

# СОДЕРЖАНИЕ

---

---

Номер 1, 2024

---

---

Нам 70! 3

---

## Общие вопросы энергетики

- На пути к климатической нейтральности: выстоит ли русский лес против энергетики?  
*В. В. Клименко, А. В. Клименко, А. Г. Терешин* 5
- Переход к углеродно-нейтральной экономике: возможности и пределы, актуальные задачи  
*С. П. Филиппов* 21
- Расчет ценового поля на тепловую энергию на основе экстремальной задачи поиска оптимального потокораспределения в теплоснабжающих системах  
*В. А. Стенников, О. В. Хамисов, А. В. Пеньковский, А. А. Кравец* 41
- 

## Паротурбинные, газотурбинные, парогазовые установки и их вспомогательное оборудование

- Малоэмиссионные камеры сгорания ГТУ. Современные тренды, диагностика и оптимизация (обзор)  
*Л. М. Чикишев, Д. М. Маркович* 50
- Расчетно-экспериментальное исследование влияния интенсивности и масштаба турбулентности потока на потери в сопловой решетке  
*А. В. Грановский, Б. И. Курманов* 73
- 

## Паровые котлы, энергетическое топливо, горелочные устройства и вспомогательное оборудование котлов

- Расчетно-экспериментальное обоснование глубокой разгрузки котла Е-420-13.8-560ГМ  
*А. Н. Тугов, В. М. Супранов, Е. В. Сомова, В. А. Верещетин* 87
- 

## Тепло- и массообмен, свойства рабочих тел и материалов

- Простой способ увеличения критического теплового потока при кипении  
*А. В. Дедов, М. Д. Филиппов* 99
- 
-

# Contents

---

---

**Vol. 71, No. 1, 2024**

---

---

WE'RE 70! 3

---

## **General Energy Issues**

Towards Climate Neutrality: Will Russian Forest Stand Against Energy?  
*V. V. Klimenko, A. V. Klimenko, and A. G. Tereshin* 5

Transition to a Carbon Neutral Economy: Opportunities and Limitations, Current Challenges  
*S. P. Filippov* 21

Heat Price Field Calculation Based on the Extreme Problem of Searching  
the Optimal Load Flow in Heat-Supply Systems  
*V. A. Stennikov, O. V. Khamisov, A. V. Pen'kovskii, and A. A. Kravets* 41

---

## **Steam-Turbine, Gas-Turbine, and Combined-Cycle Power Plants and Their Auxiliary Equipment**

Low-Emission Combustion Chambers of GTU: Modern Trends, Diagnostics,  
and Optimization (Review)  
*L. M. Chikishev and D. M. Markovich* 50

Computational and Experimental Study of the Influence of the Intensity and Scale  
of Flow Turbulence on Losses in a Nozzle Grid  
*A. V. Granovsky and B. I. Kurmanov* 73

---

## **Steam Boilers, Power-Plant Fuels, Burner Units, and Boiler Auxiliary Equipment**

Numerical-and-Experimental Substantiation of Deep Unloading  
of an E-420-13.8-560GM Boiler  
*A. N. Tugov, V. M. Supranov, E. V. Somova, and V. A. Vereshchetin* 87

---

## **Heat and Mass Transfer and Properties of Working Fluids and Materials**

A Simple Method for Increasing the Boiling Critical Heat Flux  
*A. V. Dedov and M. D. Filippov* 99

---

---

## НАМ 70!

DOI: 10.56304/S0040363624010090

В январе 2024 г. исполняется 70 лет с момента выхода в свет первого номера журнала “Теплоэнергетика”. Такие круглые даты дают прекрасный повод для того, чтобы подвести итоги, оценить, как выполняются намеченные планы, определить задачи на будущее. Редколлегия журнала старается не упустить эту возможность. В последние годы это делается раз в пять лет, видимо, по образу знаменитых советских пятилеток.

Отмечая не совсем круглую дату 65 лет в 2019 г., редколлегия ставила ряд задач по развитию журнала (см. “Теплоэнергетика”, 2019, № 1). С удовлетворением можно констатировать, что они в большинстве своем выполнены. Прежде всего хотелось бы отметить, что журналу удалось преодолеть неожиданно возникшие формальные препятствия к включению его переводной версии Thermal Engineering в базу Web of Science. Это потребовало усилий и времени, но справедливость наконец возторжествовала – Thermal Engineering на законном основании с 2021 г. индексируется в Web of Science. Более того, начиная с 2022 г. у нее появился импакт-фактор (IF). И пусть его значение пока составляет довольно скромные 0.5, важен сам факт присвоения IF, что свидетельствует о полноценном представительстве журнала в Web of Science. Если учесть, что журнал уже на протяжении многих лет индексируется в базе Scopus, то есть все основания относить журнал к числу лучших отечественных изданий, входящих в обе главные международные библиографические и реферативные базы: Web of Science и Scopus.

“Теплоэнергетика” постоянно находится на лидирующих позициях среди российских научных журналов, что подтверждается рейтингом Science Index (SI) – системы, построенной на основе данных Российского индекса научного цитирования (табл. 1). В конце октября 2023 г. был обновлен рейтинг российских научных журналов по итогам 2022 г., в котором “Теплоэнергетика”

вновь заняла 1-е место по тематике “Энергетика” и 65-е в общем рейтинге, который включает 3872 периодических издания (процентиль 2).

Журнал старается идти в ногу со временем и использовать современные приемы, обеспечивающие быстроту и удобство доведения информации до авторов и читателей журнала. По желанию авторов размещаются в электронном виде дополнительные материалы к их статьям. В Российском индексе научного цитирования (РИНЦ) полностью заполнен архив номеров журнала глубиной до 1990 г. При этом статьи старше четырех лет можно свободно скачивать. Журнал использует гибридную схему, по согласованию с авторами отдельные статьи публикуются в режиме открытого доступа (Open Access), это касается статей как на русском, так и на английском языке.

Нельзя не отметить устойчивое финансовое положение журнала. В отличие от большинства академических журналов, “Теплоэнергетика” работает по принципу самокупаемости, получая средства за подписку и скачивание статей. При этом все статьи публикуются бесплатно. Никакой бюджетной поддержки журнал не имеет, хотя, конечно, если такая возможность появится, то отказываться от нее никто не будет. Нельзя не признать, что готовность организаций и отдельных ученых оплачивать подписку на журнал и скачивание статей служит еще одним подтверждением востребованности информации, содержащейся на страницах журнала, и качества представляемой научно-технической продукции.

Еще одной характеристикой, не входящий в обычный набор показателей публикационной активности издания, но от этого ничуть не теряющей своей значимости, является наполненность редакционного портфеля. “Теплоэнергетика” не может пожаловаться на недостаточное внимание со стороны потенциальных авторов. Число ста-

Таблица 1. “Теплоэнергетика” в рейтинге SI Российского индекса научного цитирования

Показатель	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.
Значение SI	9.707	10.344	9.675	10.201	10.047	9.809
Место в общем рейтинге/число изданий	75/3431	53/3662	79/3825	56/3881	73/3977	65/3874
Место в рейтинге по тематике “Энергетика”/число изданий	1/45	1/52	2/51	1/55	2/50	1/51

**Таблица 2.** Показатели публикационной активности англоязычной версии Thermal Engineering в базе Scopus в 2014–2022 гг.

Показатель	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.
SJR	0.209	0.246	0.307	0.339	0.435	0.397	0.602	0.382	0.282
CiteScore	0.19	0.40	0.60	0.90	1.20	1.50	1.90	1.50	1.50
SNIP	0.697	0.854	0.872	1.012	1.225	1.208	1.478	0.836	0.586

тей, ежегодно поступающих в редакцию, более чем в 2 раза превышает число тех статей, которые в итоге, после тщательного рецензирования и обсуждения на редколлегии, печатаются в журнале.

Семидесятилетие журнала совпадает с еще одной знаменательной датой. Ровно пятьдесят лет назад, в 1974 г., отдельные статьи журнала начали переводиться на английский язык, а с 1992 г. переводятся все статьи и ежемесячно выходят одновременно русская и английская версии “Теплоэнергетики”. Трудно переоценить важность этого события в становлении журнала, в его признании международным научным сообществом.

И все же главное достижение прошедших пяти лет — это сохранение высокого уровня публикуемых материалов, привлечение к работе в качестве авторов и рецензентов лучших отечественных специалистов в области энергетики. Ежегодно свои труды на страницах журнала представляют авторы из примерно 100 отечественных и зарубежных организаций. Среди них институты Российской академии наук (РАН), высшие учебные заведения, отраслевые научно-исследовательские организации, энергетические компании. Особенно хочется выделить вклад ученых Национального исследовательского университета “Московский энергетический институт”, которые уже на протяжении 70 лет составляют костяк авторского коллектива журнала. Подчеркнем, что с 2020 г. НИУ МЭИ официально наряду с РАН является учредителем журнала.

В год своего основания журнал получил название “Теплоэнергетика”. По-другому, видимо, и быть не могло для журнала, ориентированного на вопросы производства полезных для человека видов энергии — электрической и тепловой. В то время и в мире, и в нашей стране доминирующее значение имела тепловая генерация. Так, в 1954 г. в СССР ее доля в выработке электроэнергии составляла 93%, остальные 7% приходились на гидроэнергетику. Со временем ситуация стала меняться, хотя по-прежнему теплоэнергетика занимала и занимает до сих пор лидирующее положение. Сначала в конце 50-х годов прошлого века заявила о себе атомная энергетика. В последние 30 лет наблюдается исключительно бурное развитие возобновляемых источников энергии

(ветровые, солнечные, геотермальные и др.). Разумеется, энергетический журнал не мог не отразить эти изменения на своих страницах, и сегодня, сохраняя название, полученное при рождении, он публикует статьи по всем современным способам производства электроэнергии и тепла — тепловые, атомные и гидростанции, возобновляемые источники энергии.

Не стоит считать, что в деятельности “Теплоэнергетики” нет проблем. Они есть и их более чем достаточно. К сожалению, после устойчивого роста показателей публикационной активности журнала в базе Scopus в 2014–2020 гг. в последние два года наметился явный спад (см. табл. 2). В результате журнал опустился из второго в третий квартиль. С чем это связано, трудно понять. Одна из возможных причин — пандемия коронавируса 2019–2021 гг., которая выбила из привычного ритма работу редколлегии, переведя ее в заочный режим. Это не могло не сказаться отрицательным образом на качестве публикуемых материалов. Остается низким (примерно 10%) для международного издания участие зарубежных авторов в работе журнала, что во многом объясняется сложной геополитической обстановкой в мире. Перечень проблемных вопросов в деятельности журнала, требующих внимания, может быть продолжен, однако юбилей не самое подходящее время для их обсуждения.

Пользуясь случаем, редколлегия выражает свою признательность издателям журнала: издателю русскоязычной версии ООО “Тематическая редакция” и издателю англоязычной версии компании Pleiades Publishing, Ltd. Без их заинтересованной позиции, без их постоянной поддержки журнал вряд ли на что мог претендовать, они по праву разделяют все успехи журнала и вместе с нами переживают его неудачи.

Редакционная коллегия искренне поздравляет авторов, рецензентов и читателей журнала с очередной вехой в его славной истории. Уверены, что “Теплоэнергетика” при Вашей поддержке и впредь будет занимать лидирующее положение среди журналов энергетического профиля.

*От имени редакционной коллегии  
Главный редактор А. Клименко*

## НА ПУТИ К КЛИМАТИЧЕСКОЙ НЕЙТРАЛЬНОСТИ: ВЫСТОИТ ЛИ РУССКИЙ ЛЕС ПРОТИВ ЭНЕРГЕТИКИ?<sup>1</sup>

© 2024 г. В. В. Клименко<sup>a, b, c, \*</sup>, А. В. Клименко<sup>b</sup>, А. Г. Терешин<sup>a, c</sup>

<sup>a</sup>Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,  
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

<sup>b</sup>Национальный исследовательский технологический университет МИСиС,  
Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049 Россия

<sup>c</sup>Институт энергетических исследований РАН, Нагорная ул., д. 31, корп. 2, Москва, 117186 Россия

\*e-mail: nilgpe@mpei.ru

Поступила в редакцию 17.04.2023 г.

После доработки 15.05.2023 г.

Принята к публикации 01.06.2023 г.

Рассмотрены перспективы снижения углеродоемкости экономики России и возможности достижения климатической нейтральности народного хозяйства страны к 2060 г. На основе историко-экстраполяционного подхода к исследованию развития различных социотехнических систем и путем сравнения динамики углеродных показателей экономик России и ведущих стран мира показано, что полная компенсация антропогенных выбросов парниковых газов при поглощении их биосферой (в первую очередь, лесами) сегодня возможна скорее лишь теоретически. Условием этого является выполнение чрезвычайно амбициозных масштабных программ реформирования всех отраслей экономики России – от энергетики до лесного хозяйства. Так, в оптимистичном сценарии темпы снижения удельных показателей эмиссии парниковых газов на душу населения должны иметь максимальные, достигнутые в мире за последние 50 лет значения – 1%/год. В управлении состоянием лесов необходимо включить полную компенсацию растущих вырубок и 50%-ное сокращение потерь лесов от пожаров, являющихся в настоящее время вторым (после энергетики) источником выбросов парниковых газов в атмосферу. Наиболее вероятным представляется сценарий, в котором скорость снижения удельных выбросов парниковых газов на душу населения составляет 0.5%/год и обеспечивается умеренное возрастание поглощающей способности лесов главным образом благодаря выполнению лесоклиматических проектов и снижению пожарной эмиссии. При реализации последнего сценария нетто-эмиссия парниковых газов может составить примерно 700 Мт СО<sub>2</sub> (экв.) к 2060 г., что потребует для достижения климатической нейтральности построения национальной индустрии улавливания и захоронения углерода в беспрецедентных масштабах.

*Ключевые слова:* экономика, энергетика, лесное хозяйство, эмиссия и поглощение парниковых газов, климатическая нейтральность, историко-экстраполяционный подход, сценарии, улавливание и захоронение углерода

DOI: 10.56304/S0040363624010053

# Towards Climate Neutrality: Will Russian Forest Stand Against Energy?

V. V. Klimenko<sup>a, b, c, \*</sup>, A. V. Klimenko<sup>b</sup>, and A. G. Tereshin<sup>a, c</sup>

<sup>a</sup> National Research University Moscow Energy Institute, Moscow, 111250 Russia

<sup>b</sup> National Research Technological University MISiS, Moscow, 119049 Russia

<sup>c</sup> Energy Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117186 Russia

\*e-mail: nilgpe@mpei.ru

**Abstract**—The prospects for reducing the carbon intensity of the Russian economy and the possibility of achieving climate neutrality of the country's national economy by 2060 are considered. Based on a historical-extrapolation approach to the study of the development of various socio-technical systems and by comparing the dynamics of carbon indicators of the economies of Russia and the leading countries of the world, it is shown that full compensation of anthropogenic greenhouse emissions gases when absorbed by the biosphere (primarily forests) is today rather only theoretically possible. The condition for this is the implementation of extremely ambitious large-scale reform programs in all sectors of the Russian economy, from energy to forestry. Thus, in an optimistic scenario, the rate of reduction in specific indicators of greenhouse gas emissions per capita should have the maximum values achieved in the world over the last 50 years: 1%/year. Forest management must include full compensation for increasing deforestation and a 50% reduction in forest losses from fires, which are currently the second (after energy) source of greenhouse gas emissions into the atmosphere. The most likely scenario is one in which the rate of reduction in specific greenhouse gas emissions per capita is 0.5%/year and a moderate increase in the absorption capacity of forests is ensured, mainly due to the implementation of forest climate projects and a reduction in fire emissions. If the latter scenario is implemented, net greenhouse gas emissions could amount to approximately 700 Mt CO<sub>2</sub>(eq) by 2060, which will require the nation's carbon capture and storage industry on an unprecedented scale to achieve climate neutrality.

**Keywords:** economics, energy, forestry, greenhouse gas emissions and absorption, climate neutrality, historical extrapolation approach, scenarios, carbon capture and storage

## ПЕРЕХОД К УГЛЕРОДНО-НЕЙТРАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКЕ: ВОЗМОЖНОСТИ И ПРЕДЕЛЫ, АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ<sup>1</sup>

© 2024 г. С. П. Филиппов\*

*Институт энергетических исследований РАН, Нагорная ул., д. 31/2, Москва, 117186 Россия*

*\*e-mail: fil\_sp@mail.ru*

Поступила в редакцию 19.06.2023 г.

После доработки 12.07.2023 г.

Принята к публикации 01.08.2023 г.

Климатическая политика постепенно становится доминирующей в мире и начинает в решающей степени определять долгосрочные перспективы развития мировой экономики и энергетики. Проблема сдерживания роста температуры планеты является глобальной, поэтому сокращение выбросов парниковых газов в результате антропогенной деятельности должно осуществляться наиболее приемлемым для мировой экономики и энергетики образом. Оптимальные пути перехода стран мира к углеродно-нейтральной экономике будут существенно различаться, поскольку они имеют разную структуру экономики и обеспеченность энергетическими ресурсами. В статье рассмотрены следующие технологические направления декарбонизации экономики: интенсификация энергосбережения, включая производство, преобразование, транспортирование и потребление энергии; изменение топливной структуры в пользу низкоуглеродных топлив путем замещения угля природным газом; вытеснение ископаемых органических топлив углеродно-нейтральной биомассой; улавливание  $\text{CO}_2$  в энергетических и промышленных установках с последующим его транспортированием и захоронением; расширение использования ядерной энергии; переход на использование безуглеродных возобновляемых энергоресурсов. Для каждого из этих направлений определены потенциальные возможности их вклада в достижение экономикой углеродной нейтральности и имеющиеся ограничения на их реализацию. Исследования проведены применительно к экономике и энергетике России, являющейся одним из крупнейших потребителей и экспортеров ископаемых органических топлив в мире. Показано, что переход к углеродно-нейтральной экономике должен быть комплексным и выполняться с помощью комбинации различных технологических решений. Реализация в стране концепции “электрического мира”, в которой все базовые потребности в энергии будут удовлетворяться путем использования электроэнергии, производимой на безуглеродной основе, до 2060 г. едва ли возможна по технологическим и экономическим причинам, поэтому использование ископаемых органических топлив в этот период останется неизбежным. При этом должен быть решен вопрос с организацией улавливания и захоронения  $\text{CO}_2$ .

*Ключевые слова:* декарбонизация, углеродная нейтральность, парниковые газы, углекислый газ, улавливание и захоронение диоксида углерода, энергетика, углеродно-нейтральная экономика

**DOI:** 10.56304/S004036362401003X

# Transition to a Carbon Neutral Economy: Opportunities and Limitations, Current Challenges

S. P. Filippov\*

*Energy Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117186 Russia*

*\*e-mail: fil\_sp@mail.ru*

**Abstract**—Climate policy is gradually becoming dominant in the world and is beginning to decisively determine the long-term prospects for the development of the global economy and energy. The problem of curbing the rise in global temperature is global; therefore, reducing greenhouse gas emissions as a result of anthropogenic activities must be carried out in the most acceptable way for the global economy and energy sector. The optimal paths for countries around the world to transition to a carbon-neutral economy will vary significantly since they have different economic structures and endowments of energy resources. The article discusses the following technological directions of decarbonization of the economy: intensification of energy conservation, including production, transformation, transportation, and consumption of energy; changing the fuel structure in favor of low-carbon fuels by replacing coal with natural gas; replacing fossil fuels with carbon-neutral biomass; CO<sub>2</sub> capture in energy and industrial installations with its subsequent transportation and disposal; expanding the use of nuclear energy; and transition to the use of carbon-free renewable energy resources. For each of these areas, the potential for their contribution to achieving carbon neutrality in the economy and the existing restrictions on their implementation are identified. The research was carried out in relation to the economy and energy sector of Russia, which is one of the largest consumers and exporters of fossil organic fuels in the world. It is shown that the transition to a carbon-neutral economy must be complex and carried out through a combination of various technological solutions. The implementation of the “electric world” concept in the country, in which all basic energy needs will be met by using electricity produced on a carbon-free basis, until 2060 is hardly possible for technological and economic reasons, so the use of fossil organic fuels during this period will remain inevitable. At the same time, the issue of organizing the capture and disposal of CO<sub>2</sub> must be resolved.

*Keywords:* decarbonization, carbon neutrality, greenhouse gases, carbon dioxide, carbon dioxide capture and storage, energy, carbon neutral economy



## РАСЧЕТ ЦЕНОВОГО ПОЛЯ НА ТЕПЛОВУЮ ЭНЕРГИЮ НА ОСНОВЕ ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ ПОИСКА ОПТИМАЛЬНОГО ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В ТЕПЛОСНАБЖАЮЩИХ СИСТЕМАХ

© 2024 г. В. А. Стенников<sup>а</sup>, О. В. Хамисов<sup>а</sup>, А. В. Пеньковский<sup>а, \*</sup>, А. А. Кравец<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (СО РАН), ул. Лермонтова, д. 130, г. Иркутск, 664033 Россия

\*e-mail: penkoffsky@isem.irk.ru

Поступила в редакцию 12.03.2023 г.

После доработки 11.05.2023 г.

Принята к публикации 01.06.2023 г.

Предложен метод расчета дифференцированных цен на тепловую энергию по узлам теплоснабжающей системы (ТСС) на основе экстремальной экономической постановки задачи по поиску оптимального потокораспределения в тепловых сетях с множеством источников тепловой энергии. Данная задача сводится к нахождению минимальных суммарных затрат, связанных с производством и транспортировкой тепловой энергии, соблюдением материальных балансов в узлах тепловой сети (первый закон Кирхгофа) и ограничениями на производительности источников тепловой энергии. Решение данной задачи основано на использовании неопределенных множителей Лагранжа. Анализ двойственности исходной задачи оптимизации показал, что двойственные переменные (множители Лагранжа) при балансовых ограничениях представляют собой не что иное, как узловые цены на тепловую энергию, а полученное в вычислительном процессе оптимальное потокораспределение в тепловой сети позволяет сформировать ценовое поле по системе в целом. При этом показано, что цены на тепловую энергию от источников тепла до конечных потребителей растут в направлении установленного оптимального потокораспределения в тепловой сети. При таком подходе к решению задачи можно также определить оптимальные зоны действия и уровни загрузок источников тепла с учетом их затратных характеристик и заданных физико-технических и экономических показателей тепловой сети. Полученные в результате расчетов узловые цены по своей экономической сущности являются маргинальными, т.е. ценами, основанными на вычислении предельно низких и предельно высоких затрат на производство и транспортировку дополнительной единицы тепловой энергии.

*Ключевые слова:* теплоснабжающие системы, задача оптимизации, оптимальное потокораспределение, неопределенные множители Лагранжа, узловые цены

DOI: 10.56304/S0040363624010077

# Heat Price Field Calculation Based on the Extreme Problem of Searching the Optimal Load Flow in Heat-Supply Systems

V. A. Stennikov<sup>a</sup>, O. V. Khamisov<sup>a</sup>, A. V. Pen'kovskii<sup>a</sup>, \*, and A. A. Kravets<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Melentyev Institute of Energy System, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 664033 Russia*

*\*e-mail: penkoffsky@isem.irk.ru*

**Abstract**—The article proposes a method for calculating differentiated prices for heat at the nodes of a heat-supply system (HSS) based on the extreme economic formulation of the problem of searching for the optimal load flow in heat networks containing several heat sources. The problem boils down to finding the minimal total costs associated with heat generation and transportation, maintaining of material balances at heat network nodes (Kirchhoff's first law), and constraints imposed on the heat source capacities. The problem is solved on the basis of Lagrange's method of undetermined multipliers. An analysis of the initial optimization problem duality has shown that the dual variables (Lagrange's multipliers) in balance constraints are nothing but nodal prices for heat, and the optimal load flow in a heat network obtained in the calculation process makes it possible to form the price field for the system as a whole. It is also shown that the prices for heat from the heat sources to end consumers increase in the direction of the steady-state optimal load flow in the heat network. With such an approach to solving the problem, it is also possible to determine the optimal action zones and levels of loading the heat sources taking into account their cost characteristics and the specified heat network's physical, technical, and economic indicators. The nodal prices obtained from the calculations are in their economic essence marginal ones, i.e., prices based on calculating the limit low and limit high costs for generation and transportation of an additional unit of heat.

*Keywords:* heat-supply systems, optimization problem, optimal load flow, Lagrange's undetermined multipliers, nodal prices

---

---

**ПАРОТУРБИННЫЕ, ГАЗОТУРБИННЫЕ,  
ПАРОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ  
И ИХ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ**

---

---

**МАЛОЭМИССИОННЫЕ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТУ.  
СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕНДЫ, ДИАГНОСТИКА И ОПТИМИЗАЦИЯ (ОБЗОР)<sup>1</sup>**

© 2024 г. Л. М. Чикишев<sup>a, b, \*</sup>, Д. М. Маркович<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
просп. Академика Лаврентьева, д. 1, г. Новосибирск, 630090 Россия

<sup>b</sup>Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова, д. 2, г. Новосибирск, 630090 Россия

\*e-mail: [chlm@itp.nsc.ru](mailto:chlm@itp.nsc.ru)

Поступила в редакцию 26.04.2023 г.

После доработки 21.08.2023 г.

Принята к публикации 30.08.2023 г.

Приведен краткий обзор конструкций малоэмиссионных камер сгорания газотурбинного типа на примере авиационных двигательных установок. Наиболее перспективная технология, способствующая снижению выбросов вредных веществ, – это сжигание обедненной предварительно перемешанной топливовоздушной смеси, однако ее применение ограничено нестационарными явлениями, оказывающими существенное влияние на стабилизацию пламени и приводящими к возникновению термоакустического резонанса. В настоящее время для двигателей большой мощности данная технология реализована только двумя компаниями – General Electric и Rolls-Royce. Работы по созданию двигателя большой тяги в России ведутся в АО “ОДК-Авиадвигатель” в рамках программы ПД-35. Задачи разработки малоэмиссионных камер сгорания для газоперекачивающих агрегатов успешно решаются в АО “ОДК-Авиадвигатель” совместно с ЦИАМ им. П.И. Баранова (ГТУ-16П). Одним из ключевых направлений развития энергетики является также разработка газовых турбин большой мощности классов ГТЭ-65, ГТЭ-170 (ПАО “Силовые машины”), ГТД-110М (ОДК “Сатурн”), и здесь необходимо решать те же проблемы, что и для газотурбинных двигателей. Наиболее актуальными проблемами являются прогнозирование возникновения термоакустических автоколебаний газа в камерах сгорания и управление ими с помощью обратной связи как в номинальных режимах, так и в режимах малой мощности. Представлен обзор технологий с использованием малоэмиссионных камер сгорания, рассмотрено современное состояние экспериментальных исследований структуры течения и процессов переноса в модельных камерах сгорания. Приведены примеры передовых экспериментальных стендов, моделирующих течение и горение в камерах сгорания газотурбинного типа, указаны необходимые режимные параметры и используемые технические решения, позволяющие эффективно проводить измерения современными методами оптической диагностики.

*Ключевые слова:* камера сгорания, панорамные методы, горение, газотурбинная установка, малоэмиссионные камеры сгорания, оптическая диагностика процессов горения, авиационные двигательные установки

**DOI:** 10.56304/S0040363624010016

# Low-Emission Combustion Chambers of GTU: Modern Trends, Diagnostics, and Optimization (Review)

L. M. Chikishev<sup>a, b, \*</sup> and D. M. Markovich<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia*

<sup>b</sup> *Novosibirsk State University, Novosibirsk, 630090 Russia*

*\*e-mail: chlm@itp.nsc.ru*

**Abstract**—A brief overview of the designs of low-emission gas turbine-type combustion chambers is given using the example of aircraft propulsion systems. The most promising technology that helps reduce emissions of harmful substances is the combustion of a lean premixed fuel-air mixture, but its use is limited by nonstationary phenomena that have a significant impact on flame stabilization and lead to the occurrence of thermoacoustic resonance. Currently, this technology is implemented for high-power engines by only two companies: General Electric and Rolls-Royce. Work on creating a high-thrust engine in Russia is being carried out at AO UEC-Aviadvigatel within the framework of the PD-35 program. The problems of developing low-emission combustion chambers for gas pumping units are successfully solved at AO UEC-Aviadvigatel together with the Baranov Central Institute of Aviation Motor Development (GTU-16P). One of the key areas of energy development is also the development of high-power gas turbines of the classes GTE-65, GTE-170 (PAO Power Machines), GTD-110M (ODK Saturn), and here it is necessary to solve the same problems as for gas turbine engines. The most pressing problems are predicting the occurrence of thermoacoustic self-oscillations of gas in combustion chambers and controlling them using feedback both in nominal modes and in low-power modes. A review of technologies using low-emission combustion chambers is presented, and the current state of experimental studies of the flow structure and transfer processes in model combustion chambers is considered. Examples of advanced experimental stands that simulate flow and combustion in gas turbine-type combustion chambers are given and the necessary operating parameters and the technical solutions used are indicated that allow efficient measurements using modern optical diagnostic methods.

*Keywords:* combustion chamber, panoramic methods, combustion, gas turbine unit, low-emission combustion chambers, optical diagnostics of combustion processes, aircraft propulsion systems

---

---

**ПАРОТУРБИННЫЕ, ГАЗОТУРБИННЫЕ,  
ПАРОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ  
И ИХ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ**

---

---

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ  
ИНТЕНСИВНОСТИ И МАСШТАБА ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПОТОКА  
НА ПОТЕРИ В СОПЛОВОЙ РЕШЕТКЕ**

© 2024 г. А. В. Грановский<sup>а</sup>, \*, Б. И. Курманов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>*Опытное конструкторское бюро им. А. Люльки, ул. Касаткина, д. 13, Москва, 129301 Россия*

<sup>\*</sup>*e-mail: andrey.granovskiy@yandex.ru*

Поступила в редакцию 26.05.2023 г.

После доработки 11.07.2023 г.

Принята к публикации 01.08.2023 г.

Несмотря на развитие экспериментальных и численных методов исследования воздействия турбулентности на структуру потока и газодинамическую эффективность турбинных решеток, возникает много вопросов при проектировании и совершенствовании лопаточных аппаратов высокотемпературных газовых турбин. Довольно сложно провести надежные измерения параметров потока или численные исследования для реальных условий работы турбомашин, когда диапазон изменения интенсивности и масштабов турбулентности в потоке трудно предсказуем. Поэтому для приближения к пониманию, как более адекватно учитывать при проектировании решеток турбины влияние таких параметров, как интенсивность и масштаб турбулентности, было проведено расчетное исследование сопловой решетки газовой турбины, которое опиралось на ряд экспериментальных результатов, полученных в Центральном институте авиационного моторостроения. Для оценки влияния отмеченных характеристик турбулентности на структуру потока в решетке были выполнены параметрические исследования с заданием различных значений интенсивности и масштабов турбулентности. В работе на основе экспериментальных данных, полученных как при использовании различных турбулизаторов, так и без них, анализируется влияние интенсивности и масштаба турбулентности на изменение структуры потока и профильных потерь в сопловой решетке в диапазоне значений приведенной (адиабатической) скорости на выходе из решетки  $\lambda_{2ад} = 0.55–0.95$ . Расчетные исследования проводились с помощью программного комплекса 2D NS для интенсивности турбулентности на входе в сопловую решетку  $Tu = 0.2–10\%$  и при разных масштабах турбулентности.

*Ключевые слова:* сопловая решетка, структура потока, профильные потери, турбулизатор, приведенная скорость, интенсивность турбулентности, масштаб турбулентности, газовая турбина

**DOI:** 10.56304/S0040363624010041

# Computational and Experimental Study of the Influence of the Intensity and Scale of Flow Turbulence on Losses in a Nozzle Grid

A. V. Granovsky<sup>a, \*</sup> and B. I. Kurmanov<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Lyulki Experimental Design Bureau, Moscow, 129301 Russia

\*e-mail: andrey.granovskiy@yandex.ru

**Abstract**—Despite the development of experimental and numerical methods for studying the effect of turbulence on the flow structure and gas-dynamic efficiency of turbine cascades, many questions arise when designing and improving the blade apparatus of high-temperature gas turbines. It is quite difficult to conduct reliable flow measurements or numerical studies for real-life turbomachinery operating conditions, where the range of changes in the intensity and scale of turbulence in the flow is difficult to predict. Therefore, to get closer to understanding how to more adequately take into account the influence of such parameters as the intensity and scale of turbulence when designing turbine arrays, a computational study of the gas turbine nozzle array was carried out, which was based on a number of experimental results obtained at the Central Institute of Aviation Engine Engineering. To assess the influence of the noted turbulence characteristics on the structure of the flow in the lattice, parametric studies were performed with different intensity values and scales of turbulence specified. In this work, based on experimental data obtained both with and without the use of various turbulators, the influence of the intensity and scale of turbulence on changes in the flow structure and profile losses in the nozzle array is analyzed in the range of values of the reduced (adiabatic) velocity at the exit from the array  $\lambda_{2ad} = 0.55\text{--}0.95$ . Computational studies were carried out using the 2D NS software package for the intensity of turbulence at the entrance to the nozzle array  $Tu = 0.2\text{--}10\%$  and at different scales of turbulence.

*Keywords:* nozzle array, flow structure, profile losses, turbulator, superficial speed, turbulence intensity, turbulence scale, gas turbine

---

---

**ПАРОВЫЕ КОТЛЫ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО,  
ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА  
И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ КОТЛОВ**

---

---

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ  
ГЛУБОКОЙ РАЗГРУЗКИ КОТЛА Е-420-13.8-560ГМ**

© 2024 г. А. Н. Тугов<sup>а</sup>, \*, В. М. Супранов<sup>б</sup>, Е. В. Сомова<sup>а</sup>, В. А. Верещетин<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Всероссийский теплотехнический институт, Автозаводская ул., д. 14, Москва, 115280 Россия

<sup>б</sup>Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,  
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

\*e-mail: ANTugov@vti.ru

Поступила в редакцию 17.05.2023 г.

После доработки 15.06.2023 г.

Принята к публикации 27.06.2023 г.

Одна из основных характеристик маневренности энергетического оборудования – уменьшение нагрузки до минимально допустимого уровня. Способность энергооборудования работать в переменном режиме (с разгрузками в ночное время) позволяет ему участвовать в регулировании частоты и мощности в энергосистеме. При этом важно отметить, что работа оборудования на малых нагрузках не должна снижать его эксплуатационные показатели. В частности, для барабанных котлов необходимо, чтобы во всем рабочем диапазоне нагрузок поддерживались требуемые параметры пара и обеспечивалась надежность циркуляции рабочей среды в испарительных экранах. В ходе расчетно-экспериментальных исследований было обосновано снижение минимально допустимой паровой нагрузки типового котла Е-420-13.8-560ГМ с 210 до 150 т/ч. Тепловые расчеты, проведенные с использованием программы Boiler Designer, показали, что при более низкой нагрузке обеспечить требуемую температуру перегрева пара (560°С) не представляется возможным. В результате натурных испытаний действующего котла было установлено, что при нагрузках менее 150 т/ч возникают сложности с регулированием расхода топлива и наблюдаются различные нарушения топочного процесса. Расчеты и экспериментальные замеры, выполненные с применением расходомерных трубок, установленных в топочных экранах, показали, что циркуляция среды в испарительных экранах устойчива даже при снижении нагрузки до 110 т/ч. Отмечается, что сейчас в эксплуатации находятся более 100 котлов Е-420-13.8-560ГМ, претерпевших конструктивные изменения в процессе длительной работы (более 40 лет). Следовательно, минимальная паровая нагрузка должна быть уточнена только после проведения дополнительных исследований для каждого котла этого типа.

*Ключевые слова:* котел, паропроизводительность, минимальная нагрузка, тепловые расчеты, циркуляция, теплотехнические испытания, пароперегреватель, расход топлива, коэффициент неравномерности тепловосприятия

**DOI:** 10.56304/S0040363624010089

# Numerical-and-Experimental Substantiation of Deep Unloading of an E-420-13.8-560GM Boiler

A. N. Tugov<sup>a, \*</sup>, V. M. Supranov<sup>b</sup>, E. V. Somova<sup>a</sup>, and V. A. Vereshchetin<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *All-Russia Thermal Engineering Institute, Moscow, 115280 Russia*

<sup>b</sup> *National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia*

*\*e-mail: ANTugov@vti.ru*

**Abstract**—One of the main characteristics of the maneuverability of power equipment is whether the load may be reduced to the minimum allowable level. The ability of power equipment to operate in a variable regime (with unloading during night time) enables it to participate in the control of frequency and power in the power system. It is important to note that low-load operation of the equipment should not make its performance poorer. In particular, for drum boilers, the required steam conditions and reliable circulation of the working fluid in the evaporation waterwalls should be maintained in the entire operating load range. The numerical-and-experimental studies have substantiated the possibility to reduce the minimum allowable steam load of a typical E-420-13.8-560GM boiler from 210 to 150 t/h. According to the results of thermal design calculations by the Boiler-Designer code, the required steam superheat temperature (560°C) cannot be attained at lower loads. Field tests of an operating boiler have revealed that difficulties with fuel flow control and failures of the furnace's combustion process arise at loads below 150 t/h. Calculations and experimental measurements performed using flow measuring tubes installed in the furnace waterwalls have demonstrated that the fluid circulation of a fluid in the evaporation water walls remains even on a load decrease to 110 t/h. It is pointed out that more than 100 E-420-13.8-560GM boilers, whose design was modified during long-term operation (for more than 40 years), are operating now. Therefore, the minimum steam load should be finalized only after additional studies for each boiler of this type.

*Keywords:* boiler, steam capacity, minimum load, circulation, thermal engineering tests, superheater, fuel flow, heat absorption nonuniformity factor



---

---

**ТЕПЛО- И МАССООБМЕН,  
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ**

---

---

**ПРОСТОЙ СПОСОБ УВЕЛИЧЕНИЯ КРИТИЧЕСКОГО ТЕПЛООВОГО  
ПОТОКА ПРИ КИПЕНИИ<sup>1</sup>**

© 2024 г. А. В. Дедов<sup>а</sup>, М. Д. Филиппов<sup>а</sup>, \*

<sup>а</sup>Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,  
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

\*e-mail: [filippovmd@mpei.ru](mailto:filippovmd@mpei.ru)

Поступила в редакцию 14.07.2023 г.

После доработки 22.08.2023 г.

Принята к публикации 30.08.2023 г.

Работа посвящена исследованию возможности увеличения критического теплового потока  $q_{кр}$  при кипении за счет использования поверхностей, состоящих из участков с разной теплопроводностью. Представлены результаты экспериментов по исследованию теплообмена при кипении насыщенной диэлектрической жидкости метоксинонафторбутан (Noves 7100) в большом объеме на биметаллических поверхностях. Исследования выполнены для биметаллических образцов, а также для образцов из меди и нержавеющей стали 08X18H10T в диапазоне давлений 0.1–0.4 МПа. Приведено описание экспериментальной установки и используемых методик. Получены кривые кипения для каждого образца во всем представленном диапазоне давлений жидкости с шагом 0.1 МПа, приведены таблицы значений критического теплового потока. Показано влияние давления жидкости на относительное увеличение  $q_{кр}$  для биметаллических образцов. Выполнено сравнение значений  $q_{кр}$ , полученных на всех образцах, показано увеличение  $q_{кр}$  на биметаллических поверхностях до 20%. Выполнен краткий обзор проведенных ранее исследований, представлены экспериментальные данные других авторов о теплообмене при кипении на поверхностях с модулированной теплопроводностью и при кипении Noves 7100, в том числе на образцах с модифицированной поверхностью теплообмена. Представлено сопоставление полученных результатов с немногочисленными данными других авторов. Выполнено численное моделирование температурного поля в биметаллическом образце, представлено распределение температуры по теплообменной поверхности. Причиной увеличения  $q_{кр}$  является неизотермичность поверхности теплообмена, приводящая к регуляризации процесса кипения.

*Ключевые слова:* кипение, биметаллический образец, критический тепловой поток, кривая кипения, насыщенная жидкость, модифицированная поверхность теплообмена, модулированная теплопроводность

**DOI:** 10.56304/S0040363624010028

# A Simple Method for Increasing the Boiling Critical Heat Flux

A. V. Dedov<sup>a</sup> and M. D. Filippov<sup>a, \*</sup>

<sup>a</sup> National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia

\*e-mail: filippovmd@mpei.ru

**Abstract**—The article considers a study of the possibility to increase the boiling critical heat flux  $q_{cr}$  through the use of surfaces consisting of areas with different heat conductivity. The results of experiments on studying pool boiling heat transfer for saturated dielectric fluid methoxynonafluorobutane (Novec 7100) on bimetallic surfaces are presented. The studies were carried out for bimetallic samples and also for samples made of copper and grade 08Kh18N10T stainless steel in the pressure range 0.1–0.4 MPa. A description of the experimental setup and the procedures used is given. The boiling curves for each sample in the entire presented range of fluid pressures with a step of 0.1 MPa are obtained, and the tables of critical heat-flux values are given. The effect that the liquid pressure has on the relative increase of  $q_{cr}$  for bimetallic samples is shown. The values of  $q_{cr}$  obtained on all samples are compared with one another, and the increase of  $q_{cr}$  on bimetallic surfaces by up to 20% is shown. The previously performed studies are briefly reviewed, and the experimental data obtained by other researchers on boiling heat transfer on surfaces with modulated heat conductivity and for boiling of Novec 7100 fluid are presented, including that on samples with a modified heat-transfer surface. The obtained results are compared with rather few data of other researchers. The temperature field in a bimetallic sample is numerically simulated, and the temperature distribution over the heat-transfer surface is presented. The growth of  $q_{cr}$  is due to nonisothermal properties of the heat-transfer surface, which causes the boiling to become regularized.

**Keywords:** boiling, bimetallic sample, critical heat flux, boiling curve, saturated fluid, modified heat-transfer surface, modulated heat conductivity