

**Keywords:** power grid operation mode, repair scheme, emergency shutdown, substation, emergency automation.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*IVANOV Pavel Gennadievich* – Master’s Student, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: Paveliv83@mail.ru

*KORNEEV Konstantin Borisovich* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: Energy-tver@mail.ru

#### CITATION FOR AN ARTICLE

Ivanov P.G., Korneev K.B. Analysis of the influence of generators of thermal power plants on the operating modes of the power grid of a large Russian city // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 4 (20), pp. 45–50.

УДК 674.093

### ВЛИЯНИЕ МЕТЕОФАКТОРОВ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ОСАДКОВ, ВЫПАВШИХ В ТВЕРИ В 2016–2022 ГГ.

*Ф.В. Качановский*

*Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Качановский Ф.В., 2023

**Аннотация.** Выполнен статистический анализ влияния метеофакторов на удельную электропроводность атмосферных осадков, выпавших в Твери в 2016–2022 годах. Подтверждено и уточнено существование корреляционных связей удельной электропроводности осадков, выпадающих в Твери, с показателем кислотности  $pH$ , температурой воздуха и количеством осадков при удлинении ряда наблюдений на два года (с пяти лет до семи).

**Ключевые слова:** удельная электропроводность, кислотность, атмосферные осадки, модель, временной ряд, тренд, циклическая компонента, сезонная компонента, случайная компонента, показатель кислотности  $pH$ .

**DOI: 10.46573/2658-7459-2023-4-50-58**

Электропроводность атмосферных осадков, являясь одним из индикаторов антропогенного воздействия на водную среду, представляет научный и практический интерес. Публикации об электропроводности достаточно многочисленны и разнообразны [1–7].

В Твери наблюдения за метеофакторами, в том числе и за электропроводностью атмосферных осадков, проводит лаборатория мониторинга окружающей среды Тверского центра по гидрометеорологии. Наблюдения за электропроводностью осадков данная

лаборатория ведет с 2016 года. Интервалы между измерениями изменяются от одних суток до двух декад в зависимости от частоты выпадения осадков. Всего в течение 2016–2022 годов были сделаны 904 измерения удельной электропроводности (около 11 измерений в месяц) [8]. Электропроводность (удельная) осадков измеряется в мкСм/см (микросименсы на сантиметр). Ряд измеренных (срочных) значений удельной электропроводности осадков (далее обозначается как  $sw$ ) показан на рис. 1.

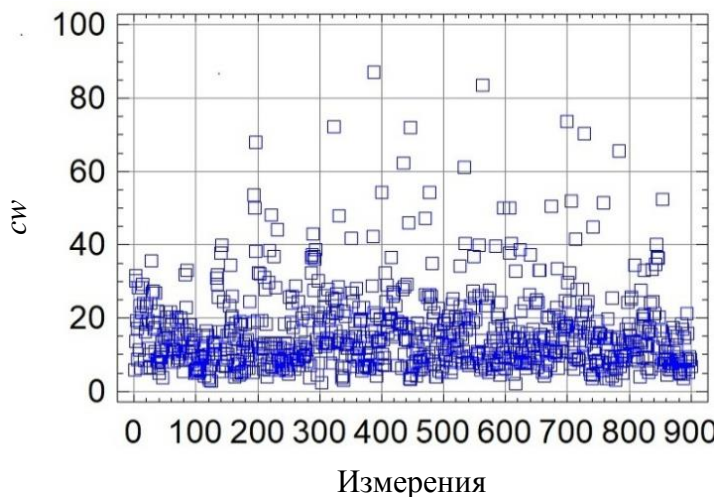


Рис. 1. Измеренные срочные значения удельной электропроводности  $sw$  (2016–2022 годы)

Временная последовательность срочных значений удельной электропроводности  $sw$  преобразована в ряд среднемесячных значений  $amsw$  с равномерным месячным интервалом, что позволяет применить к  $sw$  в качестве эффективного инструмента статистический анализ [11]. Этот прием уже был использован в статьях [3–7].

С учетом опыта применения статистического анализа к рядам показателя кислотности [8] в качестве моделей трендов  $sw$  и  $amsw$  принята кубическая модель. Уравнения кубических трендов семилетнего ряда наблюдений для величин  $sw$  и  $amsw$  имеют вид:

$$sw = 13,3325 + 0,019\ 899\ 6 \cdot n - 0,000\ 029\ 501\ 8 \cdot n^2 + 0,000\ 000\ 008\ 482\ 23 \cdot n^3; \quad (1)$$

$$amsw = 14,759\ 5 + 0,019\ 142\ 6 \cdot n + 0,003\ 066\ 06 \cdot n^2 - 0,000\ 042\ 797 \cdot n^3. \quad (2)$$

Следует отметить, что численные значения коэффициентов у членов третьей степени в формулах (1) и (2) весьма малы и их без существенной погрешности можно отбросить, что превратит кубические модели в квадратические.

Тренды, соответствующие формулам (1) и (2), представлены на рис. 2 и 3. В обоих случаях тренды слабо искривлены и имеют максимум в срединной части, соответствующей концу 2019 года. Сходство трендов  $sw$  и  $amsw$  дает основание предполагать, что при статистическом анализе можно ограничиться изучением свойств  $amsw$ , не потеряв ничего существенного.

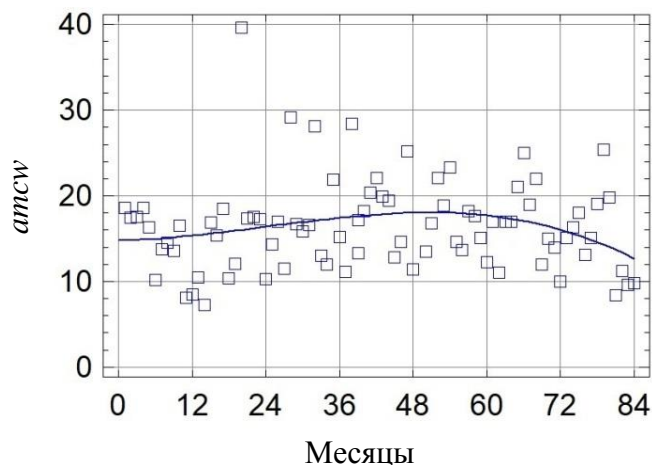


Рис. 2. Кубический тренд  $amtsw$  семилетнего ряда наблюдений (2016–2022 годы)

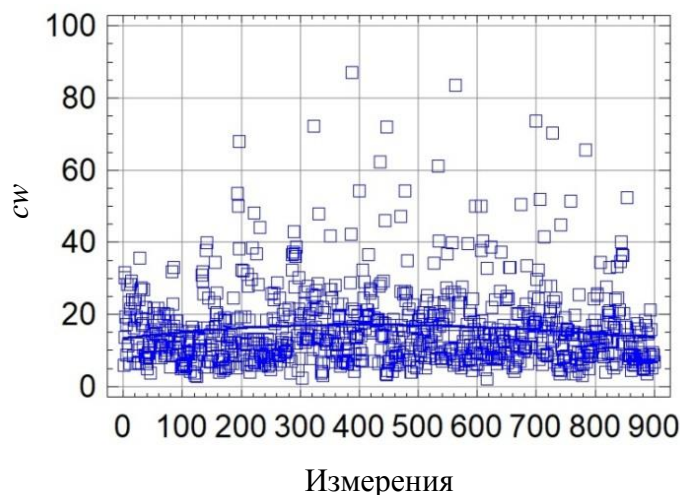
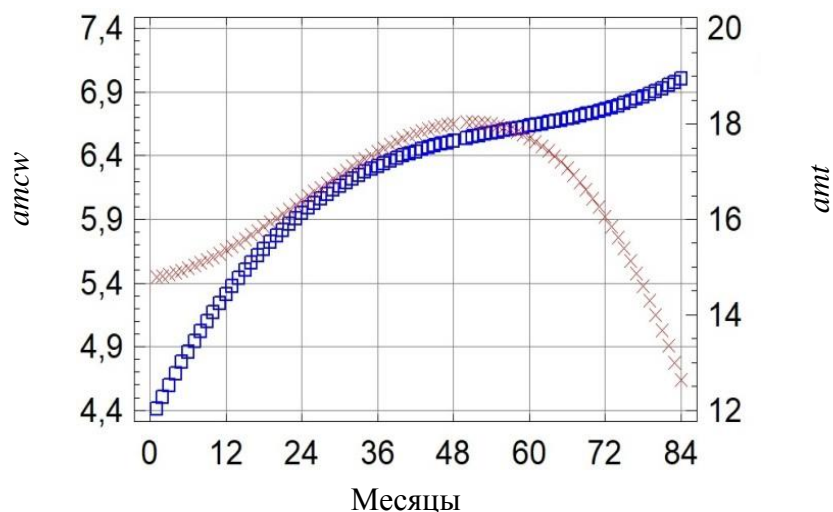


Рис. 3. Кубический тренд  $sw$  семилетнего ряда наблюдений (2016–2022 годы)

Представляет интерес связь электропроводности с таким метеофактором, как температура воздуха  $t$ . Уравнение кубического тренда среднемесячных температур воздуха  $amt$  имеет вид:

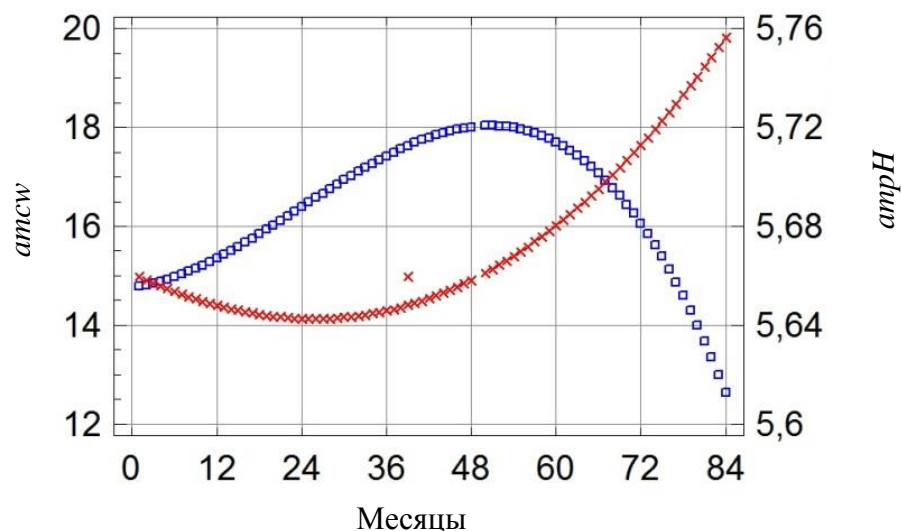
$$amt = 4,310\ 58 + 0,100\ 967 \cdot n - 0,001\ 579\ 14 \cdot n^2 + 0,000\ 009\ 035\ 7 \cdot n^3. \quad (3)$$

Для сравнения кубические тренды  $amtsw$  и  $amt$  показаны на рис. 4. Тренд  $amtsw$  имеет выраженный максимум, который, как уже отмечалось, приходится на конец 2019 года, а тренд температуры  $amt$  монотонно растет в течение всего интервала наблюдений (2016–2022 годы). Это указывает на отсутствие существенного взаимовлияния обсуждаемых факторов. При этом на тренде температуры заметен перегиб, совпадающий по времени с максимумом тренда электропроводности, однако эта деталь требует более обстоятельного рассмотрения.

Рис. 4. Кубические тренды  $atcsw$  и  $amt$  (2016–2022 годы)

Коэффициент линейной корреляции сравниваемых трендов имеет значение 0,303 27, что свидетельствует о существовании относительно слабой (однако статистически значимой на 99%-м уровне доверия) связи между сравниваемыми величинами.

Сопоставление кубических трендов рядов электропроводности  $atcsw$  и показателя кислотности осадков  $atpH$ , представленное на рис. 5, показывает противоположный характер их поведения в течение всего интервала наблюдений за ними.

Рис. 5. Кубические тренды семилетних рядов  $atcsw$  и  $atpH$  (2016–2022 годы)

Уравнения кубических трендов  $atcsw$  и  $atpH$  для семилетнего ряда наблюдений имеют вид:

$$atcsw = 14,759\ 5 + 0,019\ 142\ 6 \cdot n + 0,003\ 066\ 06 \cdot n^2 - 0,000\ 042\ 797 \cdot n^3; \quad (4)$$

$$atpH = 5,681\ 93 + 0,004\ 000\ 86 \cdot n - 0,000\ 314\ 676 \cdot n^2 + 0,000\ 003\ 656\ 84 \cdot n^3. \quad (5)$$

Линейный коэффициент корреляции трендов семилетнего ряда наблюдений составляет  $-0,950\ 643$ , в то время как для шестилетних рядов [7] корреляция несколько слабее, ее коэффициент равен  $-0,871\ 64$ . Это объясняется, по нашему мнению, тем, что при удлинении рядов их тренды становятся более пологими, более похожими друг на друга, и корреляция растет. Синхронность глобальных экстремумов противоположного знака, которая наблюдалась у шестилетних рядов [7], у семилетних исчезла в результате распрямления их трендов.

Удлинение ряда *amsw* на два года (то есть до семи лет) привело к дальнейшему изменению формы кубической модели его тренда (см. рис. 5) по сравнению с предыдущими исследованиями. С удлинением ряда год от года максимум тренда наступал все позже: от января 2019 года у четырехлетнего ряда до марта 2020 года у семилетнего. Отметим еще одну особенность: чем длиннее ряд, тем больше отстает момент наступления максимума кубического тренда от окончания процесса наблюдений. Одновременно с удлинением конечных нисходящих участков трендов происходит уменьшение их наклона.

Сравнение трендов электропроводности *amsw* (см. рис. 5) и количества выпадающих осадков *ampre* (рис. 6) для семилетнего ряда наблюдений указывает на их обратную связь. Связь эта характеризуется относительно слабой, но статистически значимой корреляцией с коэффициентом  $-0,122\ 57$ . Для ряда срочных значений корреляция между электропроводностью *sw* и осадками *pre* более сильная, ее коэффициент корреляции составляет  $-0,213\ 567$ .

В статье [4] сделана попытка перейти от однофакторных зависимостей электропроводности от метеофакторов к двухфакторной зависимости с целью отображения совокупного влияния на электропроводность кислотности осадков и температуры воздуха в пятилетнем ряду наблюдений. В настоящей работе проводится сравнение уравнений регрессии для пятилетнего и семилетнего рядов наблюдений.

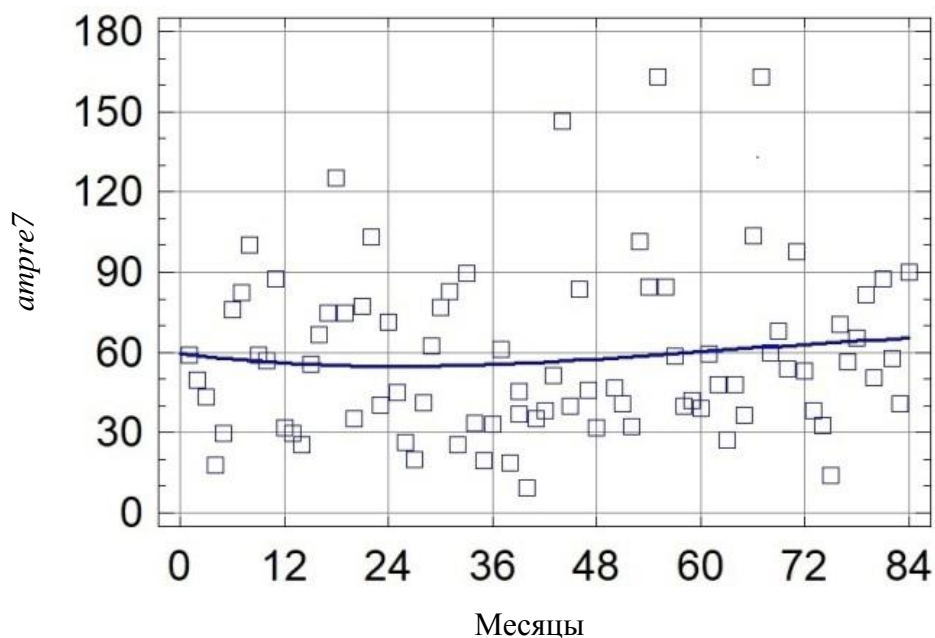


Рис. 6. Кубический тренд среднемесячных осадков *ampre* (2016–2022 годы)

Уравнения регрессии имеют вид:

для срочных значений  $sw$ :

ряд длиной 5 лет

$$sw = -2,918\ 24 + 3,153\ 28 \cdot pH + 0,199\ 623 \cdot t; \quad (6)$$

ряд длиной 7 лет

$$sw = 2,102\ 33 + 2,169\ 26 \cdot pH + 0,253\ 368 \cdot t; \quad (7)$$

для среднемесячных значений:

ряд длиной 5 лет

$$amsw = -3,737\ 42 + 3,489\ 97 \cdot ampH + 0,119\ 535 \cdot amt; \quad (8)$$

ряд длиной 7 лет

$$amsw = 10,472\ 2 + 0,830\ 2 \cdot ampH + 0,200\ 695 \cdot amt. \quad (9)$$

Изменения значений коэффициентов уравнений (7) и (9) в результате удлинения ряда наблюдений имеют сходный, но не идентичный характер. Наблюдается рост значений всех коэффициентов: свободные члены существенно увеличились и стали положительными, коэффициенты при  $pH$  тоже выросли, но более умеренно. Наиболее скромный рост коэффициентов при  $t$ . Все коэффициенты в (7) и (9) статистически значимы. Из двух факторов более влиятельным представляется показатель кислотности осадков  $pH$ . Знаки членов уравнений (7) и (9) указывают на то, что с увеличением значений показателя кислотности и температуры воздуха электропроводность осадков растет.

Включение в круг факторов влияния на электропроводность срочного количества осадков  $pre$  (мм) приводит к уравнению трехфакторной регрессии:

для ряда длиной 5 лет

$$sw = 5,158\ 88 + 2,050\ 1 \cdot pH + 0,288\ 872 \cdot t - 0,492\ 704 \cdot pre; \quad (10)$$

ряда длиной 7 лет

$$sw = -7,829\ 56 + 4,033\ 22 \cdot pH - 0,044\ 073 \cdot t + 0,012\ 357 \cdot pre. \quad (11)$$

В этом случае относительно большое удлинение ряда (5 лет + 2 года) привело к существенным изменениям всех коэффициентов уравнения (11) по сравнению с уравнением (10). Это означает, что тренды при такой длине ряда еще находятся на этапе формирования.

Для оценки влияния на внутригодовую динамику удельной электропроводности осадков  $amsw$  таких метеофакторов, как  $ampH$ ,  $amt$  и  $sumpre$ , используем уже применявшуюся для этого в статье [5] методику, т.е. рассчитаем сезонные компоненты семилетних временных рядов данных факторов. Примем равным 12 месяцам продолжительность периода сезонных колебаний всех факторов  $p$ . В качестве оценки сезонной компоненты используем среднее  $\hat{s}_i$  отклонение значений  $amsw$  от тренда [11], положив для среднемесячной электропроводности

$$\hat{s}_i = \frac{1}{m+1} \cdot \sum_{l=0}^m (amsw_{i+lp} - \hat{tr}_{i+lp}) \quad \text{для } i = 1, \dots, p, \quad (12)$$

где  $m + 1 = 7$  – число (годовых) периодов в ряду наблюдений. Рассчитаем таким же образом среднее  $\hat{s}_i$  отклонение значений  $pH$ ,  $t$  и  $pre$  от их трендов. Годовой ход сезонных компонент (месячных индексов) показан на рис. 7.

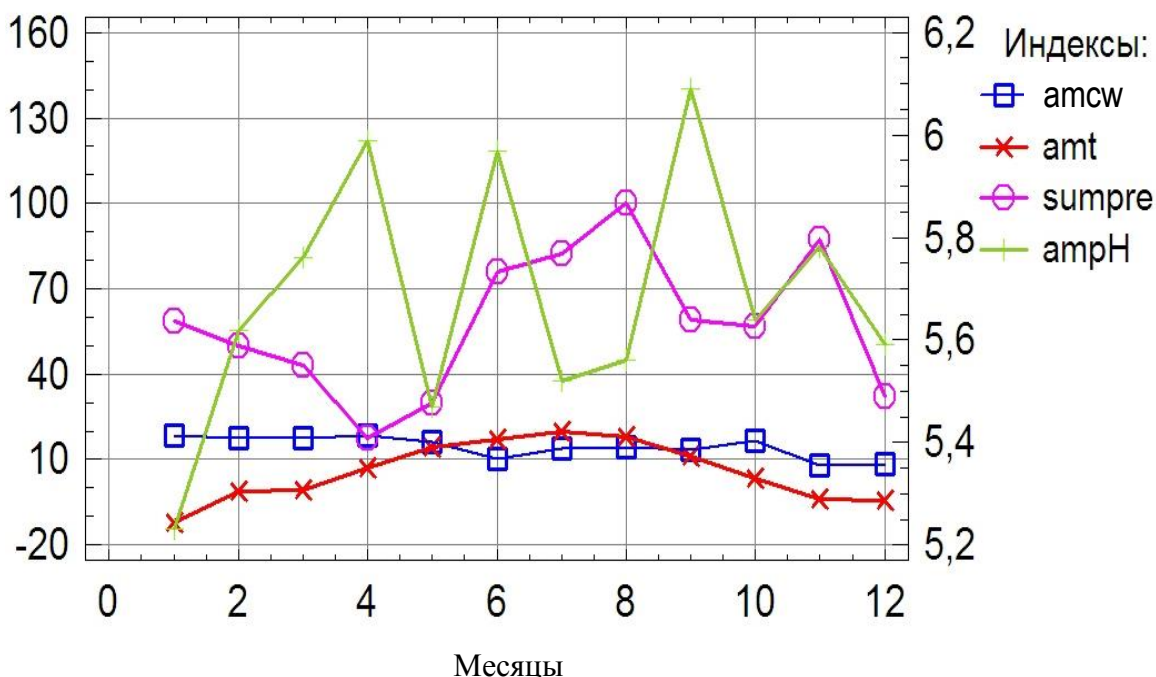


Рис. 7. Годовой ход сезонных (месячных) индексов рядов *amcw*, *amH*, *amt* и *sumpre* (2016–2022 годы)

Индексы удельной электропроводности *amcw* колеблются с небольшой амплитудой и почти незаметно убывают от начала к концу года. Такой характер поведения индекса *amcw*, отличающий его от поведения других факторов, демонстрируемых на рис. 7, косвенно указывает на то, что они слабо влияют на *amcw*.

График хода индексов осадков *sumpre* характерен глубоким апрельским засушливым провалом и дождливыми июлем и ноябрем.

Внутригодовая динамика температур воздуха *amt* традиционна (летом теплее, чем зимой) и не нуждается в отдельном обсуждении.

На графике индексов показателя кислотности осадков *amH* обращают на себя внимание три максимума: апрельский, июньский и сентябрьский, между которыми размещаются майский и июльский минимумы. Отмеченные локальные экстремумы *amH* существовали уже и в пятилетнем ряде [4].

### ВЫВОДЫ

Подведем итоги проведенного исследования:

1. В результате удлинения на два года ряда наблюдений за удельной электропроводностью осадков, показателем кислотности *pH*, температурой воздуха и количеством осадков, выпавших в Твери за 2016–2022 годы, произошли заметные изменения параметров моделей корреляционных связей между электропроводностью и названными метеофакторами.

2. Были построены уточненные регрессионные однофакторные, двухфакторные и трехфакторные модели связей.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Качество воды в Центральной Азии: база знаний: общие и суммарные показатели качества вод: электропроводность. URL: [http://www.cawaterinfo.net/water\\_quality\\_in\\_ca/hydrochem1.htm](http://www.cawaterinfo.net/water_quality_in_ca/hydrochem1.htm) (дата обращения: 14.04.2018).
2. Янченко Н.И. Особенности изменения величины  $pH$  и электропроводности снежного покрова в Братске // *Известия Томского политехнического университета. Химия и химические технологии*. 2014. Т. 325. № 3. С. 23.
3. Качановский Ф.В. Электропроводность осадков, выпадающих в Твери // *Вестник Тверского государственного технического университета, Серия «Строительство, электротехника и химические технологии»*. 2019. № 3 (3). С. 65–71.
4. Качановский Ф.В. Связь электропроводности осадков, выпадающих в Твери, с метеофакторами // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство, электротехника и химические технологии»*. 2020. № 3 (7). С. 69–76.
5. Качановский Ф.В. Удельная электропроводность осадков, выпадающих в Твери // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство, электротехника и химические технологии»*. 2020. № 4 (8). С. 89–97.
6. Качановский Ф.В. Анализ особенностей электропроводности осадков, выпавших в Твери в 2016–2020 гг. // *Вестник Тверского государственного технического университета, Серия «Строительство, электротехника и химические технологии»*. 2021. № 2 (10). С. 47–55.
7. Качановский Ф.В. Что происходит с электропроводностью осадков, выпадающих в Твери, при удлинении ряда наблюдений // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство, электротехника и химические технологии»*. 2021. № 4 (12). С. 66–73.
8. Тверской центр гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды. URL: <http://tvermeteo.ru/?id=9> (дата обращения: 23.08.2023)
9. Качановский Ф.В. О кислотности осадков, выпадающих в Твери // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство, электротехника и химические технологии»*. 2020. № 2 (6). С. 66–74.
10. Голицын А.Н. Инженерная геоэкология. Москва: Оникс. 2007. 202 с.
11. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Статистический анализ данных на компьютере. М.: ИНФРА-М. 1998. 528 с.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ**

*КАЧАНОВСКИЙ* Феликс Вячеславович – доцент кафедры гидравлики, теплотехники и гидропривода, ФГБОУ ВО «Тверской государственной технической университет», 170026, Россия, г. Тверь, наб. А. Никитина, д. 22. E-mail: felix.kachanovsky@yandex.ru

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА**

Качановский Ф.В. Влияние метеофакторов на электропроводность осадков, выпавших в Твери в 2016–2022 гг. // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Строительство. Электротехника и химические технологии»*. 2023. № 4 (20). С. 50–58.



**INFLUENCE OF METEOROLOGICAL CONDITIONS  
UPON THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF THE PRECIPITATION  
IN TVER DURING 2016–2022 YEARS***F.V. Kachanovsky**Tver State Technical University (Tver)*

**Abstract.** Analysis had made of the precipitation's electrical conductivity (atmospheric precipitation had fallen in Tver in 2016–2022 years) and factors of the influence on it. Time series models of the electrical conductivity were examined. Cubic model has considered as adequate.

**Keywords:** conductivity, acidity, acid rain, precipitation, model, time series, trend, cycle component, seasonal component, correlation.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

*KACHANOVSKY Felix Vjacheslavovich* – Associate Professor of the Department of Hydraulics, Heat Engineering and Hydraulic Drive, Tver State Technical University, 22, embankment of A. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: felix.kachanovsky@yandex.ru

**CITATION FOR AN ARTICLE**

Kachanovsky F.V. Influence of meteorological conditions upon the electrical conductivity of the precipitation in Tver during 2016–2022 years // Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology». 2023. No. 4 (20), pp. 50–58.

**УДК 44.31.03:45.43.00:53.07.00****ПРОВЕРКА НА СООТВЕТСТВИЕ ИСТИНЕ  
ЗАКОНОВ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ.  
ЧАСТЬ I. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ ПО ЗАКОНАМ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ГАЗОВЫХ ОБЪЕМОВ***А.Н. Макаров**Тверской государственный технический университет (г. Тверь)*

© Макаров А.Н., 2023

**Аннотация.** Приведены примеры расчетов теплообмена газовых объемов с поверхностями нагрева по законам теплового излучения цилиндрических газовых объемов. Указано, что примеры расчетов подтверждают истинность пяти законов теплового излучения газовых объемов электрических дуг и факелов. Исследователям и читателям предложено на компьютере с помощью программы «Компас» проверить истинность законов теплового излучения газовых объемов.

**Ключевые слова:** тепловое излучение, законы, газовые объемы, факел, электрическая дуга, печи топки, камеры сгорания.