода на базе вентильного двигателя;
- 4) привода на базе асинхронного двигателя с использованием частотного регулирования частоты вращения [1].

### **Заключение**

Уменьшение несинусоидальности в сети позволит повысить надежность системы электроснабжения, улучшить режимы работы силового оборудования, снизить его износ и уменьшить число отказов автоматики и релейной защиты.

### **Библиографический список**

1. Качество электроэнергии: лекции. URL: [https://otherreferats.allbest.ru/physics/00279714\\_0.html](https://otherreferats.allbest.ru/physics/00279714_0.html) (дата обращения: 17.03.2023).
2. Ермаков В.Ф. Качество электроэнергии. М.: Вузовская книга, 2012. 192 с.
3. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташов [и др.]; под ред. Ю.В. Шарова. М.: МЭИ, 2017. 87 с.
4. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.
5. Титов А.Ф. Энергосбережение и качество электроэнергии: методические указания на выполнение комплексного домашнего задания. Хабаровск: ДВГУПС, 2007. 30 с.
6. ГОСТ 30804.4.7-2013 (IEC 61000-4-7:2009). Совместимость технических средств электромагнитная. Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств. М.: Стандартинформ, 2013. 34 с.

# INFLUENCE OF NON-SINUSOIDALITY OF THE VOLTAGE CURVE FORM ON THE QUALITY OF ELECTRIC ENERGY

*V.V. Maslennikov, A.Yu. Rusin*

**Abstract.** *The article is devoted to the indicators of the power quality limits, among which special attention is paid to the non-sinusoidal voltage. The negative consequences of the presence of higher harmonic voltage components are described. The analysis of the negative influence of valve converters on non-sinusoidal voltage is presented.*

**Keywords:** *non-sinusoidal voltage, unbalance, harmonics.*

Об авторах:

МАСЛЕННИКОВ Виктор Владимирович – магистрант кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: vityamaslennikov9@gmail.com

РУСИН Александр Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: alexrusin@inbox.ru

About the authors:

MASLENNIKOV Viktor Vladimirovich – Master's Student of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: vityamaslennikov9@gmail.com

RUSIN Aleksandr Yur'evich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: alexrusin@inbox.ru

УДК 621.316

## ВНЕДРЕНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ

*А.А. Горев, А.Ю. Русин*

© Горев А.А., Русин А.Ю., 2023

**Аннотация.** *Статья посвящена энергосберегающим технологиям. Приведена классификация энергосберегающих мероприятий на промышленных предприятиях, в том числе с применением новых энергоэффективных технологий. Описаны способы сокращения расходов электроэнергии, используя которые, можно добиться большого экономического эффекта.*

*Ключевые слова:* энергосбережение, потери электроэнергии, качество электроэнергии, энергосберегающие технологии, энергоресурсы.

Мероприятия, которые можно отнести в данный момент времени к энергосберегающим, играют большую роль в электроэнергетике промышленных предприятий.

Промышленные предприятия расходуют свои ресурсы на сырье, материалы и услуги сторонних организаций, но плата за различные виды энергии, в том числе электрическую, является одной из самых больших для промышленных предприятий. В связи с этим для современной промышленности вопросы энергосбережения очень актуальны. При этом стоит учитывать также постоянный рост цен на электроэнергию и другие энергоносители.

Затраты на энергоносители можно значительно уменьшить и тем самым улучшить экономические показатели работы производства, если грамотно организовать энергосберегающие мероприятия. Если в результате реализации мероприятий, проводимых на действующих объектах, достигается уменьшение расхода энергоресурсов на выпуск единицы продукции по сравнению с текущими затратами (при условии выполнения санитарных и экологических норм и правил), то они относятся к энергосберегающим.

Достичь экономии электроэнергии можно целым рядом разных способов. Приведем основные из них [1]:

использование современных, новых технологий, которые относятся к энергосберегающим;

регулирование режимов работы оборудования;

улучшение показателей качества электроэнергии;

установка нового, более современного и энергоэффективного оборудования;

снижение потерь электроэнергии в отдельных электроприемниках и в системе электроснабжения в целом.

Все энергосберегающие мероприятия можно разделить на две категории:

1. Мероприятия, в результате применения которых уменьшается потребление энергоносителей и снижается удельный расход электрической энергии на единицу выпускаемой продукции.

К мероприятиям первой категории относятся:

обеспечение оптимальной загрузки трансформаторов, отключение малозагруженных трансформаторов;

использование допустимых уровней напряжения, применение регулирования напряжения;

проведение модернизации оборудования на промышленных предприятиях;

автоматическое управление освещением в течение суток;

применение компенсации реактивной мощности;

повышение производительности производственных процессов;

применение новых технологий;

уменьшение потерь электрической энергии в электрооборудовании;

снижение потерь электроэнергии в системах электроснабжения;

использование энергоресурсов, которые относятся к вторичным.

2. Мероприятия по выравниванию нагрузки по времени суток. Оптимизируя суточные графики электропотребления и тем самым повышая КПД генерации электроэнергии [2], можно достичь уменьшения удельных расходов ресурсов на генерацию электроэнергии.

Для одного и того же технологического процесса можно использовать разные виды энергоносителей. Например, термическую обработку изделий можно осуществлять в различных печах:

печах, в которых осуществляется непосредственное сжигание топлива;

печах индукционного нагрева;

печах электрического сопротивления.

При этом необходимо выбирать более эффективный, а значит, более выгодный технологический процесс.

В системе электроснабжения в целом и в отдельных видах электрооборудования снизить потери электроэнергии можно с помощью целого ряда мероприятий:

обеспечения работы оборудования с номинальной мощностью (достигается наиболее оптимальный КПД);

замены оборудования, которое работает длительное время с нагрузкой ниже номинальной, на оборудование меньшей мощности;

использования ограничителей холостого хода, например для отключения электродвигателей в период простоя, чтобы не допускать длительной работы электродвигателей на холостом ходу;

обеспечения оптимального освещения рабочих мест;

использования оптимальных видов и более рациональных параметров энергоносителей для технологических процессов (пара, газа, электроэнергии, горячей воды, сжатого воздуха и др.);

применения современных способов регулирования частоты вращения асинхронных электродвигателей.

Сейчас наиболее эффективным является использование тиристорных преобразователей частоты [3, 4], позволяющих плавно и в большом диапазоне регулировать частоту вращения асинхронных двигателей.

Применение на предприятиях новых энергоэффективных технологий и более совершенного оборудования дает возможность снизить удельные расходы электроэнергии на выпускаемую продукцию.

### **Заключение**

Все перечисленные в статье способы очень эффективны для предприятий, целью которых является достижение энергосбережения. Уменьшение потребления электроэнергии хорошо сказывается на экономике организаций, а также приводит к замене старого оборудования новым, что положительно отражается на производстве.

### **Библиографический список**

1. Фокин В.М. Основы энергосбережения и энергоаудита. М.: Машиностроение-1, 2006. 256 с.
2. Юдаева Н.Д. Энергосбережение на промышленных предприятиях // Молодой ученый. 2018. № 50 (236). С. 65–67.
3. Иванова В.Р., Киселев И.Н. Частотно-регулируемый электропривод для энергосбережения и оптимизации технологических процессов в электротехнических комплексах // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т. 21. № 5. С. 59–70.
4. Усуфов М.М. Применение современных частотных преобразователей как способ повышения энергосбережения в сфере ЖКЧ // Техничко-технологические проблемы сервиса. 2014. № 1 (27). С. 28–31.

## **INTRODUCTION OF ENERGY SAVING TECHNOLOGIES**

*A.A. Gorev, A.Yu. Rusin*

***Abstract.** The article is devoted to energy-saving technologies. The classification of energy-saving measures at industrial enterprises, including with the use of new energy-efficient technologies, is given. The methods of reducing electricity costs are described, using which it is possible to achieve a great economic effect.*

***Keywords:** energy saving, electricity losses, electricity quality, energy-saving technologies, energy resources.*

Об авторах:

ГОРЕВ Андрей Андреевич – магистрант кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственной технической университет.  
E-mail: andrey.gorev08@mail.ru

РУСИН Александр Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственной технической университет. E-mail: alexrusin@inbox.ru

About the authors:

GOREV Andrey Andreevich – Master’s Student of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: andrey.gorev08@mail.ru

RUSIN Aleksandr Yur’evich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: alexrusin@inbox.ru

УДК 669.187:621.186

## **РОЛЬ ШУНТИРУЮЩЕГО РЕЗИСТОРА В ЦЕПЯХ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

***Н.В. Милютин, М.Н. Понятых***

© Милютин Н.В., Понятых М.Н., 2023

***Аннотация.** В статье рассмотрены цели использования шунтирующего резистора в цепях ротора двигателя постоянного тока независимого возбуждения. Исследовано, как повлияет шунтирующий резистор на характеристики двигателя постоянного тока. Сделаны выводы о перспективах шунтирующего резистора.*

***Ключевые слова:** шунтирующий резистор, двигатель постоянного тока, независимое возбуждение, механические характеристики.*

Основными функциями шунтирующего резистора в цепи независимого возбуждения являются регулирование скорости вращения двигателя и динамическое торможение. Его также можно использовать в качестве разрядника.

Более плавное регулирование угловой скорости получают в схеме с шунтированием якоря двигателя небольшой мощности (до 1 кВт), постоянного тока резистором  $R_{ш}$  и включением сопротивления  $R_n$  последовательно  $R_{ш}$  (рис. 1).

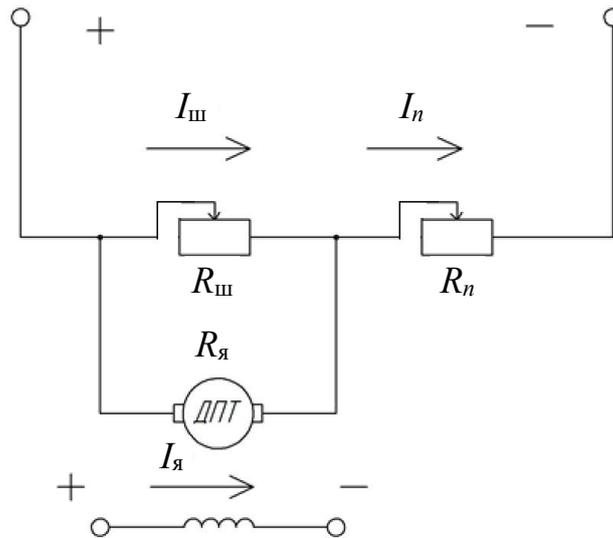


Рис. 1. Схема двигателя постоянного тока с шунтирующим резистором

Шунтирующий  $R_{ш}$  и добавочный  $R_n$  резисторы создают падение напряжения за счет тепловыделения. Ток якоря  $I_я$  и ток добавочного сопротивления  $I_n$  изменяются от нагрузки на валу двигателя следующим образом: чем больше нагрузка, тем выше ток, потребляемый из сети. Благодаря изменению сопротивлений, изображенных на рис. 1, осуществляется влияние на напряжение и ток, а значит, и на угловую скорость двигателя. Это можно увидеть с помощью механической характеристики, которая отражена в уравнениях:

$$U = E + I_я \cdot R_я + I_n \cdot R_n, \quad (1)$$

$$U = I_{ш} \cdot R_{ш} + I_n \cdot R_n, \quad (2)$$

$$I_n = I_я + I_{ш}, \quad (3)$$

где  $U$  – напряжение на обмотке статора;  $E$  – ЭДС двигателя;  $R_я$  – сопротивление обмотки статора;  $I_{ш}$  – ток шунта.

Подставив выражения (2) и (3) в уравнение (1), найдем  $E$ :

$$E = U \frac{R_{ш}}{R_{ш} + R_n} - I_я R_я + \frac{R_{ш} R_n}{R_{ш} + R_n}. \quad (4)$$

Упростить формулу (4) можно, приняв за  $A$  отношение сопротивлений:

$$\frac{R_{ш}}{R_{ш} + R_n} = A.$$

Из формулы (4) выведем угловую скорость  $\omega$ , заменив напряжение на начальную угловую скорость  $\omega_0$  и подставив величину  $A$ . Далее разделим выражение на коэффициент  $C$  и заменим ток якоря  $I_я$  на момент  $M$ . Получим уравнение механической характеристики:

$$\omega = A \omega_0 - \frac{I_{\text{я}} (R_{\text{я}} + A R_n)}{C}, \quad (5)$$

$$\omega = A \omega_0 - \frac{M (R_{\text{я}} + A R_n)}{C^2}. \quad (6)$$

Из уравнений (5) и (6) видно, что характеристики линейны, а угловая скорость будет изменяться с увеличением или уменьшением сопротивления  $R_n$ .

Следовательно, от того, какие сопротивления подобраны, зависит характеристика двигателя постоянного тока.

Если принять сопротивление  $R_n$  за бесконечно большое, образуется разрыв, а значит, цепь двигателя разомкнется и замкнется на шунтирующий резистор  $R_{\text{ш}}$ , что влечет за собой включение режима динамического торможения. Приняв сопротивление  $R_{\text{ш}} = 0$ , получим схему с реостатным регулированием. Изменяя сопротивления, можно получить большое количество искусственных характеристик (рис. 2). Данная схема включения дает более плавное регулирование  $\omega$ , а следовательно, и увеличенный диапазон регулирования: примерно с (2; 3) : 1 до (5; 6) : 1 при малом отклонении момента нагрузки.

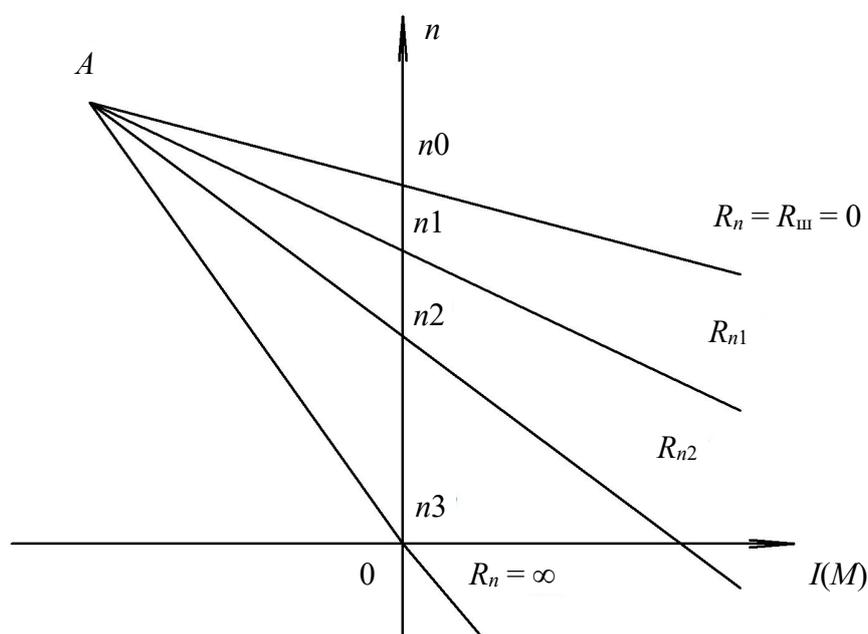


Рис. 2. Механические характеристики двигателя постоянного тока с шунтирующим резистором цепи ротора

В соответствии с информацией выше в двигателе небольшой мощности плавное регулирование угловой частоты достигается путем использования схемы с шунтирующим резистором и последовательно включенным сопротивлением. Так как схема (см. рис. 1) используется при

предварительном снижении скорости для более плавной остановки, она не получила широкое применение. Кроме того, при длительном применении схемы большое количество энергии уходит на выделение тепла, вследствие чего она является затратной.

Далее рассмотрим функцию шунтирующего резистора в качестве разрядника.

Чтобы обмотки двигателя не выходили из строя из-за пробоя изоляции и дальнейшего их перегорания, вводится шунтирующий резистор. Для этого следует подключить резистор в ветвь обмотки возбуждения. Он уже практически не будет выполнять функцию регулирования скорости, а будет использоваться в качестве защиты обмоток статора (рис. 3).

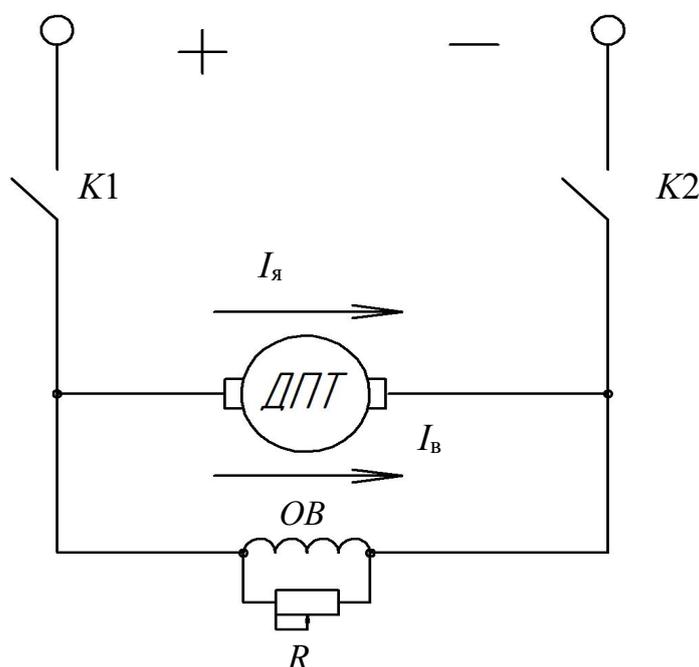


Рис. 3. Схема двигателя постоянного тока с шунтирующим резистором в роли разрядника

Когда двигатель отключают от сети, он продолжает вращаться по инерции и создавать ЭДС самоиндукции, а ток обмотки возбуждения  $I_B$  меняется от номинального значения до 0 за короткий промежуток времени. Из уравнения, данного ниже, и рис. 4 прослеживается зависимость ЭДС  $E$  от изменения тока  $dI$  по времени  $dt$ .

$$E = -L \frac{d I_B}{d t} ,$$

где  $L$  – индуктивность обмотки статора.

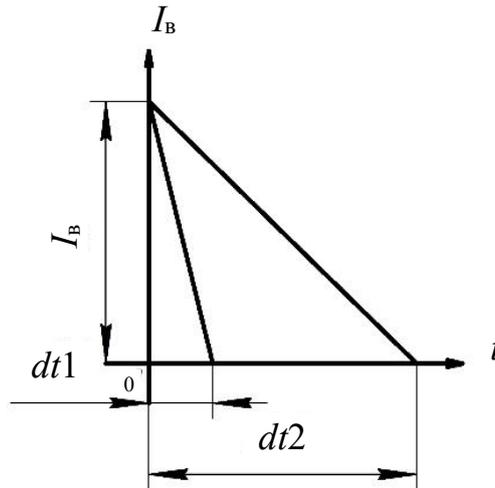


Рис. 4. Зависимость изменения тока от изменения времени

Из формулы (1) видно, что за счет резкого уменьшения промежутка времени происходит скачок ЭДС, который вызывает пробой изоляции.

Шунтирующий резистор в схеме (см. рис.3) помогает снизить ЭДС самоиндукции по правилу Ленца, создавая в схеме разрядный контур. Он увеличивает время, за которое ток достигает 0, вследствие чего идет уменьшение ЭДС самоиндукции. Это работает, если сопротивление резистора в несколько (5–10) раз больше сопротивления обмотки возбуждения. Преимуществами данной схемы являются простота, надежность и дешевизна. Недостаток заключается в протекании тока через шунтирующий резистор во время работы двигателя, но его можно исправить с помощью последовательного включения диода в цепь резистора (рис. 5).

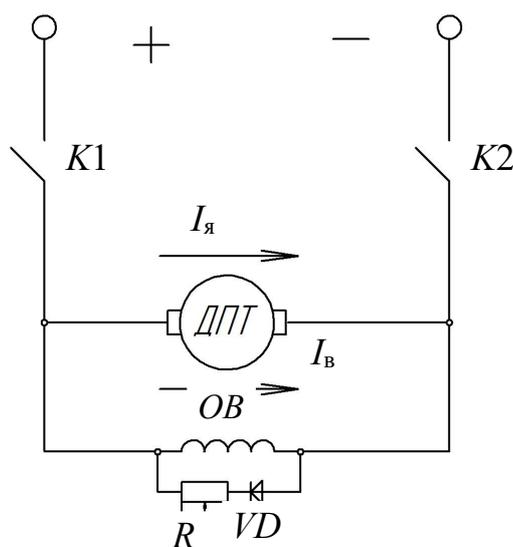


Рис. 5. Шунтирующий резистор в роли разрядника с последовательным включением диода

На основе информации, рассмотренной в статье, можно сделать вывод, что шунтирующий резистор наиболее полезно применять в качестве разрядника для защиты обмоток возбуждения двигателя постоянного тока, а регулировка скорости целесообразна только для маломощных двигателей.

### **Библиографический список**

1. Москаленко В.В. Электрический привод: учебник. М.: Академия, 2009. 320 с.
2. Онищенко Г.Б. Электрический привод: учебник для вузов. М.: Академия, 2008. 288 с.
3. Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебник для вузов. 3-е изд., испр. М.: Академия, 2007. 546 с.

### **THE ROLE OF A SHUNT RESISTOR IN THE ROTOR CIRCUITS OF A DC MOTOR**

*N.V. Milyutin, P.M. Ponyatykh*

***Abstract.** The article discusses the purpose of using a shunt resistor in the rotor circuits of a DC motor of independent excitation. It is investigated how the shunt resistor will affect the characteristics of a DC motor. Conclusions are drawn about the prospects of a shunt resistor.*

***Keywords:** shunt resistor, DC motor, independent excitation, mechanical characteristics.*

Об авторах:

МИЛЮТИН Никита Владимирович – ассистент кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственной технической университет. E-mail: [nik.milyutin@yandex.ru](mailto:nik.milyutin@yandex.ru)

ПОНЯТЫХ Михаил Николаевич – студент 3-го курса бакалавриата кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственной технической университет. E-mail: [misha\\_mejevo@mail.ru](mailto:misha_mejevo@mail.ru)

About the authors:

MILYUTIN Nikita Vladimirovich – Assistant of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: [nik.milyutin@yandex.ru](mailto:nik.milyutin@yandex.ru)

PONYATYKH Mikhail Nikolayevich – 3<sup>rd</sup> Year Undergraduate Student of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: [misha\\_mejevo@mail.ru](mailto:misha_mejevo@mail.ru)

## ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

*А.Ю. Морозов, Л.С. Араратьян, Ю.М. Павлова*

© Морозов А.Ю., Араратьян Л.С.,  
Павлова Ю.М., 2023

***Аннотация.** В статье затронут вопрос повышения эффективности электроснабжения промышленности. Подчеркнуто, что данная тематика носит актуальный характер в современных условиях. Сделан вывод, что оптимальный режим работы электроприемников напрямую зависит от процесса передачи электроэнергии.*

***Ключевые слова:** качество электроэнергии, тиристорные регуляторы напряжения, эффективность энергоснабжения, регулирование напряжения, компенсация реактивной мощности.*

Электричество как товар имеет множество специфических свойств, от нее напрямую зависят качество производимой продукции и некоторые экономические показатели. Именно надежная, бесперебойная работа электроприемников обеспечивает высокий уровень передачи электроэнергии.

Электроприемники и электрические аппараты, присоединенные к электрической сети, характеризуются номинальными показателями работы, частотой, напряжением, и отклонение этих параметров может отрицательно повлиять на их работу, в частности вывести из строя. Каждый год ущерб из-за плохих показателей качества электроэнергии в России соответствует 25 млрд долларов [1]. Помимо этого, в распределительных установках и сетях низкого напряжения показатели электроэнергии сильно отклоняются от установленных ГОСТ 32144-2013 [2]. Следовательно, важно, чтобы параметры электроэнергии соответствовали указанным в стандарте.

Для повышения эффективности электроснабжения стоит проводить ряд мероприятий, целями которых являются реализация потенциала энергоснабжения и сведение к минимуму просадки и потери электроэнергии [3].

Рассмотрим основные причины снижения показателей качества энергии:

1. Отклонение частоты сети. Частота сети задается общесистемным показателем активной мощности в сети. При дефиците активной мощности происходит снижение показателя частоты, а баланс потребляемой и вырабатываемой электроэнергии восстанавливается.

2. Отклонение напряжения. Это медленные изменения напряжения (как правило, продолжительностью более 1 мин), обусловленные изменением нагрузки в электрической сети. Определяются установившимся отклонением напряжения. Отклонения напряжения в точке передачи электрической энергии не должны превышать  $\pm 10\%$  номинального значения напряжения в течение 100 % времени интервала в одну неделю.

3. Колебания напряжения. Это быстрые изменения напряжения (как правило, менее 1 мин), обуславливающие возникновение фликера. Характеризуются кратковременной и долговременной дозами фликера в точке передачи электроэнергии.

4. Провалы напряжения. Предельно допустимая длительность провалов напряжения не должна превышать 30 с. Провалы характеризуются при падении на 0,9 от номинального напряжения.

Комплексное решение проблем заключается в повышении эффективности электроснабжения.

Регулирование напряжения в сети – целый процесс, связанный с изменением уровня напряжения в определенных точках (табл. 1). Трансформаторы снабжают регулированием под напряжением (РПН). Такие трансформаторы могут регулировать напряжение от  $\pm 10\%$  до  $\pm 16\%$ . Силовые трансформаторы на 6–20/0,4 кВ включают в себя устройство регулирования переключения без возбуждения (ПВВ) с диапазоном  $\pm 5\%$  и шагом  $\pm 2,5\%$  [2].

Таблица 1

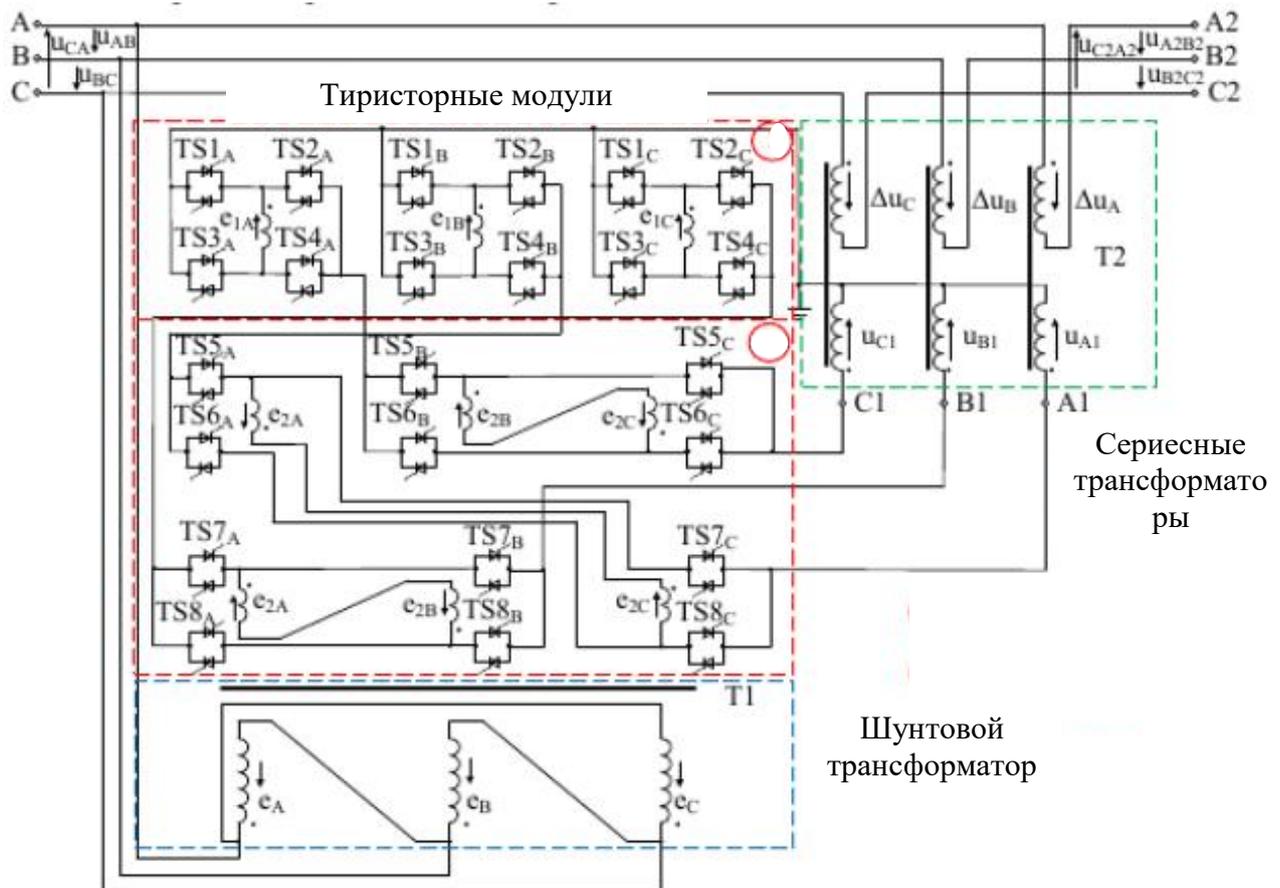
Добавки напряжения трансформатора 6–20/0,4кВ с ПВВ [4]

Регулировочное ответвление обмотки первичного напряжения		Добавка напряжения трансформатора, %		Ширина зоны регулировочного ответвления, %
Порядковый номер	Проценты	Точно	Округленно	
1	+5	0,25	0	2,45
2	+2,5	2,7	2,5	2,56
3	0	5,26	5	2,7
4	-2,5	7,96	7,5	2,84
5	-5	10,8	10	2,84

Для повышения показателей электроэнергии перспективно использовать в сетях 6–20 кВ тиристорные регуляторы напряжения. Один из таких регуляторов напряжения разработан на кафедре Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева [5].

На рисунке показана принципиальная схема тиристорного регулятора напряжения, который позволяет производить гибкое регулирование в распределительных сетях по амплитуде и по фазе, а также имеет про-

дольное и поперечное регулирование тиристорным модулем. Регулятор изменяет входящую величину ЭДС и сдвигает по фазе на  $\pm 90^\circ$  относительно источника, тем самым позволяя изменять поток активной мощности. При этом модуль продольного регулирования дает возможность варьировать величину потока реактивной мощности. При продольно-поперечном регулировании происходит изменение величины фазы и напряжения, что позволяет изменять потоки реактивной и активной мощности.



Принципиальная схема силовой части  
тиристорного регулятора напряжения [6]

Для повышения эффективности электроснабжения стоит проводить ряд мероприятий, целью которых является реализация потенциала энергосбережения.

Основные причины потерь в энергосистемах:

1) элементы систем электроснабжения, вынужденные при высоком потреблении работать в неоптимальных режимах; снижение количества капитальных ремонтов, а также отсутствие обновления и замены устаревшего и износившегося оборудования;

2) перетоки реактивной мощности, которые приводят к увеличению потерь электроэнергии, уменьшению пропускной способности и повышению потерь напряжения;

3) нагрузки, вызывающие несинусоидальность и несимметрию фаз. Перекос фаз влечет за собой несимметрию токов, что приводит к несимметрии напряжений и оказывает плохое воздействие на работу всех электроприемников. Вследствие этого появляются повреждения, отказы, увеличивается износ, уменьшается период эксплуатации, быстрее изнашивается изоляция электрооборудования и увеличивается энергопотребление.

Потери электроэнергии происходят из-за перетоков реактивной мощности. На предприятиях реактивная мощность может достигать 130 % активной нагрузки, из-за чего перетоки реактивной мощности очень существенны. По табл. 2 видно, как из-за перетоков мощности изменяются активные потери, что также становится причиной потерь электроэнергии и уменьшения пропускной способности.

Таблица 2

Активные потери в сети при различных коэффициентах мощности и неизменной активной мощности, передаваемой по сети [7]

$\cos\phi$	$tg\phi$	Мощность, %		Активные потери $\Delta P$ , %	Полезная активная мощность у потребителя ( $P - \Delta P$ )
		Реактивная	Полная		
1	0	0	100	10	90
0,9	0,484	48,4	111,1	12,3	87,7
0,8	0,75	75	125	15,6	84,4
0,7	1,02	102	142,9	20,4	79,6
0,5	1,732	173,2	200	40	60
0,316	3,016	301,6	316,5	100	0

Повышение эффективности электроснабжения заключается в решении целого ряда проблем. Важно также контролировать процесс внедрения всех элементов системы. В первую очередь реализуют самые простые мероприятия по энергосбережению, которые не требуют больших затрат и могут дать быстрый эффект.

К техническим мероприятиям относят:

снижение потерь энергии во внутривоздушных сетях и линиях электропередачи;

включение под нагрузку резервных линий электропередач;

внедрение новой энергосберегающей техники и технологий.

В качестве мер по повышению эффективности электроснабжения можно применить компенсацию реактивной мощности, которая уменьшает потери и повышает качество электроэнергии. Потребителями указанной

мощности являются асинхронные двигатели, трансформаторы, вентильные преобразователи, воздушные электрические сети, реакторы и другие установки. Компенсировать реактивную мощность возможно синхронными компенсаторами, синхронными двигателями (в режиме нагрузки меньше номинальной) и конденсаторными установками (источниками реактивной мощности) [7].

Компенсацию подразделяют на поперечную и продольную. Первая используется с целью повышения коэффициента. Уровень напряжения растет, но колебания не изменяются (как и до компенсации). Вторая при повышении напряжения может обеспечить колебания напряжения в меньших пределах. Ее стоит применять при резких и кратковременных перепадах напряжения. Продольная компенсация используется как способ регулирования напряжения с резкопеременными нагрузками, поперечная – для увеличения коэффициента мощности.

Компенсация реактивной мощности при использовании статических конденсаторных батарей классифицируется на централизованную, индивидуальную и групповую. Выбор компенсации индивидуален для каждой сети с учетом ее специфических свойств нагрузок.

Централизованный способ позволит разгрузить трансформаторы, токоведущие кабели, а также повысить качество электроэнергии, что прослеживается в формулах:

$$S_m = \sqrt{P_m^2 + Q_m^2},$$
$$S_m = \sqrt{P_m^2 + (Q_m - Q_{кв})^2},$$

где  $S_m$  – мощность загруженных трансформаторов, состоящая из активной  $P_m$  и реактивной  $Q_m$  составляющих;  $Q_{кв}$  – мощность конденсаторной установки.

Из формул видно, как установка компенсации реактивной мощности влияет на мощность загруженных трансформаторов. Однако при такой компенсации разгружаются только вышестоящие элементы системы, что приведет к незначительному техническому эффекту, мощности цеховых трансформаторов при этом не освобождаются. Данный способ обычно используется предприятиями с сетью напряжением 10 кВ на стороне низшего/высшего напряжения 110/10 кВ, где балансовая принадлежность проходит по стороне 110 кВ или на стороне напряжения 0,4 кВ в узлах с большой динамикой нагрузки. К сожалению, такой способ дает лишь экономический эффект, повышая точность измерения электроэнергии при пониженном коэффициенте мощности.

Схема групповой компенсации на распределительной трансформаторной подстанции дает минимальную стоимость удельного киловара. Главным недостатком являются большие инвестиции в покупку.

Индивидуальная компенсация наиболее затратная, но при этом самая эффективная. В ней используют косинусные батареи, статические конденсаторные батареи и нерегулируемые установки повышения коэффициента мощности.

Основным путем повышения эффективности электроснабжения служит улучшение качества электроэнергии (как с технической, так и с экономической стороны) путем проведения мероприятий. Для комплексного внедрения мероприятий стоит принимать во внимание обобщенный показатель, учитывающий экономический и технический факторы.

### Библиографический список

1. Смородин С.Н., Белоусов В.Н., Лакомкин В.Ю. Методы энергосбережения в энергетических, технологических установках и строительстве: учебное пособие. СПб.: СПбГТУРП, 2014. 99 с.

2. ГОСТ 32144-2013. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2012. 16 с.

3. Мероприятия и технические средства повышения качества электрической энергии. URL: <http://electricalschool.info/main/elsnabg/1292-meroprijatija-i-tehnicheskie-sredstva> (дата обращения: 15.12.2022).

4. Устройство РПН. URL: [https://ru.wikibrief.org/wiki/Tap\\_changer](https://ru.wikibrief.org/wiki/Tap_changer) (дата обращения: 15.12.2022).

5. Универсальный тиристорный регулятор величины вольтодобавочного напряжения: пат. 2710660 Рос. Федерация. № 2019120064 / Асабин А.А., Соснина Е.Н., Кралин А.А., Крюков Е.В.; заявл. 27.06.2019; опубл. 30.12.2019, Бюл. № 1.

6. Тиристорное фазоповоротное устройство с вольтодобавочным трансформатором для сети среднего напряжения: пат. 2612062 Рос. Федерация. № 2016127017 / Соснина Е.Н., Асабин А.А., Кралин А.А., Крюков Е.В.; заявл. 06.07.2016; опубл. 31.05.2017, Бюл. № 16.

7. Для чего нужна компенсация реактивной мощности? URL: <http://electricalschool.info/main/elsnabg/14-dlja-chego-nuzhna-kompensacija.html> (дата обращения: 15.12.2022).

## IMPROVING THE QUALITY OF ELECTRICITY

*A.Yu. Morozov, L.S. Araratyan, Yu.M. Pavlova*

*Abstract. The article touches upon the issue of increasing the efficiency of power supply to industry. It is emphasized that this topic is relevant in modern conditions. It is concluded that the optimal mode of operation of electric receivers directly depends on the process of electricity transmission.*

**Keywords:** power quality, thyristor voltage regulators, energy supply efficiency, voltage regulation, reactive power compensation.

Об авторах:

МОРОЗОВ Александр Юрьевич – студент 4-го курса, Тверской государственной технической университет. E-mail: morozov.wot2016@yandex.ru

АРАРАТЪЯН Любовь Сергеевна – доцент кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственной технической университет. E-mail: liuba.araratyan@yandex.ru

ПАВЛОВА Юлия Михайловна – старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственной технической университет. E-mail: sokolhawk98@gmail.com

About the authors:

MOROZOV Alexandr Yuryevich – 4<sup>th</sup> Year Student, Tver State Technical University. E-mail: morozov.wot2016@yandex.ru

ARARATYAN Lyubov Sergeevna – Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: liuba.araratyan@yandex.ru

PAVLOVA Yulia Mikhailovna – Senior Lecturer of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: sokolhawk98@gmail.com

УДК 621.311

## МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

*М.В. Заварин, Л.С. Араратьян, Ю.М. Павлова*

© Заварин М.В., Араратьян Л.С.,  
Павлова Ю.М., 2023

**Аннотация.** *Статья посвящена вопросу определения места повреждения на воздушных линиях электропередачи. Рассмотрены современные методы определения места повреждения и их недостатки. Даны рекомендации по их применению.*

**Ключевые слова:** *повреждение линии, методы определения повреждений, линии электропередачи, выявление повреждений.*

Мероприятия по предотвращению повреждений линий и своевременное выявление и ремонт повреждений – наиболее актуальные задачи электроэнергетики, так как в настоящий момент общий износ распределительных электросетей достигает 70 %, а износ магистральных электрических сетей – 50 %. При этом в крупных странах показатель износа находится в пределах 27–44 %. Доля распределительных электрических сетей, выработавших свой нормативный срок, составляет 50 % [1]. Это значит, что нарушения в работе электроэнергетических систем будут присутствовать и уровень их опасности снизится лишь после замены оборудования, отработавшего свой срок службы.

Для уменьшения зоны обхода воздушных линий (ВЛ) оперативно-ремонтным персоналом электрических сетей требуется точное дистанционное определение места повреждения (ОМП). При успешном срабатывании аппаратуры повторного включения и отсутствии видимых следов пробоя на элементах ВЛ это становится крайне важно [2].

Наибольшее распространение в мире, в частности в России, получила группа методов и устройств, с помощью которой осуществляют измерение параметров аварийного режима на промышленной частоте. Однако погрешность данных методов и устройств составляет не менее 1–2 % от длины ВЛ, поэтому повышение точности ОМП на ВЛ является актуальной проблемой, решение которой позволяет сократить время обнаружения места повреждения [3].

Методы ОМП делятся на дистанционные и топографические. В дистанционных используются устройства, устанавливаемые в доступных персоналу пунктах сети (как правило, в общеподстанционных пунктах управления) и указывающих расстояние от места установки устройства до места повреждения. Топографические методы подразумевают определение места повреждения при движении по трассе с помощью переносных либо стационарных устройств, установленных вдоль ВЛ (рис. 1).

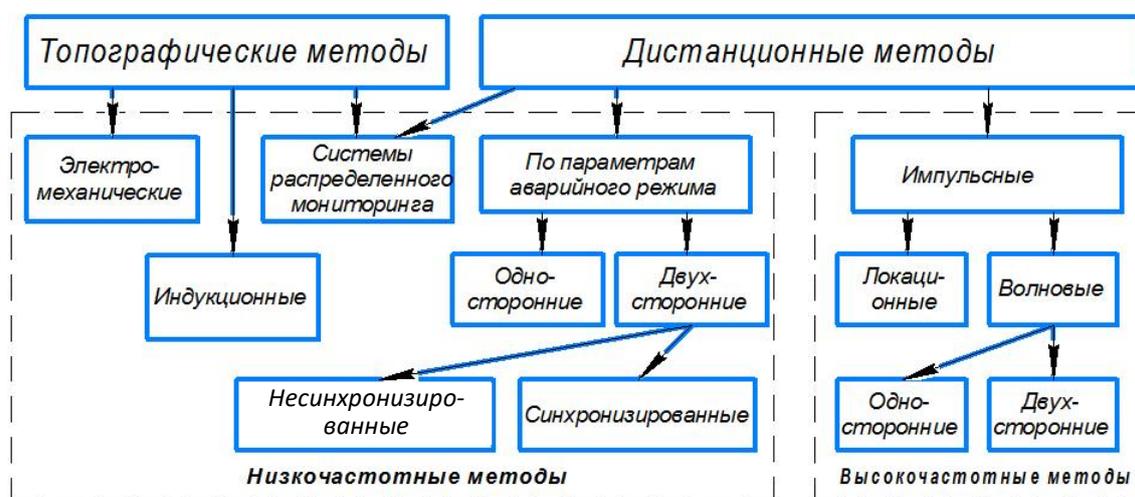


Рис. 1. Классификация методов ОМП

Дистанционные методы ОМП подразделяются на работающие на промышленной частоте и высокочастотные ( $\gg 10$  кГц) [4].

В отношении ВЛ 110–220 кВ целесообразно стремиться к повышению точности дистанционных методов ОМП, чтобы ликвидировать необходимость использования топографических.

В мире, в частности в России, распространение получили ОМП на ВЛ 110–220 кВ, измерения параметров аварийного режима (ПАР) на промышленной частоте, их запоминание и последующая обработка с целью расчета расстояния до места короткого замыкания (КЗ). Широкое распространение методов этой группы объясняется их простотой и использованием алгоритмов, применяющихся в релейной защите [5]. Указанные методы делятся на две основные группы: с двухсторонним и односторонним измерением.

Наибольшей точностью среди дистанционных методов ОМП обладает группа импульсных методов, заключающихся в том, что на линию посылаются электрические импульсы (зондирующие импульсы), которые, распространяясь по линии, частично отражаются от неоднородностей волнового сопротивления и возвращаются к месту, откуда были посланы. По времени прохождения импульса до неоднородности и обратно вычисляют расстояние.

Волновые явления связаны с распространением электромагнитных волн, возникающих в результате КЗ в линиях электропередачи, атмосферного разряда или коммутационных операций в электрической сети. Внезапное и значительное изменение напряжения как минимум в одном месте высоковольтной линии инициирует образование электромагнитной волны, которая распространяется в противоположных направлениях от данной точки.

Предельная погрешность импульсных методов в основном определяется частотными характеристиками измерительного канала и частотой дискретизации. Минимальный шаг нахождения расстояния до места повреждения  $h$  высчитывается следующим образом:

$$h = \frac{v}{2dt},$$

где  $v$  – скорость распространения волны, м/с;  $dt$  – период дискретизации устройства, с.

В свою очередь, предельная погрешность методов по параметрам аварийного режима в основном определяется погрешностью измерения токов (напряжений) для определения амплитуды и угла тока (напряжения) промышленной сети и погрешностью задания параметров линии (при отсутствии уточнения параметров по предаварийному режиму).

Волновой метод двухсторонних измерений, в отличие от метода односторонних измерений, основан на фиксации волн, возникших в месте

повреждения до их отражения и преломления от различных неоднородностей. Такие волны обладают наименьшим искажением формы волны после пробега по ВЛ, что является преимуществом двухстороннего метода перед односторонним. При реализации одностороннего волнового метода возникают сложности при распознавании повторно отраженных волн, в особенности при близких КЗ и при наличии множества неоднородностей в ВЛ.

Необходимым условием для успешного применения волнового метода ОМП выступает синхронизация измерений по концам линий, что возможно реализовать с использованием спутниковых радионавигационных систем, таких как GPS и «ГЛОНАСС». Измерения в устройствах синхронизируются со шкалой всемирного координированного времени.

В зависимости от используемого метода измерения устройства волнового ОМП подразделяются на пять типов: А, В, С, D и E. Работа устройства каждого типа основывается на анализе прошедшей электромагнитной волны, возникающей в результате повреждения. Далее представлено описание этих методов [6, 7].

**Устройства ОМП типа А** производят измерения на одном конце линии (рис. 2). Расстояние до места повреждения находится путем измерения времени между моментом, когда волна, генерируемая повреждением, достигнет локатора повреждения, и моментом возврата отраженной от места повреждения волны. Электромагнитная волна полностью отражается от места повреждения, когда дуга в месте повреждения имеет меньшее сопротивление, чем волновое сопротивление линии.

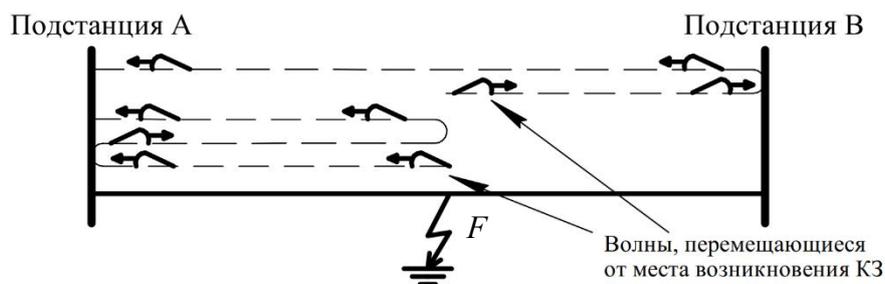


Рис. 2. Устройство ОМП типа А

Расстояние до места повреждения  $D$ , м, от подстанции А можно рассчитать по уравнению

$$D = \frac{t_2 - t_1}{2} v,$$

где  $t_2$  – время, за которое волна, отраженная от места повреждения, достигает подстанции А, с;  $t_1$  – время, за которое первая возникающая в повреждении волна достигает подстанции А, с.

Погрешность ОМП при использовании метода А зависит от таких факторов, как малая продолжительность дуги КЗ, переходное сопротивление, разветвления и ответвления линии и сложность определения верной волны. Эти погрешности устраняются при использовании метода D.

**Устройства ОМП типа В** относятся к устройствам двухстороннего ОМП (рис. 3). Волна, вызванная повреждением, направляется к подстанциям А и В и, достигнув подстанции А, провоцирует включение таймера. Он отключается после получения сигнала с подстанции В о том, что устройство, установленное на ней, зарегистрировало волну от повреждения.

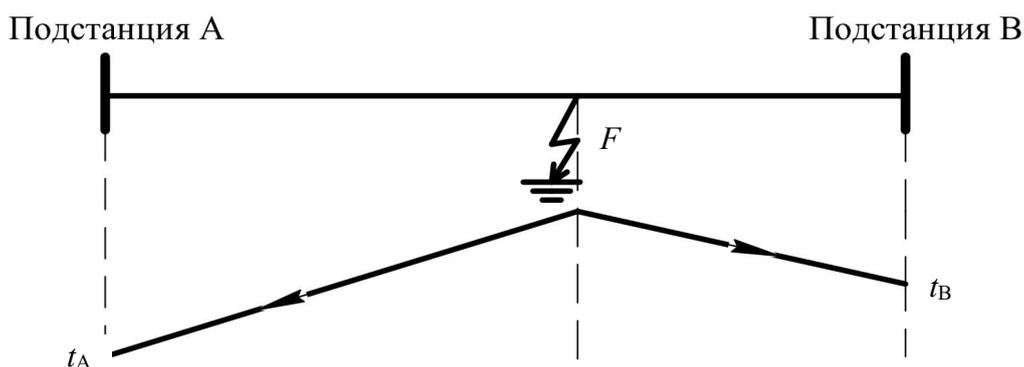


Рис. 3. Устройство ОМП типа В

Расчет расстояния до места повреждения аналогичен методу D, но в расчетах нужно принимать во внимание задержку по времени, связанную с передачей со станции В на станцию А останавливающего таймер сигнала.

**Устройства ОМП типа С** относятся к устройствам одностороннего ОМП (рис. 4). Устройство отправляет импульс в линию, в которой произошли возмущающие помехи. Расстояние до места повреждения рассчитывается с использованием разницы во времени между моментом отправки импульса и временем приема устройством волны, отраженной от дуги в месте повреждения.

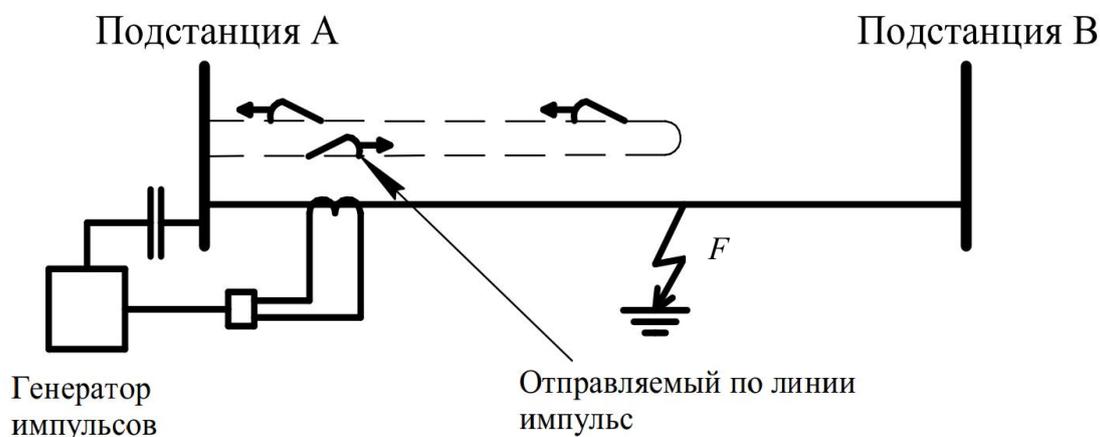


Рис. 4. Устройство ОМП типа С

Расстояние до места КЗ от станции А выводится из зависимости

$$D = \frac{t_2 - t_1}{2} v,$$

где  $t_2$  – время, за которое волна, отраженная от места повреждения, достигает станции А, с;  $t_1$  – время отправки импульса генератором, с.

Следует отметить, что использование данного типа устройств сопряжено с трудностями, связанными с правильным взаимодействием импульсного генератора с линией электропередач и его высокой стоимостью.

**Устройства ОМП типа D** относятся к устройствам двухстороннего ОМП (рис. 5). Волны, расходящиеся от места повреждения, идут в противоположных направлениях (к подстанциям А и В) и достигают их за несколько микросекунд. Для правильного определения расстояния система ОМП типа D требует использования двух синхронизированных устройств, установленных на обоих концах линии. Синхронизация устройств осуществляется с помощью системы GPS. Система находит разницу во времени достижения волнами подстанций А и В, которая затем используется для расчета расстояния до повреждения.

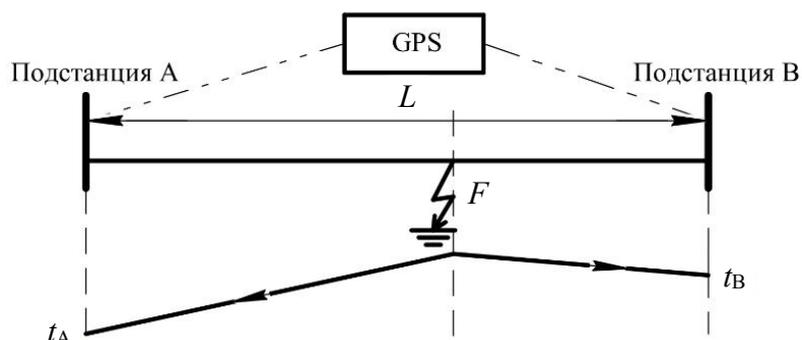


Рис. 5. Устройство ОМП типа D

Расстояние до места КЗ от станции А выводится из зависимости

$$D = \frac{L + (t_A - t_B) v}{2},$$

где  $L$  – длина линии, м;  $t_A$  – время, за которое первая волна достигает подстанции А, с;  $t_B$  – время, за которое первая волна достигает подстанции В, с.

Точность ОМП типа D не уменьшается из-за малого времени неисправности или наличия ответвлений в линии. Последующее отражение волны в точках изменения волнового полного сопротивления не влияет на определение расстояния. Основная ошибка в расчете расстояния до места повреждения – ошибка синхронизации.

**Устройства ОМП типа Е** относятся к устройствам одностороннего ОМП (рис. 6). Они используют волну, которая генерируется замыканием автоматического выключателя на линии. По своей работе метод типа Е аналогичен методу импульсной рефлектометрии, используемому для обнаружения неисправностей в кабелях. Автоматический выключатель, который замыкается в линии передачи, можно рассматривать как три отдельных источника импульсов.

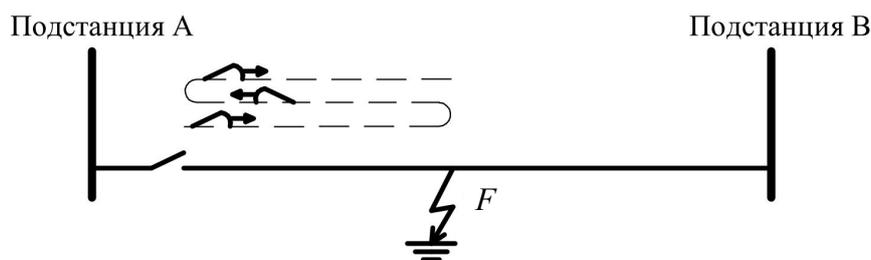


Рис. 6. Устройство ОМП типа Е

Разность во времени между импульсом, генерируемым при замыкании выключателя, и отраженным импульсом от неисправности применяется для определения расстояния до неисправности.

Расстояние до места повреждения от подстанции А рассчитывается на основании зависимости

$$D = \frac{t_2 - t_1}{2} v,$$

где  $t_2$  – время, за которое отраженная волна достигает подстанции А, с;  $t_1$  – время, в течение которого волна генерируется в результате коммутации, с.

Данные методы могут применяться как в обычных линиях электропередач переменного тока, так и в высоковольтных линиях постоянного тока, линиях с отпайками и ВЛ с кабельными участками.

В последних технических решениях по ОМП результаты одновременно регистрируются устройствами типов А, D и нового типа Е. В своей работе они используют волны тока. Метод типа D обычно является основным методом измерения, применяемым в устройствах ОМП. Методы А и Е добавляются к методу D, который в период опытной эксплуатации зарекомендовал себя как надежный и точный. В свою очередь, методы В и С устарели и в современных системах не используются.

### Библиографический список

1. Стратегия развития электросетевого комплекса Российской Федерации: Распоряжение Правительства Рос. Федерации от 3 апреля 2013 г. № 511-р. URL: [www.rg.ru/2013/04/08/elektroseti-site-dok.html/](http://www.rg.ru/2013/04/08/elektroseti-site-dok.html/) (дата обращения 15.12.22)

2. Смирнов А.Н. Волновой метод двухсторонних измерений для определения места повреждения воздушной линии электропередачи 110–220 кВ: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. М., 2015. 209 с.
3. Шалыт Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях. М.: Энергоиздат, 1982. 312 с.
4. Основные методы определения мест повреждения кабельных линий. URL: [https://angstrem.tech/blog/osnovnye\\_metody\\_opredeleniya\\_mest\\_povrezhdeniya\\_omp](https://angstrem.tech/blog/osnovnye_metody_opredeleniya_mest_povrezhdeniya_omp) (дата обращения: 15.12.2022).
5. Комплектное реле определения места повреждения воздушных линий электропередачи «ТОР 100ЛОК»: руководство по эксплуатации. Чебоксары: ООО «Релематика», 2016. 61 с.
6. Kowalik R., Glik K., Rasolomampionona D. Travelling wave fault location in HV lines // Acta Energetica. 2011. Vol. 3. № 8. P. 5–12.
7. Traveling wave fault location in power transmission systems: an overview / G. Krzysztof [et al.] // Electrical Systems. 2011. № 7-3. P. 287–296.

## METHODS FOR DETERMINATION OF DAMAGE POINTS OF OVERHEAD LINES

*M.V. Zavarin, L.S. Araratyan, Yu.M. Pavlova*

***Abstract.** The article is devoted to the issue of determining the location of damage on overhead power lines. Modern methods of determining the place of damage and their disadvantages are considered. Recommendations for their use are given.*

***Keyword:** line damage, damage detection methods, power lines, damage detection*

Об авторах:

ЗАВАРИН Михаил Владиславович – магистрант 1-го курса кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: mvzavarin@mail.ru

АРАРАТЪЯН Любовь Сергеевна – доцент кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: liuba.araratyan@yandex.ru

ПАВЛОВА Юлия Михайловна – старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: sokolhawk98@gmail.com

About the authors:

ZAVARIN Mikhail Vladislavovich – 1<sup>st</sup> Year Master's Student of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: mvzavarin@mail.ru

ARARATYAN Lyubov Sergeevna – Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: liuba.araratyan@yandex.ru

PAVLOVA Yulia Mikhailovna – Senior Lecturer of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: sokolhawk98@gmail.com

УДК 621.311.243

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В РОССИИ И ЗА РУБЕЖОМ

*Д.И. Кузнецов, Л.С. Араратьян, Ю.М. Павлова*

© Кузнецов Д.И., Араратьян Л.С.,  
Павлова Ю.М., 2023

***Аннотация.** В работе рассмотрено применение солнечной энергии как источника электроэнергии. Проанализирован опыт зарубежных стран, исследовано развитие солнечной энергетики в России и за рубежом, а также перспективы увеличения доли энергии, полученной на солнечных электростанциях в общемировой практике в будущем.*

***Ключевые слова:** возобновляемые источники энергии, солнечная энергия, солнечная энергетика.*

Солнце – самый мощный возобновляемый источник энергии. Количество энергии, которую оно посылает на Землю за день, в несколько раз больше, чем ее мировое потребление за год. Поэтому неудивительно, что человечество старается использовать эту энергию в своих целях, в частности в тепло- и электроэнергетике, основанной на энергии Солнца. Для преобразования и использования энергии звезды используются различные способы: фотоэлементы и концентрационные станции (для производства электроэнергии); пассивная солнечная энергетика (для освещения и отопления помещений, нагрева воды и других второстепенных задач) [1].

С каждым годом солнечная энергетика все больше развивается. За последние несколько лет установленная мощность солнечных электростанций (СЭС) увеличилась в несколько раз и на момент 2018 г. составляла 510,5 ГВт. Большинство этих СЭС (общей мощностью 505 ГВт) являются станциями с прямым преобразованием солнечного излучения в электроэнергию – фотоэлектрическими (ФЭС). Только 1 % (общей мощностью 5,5 ГВт) составляют термодинамические СЭС, в которых используется

технология преобразования солнечной энергии сначала в тепловую (пар), а затем в электрическую [2].

В мировой практике первые пять мест по производству электроэнергии посредством преобразования солнечной энергии занимают Китай, США, Япония, Германия и Индия (рис. 1). Солнечная энергетика в них представлена по большей степени ФЭС, башенными СЭС и солнечной тепловой энергетикой [3].

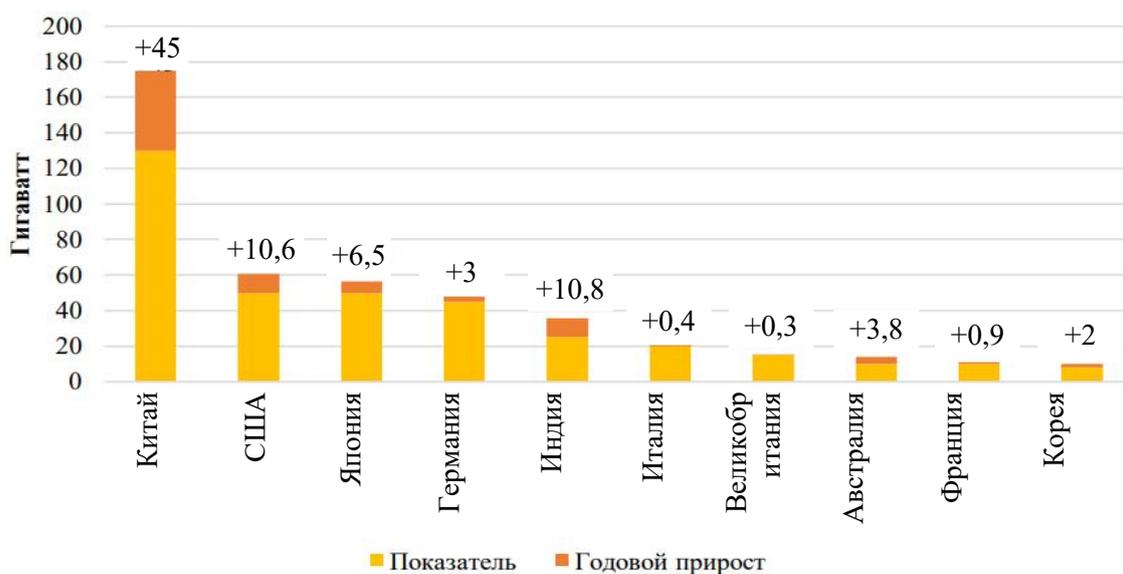


Рис. 1. Мировые лидеры по развитию солнечной энергетики [3]

Согласно отчету EPIA за 2012 г. в части установленной мощности, Европа производила около 69 % мирового объема электроэнергии за счет энергии Солнца (более 70 ГВт). В последующие годы реальный темп развития солнечной электроэнергетики значительно превысил ожидаемый: уже на 2018 г. суммарная установленная мощность всех четырех европейских стран превысила предполагаемую мощность к 2020 г. (90 и 84 ГВт соответственно). Таким образом, реальный темп развития оказался намного выше самых оптимистичных планов.

Самым быстроразвивающимся рынком возобновляемой энергии в мире на сегодняшний день является Китай (КНР). Самый большой прирост выработки электроэнергии по секторам электроэнергетики в этой стране в 2019 г. приходился на солнечный сектор и составил 26,5 % (в сравнении с 17,4 % в 2018 г.). Динамика роста этого сектора показана на рис. 2. Так, в период с 2013 по 2019 г. установленная мощность СЭС увеличилась почти в 5 раз, практически сравнявшись с такой же мощностью ветряных электростанций страны.

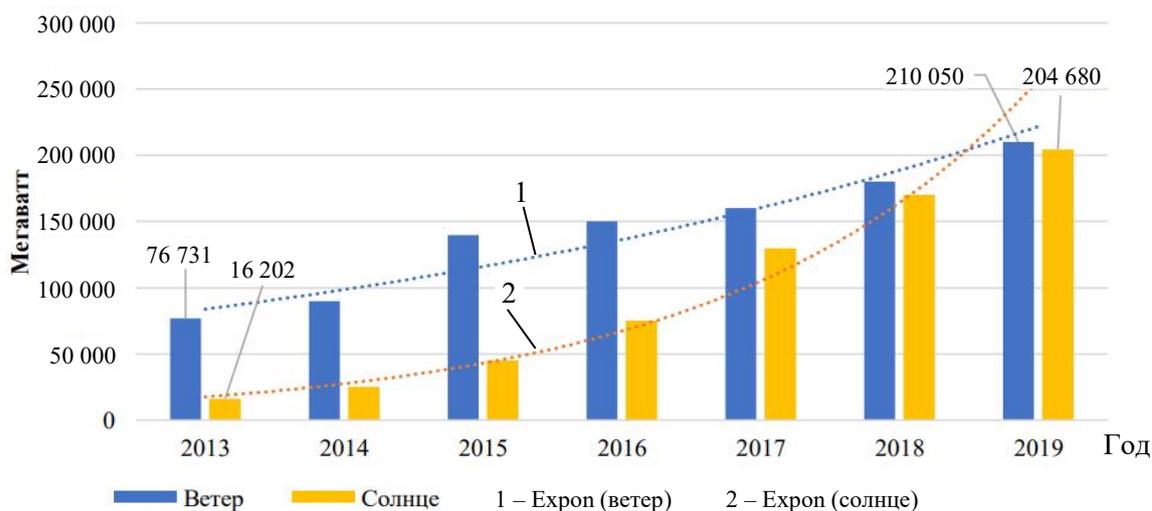


Рис. 2. Динамика роста ветряного и солнечного секторов электроэнергетики КНР [3]

Анализируя приведенные данные, можно сделать вывод, что главным фактором, влияющим на такой быстрый рост и развитие солнечной энергетики, стало резкое снижение стоимости оборудования для СЭС (фотоэлектрических модулей для солнечных панелей) в связи с переносом их производства в Китай, увеличением его объема и автоматизацией производственных процессов. Вместе с этим уменьшилась и себестоимость энергии, полученной таким способом.

Россия, в отличие от западных стран, практически не использует такие возобновляемые источники энергии, как солнечная и ветровая энергия (всего 0,2 % производства всей энергии в стране на первое полугодие 2020 г.). В первую очередь это связано с географическим положением страны – достаточно солнечного света для безубыточного производства электроэнергии можно получить лишь на небольшой части юга страны, на всей остальной территории данный вид получения энергии будет являться нецелесообразным. По данным [3], наиболее перспективными регионами являются Калмыкия, Ставропольский край, Ростовская область, Краснодарский край, Волгоградская область, Астраханская область, Оренбургская область и другие регионы на юго-западе, Алтай, Приморье, Читинская область, Бурятия и другие регионы на юго-востоке.

Однако несмотря на столь малую солнечную активность, в России все же делают попытки использования солнечной энергии. Так, в период с 2014 по 2020 г. частными компаниями и предприятиями было установлено до 100 МВт СЭС, что составило 0,04 % от всей энергосистемы страны (246 ГВт). Осуществляется также строительство крупных станций: с 2013 по 2018 г. прошли конкурсный отбор проекты общей мощностью около 2 000 МВт с планируемыми датами введения в эксплуатацию до

2022 г. К концу декабря 2018 г. было возведено несколько СЭС установленной мощностью около 550 МВт в 11 субъектах РФ, что вместе с крымскими станциями (около 300 шт.) составило практически 850 МВт, получаемых от солнечного света [4, 5].

Основными факторами, влияющими на развитие солнечной энергетики в России, являются:

климатические условия, сильно различающиеся по всей территории страны;

государственная поддержка развития данной отрасли производства энергии, которая сильно отличается от более перспективных условий стран Европы;

стоимость строительства станций, в частности стоимость их составляющих (солнечных фотоэлектрических установок), которые с каждым годом все больше дешевеют и тем самым становятся более перспективными по сравнению с традиционными преобразователями (турбинами, генераторами и т. д.);

ужесточение экологических норм, которое может произойти после возможного пересмотра Киотского протокола.

К основным плюсам солнечной энергии можно отнести производственную доступность, неисчерпаемость энергетического источника, низкую себестоимость добычи, экологическую безопасность, минимальное техническое обслуживание. Кроме того, благодаря развитию данной отрасли электроэнергетики развивается и промышленность (разрабатываются новые технологии и ведется поиск материалов с повышенными характеристиками, которые могут быть использованы и в других сферах) [6]. В то же время имеются и отрицательные моменты, поиск решения которых займет еще немало времени: невысокий КПД (всего около 20 %); дорогостоящее на данный момент оборудование; зависимость от сезонности, географического положения, времени суток и погоды; большая площадь для установки; высокая стоимость хранения избыточной энергии.

### **Библиографический список**

1. Касимова Н.С., Степанова О.А., Ермоленко М.В. Перспективы солнечной энергетики // Международный студенческий научный вестник. 2016. № 3 (часть 1). С. 32–33.

2. Бутузов В.В. Фотоэнергетика в России // СОК. 2020. № 7. С. 46–54.

3. Ширяева Ю.О. Особенности развития солнечной энергетики в России. URL: [https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/93970/1/m\\_th\\_y.o.shiryaeva\\_2020.pdf](https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/93970/1/m_th_y.o.shiryaeva_2020.pdf) (дата обращения: 20.11.2022).

4. Ланьшина Т. Несубсидируемый рынок солнечной энергетики в России: в ожидании взрывного роста. URL: <https://www.eprussia.ru/>

upload/iblock/50a/50a6a3fa1ebbe63c01344552b77f7d90.pdf (дата обращения: 12.02.2023).

5. Дегтярев К.С., Панченко В.А. Развитие и реализованные проекты солнечной энергетики в России // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2019. № 9. С. 74–79.

6. Solar energy pros and cons. URL: <https://sciencetrends.com/solar-energy-pros-cons-true-advantage-solar-panels/> (дата обращения: 20.11.2022).

## THE USE OF SOLAR ENERGY IN RUSSIA AND ABROAD

*D.I. Kuznetsov, L.S. Araratyan, Y.M. Pavlova*

*Abstract.* In this paper, the use of solar energy as a source of electricity will be considered. The experience of foreign countries, the development of solar energy in them and Russia, as well as the prospects for increasing the share of energy obtained in this way in global practice in the future will be considered.

*Keywords:* renewable energy sources, solar energy.

Об авторах:

КУЗНЕЦОВ Данила Игоревич – студент кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: [tgtu\\_kafedra\\_ese@mail.ru](mailto:tgtu_kafedra_ese@mail.ru)

АРАРАТЪЯН Любовь Сергеевна – старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: [liuba.araratyan@yandex.ru](mailto:liuba.araratyan@yandex.ru)

ПАВЛОВА Юлия Михайловна – старший преподаватель кафедры электроснабжения и электротехники, Тверской государственный технический университет. E-mail: [sokolhawk98@gmail.com](mailto:sokolhawk98@gmail.com)

About the authors:

KUZNETSOV Danila Igorevich – Student of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: [tgtu\\_kafedra\\_ese@mail.ru](mailto:tgtu_kafedra_ese@mail.ru)

ARARATYAN Lubov Sergeevna – Senior Lecturer of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: [liuba.araratyan@yandex.ru](mailto:liuba.araratyan@yandex.ru)

PAVLOVA Yulia Mikhailovna – Senior Lecturer of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University. E-mail: [sokolhawk98@gmail.com](mailto:sokolhawk98@gmail.com)

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение: фундаментальные и прикладные научно-исследовательские работы по энергоресурсосбережению на кафедре электроснабжения и электротехники Тверского государственного технического университета.....	3
--	---

### РАЗДЕЛ 1. ВЛИЯНИЕ УНИВЕРСИТЕТОВ НА ЭНЕРГОРЕСУРСОПОТРЕБЛЕНИЕ В МИРЕ

<b>А.Н. Макаров</b> Влияние университетского образования на ресурсопотребление в мире. Часть I. Образование в древних цивилизациях и первых университетах.....	9
<b>А.Н. Макаров, К.Б. Корнеев, М.С. Хрусталева</b> Влияние университетского образования на ресурсопотребление в мире. Часть II. Влияние университетов на ресурсопотребление в Западной Европе.....	17
<b>А.Н. Макаров, К.Б. Корнеев, М.С. Хрусталева</b> Влияние университетского образования на ресурсопотребление в мире. Часть III. Колонизация государств мира западноевропейскими странами и ресурсопотребление в колониальных странах.....	26
<b>А.Н. Макаров</b> Влияние университетского образования на ресурсопотребление в России. Часть I. Образование и ресурсопотребление в России в X–XVII веках.....	33
<b>А.Н. Макаров, К.Б. Корнеев, Е.П. Алисова</b> Влияние университетского образования на ресурсопотребление в России. Часть II. Влияние императора Петра I Великого на образование, ресурсопотребление в России.....	39
<b>А.Н. Макаров</b> Влияние университетов на развитие человечества и энергоресурсопотребление в мире.....	45

### РАЗДЕЛ 2. ТЕПЛООБМЕН И ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧАХ

<b>А.Н. Макаров, А.В. Крупнов, Ю.М. Павлова</b> Теплообмен в высокоомощных стотонных дуговых сталеплавильных электропечах.....	52
<b>А.Н. Макаров, А.Ю. Соколов, М.С. Хрусталева</b> Распределение потоков теплового излучения коротких дуг по ванне металла дуговых сталеплавильных электропечей.....	59

<b>А.Н. Макаров, А.В. Крупнов, Е.П. Алисова</b> Взаимосвязь электротехнологических режимов и удельного расхода электроэнергии в высокомоощных дуговых сталеплавильных электропечах.....	65
<b>А.Н. Макаров, А.В. Крупнов, В.В. Окунева</b> Взаимосвязь КПД дуг и удельного расхода электроэнергии в высокомоощных дуговых сталеплавильных электропечах.....	72
<b>А.Н. Макаров, В.В. Лебедев</b> Результаты расчета потоков тепловых излучений дуги на стены печи ДСППТ-25 и на ванну металла.....	79
<b>А.Н. Макаров, Е.П. Алисова</b> Результаты расчета потоков тепловых излучений дуги на стены и ванну металла печи ДСППТ-12.....	86
<b>Н.В. Милютин, А.Н. Макаров</b> Разработка алгоритма расчета плотности тепловых потоков от дуг на ванну металла в дуговых сталеплавильных печах с помощью программы EXCEL.....	93
<b>Н.В. Милютин, А.Н. Макаров</b> Исследование тепловых потерь на излучение от дуг в дуговой сталеплавильной печи вместимостью 90 тонн.....	100
<b>А.Н. Макаров, А.В. Крупнов, А.Ю. Соколов</b> Взаимосвязь электрического, шлакового режимов и теплообмена в высокомоощных дуговых сталеплавильных печах. Часть I. Влияние шлакового режима на тепловое излучение дуг на стены.....	104
<b>А.Н. Макаров, А.В. Крупнов, А.Ю. Соколов</b> Взаимосвязь электрического, шлакового режимов и теплообмена в высокомоощных дуговых сталеплавильных печах. Часть II. Влияние шлакового режима на тепловое излучение дуг на ванну металла.....	113

### **РАЗДЕЛ 3. ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ**

<b>М.Д. Шубин, Л.С. Араратьян, Ю.М. Павлова</b> Разработка цифровой подстанции на основе моделирующего комплекса реального времени.....	121
<b>А.А. Горев, Л.С. Араратьян, Ю.М. Павлова</b> Интеллектуальная электрическая сеть (умные сети электроснабжения).....	128
<b>А.С. Жуков, С.В. Маринова</b> Цифровые оптические трансформаторы тока для современного электросетевого комплекса.....	133

<b>А.П. Чуруткин, Л.С. Араратьян, Ю.М. Павлова</b> Новейшие технологии передачи электрической энергии по линиям постоянного тока. Мировой опыт и место России.....	141
<b>Ю.М. Павлова, Л.С. Араратьян, А.А. Горев, А.В. Павлов</b> Новые технологии беспроводного электричества.....	149
<b>А.А. Бойченко</b> Применение водорода как топлива для газовой турбины.....	155
<b>Н.С. Рыжов, А.И. Карнавский, Л.С. Араратьян</b> Перспективы развития тепловых электростанций.....	161
<b>А.А. Зуйков, А.Ю. Русин</b> Уменьшение потерь ветроколеса ветроэнергетической установки....	167
<b>А.М. Панкулинец, Л.С. Араратьян, А.В. Крупнов</b> Перспективы развития гидроэнергетики России.....	175
<b>Ф.Ф. Шайхутдинова, Л.С. Араратьян, Ю.М. Павлова</b> Информационное моделирование закрытия атомных электростанций.....	180
<b>Н.М. Ганчев, А.Ю. Русин</b> Преимущества и недостатки установки высоковольтного частотно-регулируемого привода на основных технологических насосах атомных электростанций.....	186
<b>В.В. Масленников, А.Ю. Русин</b> Влияние несинусоидальности формы кривой напряжения на качество электрической энергии.....	191
<b>А.А. Горев, А.Ю. Русин</b> Внедрение энергосберегающих технологий.....	196
<b>Н.В. Милютин, М.Н. Понятых</b> Роль шунтирующего резистора в цепях двигателя постоянного тока.....	200
<b>А.Ю. Морозов, Л.С. Араратьян, Ю.М. Павлова</b> Повышение качества электроэнергии.....	206
<b>М.В. Заварин, Л.С. Араратьян, Ю.М. Павлова</b> Методы определения мест повреждения воздушных линий.....	212
<b>Д.И. Кузнецов, Л.С. Араратьян, Ю.М. Павлова</b> Использование солнечной энергии в России и за рубежом.....	220

# **ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

*Сборник научно-практических трудов*

*Выпуск 11*

Редакторы: М.Б. Юдина, Я.А. Петрова  
Корректоры: Ю.Ф. Воробьева, Ю.А. Якушева

---

Подписано в печать 08.09.2023

Формат 60x84/16

Физ. печ. л. 14,25

Тираж 100 экз.

Усл. печ. л. 13,253

Заказ № 52

Бумага писчая

Уч.-изд. л. 12,398

С – 52

---

Редакционно-издательский центр  
Тверского государственного технического университета  
170026, г. Тверь, наб. Афанасия Никитина, 22