

# СОДЕРЖАНИЕ

---

---

Номер 6, 2023

---

---

## Возобновляемые источники энергии

Исследование влияния климатической изменчивости на работу ветроэнергетических установок на территории России

*Е. В. Федотова, В. В. Клименко, Ю. А. Козлова*

3

---

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

Парогазовые установки с внутрицикловой газификацией: история, современное состояние и перспективы развития (обзор)

*В. А. Баторшин, С. И. Сучков, А. Н. Тугов*

26

Исследования эрозионного износа лопаточного аппарата осевых турбокомпрессоров (обзор)

*В. Л. Блинов, И. С. Зубков, С. В. Богданец, О. В. Комаров, Г. А. Дерябин*

41

Результаты исследования регулирующего клапана с обратным подводом пара

*В. Г. Грибин, О. М. Митрохова, А. В. Шерстнева, П. М. Нестеров*

56

---

## Водоподготовка и водно-химический режим

Оценка влияния гидрокарбонатов на рН и концентрации аммиака в условиях ухудшения качества питательной воды

*О. В. Егошина, С. К. Звонарева, А. О. Иванова*

67

Импортозамещающие технологии водно-химического режима на основе аминокислотсодержащих реагентов для котлов ПГУ

*Б. М. Ларин, С. Ю. Сулов, А. В. Кирилина,  
В. В. Козловский, А. А. Зидиханова*

74

Расчетные методы на основе измерений удельной электрической проводимости и рН в системах химического контроля водного теплоносителя

*А. Б. Ларин, С. В. Кует, К. В. Зотова, Е. Г. Ухалова*

82

---

---

# Contents

---

---

**Vol. 70, No. 6, 2023**

---

---

## **Renewable Energy Sources**

Study of the Influence of Climate Variability on the Operation of Wind Generation on the Territory of Russia

*E. V. Fedotova, V. V. Klimenko, and Yu. A. Kozlova*

3

---

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

Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) Units: History, State-of-the Art, Development Prospects (Review)

*V. A. Batorshin, S. I. Suchkov, and A. N. Tugov*

26

Studies of Erosive Wear of the Blading in Axial Compressors of Gas Turbines (Review)

*V. L. Blinov, I. S. Zubkov, S. V. Bogdanets, O. V. Komarov, and G. A. Deryabin*

41

Results from the Study of a Control Valve with Reverse Steam Supply

*V. G. Gribin, O. M. Mitrokhov, A. V. Sherstneva, and P. M. Nesterov*

56

---

## **Water Treatment and Water Chemistry**

Estimation of Hydrocarbonates' Effect on Ammonia Concentration and pH in Conditions of Feed-Water Quality Deterioration

*O. V. Yegoshina, S. K. Zvonareva, and A. O. Ivanova*

67

Import Substituting Water-Chemistry Technologies on the Basis of Amine-Containing Reagents for Combined-Cycle Power Plant Steam Generators

*B. M. Larin, S. Yu. Suslov, A. V. Kirilina, V. V. Kozlovskii, and A. A. Zidekhanova*

74

Prediction Methods Based on Electrical Conductivity and pH Measurements in Water Coolant Chemical-Monitoring Systems

*A. B. Larin, S. V. Kiet, K. V. Zotova, and E. G. Ukhalova*

82

---

---

---

---

**ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ  
ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ**

---

---

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КЛИМАТИЧЕСКОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ  
НА РАБОТУ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК  
НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ<sup>1, 2</sup>**

© 2023 г. **Е. В. Федотова<sup>a, b, \*</sup>, В. В. Клименко<sup>a, b</sup>, Ю. А. Козлова<sup>a, b</sup>**

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

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

<sup>\*</sup>*e-mail: e.v.kasilova@gmail.com*

Поступила в редакцию 01.07.2022 г.

После доработки 24.11.2022 г.

Принята к публикации 23.12.2022 г.

Работа посвящена исследованию особенностей динамики скорости ветра в регионах России, в которых сосредоточены существующие и перспективные объекты ветровой энергетики. Для расчетов был использован массив данных реанализа последнего поколения ERA5 для периода 1950–2021 гг. Проведен анализ синхронности изменения скорости ветра на кросс-континентальных масштабах Северной Евразии. Показано, что характерный размер области синхронного изменения скорости ветра составляет сотни километров, при этом на тех территориях России, на которых в основном сосредоточена вводимая ветровая генерация, можно найти локации с несогласованным изменением скорости ветра. Выполнено эмпирическое исследование показателей работы ветроэнергетической установки (ВЭУ) в различных временных масштабах: от почасового до мультидекадного. Показано, что характерная изменчивость среднегодового коэффициента использования установленной мощности (КИУМ) ВЭУ составляет 10–20%. Изменения экстремальных значений КИУМ во всем рассмотренном периоде при этом оказываются в 2–3 раза больше. Осреднение по территории нивелирует эту величину до 10% в случае характерных значений и до 25–35% для экстремальных. Предложен коэффициент, позволяющий оценить суточную неравномерность выработки электроэнергии ВЭУ и дополнительный резерв мощности, который потребуется на протяжении выбранных суток, чтобы нивелировать влияние колебаний мощности ветроустановки. Показано, что на протяжении суток для ветроустановки характерны высокие значения коэффициента неравномерности, что с учетом специфики энергосистем на определенной территории означает повышение потребности в регулировочном резерве. Осреднение по всей территории каждого из рассмотренных регионов позволяет незначительно повысить “гарантированную” выработку ВЭУ и снизить ее суточную неравномерность. При этом выбор локаций с минимальными взаимными корреляциями скорости ветра оказывается для снижения суточной неравномерности практически столь же действенным, что и осреднение по обширной территории. Идентифицированы задачи, решение которых позволит упростить интеграцию ветровой генерации в энергосистемы России за счет минимизации рисков для надежности электроснабжения и оптимизации использования доступных возможностей повышения ее гибкости.

*Ключевые слова:* ветроэнергетика, изменение и изменчивость климата, скорость ветра, климатические сценарии, надежность электроснабжения, коэффициент использования установленной мощности

**DOI:** 10.56304/S0040363623060048

# Study of the Influence of Climate Variability on the Operation of Wind Generation on the Territory of Russia

E. V. Fedotova<sup>a, b, \*</sup>, V. V. Klimenko<sup>a, b</sup>, and Yu. A. Kozlova<sup>a, b</sup>

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

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

\*e-mail: evkasilova@gmail.com

**Abstract**—The work is devoted to studying the features of the wind-speed dynamics in the regions of Russia in which wind-energy facilities are concentrated. For calculations, the latest generation reanalysis data set ERA5 for the period 1950–2021 was used. An analysis of the synchronism of wind-speed changes on the cross-continental scales of Northern Eurasia has been carried out. It is shown that the characteristic size of the area of synchronous change in wind speed is hundreds of kilometers, while one can find locations with an inconsistent change in wind speed in those territories of Russia where the input wind generation is mainly concentrated. An empirical study of the performance of a wind power plant (WPP) has been carried out on various time scales: from hourly to multidecade. It is shown that the characteristic variability of the average annual installed capacity utilization factor (ICUF) of wind turbines is 10–20%. In this case, the extreme values of the ICUF in the entire considered period turn out to be two to three times higher. Averaging over the territory levels this value down to 10% in the case of typical values and up to 25–35% for extreme ones. A coefficient is proposed to estimate the daily unevenness of wind turbine power generation and the additional power reserve that will be required during the selected day in order to level the influence of wind turbine power fluctuations. It is shown that the wind turbine is characterized during the day by high values of the coefficient of nonuniformity, which, taking into account the specifics of power systems in a certain area, means an increase in the need for an adjustment reserve. Averaging over the entire territory of each of the considered regions makes it possible to slightly increase the “guaranteed” generation of wind turbines and reduce its daily nonuniformity. At the same time, the choice of locations with minimal cross-correlations of the wind speed turns out to be almost as effective for reducing the daily nonuniformity as averaging over a large area. Tasks are identified, the solution of which will make it possible to simplify the integration of wind generation into the power systems of Russia by minimizing risks for the reliability of power supply and optimizing the use of available opportunities to increase its flexibility.

*Keywords:* wind energy, climate change and variability, wind speed, climate scenarios, reliability of power supply, installed capacity utilization factor

---

---

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

---

---

**ПАРОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ С ВНУТРИЦИКЛОВОЙ ГАЗИФИКАЦИЕЙ:  
ИСТОРИЯ, СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ  
И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ (ОБЗОР)**

© 2023 г. В. А. Баторшин<sup>а</sup>, \*, С. И. Сучков<sup>а</sup>, А. Н. Тугов<sup>а</sup>

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

\*e-mail: VABatorshin@vti.ru

Поступила в редакцию 03.11.2022 г.

После доработки 06.12.2022 г.

Принята к публикации 23.12.2022 г.

Парогазовые установки с внутрицикловой газификацией (ПГУ с ВЦГ), в которых используются твердые виды топлива (уголь, нефтяной кокс и др.) для выработки электроэнергии на основе комбинированного цикла, развиваются уже около полувека. В настоящее время наибольший интерес к ПГУ с ВЦГ проявляют страны Азиатского региона. В Японии введены в эксплуатацию два крупных энергоблока ПГУ с ВЦГ – на ТЭС Nakoso и ТЭС Hirano; кроме того, успешно продвигается проект Osaki CoolGen. Китайская Народная Республика и Республика Корея также совершенствуют свои проекты ПГУ с ВЦГ. Благодаря разработкам более эффективных технологий очистки генераторного газа и применению газотурбинных установок следующего поколения на новых ПГУ с ВЦГ удалось достичь низких показателей выбросов вредных веществ и повысить КПД до 48%. В XXI в. возрос интерес к ПГУ с ВЦГ вследствие потенциальной возможности с помощью входящего в их состав оборудования улавливать CO<sub>2</sub>. Помимо отмеченных преимуществ парогазовые установки с внутрицикловой газификацией имеют и недостатки, самый существенный из которых – высокая стоимость. По этой причине, несмотря на большое количество планировавшихся к реализации в 2000-х годах проектов с участием ПГУ с ВЦГ, значительная их часть была впоследствии отменена, а в настоящее время постепенно выводятся из эксплуатации установки, построенные в 90-х годах. Перспективное направление для ПГУ с ВЦГ – производство водорода для его дальнейшего использования в топливных элементах с одновременным улавливанием CO<sub>2</sub>. Уже применяемая на некоторых объектах технология полигенерации, благодаря выработке и отпуску потребителю не только электроэнергии, но и побочных товарных продуктов газификации, также позволит решить экономические проблемы ПГУ с ВЦГ.

*Ключевые слова:* твердое топливо, внутрицикловая газификация, парогазовая установка, эффективность, капитальные затраты, удельная стоимость, надежность, топливный элемент, полигенерация, улавливание CO<sub>2</sub>

DOI: 10.56304/S0040363623060012

# **Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) Units: History, State-of-the Art, Development Prospects (Review)**

**V. A. Batorshin<sup>a, \*</sup>, S. I. Suchkov<sup>a</sup>, and A. N. Tugov<sup>a</sup>**

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

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

**Abstract**—Integrated gasification combined-cycle (IGCC) units, which use solid fuels (coal, petroleum coke, etc.) for combined-cycle power generation, have been under development for approximately half a century. At present, the countries of the Asian region show the greatest interest in this type of power plants. Two large IGCC power units entered into commercial operation at Nakoso and Hirono thermal power plants (TPPs) in Japan; in addition, the Osaki CoolGen project is advancing greatly. The People's Republic of China and the Republic of Korea are also improving their IGCC projects. Development of more efficient technologies for generator gas cleaning and application of the next generation of gas-turbine units (GTUs) at new IGCC units have cut down harmful emissions and increased the efficiency up to 48%. The 21<sup>st</sup> century has brought increased interest in IGCC units due to the ability of their equipment to capture CO<sub>2</sub>. Besides the above-mentioned advantages, IGCC units also have disadvantages, the biggest of which is their high cost. That is why, despite many IGCC projects to be deployed in the 2000s, most of these projects were subsequently canceled, and the plants built in the 1990s are being gradually decommissioned. The promising direction for future application of IGCC units is the production of hydrogen for fuel cells with simultaneous CO<sub>2</sub> capture. The poly-generation technology already used at some facilities, which enable the generation and delivery to the consumer of not only electricity but also gasification by-products, will also render support to the solution of the economic problems of IGCC units.

*Keywords:* solid fuel, integrated gasification, combined-cycle unit, effectiveness, capital expenditures, specific cost, reliability, fuel cell, CO<sub>2</sub> capture

---

---

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

---

---

**ИССЛЕДОВАНИЯ ЭРОЗИОННОГО ИЗНОСА ЛОПАТОЧНОГО АППАРАТА  
ОСЕВЫХ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ (ОБЗОР)<sup>1</sup>**

© 2023 г. **В. Л. Блинов<sup>а</sup>\*, И. С. Зубков<sup>а</sup>, С. В. Богданец<sup>а</sup>, О. В. Комаров<sup>а</sup>, Г. А. Дерябин<sup>а</sup>**

*<sup>а</sup>Уральский федеральный университет, ул. Мира, д. 19, г. Екатеринбург, 620002 Россия*

*\*e-mail: vithomukyn@mail.ru*

Поступила в редакцию 13.09.2022 г.

После доработки 09.12.2022 г.

Принята к публикации 23.12.2022 г.

В процессе эксплуатации все узлы газотурбинной установки (ГТУ), в том числе и лопаточный аппарат осевого компрессора, испытывают воздействия потоков среды, которые приводят к возникновению различных дефектов, ухудшению основных рабочих характеристик (КПД, эффективной мощности и др.). Один из наиболее опасных дефектов – эрозионный износ, следствием которого может стать разрушение как одной лопатки, так и всего лопаточного аппарата. Это может привести к досрочному выводу ГТУ из эксплуатации. Поэтому эрозионная стойкость лопаток компрессора является одним из основных параметров, определяющих ресурс газотурбинной установки. В связи с этим высокую актуальность приобретают исследования эрозионного износа осевых компрессоров в процессе эксплуатации ГТУ. В данной работе представлен обзор научно-технической литературы, посвященной эрозионному износу лопаточного аппарата осевого компрессора как элемента газотурбинной установки. Рассмотрены основные механизмы эрозии, классифицируемые по типу частиц примесей, воздействующих на материал лопаток. Указаны геометрические параметры лопаточного аппарата компрессора, изменение которых вследствие эрозионного износа может привести к нарушениям аэродинамики потока и ухудшению эксплуатационных характеристик как отдельных элементов, так и всей ГТУ. Современные исследования эрозионного износа ведутся в трех направлениях: прогнозирование степени эрозии; оценка и прогнозирование последствий эрозии; разработка защитных мер, цель которых – снизить влияние эрозии в процессе эксплуатации газотурбинной установки. Отмечены наиболее часто рассматриваемые и перспективные темы исследований эрозии применительно к газотурбо- и компрессоростроению. Проанализировано текущее состояние исследований в данной области.

*Ключевые слова:* газотурбинная установка, осевой компрессор, лопаточный аппарат, проточная часть, эрозионный износ, механические примеси, численное моделирование

**DOI:** 10.56304/S0040363623060024

# Studies of Erosive Wear of the Blading in Axial Compressors of Gas Turbines (Review)

V. L. Blinov<sup>a, \*</sup>, I. S. Zubkov<sup>a</sup>, S. V. Bogdanets<sup>a</sup>, O. V. Komarov<sup>a</sup>, and G. A. Deryabin<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Ural Federal University, Ekaterinburg, 620002 Russia

\*e-mail: vithomukyn@mail.ru

**Abstract**—During operation, all components of a gas-turbine unit (GTU), including the blading of the axial compressor, are affected by the flow in the GTU flowpath, which results in the development of defects and deterioration of the main performance characteristics (efficiency, effective power, etc.). One of the most serious defects is erosive wear since it can cause destruction of one blade or all the blades in the compressor. This can lead to preliminary removal of a GTU from operation. Therefore, the erosion resistance of compressor blades is one of the main parameters controlling the service life of a gas-turbine unit. That is why studies of the erosive wear of axial compressors during operation of GTUs are urgent. This paper provides a review of the available publications on the erosive wear of blades and vanes in an axial compressor of gas-turbine units. The major erosion mechanisms classified by the type of particulates acting on blade material are examined. The geometric parameters of the compressor blading are found whose change due to erosive wear can disturb the flow aerodynamics and deteriorate the performance of individual elements and the overall GTU. The main three lines of erosive wear studies may be listed as follows: prediction of erosive wear, assessment and prediction of erosion consequences, and development of protective measures to control erosion during operation of a gas-turbine unit. The most frequently examined and promising subjects of erosion studies are outlined as applicable to gas turbine and compressor machine building. The state-of-the-art of studies in this field is analyzed.

**Keywords:** gas-turbine unit, axial compressor, set of blades, flowpath, erosive wear, particulates, numerical simulation



---

---

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

---

---

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕГУЛИРУЮЩЕГО КЛАПАНА  
С ОБРАТНЫМ ПОДВОДОМ ПАРА**

© 2023 г. В. Г. Грибин<sup>а</sup>, \*, О. М. Митрохова<sup>а</sup>, А. В. Шерстнева<sup>а</sup>, П. М. Нестеров<sup>а</sup>

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

\*e-mail: GribinVG@mpei.ru

Поступила в редакцию 19.07.2022 г.

После доработки 13.12.2022 г.

Принята к публикации 23.12.2022 г.

Рассмотрены различные варианты конструкций регулирующих клапанов и способы компоновки органов парораспределения. Выявлено, что традиционная прямоточная схема регулирующего клапана не всегда отвечает требованиям по размещению оборудования паротурбинной установки и приводит к дополнительным потерям энергии. Предлагается использовать регулирующий клапан принципиально новой конструкции – с обратным подводом пара. Спроектирована и создана экспериментальная установка для исследования регулирующего клапана с обратным подводом пара, составлена схема измерений его характеристик. На экспериментальной установке по предлагаемой схеме можно исследовать как базовую конструкцию регулирующего клапана с обратным подводом пара, так и усовершенствованные ее варианты. Используя схему измерений, можно определить массовый расход рабочей среды, гидравлическое сопротивление тракта клапана, силовые и вибродинамические характеристики регулирующего клапана. Приводятся результаты математического моделирования и экспериментального исследования проходного тракта блока регулирующего клапана с обратным подводом пара. Предложены конструктивные изменения нижней половины клапанной коробки, благодаря которым снижаются потери давления и гидравлические потери и уменьшаются статические и динамические усилия, действующие на шток. Показана возможность создания экономичного и надежного клапана с обратным подводом пара, который может быть использован в системах парораспределения паровых турбин. Разработанную конструкцию регулирующего клапана с обратным подводом пара целесообразно применять для упрощения компоновки паротурбинной установки с клапанными коробками, расположенными на корпусе турбины.

*Ключевые слова:* регулирующий клапан, клапан с обратным подводом пара, обратный клапан, паровая коробка, неравномерность, восстановление давления, гидравлическое сопротивление

**DOI:** 10.56304/S004036362306005X

# Results from the Study of a Control Valve with Reverse Steam Supply

V. G. Gribin<sup>a, \*</sup>, O. M. Mitrokhov<sup>a</sup>, A. V. Sherstneva<sup>a</sup>, and P. M. Nesterov<sup>a</sup>

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

\*e-mail: GribinVG@mpei.ru

**Abstract**—Various design options for control valves and methods for arranging steam-distribution elements are considered. It was revealed that the traditional direct-flow control valve scheme does not always meet the requirements for the placement of equipment in a steam-turbine plant and leads to additional energy losses. It is proposed to use a control valve of a fundamentally new design: with reverse steam supply. An experimental setup for studying a control valve with reverse steam supply has been designed and created, and a diagram of changes in its characteristics has been drawn up. Using the proposed scheme, it is possible to study both the basic design of a control valve with a reverse steam supply and its improved versions on the experimental plant according to the proposed scheme. Using the measurement scheme, it is possible to determine the mass flow rate of the working medium, the hydraulic resistance of the valve path, and the power and vibrodynamic characteristics of the control valve. The results of mathematical modeling and experimental study of the flow path of the control valve block with reverse steam supply are presented. Design changes of the lower half of the valve box are proposed, due to which pressure losses and hydraulic losses are reduced and static and dynamic forces acting on the stem are reduced. The possibility of creating an economical and reliable valve with reverse steam supply, which can be used in steam-turbine steam-distribution systems, is shown. It is advisable to use the developed design of a control valve with reverse steam supply to simplify the layout of a steam-turbine plant with valve boxes located on the turbine casing.

**Keywords:** control valve, steam-return valve, nonreturn valve, steam box, unevenness, pressure recovery, hydraulic resistance

---

---

**ВОДОПОДГОТОВКА  
И ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ**

---

---

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГИДРОКАРБОНАТОВ НА pH И КОНЦЕНТРАЦИИ  
АММИАКА В УСЛОВИЯХ УХУДШЕНИЯ КАЧЕСТВА  
ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ<sup>1</sup>**

© 2023 г. О. В. Егошина<sup>а</sup>, \*, С. К. Звонарева<sup>а</sup>, А. О. Иванова<sup>а</sup>

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

\*e-mail: yegoshinaov@mpei.ru

Поступила в редакцию 08.08.2022 г.

После доработки 15.01.2023 г.

Принята к публикации 25.01.2023 г.

Нарушения норм качества воды и пара могут привести к аварийным ситуациям на тепловых электростанциях. В условиях ТЭС химико-технологический мониторинг обеспечивает надежное и быстрое получение информации о нормируемых параметрах качества воды и пара путем прямого измерения или косвенного определения химических показателей анализируемой среды. Расширение функциональных возможностей систем химико-технологического мониторинга (СХТМ) и эффективное выявление возникающих нарушений водно-химического режима возможны благодаря прогнозированию и анализу изменения состава примесей по тракту энергоблока. Однако из-за большого объема химического контроля, выполняемого с помощью лабораторных анализаторов состава жидкости, надежность систем мониторинга качества воды и пара снижается. На ранних стадиях возникновения нарушений параметров водного теплоносителя контроль целесообразно осуществлять с использованием автоматических приборов, в том числе кондуктометров и pH-метров, поскольку в промышленной эксплуатации такие приборы являются наиболее надежными. В настоящее время продолжают совершенствоваться алгоритмы расчетов pH и концентрации аммиака на основе непрерывных измерений удельной электрической проводимости (УЭП). В данной работе исследована возможность применения косвенного алгоритма по измеренному значению УЭП в условиях ухудшения качества питательной воды и рассмотрена математическая модель расчета pH и концентрации аммиака, основанная на методе половинного деления. С помощью этой модели определены pH и концентрация аммиака при дозировании раствора гидрокарбонатов в контур экспериментальной установки в лабораторных условиях. В результате анализа выявлено, что в случае ухудшения качества воды погрешность расчета pH и аммиака увеличивается.

*Ключевые слова:* тепловая электростанция, энергоблок, водно-химический режим, химико-технологический мониторинг, автоматический химический контроль, качество воды и пара, удельная электрическая проводимость, водородный показатель, гидрокарбонаты, аммиак

**DOI:** 10.56304/S0040363623060036

# Estimation of Hydrocarbonates' Effect on Ammonia Concentration and pH in Conditions of Feed-Water Quality Deterioration

O. V. Yegoshina<sup>a, \*</sup>, S. K. Zvonareva<sup>a</sup>, and A. O. Ivanova<sup>a</sup>

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

\*e-mail: yegoshinaov@mpei.ru

**Abstract**—Violations in water- and steam-quality standards cause emergencies at thermal power plants. In such conditions, chemical monitoring provides reliable and quick information about the normalized parameters of water and steam quality by direct measurement or indirect determination of the quality indicators of the analyzed medium. The expansion of functionality and effective detection of fast-flowing disturbances in cycle-chemistry monitoring systems is possible by predicting and analyzing the behavior of impurities along the path of the power unit. However, a large volume of chemical control performed with the help of laboratory chemical control analyzers reduces the reliability of water- and steam-quality monitoring systems. In the early stages, it is advisable to carry out the occurrence of violations of the quality of water and steam at the expense of automatic devices, including conductometers and pH meters, since such devices are the most reliable in industrial operation. Currently, algorithms for calculating pH and ammonia concentration based on continuous measurements of electrical conductivity continue to be improved. Within the framework of the work, the possibility of using an indirect algorithm based on the measurement of specific electrical conductivity in conditions of deterioration of feed water quality is investigated. The pH and concentration of ammonia were determined on the basis of measurements of specific electrical conductivity with dosing of hydrocarbonates in laboratory conditions. An experiment was performed, as a result of which it was revealed that, in case of water-quality deterioration, the error in calculating pH and ammonia increases.

**Keywords:** thermal power plant, power unit, cycle chemistry, cycle chemistry monitoring, automatic chemical control, water and steam quality

---

---

## ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

---

---

### ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА НА ОСНОВЕ АМИНОСОДЕРЖАЩИХ РЕАГЕНТОВ ДЛЯ КОТЛОВ ПГУ

© 2023 г. Б. М. Ларин<sup>a,\*</sup>, С. Ю. Сулов<sup>b</sup>, А. В. Кирилина<sup>b</sup>, В. В. Козловский<sup>b</sup>, А. А. Зидиханова<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Ивановский государственный энергетический университет,  
Рабфаковская ул., д. 34, г. Иваново, 153003 Россия

<sup>b</sup>ООО “Водные технологии”, Автозаводская ул., д. 14, Москва, 115280 Россия

\*e-mail: info@wteng.ru

Поступила в редакцию 01.11.2022 г.

После доработки 08.12.2022 г.

Принята к публикации 23.12.2022 г.

В последнее десятилетие на теплоэлектростанциях России и Западной Европы широко применяется водный режим паровых котлов и котлов-утилизаторов (КУ) парогазовых установок (ПГУ) с дозированием в теплоноситель полиаминов. Водный режим с комплексными реагентами торговых марок Helamin и Cetamin стал вытеснять традиционный гидразинно-аммиачный. Однако из-за высокой стоимости и неопределенности компонентного состава импортных реагентов возникла необходимость создать отечественные аналоги. Таковыми стали комплексные реагенты марки ВТИАМИН, в частности ВТИАМИН КР-33. Благодаря подбору концентраций индивидуальных компонентов в составе комплексного реагента стало возможным разрыхлять и удалять с поверхностей нагрева теплообменного оборудования ранее образовавшиеся отложения, значительно уменьшать скорость образования новых отложений, а следовательно, и скорость коррозии поверхностей теплообмена. В статье представлены результаты опытно-промышленных испытаний реагента ВТИАМИН КР-33 на котлах-утилизаторах энергоблоков с ПГУ при использовании разных тепловых схем. Эти испытания проводились с целью решить различные технологические задачи в рамках реализации программы импортозамещения полиаминной технологии водно-химического режима. Во время проведения опытно-промышленных испытаний на энергоблоках с ПГУ мощностью 110 МВт было установлено, что возможно совместное использование реагентов ВТИАМИН КР-33 и ВТИАМИН Д-2 для снижения скорости коррозии медьсодержащих сплавов и стабилизации содержания меди по пароводяному тракту энергоблоков. Выявлено повышенное содержание углекислоты в паре, вызывающее нарушение норм качества пара по показателю удельной электрической проводимости Н-катионированной пробы. Проведено сравнение тепловых схем с последовательным питанием (ПГУ мощностью 110 МВт) и параллельным питанием (ПГУ 450 МВт) барабанов низкого (БНД) и высокого (БВД) давления. Показано, что причиной нарушения водно-химического режима при большом содержании углекислоты в тракте энергоблока с ПГУ 110 МВт является неэффективная работа деаэратора, встроенного в конструкцию БНД.

*Ключевые слова:* паровые энергетические котлы, котлы-утилизаторы, парогазовые установки, полиаминный водно-химический режим, углекислота, опытно-промышленные испытания, медьсодержащие сплавы, комплексные органические реагенты

DOI: 10.56304/S0040363623060061

# Import Substituting Water-Chemistry Technologies on the Basis of Amine-Containing Reagents for Combined-Cycle Power Plant Steam Generators

B. M. Larin<sup>a,\*</sup>, S. Yu. Suslov<sup>b</sup>, A. V. Kirilina<sup>b</sup>, V. V. Kozlovskii<sup>b</sup>, and A. A. Zidekhanova<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, 153003 Russia*

<sup>b</sup> *OOO Water Technologies Engineering, Moscow, 115280 Russia*

*\*e-mail: info@wteng.ru*

**Abstract**—The last decade has seen the widespread use of water chemistry with metering polyamines into the coolant of steam boilers and heat-recovery steam generators (HRSG) of combined-cycle power plants (CCPP) at thermal power plants in Russia and Western Europe. Water chemistry with complex reagents of the Helamin and Cetamin trademarks began to oust the conventional all-volatile water chemistry. However, such factors as high cost and unclear component composition of imported reagents generated the need to develop similar domestically produced reagents. Complex reagents of the VTIAMIN and, in particular, VTIAMIN KR-33 types have become such ones. Due to selecting the concentrations of individual components in the complex reagent's composition, it has become possible to loosen the previously formed deposits and remove them from the heat-transfer equipment surfaces and obtain a significantly lower formation rate of new deposits, and, hence, the corrosion rate of heat-transfer surfaces. The article presents the results obtained from pilot commercial tests of the VTIAMIN KR-33 reagent in the HRSGs of CCPP-based power units in using various thermal cycle process circuits. These tests were carried out with the aim to solve various process-related tasks within the framework of implementing the program of substituting the imported polyamine water-chemistry technology. It has been found in the course of performing pilot commercial tests in 110-MW CCPP units that it is possible to jointly use VTIAMIN KR-33 and VTIAMIN D-2 reagents to reduce the corrosion rate of copper-containing alloys and stabilize the copper content over the power unit's steam–water path. The tests revealed an increased content of carbonic acid in the steam, which entails violation of the steam quality standards in terms of the H-cationized sample electrical conductivity indicator. The thermal cycle process circuits with sequential (the 110-MW CCPP) and parallel (the 450-MW CCPP) feeding of low- and high-pressure drums (LPD and HPD) were compared with each other. It has been shown that the violation of the standard water chemistry in the case of a high carbonic acid content in the 110-MW CCPP unit's path results from inefficient operation of the deaerator built into the LPD design.

*Keywords:* steam power-generating boilers, heat-recovery steam generators, combined-cycle power plants, polyamine water chemistry, carbonic acid, pilot commercial tests, copper-containing alloys, complex organic reagents

---

## ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

---

# РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДЫ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ УДЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОВОДИМОСТИ И pH В СИСТЕМАХ ХИМИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ВОДНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ<sup>1</sup>

© 2023 г. А. Б. Ларин<sup>а</sup>, \*, С. В. Киет<sup>б</sup>, К. В. Зотова<sup>а</sup>, Е. Г. Ухалова<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Ивановский государственный энергетический университет,  
Рабфаковская ул., д. 34, г. Иваново, 153003 Россия

<sup>б</sup>ООО НПП “Техноприбор”, Октябрьский просп., д. 112, корп. 4,  
г. Люберцы, Московская обл., 140002 Россия

\*e-mail: yaandy\_81@mail.ru

Поступила в редакцию 01.11.2022 г.

После доработки 06.12.2022 г.

Принята к публикации 23.12.2022 г.

При переходе к новым технологиям на ТЭС и АЭС повышается эффективность работы энергоблоков, но при этом ужесточаются требования к качеству водного теплоносителя. Зарубежные и отечественные нормативные документы дополняются показателями качества теплоносителя, в частности удельной электрической проводимостью прямой  $\chi$  и Н-катионированной  $\chi_{\text{Н}}$  проб всех потоков воды и пара, концентрацией хлоридов и органических веществ в питательной воде и паре при  $\chi_{\text{Н}} = 0.2\text{--}0.3$  мкСм/см. Непрерывные автоматические измерения в этих условиях достаточно надежно обеспечиваются кондуктометрами и отчасти pH-метрами, а развитие информационных технологий позволяет реализовать методики расчета некоторых показателей качества по результатам измерений. Приведены аналитические выражения для расчета pH и концентраций органических кислот в конденсате и питательной воде, фосфатов и натрия в котловой воде, хлоридов, бикарбонатов и удельной электрической проводимости дегазированной пробы в паре. Показана возможность использования вычислительных алгоритмов для анализа состояния водно-химического режима (ВХР), приведена система уравнений математической модели ионных равновесий, использованная в отечественном анализаторе качества питательной воды энергетических котлов.

*Ключевые слова:* автоматический химический контроль, водно-химический режим, расчет показателей качества теплоносителя, анализатор качества питательной воды и конденсата пара, водородный показатель, удельная электрическая проводимость, солесодержание, углекислота

DOI: 10.56304/S0040363623060073

# Prediction Methods Based on Electrical Conductivity and pH Measurements in Water Coolant Chemical-Monitoring Systems

A. B. Larin<sup>a, \*</sup>, S. V. Kiet<sup>b</sup>, K. V. Zotova<sup>a</sup>, and E. G. Ukhalova<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo 153003 Russia*

<sup>b</sup> *OOO NPP Tekhnopribor, Lyubertsy, Moscow oblast, 140002 Russia*

*\*e-mail: yaandy\_81@mail.ru*

**Abstract**—A shift for applying new technologies at thermal and nuclear power plants makes it possible to achieve more efficient operation of power units; in this case, however, more stringent requirements are posed to the water-coolant quality. Foreign and Russian national regulatory documents are supplemented with coolant quality indicators, in particular, the electrical conductivity of direct  $\chi$  and H-cationized  $\chi_H$  samples of all water and steam flows and the concentrations of chlorides and organic substances in feed water and steam at  $\chi_H = 0.2\text{--}0.3 \mu\text{S/cm}$ . Continuous automatic measurements are supported under these conditions with sufficient reliability by conductivity meters and partially by pH meters, and the progress in the development of information technologies opens the possibility to implement procedures for predicting certain quality indicators based on measurement results. The article presents analytical expressions for predicting the pH value and concentrations of organic acids in condensate and feed water, phosphates and sodium in boiler water, chlorides, bicarbonates, and electrical conductivity of a degassed steam sample. The possibility of using computation algorithms for analyzing the water chemistry (WC) state is shown, and the system of equations for the ionic equilibria mathematical model that is used in the domestically produced instrument for analyzing the feed-water quality of power-generating boilers is given.

**Keywords:** automatic chemical monitoring, water chemistry, prediction of coolant quality indicators, feed water and steam condensate quality analyzer, hydrogen ion exponent (pH value), electrical conductivity, salt content, carbonic acid