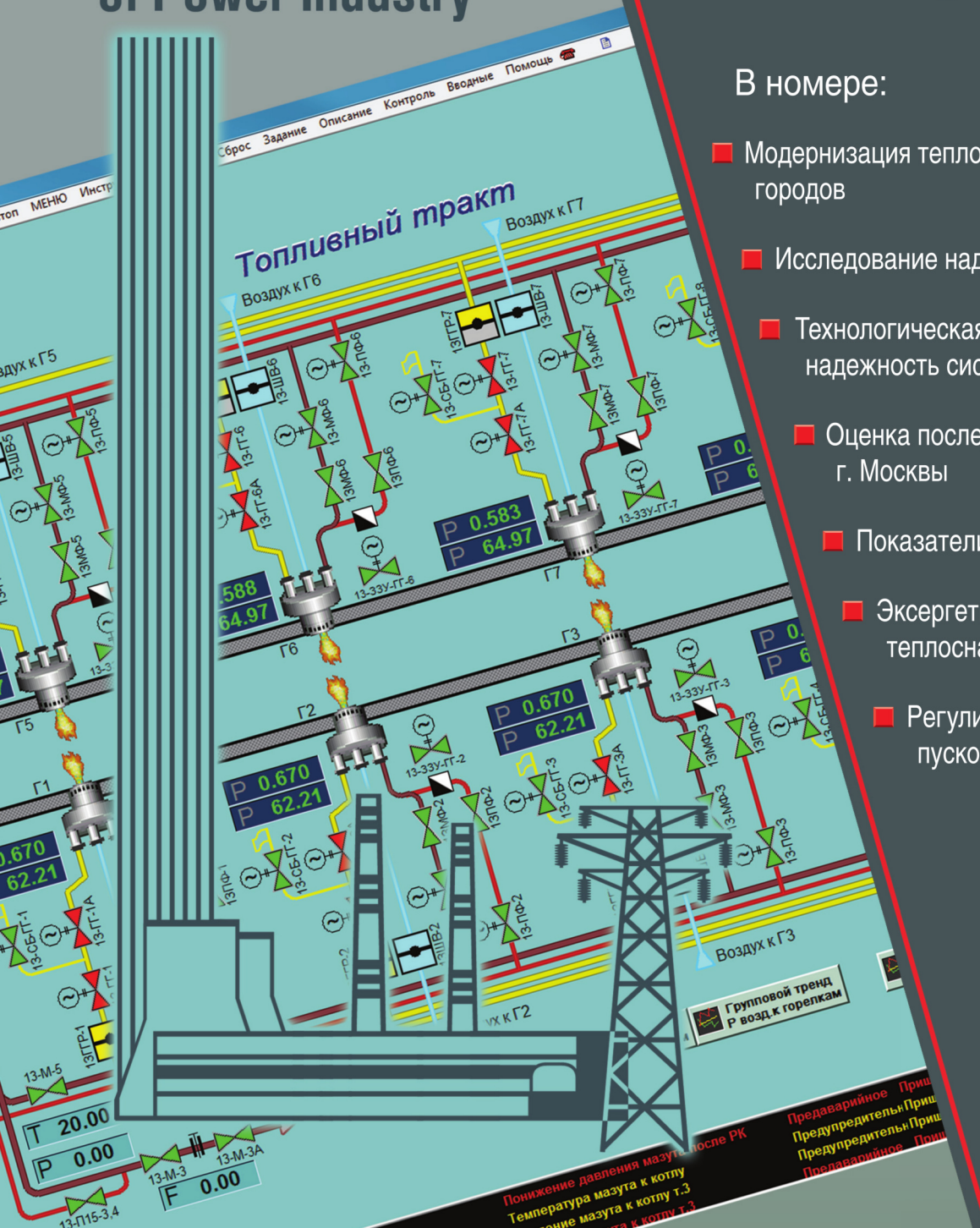


# НАДЕЖНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ ЭНЕРГЕТИКИ



Том 11 №3 2018

Safety & Reliability  
of Power Industry



В номере:

- Модернизация теплофикационных систем городов
- Исследование надежности ОЭС Юга
- Технологическая и эксплуатационная надежность систем электроснабжения
- Оценка последствий изменения климата г. Москвы
- Показатели эффективности градирен
- Эксергетический анализ систем теплоснабжения
- Регулирование частоты в связи с пуском Белорусской АЭС

[www.sigma08.ru](http://www.sigma08.ru)  
[www.testenergo.ru](http://www.testenergo.ru)





## ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

С. И. МАГИД — д. т. н., профессор, генеральный директор АО «Тренажеры электрических станций и сетей», директор Департамента «Технические обучающие системы в энергетических технологиях» TEST UNESCO (Москва, Россия)

## ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Е. Н. АРХИПОВА — д. т. н., технический директор АО «Тренажеры электрических станций и сетей» (Москва, Россия)

В. В. КУЛИЧИХИН — д. т. н., профессор ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (Москва, Россия)

## ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

В. И. БЕЛЯЕВ — к. т. н., заместитель генерального директора АО «Тренажеры электрических станций и сетей» (Москва, Россия)

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А. Н. ВИВЧАР — к. т. н., советник Директора ФГАУ «НИИ «Центр экологической промышленной политики» (Москва, Россия)

Н. И. ВОРОПАЙ — чл.-корр. РАН, д. т. н., профессор, научный руководитель ФГБУН «Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева» Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН) (Иркутск, Россия)

Е. П. ГРАБЧАК — Директор Департамента оперативного контроля и управления в электроэнергетике Министерства энергетики Российской Федерации (Москва, Россия)

Х. С. ДРАГАНЧЕВ — профессор Технического университета (Варна, Болгария)

И. Ш. ЗАТРЕТДИНОВ — к. т. н., главный инженер АО «Теплоэнергетическая компания Мосэнерго» (Москва, Россия)

З. ЗИМОН — д. т. н., профессор, заведующий кафедрой Бранденбургского Технического Университета (Котбус-Зенфтенберг, Германия)

Н. А. ЗРОЙЧИКОВ — д. т. н., профессор, заместитель директора по научной работе ОАО «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского» (ОАО «ЭНИН») (Москва, Россия)

М. Х. Г. ИБРАГИМОВ — д. т. н., профессор, Первый заместитель председателя НП «Техноэкспо» (Москва, Россия)

Н. Б. КАРНИЦКИЙ — д. т. н., профессор, заведующий кафедрой «Тепловые электрические станции» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

С. А. КРОПАЧЕВ — д.и.н., начальник Учебно-тренировочного центра АО «Мособлэнерго» (Москва, Россия)

Б. М. ЛАРИН — д. т. н., профессор кафедры химии и химических технологий в энергетике ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина» (Иваново, Россия)

М. Ю. ЛЬВОВ — д. т. н., советник генерального директора АО «Объединенная энергетическая компания» (Москва, Россия)

Е. М. МАРЧЕНКО — к. т. н., профессор, генеральный директор ООО «Энив» (Москва, Россия)

В. Е. МЕССЕРЛЕ — д. т. н., профессор, главный научный сотрудник НИИ экспериментальной и теоретической физики Казахского Национального Университета им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан)

С. В. МИЩЕРЯКОВ — д. э. н., к. т. н., Генеральный директор Некоммерческого Партнерства «Корпоративный образовательный и научный центр Единой энергетической системы» (Москва, Россия)

Д. МОРВА — доктор, профессор Будапештского политехнического университета (Будапешт, Венгрия)

Л. П. МУЗЫКА — к. т. н., доцент, директор ООО «Ресурс-персонал» (Омск, Россия)

А. Н. НАЗАРЫЧЕВ — д. т. н., профессор, ректор ФГАУ ДПО «Петербургский энергетический институт повышения квалификации» (Санкт-Петербург, Россия)

В. А. НЕПОМНЯЩИЙ — академик Российской академии естественных наук, д. э. н., профессор, к. т. н. (Санкт-Петербург, Россия)

В. М. НЕУЙМИН — к. т. н., главный специалист по энергетике и энергомашиностроению ООО «Технологические системы защитных покрытий» (Москва, Россия)

М. М. ПЧЕЛИН — Государственный советник РФ 1-го класса в отставке, лауреат премии Совета Министров СССР (Москва, Россия)

Н. Д. РОГАЛЕВ — д. т. н., профессор, ректор ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», председатель Ученого совета (Москва, Россия)

В. СТРИЕЛКОВСКИ — доктор философии, профессор, научный сотрудник Кембриджской бизнес-школы Кембриджского университета (Англия)

А. И. ТАДЖИБАЕВ — д. т. н., профессор, заведующий кафедрой «Диагностика энергетического оборудования» ФГАУ ДПО «Петербургский энергетический институт повышения квалификации» (Санкт-Петербург, Россия)

А. Е. УЖАНОВ — к. с. н., доцент кафедры "Мировая электроэнергетика" Международного института энергетической политики и дипломатии МГИМО МИД России, член-корреспондент Академии военных наук (Москва, Россия)

К. ФРАНА — д. т. н., профессор, заместитель декана факультета «Машиностроение» Технического университета (г. Либерец, Чехия)

Л. А. ХОМЕНОК — д. т. н., профессор, заведующий аналитическим отделом Научно-производственного объединения по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова (ЦКТИ) (Санкт-Петербург, Россия)

М. И. ЧИЧИНСКИЙ — к. т. н., Генеральный инспектор — начальник Департамента технического надзора и аудита ПАО «Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы» (ПАО «ФСК ЕЭС») (Москва, Россия)

Н. Д. ЧИЧИРОВА — действительный член Российской академии естественных наук, д. х. н., профессор, директор института теплоэнергетики, зав. кафедрой «Тепловые электрические станции» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» (Казань, Россия)

В. И. ШАРАПОВ — д. т. н., профессор, заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет» (Ульяновск, Россия)

Учредитель и издатель: Научно-производственное объединение «Энергобезопасность».  
Периодичность издания четыре раза в год. Выходит с 2008 года.

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере массовых коммуникаций, связи и охраны культурного наследия.  
Свидетельство ПИ № ФС77-31974 от 14 мая 2008 г.

Журнал включен в новый перечень ВАК Министерства образования и науки РФ рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней, а также в базы данных: РИНЦ, ВИНИТИ, Google Scholar, Ulrich's Periodicals Directory.

Журнал ассоциирован при Международном центре обучающих систем ЮНЕСКО и Международной кафедре-сети ЮНЕСКО «TVET». Полнотекстовые версии статей размещены в научной электронной библиотеке elibrary.ru.

## Подписные индексы:

45024 — Объединенный каталог и интернет-каталог «Пресса России», E45024 — Интернет-каталог «Книга-сервис».

Художественный редактор: — Маланьин Д. Б.

Технический редактор — Кутько Н. Е.

Подписано в печать 01.10.2018 г. Отпечатано в ООО «Паритет».

Почтовый адрес редакции: 117587, г. Москва, Варшавское шоссе, д. 125 Ж, корп. 6, ООО «НПО «Энергобезопасность»  
Телефон: +7 495 665-76-00, телефон/факс: +7 495 382-79-74; e-mail: sigma08@sigma08.ru; www.sigma08.ru

© ООО «НПО «Энергобезопасность», «Надежность и безопасность энергетики»



## EDITOR-IN-CHIEF

**Sergey I. MAGID** — Dr. of Tech. Sc., Professor, Director General, JSC «Simulators of power plants and networks», Director of the Department «Technical educational systems in energy technologies» TEST UNESCO (Moscow, Russia).

## DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

**Elena N. ARKHIPOVA** — Dr. of Tech. Sc., Technical Director, JSC «Simulators of power plants and networks» (Moscow, Russia)

**Vladimir V. KULICHIKHIN** — Dr. of Tech. Sc., Professor, National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (Moscow, Russia)

## EXECUTIVE EDITOR

**Valeriy I. BELYAEV** — Cand. of Tech. Sc., Deputy Director General, JSC «Simulators of power plants and networks» (Moscow, Russia)

## EDITORIAL BOARD

**Anton N. VIVCHAR** — Cand. of Geogr. Sc., Advisor of Director of Federal State Autonomous Institution Research Institute «Environmental Industrial Policy Centre»

**Nikolay I. VOROPAI** — Corr. Member of the RAS, Dr. of Tech. Sc., Professor, Scientific Director of the Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia)

**Hristo S. DRAGANICHEV** — Professor of the Varna Technical University (Varna, Bulgaria)

**Evgeny P. GRABCHAK** — Director of the Department for Operational Control and Management in the Electric Power Industry of the Ministry of Energy of the Russian Federation (Moscow, Russia)

**Ilyas Sh. ZAGRETDINOV** — Cand. Sc. (Eng), Chief Engineer of JSC «Heat Power Company Mosenergo» (Moscow, Russia)

**Sylvio SIMON** — Prof. Dr.-Ing., Brandenburg University of Technology (Cottbus-Senftenberg, Germany)

**Nikolay A. ZROICHIKOV** — Dr. of Tech. Sc., Professor, «G. M. Krzhizhanovsky Power Engineering Institute» (Moscow, Russia)

**Marat H. G. IBRAGIMOV** — Dr. of Tech. Sc., Professor, First Deputy Chairman, NP «Tekhnoekspo» (Moscow, Russia)

**Nikolay B. KARNITSKIY** — Dr. of Tech. Sc., Professor, head of the department of thermal power plants, the Belarus National Technical University (Minsk, Belarus)

**Sergey A. KROPACHEV** — Dr. of Hist. Sc., Head of Training Centre of JSC Mosoblenergo (Moscow, Russia)

**Boris M. LARIN** — Dr. of Tech. Sc., Professor, Department of chemistry and chemical technology in the power industry, of the «Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin» (Ivanovo, Russia)

**Mikhail Yu. LVOV** — Dr. of Tech. Sc., Adviser to the General Director of United Energy Company JSC (Moscow, Russia)

**Evgeniy M. MARCHENKO** — Cand. of Tech. Sc., Professor, Director, «Eniv», LLC (Moscow, Russia)

**Vladimir E. MESSERLE** — Dr. of Tech. Sc., Professor, Head Research Fellow of the Research institute of experimental and theoretical physics, the al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan)

**Sergey V. MISHCHERYAKOV** — Dr. of Econ. Sc., Cand. of Tech. Sc., Director General of the Non-profit Partnership «Corporate Training and Scientific Center of the Unified Energy System» (Moscow, Russia)

**George MORVA** — Sc. Dr., Professor, the Budapest Polytechnic University (Budapest, Hungary)

**Leonid P. MUZYKA** — Cand. of Tech. Sc., Director, «Resurs-Personals», LLC (Omsk, Russia)

**Aleksandr N. NAZARYCHEV** — Dr. of Tech. Sc., Professor, Rector of the «Peterburg power engineering institute of professional development» (St. Peterburg, Russia)

**Vladimir A. NEPOMNYASHCHIIY** — Academician of the RANS, Dr. of Econ. Sc., Professor, Cand. of Tech. Sc. (St. Peterburg, Russia)

**Valeriy M. NEUMIN** — Cand. of Tech. Sc., Chief Power Engineer, «Technological systems for protective coatings», LLC (Moscow, Russia)

**Mikhail M. PCHELIN** — Class I State Councilor of the RF (retired), awardee of the Prize of the Council of Ministers of the USSR (Moscow, Russia)

**Nikolay D. ROGALEV** — Dr. of Tech. Sc., Professor, Rector of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Chairman of the Academic Council (Moscow, Russia)

**Wadim STRIELKOWSKI** — Ph.D., University of Cambridge, Judge Business School (Cambridge, England)

**Aleksey I. TADZHIBAYEV** — Dr. of Tech. Sc., Professor, head of the Department of diagnostics of energy systems, «Peterburg power engineering institute of professional development» (St. Peterburg, Russia)

**Aleksandr E. UZHANOV** — Cand. of Sociol. Sc., Associate Professor of World Power Industry Department, International Institute of Energy Policy and Diplomacy, MGIMO of the Russian Federation Foreign Ministry, associate member of the Academy of Military Sciences (Moscow, Russia)

**Karel FRANA** — Prof. Dr. — Ing. habil, Technical University of Liberec (Liberec, Czech Republic)

**Leonid A. KHOMENOK** — Dr. of Tech. Sc., Professor, The head of analytical Department I. I. Polzunov Scientific and Development Association on Research and Design of Power Equipment (St. Peterburg, Russia)

**Mikhail I. CHICHINSKIY** — Cand. of Tech. Sc., Inspector General/Head of the Department of technical supervision and audit, PJSC «Federal Grid Company of the Unified Energy System» (Moscow, Russia)

**Nataliya D. CHICHIROVA** — full member of the Russian Academy of Natural Sciences, Dr. of Chem. Sc., Professor, Director of the Thermal Engineering Institute, head of the Department of thermal power plants of the «Kazan State Power Engineering University» (Kazan, Russia)

**Vladimir I. SHARAPOV** — Dr. of Tech. Sc., Professor, head of the Department of heat and gas supply and ventilation of the «Ulyanovsk State Technical University» (Ulyanovsk, Russia)

Founder and publisher: Scientific and Production Association «Energobezопасnost». Frequency of the edition four times a year. Leaves since 2008.

The journal is registered in the Federal Service for Supervision in the Sphere of Mass Communication, Communications and the Protection of Cultural Heritage. Certificate ПИ № ФС77-31974 dated May 14, 2008.

The journal is included into the SCADT's List of major reviewed scientific journals and publications, which shall publish the key scientific findings of theses for academic degrees of Doctor and Candidate of Sciences. The Journal is included in the following databases: RINC, VINITI, Google Scholar, Ulrich's Periodicals Directory.

The journal is associated with the UNESCO International Center of Training Systems and the UNESCO International Chair Network «TVET».

Artistic editor: Malanin D. B. Technical Editor: Kutko N. E. Signed in the press on October 01, 2018. Printed in LLC Paritet.



## СОДЕРЖАНИЕ

### ОБЩИЕ ВОПРОСЫ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЭНЕРГЕТИКИ

<b>Шарапов В. И., Орлов М. Е., Замалеев М. М., Чаукин П. Е.</b> Модернизация теплофикационных систем городов: цели и практика.....	184
<b>Непомнящий В. А.</b> Исследование надежности ОЭС Юга в связи с присоединением новых сосредоточенных нагрузок (часть 2).....	192
<b>Бык Ф. Л., Мышкина Л. С.</b> Технологическая и эксплуатационная надежность системы электроснабжения.....	200
<b>Гашо Е. Г., Гужов С. В., Кролин А. А.</b> Оценка последствий изменения климата на безопасность и надежность функционирования электроэнергетического комплекса г. Москвы.....	208

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИССЛЕДОВАНИЯ, РАСЧЕТЫ

<b>Лаптева Е. А., Лаптев А. Г., Фарахов М. И.</b> Показатели энергоэффективности градирен.....	217
<b>Тимофеева М. В.</b> Улучшенная аналитическая модель обледенения проводов ЛЭП.....	222
<b>Волков А. В., Маленков А. С., Шелгинский А. Я., Кутько Н. Е.</b> Эксергетический анализ системы теплоснабжения с пониженной температурой обратной сетевой воды.....	227
<b>Труханов В. М., Султанов М. М., Кухтик М. П., Горбань Ю. А.</b> Математическая модель прогнозирования отказов статистическим методом при испытаниях головных образцов энергетического оборудования ТЭС.....	235
<b>Коробец П. Н., Словик В. В., Карницкий Н. Б.</b> Привлечение ТЭС к регулированию частоты, связанное с пуском Белорусской АЭС.....	241

<b>ИНФОРМАЦИЯ</b> .....	247
-------------------------	-----

<b>ХРОНИКА, ПУБЛИКАЦИИ</b> .....	253
----------------------------------	-----

<b>ПЕСТРЫЙ МИР: МЕТА-АФОРИЗМЫ, ФАКТЫ, МНЕНИЯ</b> .....	259
--	-----

## CONTENTS

### GENERAL ISSUES OF RELIABILITY AND SAFETY OF ENERGY

<b>Sharapov V. I., Orlov M. E., Zamaleev M. M., Chaukin P. E.</b> Modernization for cogeneration and district heating systems in urban areas: objectives and practice.....	184
<b>Nepomnyashchiy V. A.</b> Investigation of the reliability of the IPS of South in connection with the acquisition of new concentrated loads (part 2).....	192
<b>Byk F. L., Myshkina L. S.</b> Technological and operational reliability of power supply system.....	200
<b>Gasho E. G., Guzhov S. V., Krolin A. A.</b> Assessment of the effects of climate change on the safety and reliability of the functioning of the electric power complex in Moscow.....	208

### DESIGN, RESEARCH, CALCULATIONS

<b>Lapteva E. A., Laptev A. G., Farakhov M. I.</b> Energy efficiency indicators of cooling towers.....	217
<b>Timofeeva M. V.</b> Enhanced analytical model of power transmission line icing.....	222
<b>Volkov A. V., Malenkov A. S., Shelginsky A. Ia., Kutko N. E.</b> Exergy analysis of a heat supply system with a lower temperature of return delivery water.....	227
<b>Trukhanov V. M., Sultanov M. M., Kukhtik M. P., Gorban' Yu. A.</b> Mathematical model of failure prediction by statistical method at testing of prototypes of heat-power equipment.....	235
<b>Korobets P. N., Slovik V. V., Karnitskiy N. B.</b> Having CHPP involved in frequency control related to starting Belarusian NPP.....	241

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2018-11-3-208-216>  
УДК 621.186.019

## Оценка последствий изменения климата на безопасность и надежность функционирования электроэнергетического комплекса г. Москвы

**Гашо Е. Г.\*, Гужов С. В., Кролин А. А.**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
ул. Красноказарменная, 14, 111250, г. Москва, Россия

Поступила / Received 20.08.2018

Принята к печати / Accepted for publication 11.09.2018

Статья посвящена исследованию проблематики влияния климатических изменений на надежность и безопасность электроэнергетического комплекса московского мегаполиса. Проведенный анализ климатических изменений в московском регионе показывает увеличившееся за десять лет число опасных явлений, приводящих к экономическому ущербу. Проанализированы, выделены и ранжированы по влиянию на надежность системы электроснабжения наблюдаемые климатические изменения. Рассмотрена уязвимость электроэнергетического хозяйства к неблагоприятным климатическим явлениям. Проведен анализ аварийности, экономических ущербов в некоторых основных элементах энергосистемы.

Система электроснабжения московского энергоузла отличается высокой надежностью и насыщенностью устройствами преобразования, распределения и передачи электрической энергии. Опираясь на официальную статистику локальных перерывов электроснабжения московского мегаполиса, проведен анализ интенсивности отказов воздушных линий электропередач. Выполнен корреляционный анализ их взаимосвязи с интенсивностью возникновения опасных климатических явлений. Показано, что наиболее интенсивными по воздействию являются не только сами климатические явления, но некоторые их сочетания: «сильный ветер» и «гололед»; «повышенная влажность» и «рост численности переходов через 0°C» и др. На основе полученных зависимостей выявлены закономерности, позволяющие прогнозировать ключевые параметры ущербов от наиболее часто встречающихся неблагоприятных климатических явлений, участвовавших с изменением климата. Посредством применения регрессионных методов анализа обоснованы функции зависимости от климатических факторов случаев возникновения обрыва проводов высоковольтной распределительной сети до 110 кВ включительно и обрыва проводов магистральных сетей напряжением свыше 110 кВ.

Проведена оценка суммарного экономического ущерба электросетевому комплексу г. Москвы от наиболее влияющих климатических явлений. Рассмотрены некоторые малозатратные направления адаптации существующих передающих электрических сетей к изменениям московского мегаполиса.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** климатические изменения, уязвимость, энергетический комплекс, экономический ущерб, адаптация

### Благодарности

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 16-19-10568.

### Адрес для переписки:

Гашо Е. Г.  
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», отдел энергоменеджмента  
ул. Красноказарменная, 14, 111250, г. Москва, Россия  
e-mail: egasho@gmail.com

### Address for correspondence:

Gasho E. G.  
National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Energy Management Department  
Krasnokazarmennaya str., 14, 111250, Moscow, Russia  
e-mail: egasho@gmail.com

### Для цитирования:

Гашо Е. Г., Гужов С. В., Кролин А. А. Оценка последствий изменения климата на безопасность и надежность функционирования электроэнергетического комплекса г. Москвы. Надежность и безопасность энергетики. 2018. – Т. 11, №3. – С. 208–216  
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2018-11-3-208-216>

### For citation:

Gasho E. G., Guzhov S. V., Krolin A. A. [Assessment of the effects of climate change on the safety and reliability of the functioning of the electric power complex in Moscow]. Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry. 2018, vol. 11, no. 3, pp 208–216 (in Russian)  
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2018-11-3-208-216>



## Assessment of the effects of climate change on the safety and reliability of the functioning of the electric power complex in Moscow

**Gasho E. G.\*, Guzhov S. V., Krolin A. A.**

National Research University "Moscow Power Engineering Institute"  
Krasnokazarmennaya str., 14, 111250, Moscow, Russia

The article is dedicated to the study of the problem of the influence of climate change on the reliability and safety of the power complex of the Moscow metropolis. The analysis of climatic change in the Moscow region shows the number of dangerous climatic events that have intensified over the past ten years, leading to economic damage. In the paper, the observed manifestations of climate change have been analyzed, isolated and ranked according to the effect on the reliability of the power supply system. The vulnerability of the electric power industry to unfavorable climatic events is considered. The analysis is presented of accident rate, economic damage in some basic elements of the power system.

The power supply system of the Moscow energy center is characterized by high reliability and saturation with devices for converting, distributing and transmitting electrical energy. Based on the official statistics of local power outages in the Moscow metropolis, analysis is performed of the intensity of failures of overhead power transmission lines. Correlation analysis of their interrelation with the intensity of occurrence of dangerous climatic events is performed. It is shown that the most intensive effects are not only produced by individual climatic events, but also by some of their combinations: "strong wind" and "ice"; "high humidity" and "a high number of temperature transitions through 0 °C", etc. Based on the dependencies obtained, regularities have been revealed that allow predicting the key parameters of damage from the most frequent unfavorable climatic events, which have become more frequent with climate change. Through the application of regression methods of analysis, the functions of the dependence of the occurrence of wire breaks in high-voltage distribution networks with a voltage up to 110 kV and wire breaks in backbone networks with a voltage over 110 kV on climatic factors are substantiated.

An estimation of the total economic damage to the power grid complex in Moscow from the most influential climatic events has been performed. Some low-cost opportunities for adaptation of existing power transmission networks to the change in the Moscow metropolis are considered.

**KEYWORDS:** climate change, vulnerability, energy complex, economic damage, adaptation

Климат Москвы, являясь умеренно континентальным, характеризуется разницей между температурами в зимний и летний периоды существенно выше, чем в других европейских столицах. Зимы отличаются более продолжительным и суровым характером, что является отражением влияния географического положения в центре Восточно-Европейской равнины, позволяющего свободно распространяться волнам тепла и холода. Отсутствие крупных водоемов способствует довольно большим амплитудам колебаниям температуры. Характерные для мегаполисов тепловые зоны или «острова тепла» формируются за счет теплопритоков от автотранспорта, промышленных предприятий, ТЭЦ, радиационного воздействия солнца на объекты инфраструктуры, а также теплового воздействия сточных вод [1].

О заметных изменениях климата Москвы и всего Московского региона можно судить по участвовавшим случаям нетипичных погодных условий. Температура воздуха в зимние периоды времени нехарактерна для данного пояса широт и находится выше климатической нормы на несколько градусов. Продолжительность холодного периода сокращается, зимы становятся теплее. В 2015 г. средняя годовая температура воздуха превысила свой исторический максимум и составила 7,4°C. С 1879 г. средняя продолжительность зимнего периода сократилась почти на

месяц. Если в начале периода зима длилась 155 дней (почти 5 месяцев), то в настоящее время около 120 дней (4 месяца) [2].

За последние полвека в Москве наблюдается статистически заметный рост средней общей облачности. Это связано, в частности, с антропогенными выбросами водяных паров, способствующими росту влагосодержания в атмосфере. Среднегодовая влажность воздуха в городе — 76%. Относительная влажность воздуха, отражающая степень насыщения воздуха водяным паром, имеет годовой ход, обратный температуре воздуха. Отмечается тенденция к изменению радиационного баланса в части усиления парникового эффекта. Наблюдается уменьшение числа солнечных часов в начале зимы при увеличении их весной и летом, что коррелирует с интенсивностью выбросов водяного пара энергетическим комплексом города. Вследствие этого центр города теплее окраин в течение всего года. Выпадение ливневых дождей происходит в центре в 1,5 раза чаще, что приводит к уменьшению годовых сумм продолжительности солнечного сияния на 100 часов в год.

В целом в московском регионе наблюдался некоторый рост опасных погодных явлений (ОЯ), оказывающих негативное влияние на объекты городской инфраструктуры, включая топливно-энергетический комплекс (ТЭК), жилищно-коммунальное хозяйство

(ЖКХ), градостроительный комплекс, транспортный, промышленный секторы и, особенно, природную среду и население.

Анализ периода с 2005 по 2015 гг. показывает незначительные различия суммарных ежегодных количеств всех ОЯ в Москве. Обобщение прогностических значений выполнено по таким видам ОЯ, как ледяной дождь и другие ледяные осадки; мокрый снег, гололед, изморозь (без учета диаметра отложения на проводах); сильный мокрый снег, сильное гололедно-изморозное отложение; экстремальные температуры; аномально жаркая погода; аномально холодная погода; продолжительный сильный дождь или сильный ливень; резкие перепады температур; количество переходов температуры через 0°C.

Из всех рассмотренных ОЯ (рисунок 1) наиболее частыми являются: резкие перепады температуры, продолжительный сильный дождь и переходы температуры через 0°C. При анализе учтена только часть переходов через 0°C, которые подпадают под строгое определение этого явления. Кроме того, опасными являются некоторые сочетания данных явлений: «сильный ветер» и «гололед»; «повышенная влажность» и «рост численности переходов через 0°C» и др.

Потребности Москвы в тепловой энергии составляют в среднем 92–99 млн. Гкал/год. Общее потребление электроэнергии в Москве достигает 54,5 млрд. кВт·ч в год, за вычетом потерь и собственных нужд ТЭК к потребителям уходит около 40 млрд. кВт·ч ежегодно. Из них торговля и сфера услуг потребляют около 38%, бытовой сектор — около 28%, промышленность — 15%, транспорт и связь — около 7%, прочие потребители — 1,5%. Потребности в электрической и тепловой энер-

гии обеспечивают 13 ТЭЦ, 66 квартальных и районных тепловых станций, 186 городских и 793 ведомственных котельных. Установленная мощность городских источников тепла составляет свыше 55 тыс. Гкал/ч, мощность городских электрических источников — свыше 14 ГВт. При этом тепловые и электрические нагрузки города связаны между собой: климатические колебания в течение года приводят к колебанию электрических нагрузок в 2,5–3 раза, тепловых — в 7–8 раз. Резерв тепловой мощности энергосистемы составляет 40–45%, пики электрической нагрузки обеспечиваются в основном с помощью гидроаккумулирующей электростанции. В анализируемом периоде наблюдаются отчетливые тенденции роста электрических (по большей части пиковых) нагрузок при фиксации тепловых нагрузок жилого фонда, офисных зданий, бюджетной сферы. Отмечен существенный рост электропотребления с 2–2,5 млрд. кВт·ч в 2007 г. до 13–14 млрд. кВт·ч в 2016 г. предприятиями сферы услуг, торговли, малыми предприятиями [3].

Рост потребления электроэнергии в энергосистеме Москвы и Московской области в 2016 г. обусловлен влиянием температуры наружного воздуха, а также не в последнюю очередь увеличением потребления не промышленной и бытовой группами потребителей, с учетом того, что темпы ввода коммерческой и жилой недвижимости в Москве составляют около 5 млн. м<sup>2</sup> в год. Тепло- и горячее водоснабжение Москвы, Троицкого и Новомосковского административных округов (ТиНАО) обеспечивает ПАО «МОЭК» — ведущая инфраструктурная компания г. Москвы. Компания осуществляет бесперебойное теплоснабжение 12-ти млн. жителей Москвы, являясь оператором самой протяженной теплоэнергетической системы в мире. В эксплуатации компании находится около 15,6 тыс. км тепловых сетей. В результате реорганизации компании, проведенной в октябре 2012 г., ПАО «МОЭК» стало крупнейшей в России и в мире вертикально-интегрированной структурой в сфере производства, транспорта, распределения и сбыта тепловой энергии.

Непосредственное воздействие на устойчивость и экономичность работы генерирующих станций Москвы может оказать изменение температуры наружного воздуха и, как следствие, изменение графиков электро- и теплопотребления. Технические характеристики оборудования гарантируют безаварийность и устойчивость работы генерирующего комплекса при рассматриваемых прогнозных оценках повышения температуры наружного воздуха. Происходящее при этом изменение графика электро- и теплопотребления

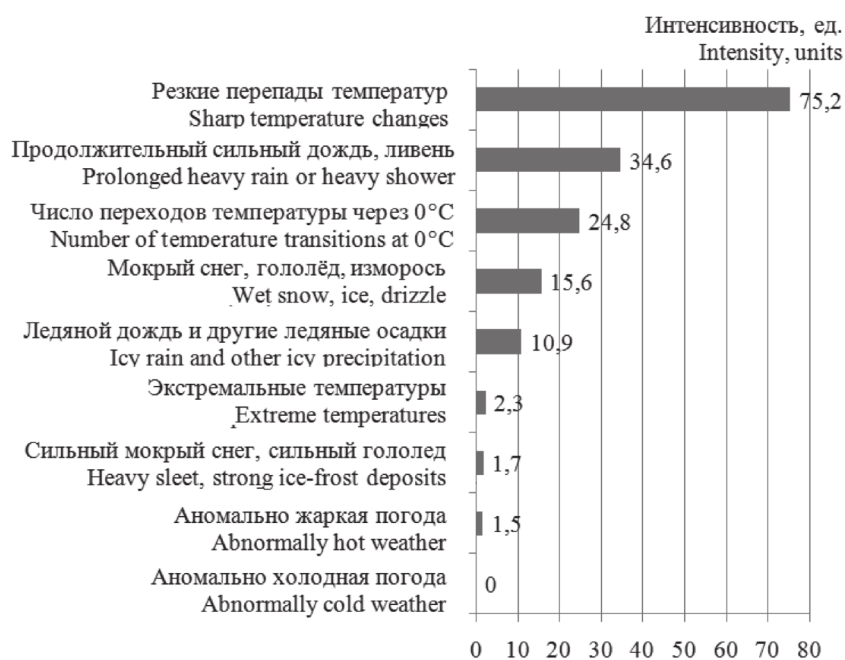


Рисунок 1. Среднее ежегодное число случаев некоторых ОЯ за 2005–2015 гг. [3]

Figure 1. Average annual number of cases of some dangerous climatic phenomena in 2005–2015 [3]



также не может привести к нарушению устойчивости работы генерирующего комплекса благодаря имеющимся резервам мощности и системным связям внутри ЕНЭС.

Климатические изменения оказывают определенное влияние на экономическую эффективность работы ТЭЦ в летний и осенне-весенний периоды. В отопительном периоде из-за уменьшения его продолжительности увеличиваются удельные расходы топлива за счет уменьшения выработки электроэнергии на тепловом потреблении. В летний период одновременно с ростом удельных расходов топлива еще и ожидается рост потребления электроэнергии на кондиционирование. Сравнительный анализ данных по выработке и потреблению электроэнергии по месяцам в Москве и Московской области в 2016 и 2015 гг. с учетом разницы в температуре наружного воздуха (таблица 1) наглядно демонстрирует взаимосвязь амплитуд температур наружного воздуха с приростом выработки и потребления электроэнергии.

Выводы, полученные по результатам проведенного количественного анализа воздействия климатических изменений на экономические результаты работы генерации Москвы, неоднозначны, поскольку на эффективность работы оборудования действуют разнонаправленные факторы. Кроме того, существенное влияние оказывает устойчивая тенденция снижения суммарного теплопотребления благодаря энергосбережению в тепловых сетях и зданиях. Проведенные расчеты показали, что влияние прогнозируемых температур наружного воздуха (+2°C) вследствие климатических изменений оказывают на ТЭЦ г. Москвы разноплановое влияние.

Увеличение электрической нагрузки в летние месяцы, в том числе за счет расхода электроэнергии на кондиционеры и производство холода, отрицательно сказывается на экономических результатах из-за увеличения доли конденсационной выработки на ТЭЦ, вследствие чего повышаются удельные расходы топлива и выбросы в атмосферу. В целом выработка электроэнергии в энергосистеме Москвы и Московской области в 2016 г. составила 74367,8 млн кВт·ч, что на 7,0% выше, чем в 2015 году (рисунок 2).

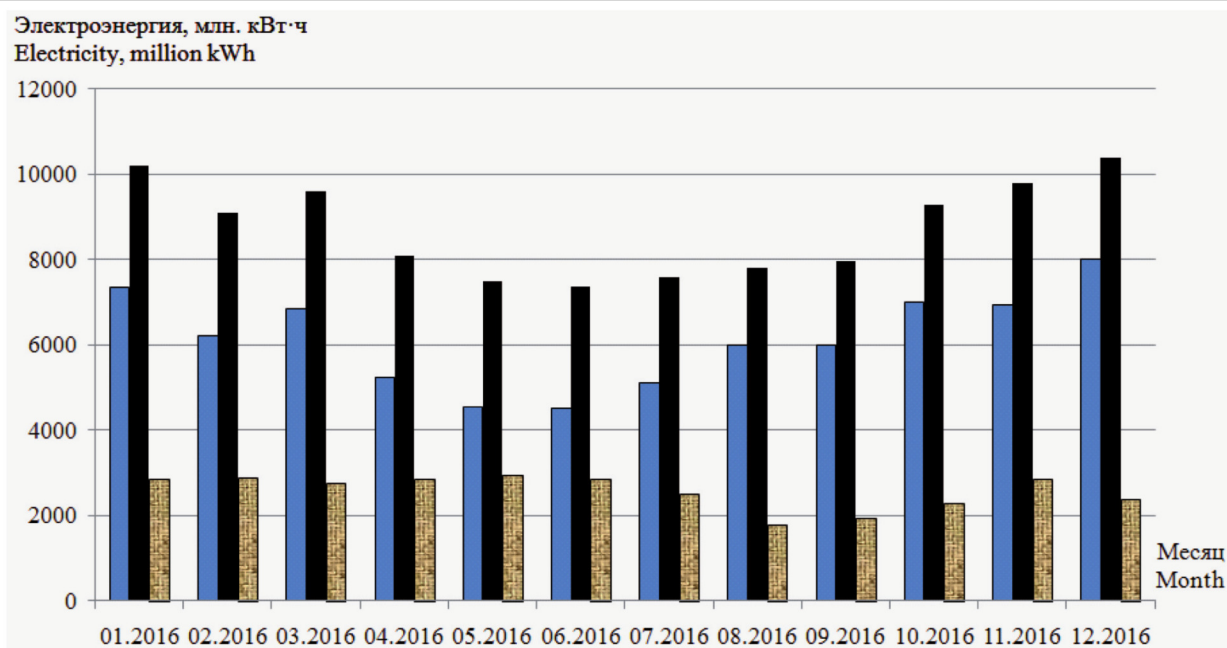
Сокращение отопительного периода приводит к аналогичным результатам в осенне-весенний период. В зимний период существенных изменений технико-

**Таблица 1.** Прирост в выработке и потреблении электрической энергии в Москве и Московской области в 2016 и 2015 гг. (%) с учетом разницы в температуре наружного воздуха  
**Table 1.** Growth in the generation and consumption of electricity in Moscow and the Moscow region in 2016 and 2015. (%) taking into account the difference in the outside air temperature

	Прирост электропотребления Москвы и Московской области в 2016 г. по сравнению с 2015 г. (%) Electricity consumption increase in Moscow and Moscow region in 2016 compared with 2015 (%)	Прирост выработки электроэнергии электростанциями Москвы и Московской области в 2016 г. по сравнению с 2015 г. (%) Increase in electricity generation by Moscow and Moscow region power plants in 2016 as compared to 2015 (%)	Разница в температуре наружного воздуха Москвы и Московской области в 2016 г. по сравнению с 2015 г. (°C) The difference in the outside temperature of Moscow and the Moscow region in 2016 compared to 2015 (°C)
Январь January	+ 4,4 %	+ 1,3 %	- 5,9 °C
Февраль February	+ 1,9 %	- 5,5 %	0
Март March	+ 2,0 %	+ 3,2 %	- 1,8 °C
Апрель April	- 2,8 %	- 11,9 %	+ 2,1 °C
Май May	+ 0,4 %	+ 7,5 %	0
Июнь June	+ 3,9 %	+ 7,5 %	+ 4,5 °C.
Июль July	+ 4,0 %	+ 14,7 %	+ 2,7 °C.
Август August	+ 4,6 %	+ 30,2 %	+ 2,0 °C
Сентябрь September	+ 5,5 %	+ 27,6 %	- 2,5 °C
Октябрь October	+ 1,8 %	+ 3,1 %	0
Ноябрь November	+ 5,6 %	+ 5,1 %	- 3,3 °C
Декабрь December	+ 6,7 %	+ 17,6 %	- 5,0 °C
По итогам 2016 г. Following the results of 2016.	+ 3,5 %	+ 7,0 %	-

экономических показателей не происходит. Влияние прогнозируемого повышения температуры наружного воздуха на величину прибыли ТЭЦ от реализации электро- и теплоэнергии относительно невелико и лежит в диапазоне 2–3%. Тем не менее, это может приводить к росту тарифов на тепловую энергию для потребителей из-за роста ее себестоимости.

В процессе исследования влияния ОЯ на различные составляющие энергетической инфраструктуры Москвы, проведенное в течение 2017 г. [2], проведен анализ надежности и уязвимости элементов и узлов энергосистемы к разным климатическим аномалиям. Из четырех наиболее подверженных воздействию ОЯ составляющих систем электроснабжения, таких, как трансформаторные подстанции и распределительные



**Рисунок 2.** Выработка и потребление электрической энергии в Москве и Московской области в 2016 г. по данным Московского РДУ:

Синее выделение — Выработка электроэнергии ТЭЦ Москвы и Московской области, млн. кВт·ч;

Черное выделение — Потребление электроэнергии, млн. кВт·ч;

Коричневое выделение — Дефицит электроэнергии (суммарный сальдо-переток в энергосистему Москвы и Московской области), млн. кВт·ч;

**Figure 2.** Generation and consumption of electricity in Moscow and the Moscow region in 2016 according to the Moscow RDU

Marked in blue — Power generation by Moscow City and Moscow Region CHPPs, mln kW-hr;

Marked in black — Power consumption, mln kW-hr;

Marked in brown — Power deficit (aggregate net power flow into the power system of Moscow City and Moscow Region), mln kW-hr;

устройства, устройства релейной защиты и автоматики, кабельные распределительные линии и воздушные линии электропередач, наиболее уязвимыми в основном в силу распределенности являются последние.

Для обеспечения надежного электроснабжения мегаполиса требуется наличие разветвленных сетей, объединенных ЛЭП-500кВ в Московское энергетическое кольцо (таблица 2).

Средний уровень износа электрических сетей города Москвы составляет 59,2%. С увеличением уровня физического износа увеличивается подверженность всех элементов системы, в первую очередь — воздушных линий электропередач (ВЛЭП) воздействию климатических факторов. При превышении пороговых значений прочностных нагрузок возникают обрывы сетей (таблица 3), приводящие к нарушениям электроснабже-

ия, недопуску электрической энергии и дополнительным расходам на восстановление целостности системы электроснабжения.

Существует несколько основных причин перерыва электроснабжения в результате ОЯ. В соответствии со статистикой отказов ПАО «МОЭСК» наиболее частой причиной нарушения процесса электропередачи является падение дерева из глубины леса с последующим прекращением электроснабжения посредством: падения на провода ВЛ в пролете опор и нарушения крепления проводов к изоляторам на соседних опорах; обрыва проводов в пролете опор; повреждения опоры; возникновения короткого замыкания и последующего автоматического отключения ВЛ. Причиной нарушения электроснабжения могут быть также сильное гололедно-изморозевое отложение (ледяной дождь), сильный ливневый дождь, очень сильный снег, приводящие к налипанию снега и утяжелению пролетов с последующим аварийным отключением (АО) ВЛЭП и обрывом проводов. Чрезмерная ветровая нагрузка является причиной инициации нарушения электроснабжения. Наиболее частым является нахлест сильным ветром проводов на окружающие предметы (дерево) из-за недопустимого снижения дистанции короткого замыкания. Пролонгированным во времени является ослабление и/или нарушение

**Таблица 2.** Параметры системы электроснабжения Москвы [4]

**Table 2.** Parameters of the power supply system in Moscow [4]

Напряжение Voltage	Общая протяженность участков системы The total length of the sections of the system		Подстанции, шт. Substations, pcs.
	Воздушные линии Overhead lines	Кабельные линии Cable Lines	
0,38 кВ	14 тыс. км	30 тыс. км	
6 – 20 кВ	1350 км	50 тыс. км	
35 – 110 кВ	1100 км		111 (110 кВ)
220 кВ	651 км		57
500 кВ	86,9 км		4



**Таблица 3.** Интенсивность отказов ЛЭП при различных причинах перерыва электроснабжения для сетей Предприятия Магистральных Электрических Сетей напряжением 220 кВ и 500 кВ и ПАО «МОЭСК» для сетей 6 – 110 кВ [4]

**Table 3.** Intensity of power line failures for various reasons of interruption of power supply for the networks of the Company of Backbone Electric Networks with a voltage of 220 kV and 500 kV and PJSC "MOESK" for 6–110 kV networks [4]

	Причины отказов Reasons for failure	Частота отказов по годам Failure rate by years						
		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
1.	Число обрывов проводов в результате высоких ветровых нагрузок ЛЭП 6–110кВ, шт. The number of wire breaks resulting from high wind loads of 6–110 kV transmission lines, pcs.	1784	1803	68	277	301	659	582
2.	Число обрывов проводов в результате высоких ветровых нагрузок ЛЭП 220–500 кВ, шт. The number of wire breaks resulting from high wind loads of 220–500 kV transmission lines, pcs.	30	25	19	14	1	3	2
3.	Грозовые перенапряжения для ЛЭП 220–500 кВ, шт. Lightning overvoltage for power transmission lines 220–500 kV, pcs.	11	9	16	16	14	6	19
4.	Птичий наброс для ЛЭП 6–110 кВ, шт. Bird draft for a 6–110 kV transmission line, pcs.	101	66	46	24	70	39	27
5.	Птичий наброс для ЛЭП 220–500 кВ, шт. Bird draft for power transmission lines 220–500 kV, pcs.	3	4	0	7	3	5	0
6.	Почвенная коррозия для ЛЭП 6–110кВ, шт. Soil corrosion for power transmission lines 6–110 kV, pcs.	393	834	677	0	6	1	0
7.	Коррозия элементов токоведущих частей для РУ и ТП 6–110 кВ Corrosion of elements of current-carrying parts for switchgears and transformers 6–110 kV	104	221	38	9	31	47	1
8.	Разрушение изоляторов для ЛЭП 6–110 кВ, шт. Destruction of insulators for power transmission lines 6–110 kV, pcs.	2577	312	228	97	326	156	139
9.	Разрушение гирлянд изоляторов для ЛЭП 220–500 кВ, шт. Destruction of garlands of insulators for LEP 220–500 kV, pcs.	3	1	1	0	3	1	1
10.	Сильная мгла, приводящая к пробоем по поверхности загрязненных изоляторов для ЛЭП 6–110 кВ, шт. Strong fog, leading to breakdown on the surface of contaminated insulators for 6–110 kV transmission lines, pcs.	7	3	39	221	140	7	4
11.	Общее число отказов по климатическим причинам, шт. Total number of failures due to climatic reasons, pcs.	4966	3239	1096	628	874	909	753
12.	Общее число отказов с учетом всех возможных причин, шт. Total number of failures, taking into account all possible causes, pcs.	8956	8147	7194	1603	3639	12527	13400
13.	Доля отказов по климатическим причинам,% Failure rate for climatic reasons	55,4	39,7	15,2	39,2	24,1	7,3	5,6
14.	Омические потери в сетях с учетом последствий аномально холодной погоды, 10 <sup>6</sup> кВт·ч Ohmic losses in networks, taking into account the consequences of abnormally cold weather, 10 <sup>6</sup> kWh	6,56	8,20	7,66	3,83	6,29	5,47	4,37
15.	Омические потери в сетях с учетом последствий аномально жаркой погоды, 10 <sup>6</sup> кВт·ч Ohmic losses in networks taking into account the consequences of abnormally hot weather, 10 <sup>6</sup> kWh	262,5	87,5	43,7	32,8	76,6	32,8	27,3

механической прочности опор, проводов, изоляторов из-за вибрации и «пляски» проводов, что приводит к их ускоренному разрушению [5].

В период существенного снижения температур окружающего воздуха ( $\leq -30^\circ\text{C}$ ) сильные тряска и вибрация, усиливающие натяжение провода, в сочетании с изменением прочностных свойств элемента вязки проводов по причинам износа, окисления, вибрации ветровыми нагрузками приводят к ослаблению узлов соединения с последующим разрывом цепи. Данный механизм возникает также при относительно небольших морозах, но при достаточно сильном ветре. В таком случае зна-

чения эффективной температуры с учетом охлаждающего эффекта ветра рассчитывается по формуле [6]:

$$t_{\text{эфф}} = 13.12 + 0.6215 t_{\text{в}} - 11.37 v^{0.16} + 0.3965 t_{\text{в}} v^{0.16}, \quad (1)$$

где  $t_{\text{эфф}}$  — эффективная температура с учетом ветра в  $^\circ\text{C}$ ;  $t_{\text{в}}$  — температура воздуха в  $^\circ\text{C}$ ;  $v$  — скорость ветра в км/час. Например, при скорости ветра 20 м/с (сильный ветер) и температуре воздуха  $-20^\circ\text{C}$   $t_{\text{эфф}} = -30^\circ\text{C}$ , при скорости ветра 25 м/с (сильный ветер) и температуре воздуха  $-25^\circ\text{C}$   $t_{\text{эфф}} = -45^\circ\text{C}$ , а при скорости ветра 30 м/с (ураган) и температуре воздуха  $-30^\circ\text{C}$   $t_{\text{эфф}} = -53^\circ\text{C}$ .

Сильная мгла, характеризующаяся сильным помутнением воздуха за счет скопления мельчайших частиц воды, пыли, продуктов горения, является причиной загрязнения поверхности изолятора частицами с низким электрическим сопротивлением с последующим развитием пробоя по поверхности, приводящим к автоматическим отключениям. К аналогичным последствиям, в сочетании с повышенными токами утечки неизолированных проводников, приводит 100%-ая влажность воздуха.

Надежность передачи электрической энергии по ВЛЭП зависит от надежности изоляторов, применяемых в распределительных сетях. Отказ линейной изоляции вызывает до 40% всех отключений в распределительных сетях 10 кВ, что объясняется наличием у многих изоляторов заводских дефектов, а также их дополнительным внесением при транспортировке. Отказ изоляторов наиболее часто происходит по причине воздействия механических нагрузок от проводов или из-за электрического пробоя по поверхности, возникающего, например, по причине сильного загрязнения поверхности. Дуга однофазного короткого замыкания может устойчиво гореть при токах порядка 5А, вызывая при этом полное разрушение изолятора за 1 мин. При воздействии дуги междуфазного КЗ разрушение происходит за 1,5–2 с. [7]. Ускорение старения изоляции происходит в период существенных среднесуточных колебаний температуры воздуха и в связи с наибольшим среднемесячным количеством осадков.

Интенсивность климатического воздействия достигает максимума в период гололедообразования, когда воздействие электромагнитного поля на образование гололедных отложений на воздушных линиях электропередачи особенно велико. Скорость и направление ветра играют немаловажную роль в формировании структуры отложения. При определенных условиях ветер может способствовать слиянию мелких капель в крупные, что влияет на вес образовавшегося осадка [8].

Таким образом, проведенный анализ показал, что из всех ОЯ наибольшее отрицательное воздействие на работу систем энергоснабжения оказывает повышенная ветровая нагрузка либо как самостоятельный фактор, либо в сочетании с другими видами погодных явлений. В строках 1 и 2 таблицы 3 представлены агрегированные данные об отказах для общей протяженности ВЛЭП на территории Москвы, включая ТиНАО.

Необходимо отметить, что многие из перечисленных факторов являются косвенными и не всегда учитываются в статистике отказов работы ВЛЭП. Так, все варианты последствий, вызванные падениями деревьев из глубины леса, сведены в исходной статистиче-

ской документации ПАО «МОЭСК» к факту фиксации короткого замыкания (КЗ). По аналогичным причинам явления «падение дерева», «очень сильный снег, приводящий к утяжелению пролетов проводов», «ледяной дождь», «обрыв по причине порывов ветра с учетом эффективной температуры» и «сильный ливневый дождь, приводящий к утяжелению пролетов проводов» учтены совместно в графе «ветровая нагрузка». Из всех видов отказов выбраны связанные с необходимостью проведения аварийно-восстановительных работ ввиду разрушения элементов системы (в большинстве случаев — обрыв проводов). С применением многофакторного регрессионного анализа [9] получены расчетные функции статистики отказов в зависимости от факторов опасных климатических явлений для случаев:

1) обрыв проводов высоковольтной распределительной сети до 110 кВ включительно (рисунок 3):

$$y_1 = 836.8 - 34.4x_1 + 38.8x_2, \quad (2)$$

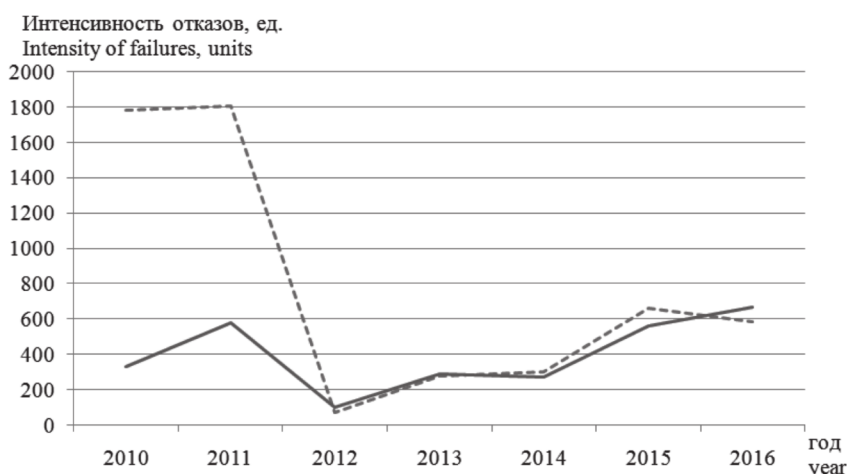
где  $x_1$  — частота фиксации групп климатических факторов: мокрый снег, гололед, изморозь, ледяной дождь, ед./год.;

$x_2$  — частота фиксации групп климатических факторов: сильный ветер, ураган, шквал, ед./год.

2) обрыв проводов магистральных ЛЭП свыше 110 кВ (рисунок 4):

$$y_2 = 26.026 x_1^{0.0216}$$

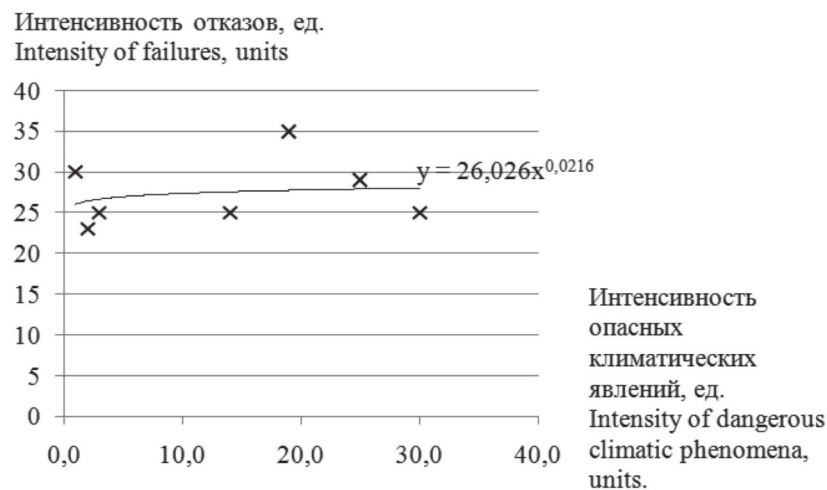
Функциональные зависимости, выведенные для уровня достоверности 95%, позволяют провести оценку интенсивности отказов высоковольтных распределительных сетей до 110 кВ и магистральных сетей свыше 220 кВ вследствие обрывов проводов от ОЯ. Получен-



**Рисунок 3.** Прогнозные и фактические значения частоты обрывов проводов высоковольтной распределительной сети до 110 кВ включительно: -- — ветровая нагрузка для ЛЭП до 110кВ включительно; — — прогнозные значения, полученные на основании многофакторного регрессионного анализа

**Figure 3.** Forecast and actual values of the frequency of wire breaks in a high-voltage distribution network up to 110 kV inclusive: -- — wind load for power lines up to 110kV inclusive; — — predicted values derived from multivariate regression analysis





**Рисунок 4.** Прогнозное и фактическое значения частоты обрывов проводов высоковольтной магистральной сети свыше 220 кВ: x — ветровая нагрузка для ЛЭП 220 кВ; — — степенная функция, аппроксимирующая значения ветровой нагрузки для ЛЭП 220 кВ  
**Figure 4.** Forecast and actual values of the frequency of wire breaks in a high-voltage backbone network over 220 kV: x — wind load for a 220 kV power line; — — power function, approximating the values of the wind load for power lines 220 kV

ные с применением предложенного метода данные по прогнозированию числа отказов в работе линий в результате опасных погодных явлений, связанные с необходимостью замены проводов и изоляторов на ВЛЭП, могут быть использованы для количественной оценки надежности и уязвимости электросетевого хозяйства московского энергоузла к проявлениям изменения климата и связанного с ними ущерба.

Для оценки средней величины ущерба от одной аварии, связанной с обрывом проводов на ЛЭП-220 кВ, применены усредненные данные МЭС-Центра, включая сметы по проведению конкретных аварийно-восстановительных работ, по стоимости замены проводов с учетом затрат рабочего времени и стоимости техники, ГСМ и расходных материалов. Данная сумма составила около 1,2 млн. руб. в ценах 2016 г. Средняя стоимость АВР по сетям МОЭСК до 110 кВ, рассчитанная путем усреднения сметных оценок затрат на проведение подобных работ на ЛЭП разного уровня напряжения (от 6 кВ до 110 кВ) в 2016–17 гг., составляет 650 тыс. руб.

В расчетах ущербов в соответствии с Прогнозом Минэкономразвития индексов дефляторов и индексов цен производителей по видам экономической деятель-

ности до 2019 г. применялось значение среднегодовой инфляции за расчетные периоды 4% в год. Суммарные оценки ущербов от воздействия ОЯ на электросетевой комплекс г. Москвы приведены в таблице 4.

Таким образом, ожидаемый ущерб от ОПЯ в системах электроснабжения можно оценить на уровне 2 млрд. руб. в период с 2017 до 2030 гг. Представляется очевидным, что наибольший ущерб достигается в тех случаях, когда действие повышенной ветровой нагрузки прилагается к наиболее слабым звеньям цепи. Заранее выявить подобные элементы возможно или посредством проведения периодических осмотров и регламентных работ по техническому обслуживанию ЛЭП, или масштабным внедрением средств цифровизации электрических сетей. Первый способ является необходимым адаптационным мероприятием, проводящимся в рамках плановых работ и не требующим дополнительных затрат.

В качестве другого адаптационного мероприятия могла бы быть полная внеплановая замена тех сетей, которые имеют максимальные сроки эксплуатации. При этом следует учитывать, что возможный/прогнозируемый ущерб имеет на данных линиях локальный характер, а замене должна подлежать вся линия ввиду практической невозможности определения состояния составляющих ее элементов. Очевидно, что в таком случае затраты на адаптацию будут превышать прогнозируемые ущербы.

Следующим мероприятием, направленным на предотвращение ущерба от высоких ветровых нагрузок, является расширение зоны отчуждения воздушных ЛЭП, минимизирующее ущербы, связанные с падением деревьев. Программы по расширению зон вырубки деревьев в том или ином виде были приняты к исполнению всеми сетевыми компаниями после ледяного дождя 2010 г., например, по ПАО «МОЭСК» она будет завершена в 2018 г. Данное адаптационное мероприятие не требует дополнительных существенных затрат ввиду того, что затраты на его реализацию включены в инвестиционные программы сетевых компаний.

Кроме того, сетевые компании реализуют целевые инвестиционные программы по повышению надежности, которые предполагают замену предаварийных опор и проводов на основе обследования линий электропередач. Суммарная стоимость целевых инвестпрограмм в течение 9 лет (до 2025 г.) составит около 540,00 млн. руб. без учета НДС. Планируемые капиталовложения ниже предпола-

**Таблица 4.** Суммарные оценки ущербов от ОЯ для электросетевого комплекса г. Москвы  
**Table 4.** Summary estimates of damages from the ON for the power grid complex in Moscow

	2017–2020	2021–2025	2026–2030	2031–2035	2036–2040	2041–2045
Прогноз средних значений ущерба от ОЯ на системы электроснабжения г. Москвы по пятилетиям, млн. руб. Forecast of the average values of damage from OA to the power supply systems in Moscow for the five-year period, million rubles.	657	676	734	826	939	1062

гаемого ущерба, с учетом дисконтирования ущерба от повышенной ветровой нагрузки превысит капиталовложения в адаптацию через 6 лет [10].

## Выводы

1. Исследована проблематика, выявлены и показаны климатические факторы, оказывающие влияние на надежность и безопасность электроэнергетического комплекса московского мегаполиса.

2. Выявлено, что системы электроснабжения Москвы в достаточной мере адаптированы к ожидаемым в ближайшем десятилетии воздействиям, связанным с частотой возникновения и амплитудой опасных природных явлений. Данная адаптационная способность, с одной стороны обеспечивается изначально заложенной высокой надежностью элементов системы электроснабжения, и обеспечиваемой выполнением регламентов по их эксплуатации и обслуживанию, а с другой, активно поддерживается в настоящее время электросетевыми предприятиями.

## Список использованных источников

1. Доклад Департамента природопользования и охраны окружающей среды города Москвы «О состоянии окружающей среды в городе Москве в 2015 году». Департамент природопользования и охраны окружающей среды города Москвы, Москва 2016 г.

2. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации [Официальный сайт] <http://meteo.ru/data> (дата обращения 01.10.2017).

3. Приоритеты устойчивого развития Москвы: энергоэффективность, снижение уязвимости, климатическая адаптация. Доклад на научно-практической конференции «Экология Московского региона – 2017». 23 октября 2017 г. / Е. Г. Гашо, М. В. Степанова, О. А. Климанова и др. Москва 2017: 55.

4. Публичное Акционерное Общество «Московская объединенная электросетевая компания», раздел «Отключения» [Официальный сайт] <http://www.moesk.ru/client/disconnection/#tab-otchet> (дата обращения 01.10.2017).

5. Доронина О. И. Информационно-измерительная система мониторинга надежности воздушных линий электропередач: дис. .... канд. техн. наук. Волгоград; 2014: 137.

6. Охлаждающий эффект ветра. Влияние скорости ветра на ощущаемую (эффективную, действующую) температуру воздуха и конвекционный теплообмен [Электронный ресурс] [http://tehtab.ru/Guide/Guide\\_Tricks/WindChillingEffect/](http://tehtab.ru/Guide/Guide_Tricks/WindChillingEffect/) (дата обращения 01.10.2017).

7. Рыбаков Л. М., Иванова З. Г. Прогнозирование отказов и планирование резерва запасных элементов, аппаратов и оборудования распределительных электрических сетей 10 кВ / Вестник Чувашского университета 2015; 1: 104–111.

8. Панасенко М. В., Ахмедова О. О., Сошинов А. Г. Анализ воз-

действия электромагнитного поля на образование гололедных отложений на воздушных линиях электропередачи // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований 2015; 9: 210–214.

9. Гужов С. В. Методы определения и способы подтверждения энергосберегающего эффекта при передаче и использовании электрической и тепловой энергии. Москва: Издательство МЭИ 2016: 112.

10. Приложение к распоряжению Мэра Москвы от 28 апреля 2017 г. №288-ПМ «Схема и программа перспективного развития электроэнергетики города Москвы на 2017–2022 гг.».

## References

1. Report of the Department of Nature Management and Environmental Protection of the City of Moscow "On the state of the environment in the city of Moscow in 2015". Department of Nature Management and Environmental Protection of Moscow, Moscow 2016. (In Russ.)

2. All-Russian Scientific Research Institute of Hydrometeorological Information [Official site] <http://meteo.ru/data> (circulation date 01.10.2017). (In Russ.)

3. Priorities of Moscow's sustainable development: energy efficiency, vulnerability reduction, climate adaptation. Report at the scientific and practical conference "Ecology of the Moscow region – 2017". October 23, 2017 / Gasho E. G., Stepanova M. V., Klimanova O. A. and others. Moscow 2017: 55.

4. Public Joint Stock Company "Moscow United Electric Grid Company", section "Disconnections" [Official site] <http://www.moesk.ru/client/disconnection/#tab-otchet> (circulation date 01.10.2017). (In Russ.)

5. Doronina O. I. Information-measuring system for monitoring the reliability of overhead power lines: dis. .... Cand. tech. sciences. Volgograd; 2014: 137. (In Russ.)

6. Cooling effect of wind. Effect of wind speed on the perceived (effective, acting) air temperature and convection heat exchange [Electronic resource] [http://tehtab.ru/Guide/Guide\\_Tricks/WindChillingEffect/](http://tehtab.ru/Guide/Guide_Tricks/WindChillingEffect/) (circulation date 01.10.2017). (In Russ.)

7. Rybakov L. M., Ivanova Z. G. Forecasting of failures and planning of reserve of spare parts, apparatuses and equipment of 10 kV distribution networks / Bulletin of the Chuvash University 2015; 1: 104–111. (In Russ.)

8. Panasenko M. V., Akhmedova O. O., Soshinov A. G. Analysis of the effect of the electromagnetic field on the formation of ice deposits on overhead transmission lines // International Journal of Applied and Fundamental Research 2015;9:210–214. (In Russ.)

9. Guzhov S. V. Methods for determining and ways of confirming the energy-saving effect in the transmission and use of electrical and thermal energy. Guzhov S. V. – Moscow: Publishing house MPEI 2016: 112. (In Russ.)

10. Annex to the order of the Mayor of Moscow from 28 April 2017 No. 288-RM "Scheme and program for the future development of the electric power industry in Moscow for 2017–2022 years." (In Russ.)

