

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 674.093

**ЧТО ПРОИСХОДИТ С ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬЮ ОСАДКОВ,
ВЫПАДАЮЩИХ В ТВЕРИ, ПРИ УДЛИНЕНИИ РЯДА НАБЛЮДЕНИЙ****Ф.В. Качановский***Тверской государственной технической университет (г. Тверь)*

© Качановский Ф.В., 2021

Аннотация. Проведен статистический анализ параметров удельной электропроводности атмосферных осадков, выпавших в Твери в 2016–2020 гг., и связей электропроводности с кислотностью и количеством осадков, а также с температурой воздуха при удлинении ряда наблюдений на один год. Построены однофакторные и многофакторные регрессионные модели связей электропроводности с метеофакторами удлинённого ряда.

Ключевые слова: удельная электропроводность, кислотность, атмосферные осадки, температура воздуха, модель, корреляция, регрессия, факторы, тренд, сезонная компонента, показатель кислотности pH .

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-4-66-74

Электропроводность атмосферных осадков существенно определяет состояние природной среды и в значительной мере обусловлена антропогенным воздействием на среду. Исследование этого фактора представляет как научный, так и практический интерес и давно находится в поле внимания специалистов разных профилей [1–6].

Наблюдения за удельной электропроводностью выпадающих в Твери осадков (обозначим ее sw) проводятся лабораторией мониторинга окружающей среды Тверского центра по гидрометеорологии уже начиная с 2016 г. В течение 2016–2020 гг. было произведено 640 измерений (т.е. около 11 измерений в месяц). Результаты срочных измерений sw показаны на рис. 1. С 1990 г. лаборатория мониторинга проводит также наблюдения за кислотностью осадков (показатель кислотности обозначается далее как pH). Срочные измерения обеих величин (электропроводности и кислотности) производятся одновременно, интервалы между измерениями изменяются от одних суток до двух декад. Проводятся также наблюдения за температурой воздуха, осадками и другими метеофакторами.

Удельная электропроводность осадков sw измеряется в мкСм/см (микросименсы на сантиметр), показатель кислотности pH – безразмерная величина.

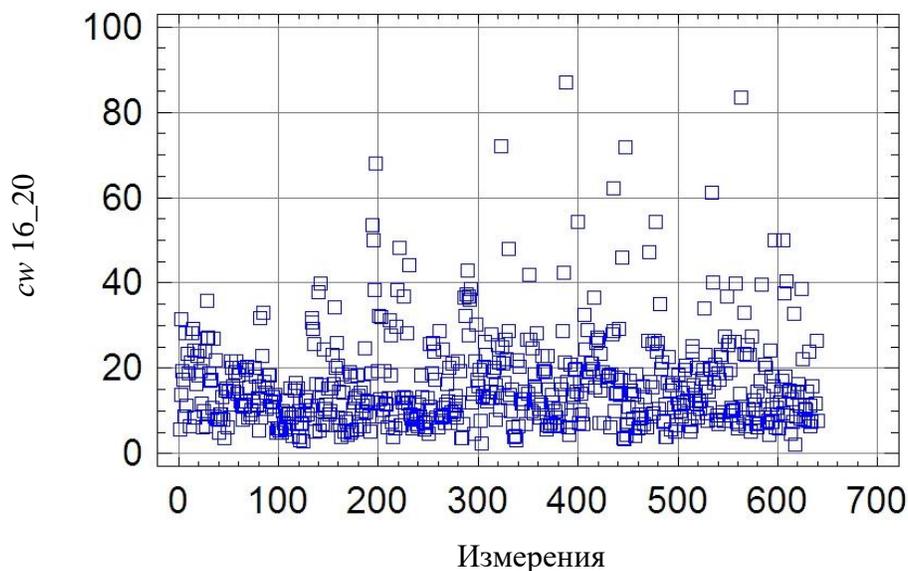


Рис. 1. Результаты измерений электропроводности sw за 2016–2020 гг.

Автором настоящей публикации ежегодно проводится статистический анализ временных последовательностей срочных значений удельной электропроводности sw и показателя кислотности pH , а также последовательностей их среднемесячных значений $amsw$ и $ampH$ [3–5]. В статье изложены результаты исследования связей удельной электропроводности осадков с их кислотностью и количеством, а также с температурой воздуха.

В работе [5] нами было подробно (применительно к 4-летнему ряду наблюдений, с 2016 по 2020 гг.) обсужден вопрос о выборе модели тренда временного ряда sw и, соответственно, модели тренда ряда $amsw$. Из множества регрессионных моделей $amsw$ были взяты для сопоставления три модели простой регрессии: линейная, экспоненциальная и логарифмическая. Сопоставление показало, что для коротких (4-летних) рядов вполне подходящей оказывается линейная модель тренда, которой соответствует коэффициент корреляции 0,22466. Уравнение регрессии имеет вид

$$amsw = 14,2591 + 0,0970909 \cdot n, \quad (1)$$

где n – номер месяца в ряду наблюдений.

Удлинение ряда $amsw$ на один год привело к изменению параметров линейной модели (рис. 2): коэффициент корреляции уменьшился до значения 0,150329, увеличились значения $amsw$ в начале ряда, вдвое снизился темп роста значений $amsw$. Эти изменения качественно характеризуют поведение электропроводности осадков в течение 5-летнего периода наблюдений. Уравнение 5-летнего линейного тренда имеет вид

$$amsw = 15,1585 + 0,0483038 \cdot n. \quad (2)$$

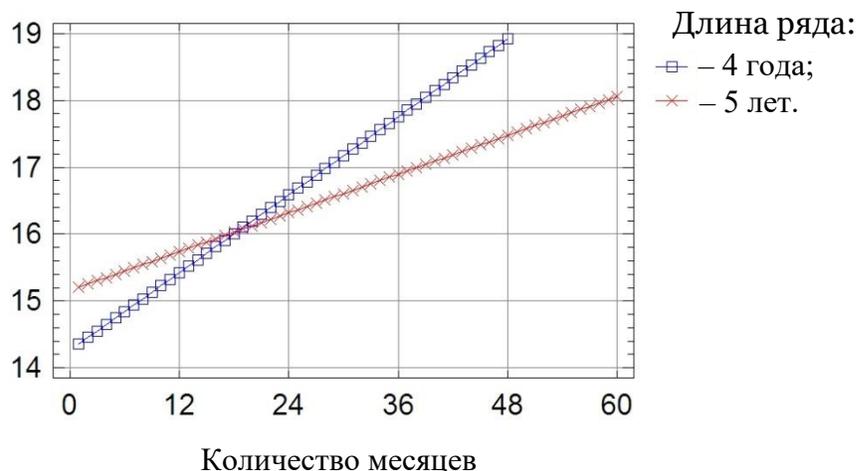


Рис. 2. Линейные тренды $amcw$ для рядов длиной в 4 года (2016–2019 гг.) и 5 лет (2016–2020 гг.)

Линейный тренд (2) сопоставлен с квадратическим (рис. 3), уравнение которого имеет вид

$$amcw = 13,3685 + 0,2213523 \cdot n - 0,00283966 \cdot n^2. \quad (3)$$

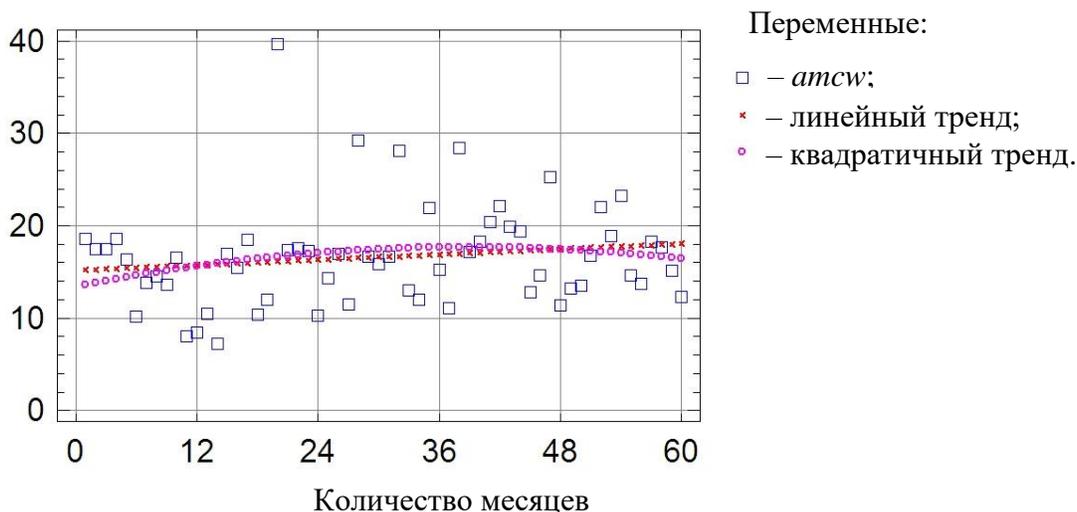


Рис. 3. 5-летний ряд $amcw$ и его тренды (2016–2020 гг.)

Линейный и квадратический тренды мало отличаются друг от друга, однако второй из них указывает на слабо выраженный максимум $amcw$, приходящийся на март 2019 г., и не опровергает вывода из анализа линейного тренда о существовании медленного роста средних значений ряда электропроводности с течением времени.

Связь между среднемесячными значениями электропроводности $amcw$ и показателя кислотности $amrH$ для 4-летнего ряда описывается линейной регрессионной моделью [4]

$$amcw = -10,0444 + 4,7351 \cdot amrH. \quad (4)$$

Уравнение модели для 5-летнего ряда имеет вид

$$amsw = -6,64687 + 4,14616 \cdot ampH. \quad (5)$$

Линии регрессии для обоих рядов показаны на рис. 4. Коэффициент корреляции для 4-летнего ряда $amsw$ составляет 0,272486, а для 5-летнего он несколько меньше – 0,246955.

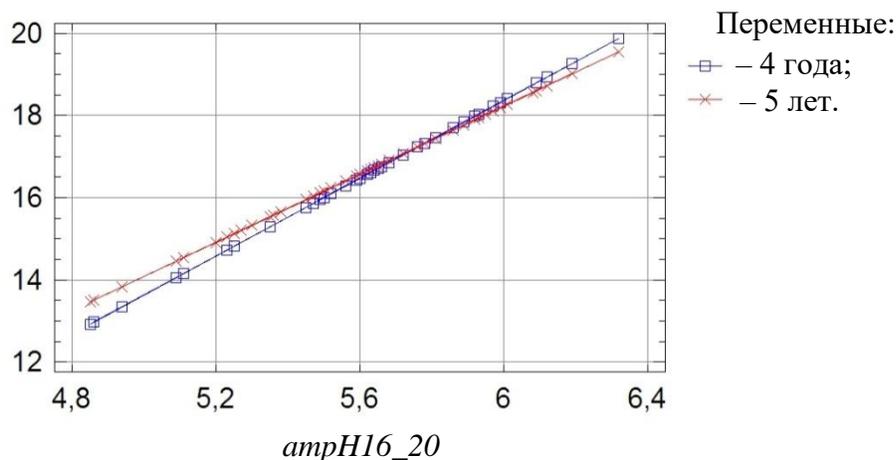


Рис. 4. Линии регрессии $amsw$ - $ampH$ рядов длиной в 4 года (2016–2019 гг.) и 5 лет (2016–2020 гг.)

Линейная связь между срочными значениями электропроводности sw и показателя pH характеризуется уравнениями регрессии вида:

для 4-летнего ряда

$$am = -5,39213 + 3,82533 \cdot pH; \quad (6)$$

для 5-летнего ряда

$$am = -5,70818 + 3,905 \cdot pH. \quad (7)$$

Коэффициент корреляции для 4-летнего ряда sw составляет 0,20234, а для 5-летнего – 0,198448. Корреляция между среднемесячными значениями сильнее, чем между срочными, что является закономерным результатом осреднения значений электропроводности и показателя кислотности при переходе от срочных значений к среднемесячным и не является отражением свойств исследуемых величин.

Удлинение ряда наблюдений на год привело к уменьшению значений коэффициентов корреляции как срочных, так и среднемесячных значений электропроводности и показателя кислотности.

Положительность связи между электропроводностью и показателем кислотности позволяет предположить, что сложившейся за последние 20 с лишним лет тенденции к повышению кислотности атмосферных осадков соответствует постепенное снижение их электропроводности в этот период.

Влияние температуры воздуха на электропроводность осадков для 4-летнего ряда [4] оценивалось по той же методике, что и связь электропроводности с кислотностью осадков. Линейная регрессия среднемесячных значений электропроводности $amcsw$ и среднемесячных температур amt описывается уравнениями вида:

для ряда 2016–2019 гг.

$$amcsw = 15,5888 + 0,176449 \cdot amt; \quad (8)$$

для ряда 2016–2020 гг.

$$amcsw = 15,544 + 0,176707 \cdot amt. \quad (9)$$

Сравнение уравнений (8) и (9) показывает (и рис. 5), что при удлинении ряда на один год параметры модели остались прежними. Коэффициенты корреляции сравниваемых рядов равны 0,256527 и 0,265817 соответственно, т.е. весьма близки друг другу. Это означает, что линейная модель связи $amcsw$ и amt адекватна реальному временному процессу. Связь между срочными значениями электропроводности sw и температурами воздуха t характеризуется коэффициентом корреляции 0,19183 для 4-летнего ряда и для 5-летнего 0,192743 соответственно. Значения эти заметно меньше, чем для $amcsw$ и amt , но несущественно отличаются друг от друга. Уравнения корреляционных линейных моделей для срочных значений sw имеют вид:

для 4-летнего ряда

$$sw = 14,4524 + 0,249723 \cdot t; \quad (10)$$

для 5-летнего ряда

$$sw = 14,4018 + 0,259573 \cdot t. \quad (11)$$

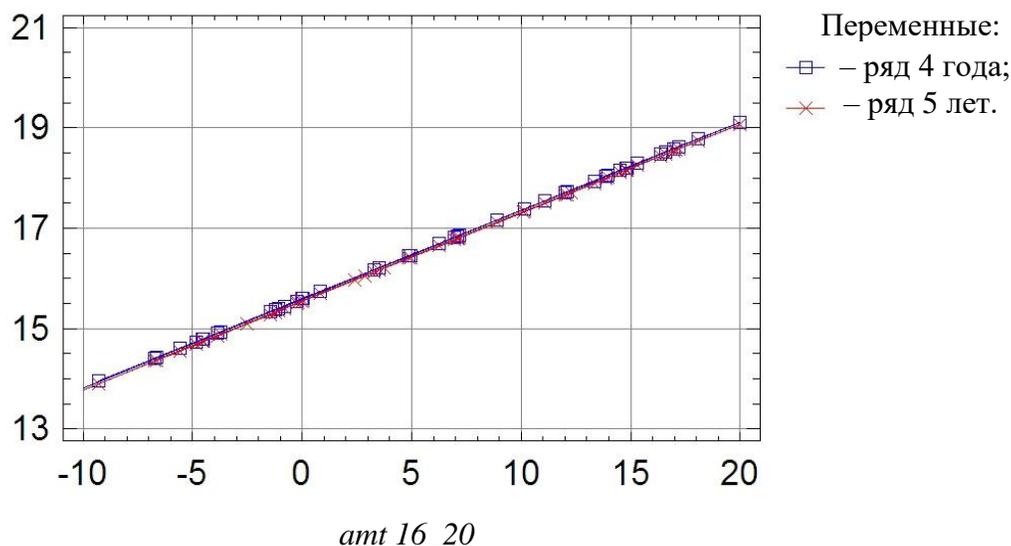


Рис. 5. Связь $amcsw$ и среднемесячных температур воздуха amt для рядов 4 года (2016–2019 гг.) и 5 лет (2016–2020 гг.)

В статье [5] для 4-летнего ряда наблюдений была установлена относительно слабая зависимость удельной электропроводности sw от суточного количества выпадающих

осадков pre (мм). Эта зависимость характеризуется отрицательным коэффициентом корреляции $(-0,210906)$ и уравнением связи

$$cw = 18,2157 - 0,429436 \cdot pre. \quad (12)$$

Для 5-летнего ряда наблюдений отрицательная (и почти так же относительно слабая) зависимость удельной электропроводности cw от суточного количества осадков pre характеризуется коэффициентом корреляции $-0,229997$ и уравнением связи

$$cw = 18,4397 - 0,463309 \cdot pre. \quad (13)$$

Близость значений параметров связи cw и pre у рядов разной продолжительности свидетельствует об устойчивости этой связи.

Оценка совокупного влияния на удельную электропроводность кислотности осадков и температуры воздуха была сделана в статье [5] для 4-летнего ряда построением двухфакторного уравнения регрессии вида

$$cw = -2,91824 + 3,15328 \cdot pH + 0,199623 \cdot t. \quad (14)$$

Для 5-летнего ряда уравнение регрессии приняло вид

$$cw = -3,9433 + 3,32968 \cdot pH + 0,218769 \cdot t. \quad (15)$$

Значения коэффициентов перед переменными в уравнениях (14) и (15) мало отличаются друг от друга, что указывает на устойчивость связи, а их соотношение свидетельствует о сохранении доли вклада этих факторов в конечный результат при удлинении ряда наблюдений. При этом влияние на электропроводность показателя кислотности pH в полтора раза сильнее влияния количества осадков pre .

Рассмотрим трехфакторную связь удельной электропроводности cw с показателем кислотности pH , среднесуточной температурой воздуха t и суточным количеством выпадающих осадков pre . Уравнение регрессии для 4-летнего ряда имеет в этом случае вид [4]

$$cw = 5,15888 + 2,0501 \cdot pH + 0,288872 \cdot t - 0,492704 \cdot pre, \quad (16)$$

а для 5-летнего ряда

$$cw = 5,58455 + 1,93833 \cdot pH + 0,32845 \cdot t - 0,546285 \cdot pre. \quad (17)$$

Из сопоставления уравнений (16) и (17) видно, что при удлинении ряда наблюдений на один год роль показателя кислотности pH незначительно уменьшилась, а роли температуры воздуха t и осадков pre заметно усилились.

Для сравнения внутригодовой динамики удельной электропроводности осадков $amcw$ 4-летнего и 5-летнего рядов использованы сезонные компоненты (месячные индексы) временных рядов этих факторов [8]. Период сезонных колебаний $amcw$ принят равным числу месяцев в году, т.е. 12. Оценкой сезонной компоненты служит среднее \hat{s}_i отклонений значений $amcw$ от тренда \hat{tr}_i , т.е. положено, что для среднемесячной электропроводности

$$\hat{s}_i = \frac{1}{m+1} \cdot \sum_{l=0}^m (amcw_{i+lp} - \hat{tr}_{i+lp}) \quad \text{для } i = 1, \dots, p, \quad (18)$$

где $m + 1 = 4$ и $m + 1 = 5$ – число (годовых) периодов в 4- и 5-летнем ряду наблюдений соответственно. Графики внутригодовой динамики $amcw$ показаны на рис. 6. Общий характер внутригодового поведения удельной электропроводности $amcw$ при удлинении

ряда наблюдений сохранился. Локальные минимумы и максимумы обоих рядов наступают в те же месяцы года. Глобальный максимум (несколько меньший у 5-летнего ряда) приходится на июль, минимальные значения индексов соответствуют зимним месяцам, что согласовывается с внутригодовым ходом температур воздуха.

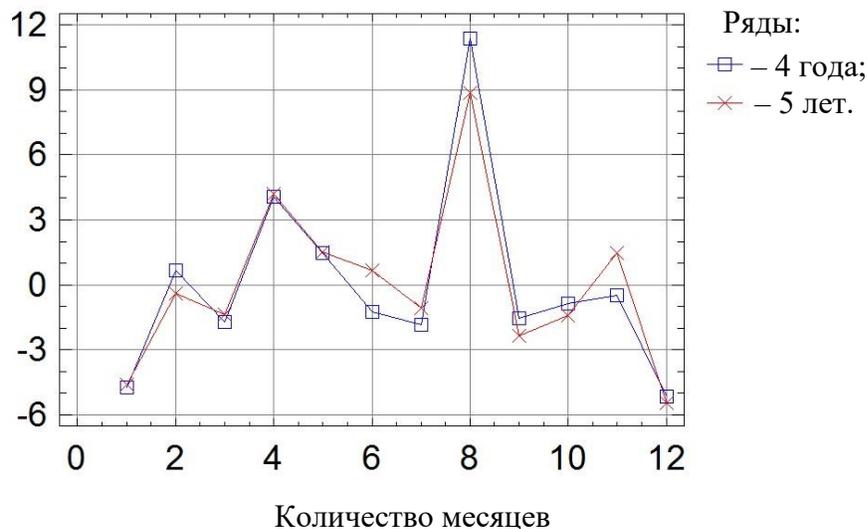


Рис. 6. Годовой ход сезонных компонент (месячных индексов) рядов *атсв* длиной 4 года (2016–2019) и 5 лет (2016–2020)

ВЫВОДЫ

1. Установлены изменения корреляционных связей удельной электропроводности осадков, выпадающих в Твери, с показателем кислотности *pH*, температурой воздуха и количеством выпадающих осадков при удлинении ряда наблюдений на один год.
2. Построены регрессионные одно-, двух- и трехфакторные модели связей для удлиненного (5-летнего) ряда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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 (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. Голицын А.Н. Инженерная геоэкология. М.: Оникс. 2007. 202 с.
7. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа. 1999. 479 с.
8. 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 государственный технический университет», 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, д. 22. E-mail: felix.kachanovscky@yandex.ru

БИБЛИОГРАФИЧЕСКАЯ ССЫЛКА

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. 66–74.

WHAT HAPPENS OF A LENGTHENING OF TIME SERIES FOR ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF THE PRECIPITATION IN TVER

F.V. Kachanovsky

Tver State Technical University (Tver)

Abstract. A statistical analysis of the parameters of the specific electrical conductivity of atmospheric precipitation that fell in Tver in 2016–2020 and the relationship of electrical conductivity with acidity and precipitation amount, as well as with air temperature has been carried out with an extension of the series of observations by one year. One-factor and multifactor regression models of relationships between electric conductivity and meteorological factors of the lengthened series were constructed.

Keywords: specific conductivity, acidity, precipitation, air temperature, model, correlation, regression, factors, trend, seasonal component, pH acidity index.

REFERENCES

1. Water quality in Central Asia: Knowledge base: General and summary indicators of water quality: Electrical conductivity. URL: http://www.ca_water_info.net/water_quality_in_ca/hydrochem1.htm (date of access: 14.04.2018). (In Russian).
2. Yanchenko N.I. Features of the change in the pH and electrical conductivity of the snow cover in Bratsk. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Himiya i himicheskie tekhnologii*. 2014. Vol. 325. No. 323. (In Russian). P. 23.
3. Kachanovsky F.V. Electrical conductivity of the precipitation in Tver. *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2019. No. 3 (3), pp. 65–71. (In Russian).

4. Kachanovsky F.V. Connection of electrical conductivity of precipitation falling in Tver with weather factors. *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2020. No. 3 (7), pp. 69–76. (In Russian).
5. Kachanovsky F.V. Electrical specific conductivity of the precipitation in Tver. *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2020. No. 4 (8), pp. 89–97. (In Russian).
6. Golicyn A.N. *Inzhenernaya geokologiya [Engineering geocology]*. Moscow: Oniks. 2007. 202 p.
7. Gmurman V.E. *Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika [Probability theory and mathematical statistics]*. Moscow: Vysshaya shkola. 1999. 479 p.
8. Tyurin Yu.N., Makarov A.A. *Statisticheskij analiz dannyh na komp'yutere [Statistical analysis of data on a computer]*. Moscow: INFRA-M. 1998. 528 p.

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 Af. Nikitin, Tver, 170026, Russia. E-mail: *felix.kachanovscky@yandex.ru*

CITATION FOR AN ARTICLE

Kachanovsky F.V. What happens of a lengthening of time series for electrical conductivity of the precipitation in Tver // *Vestnik of Tver State Technical University. Series «Building. Electrical engineering and chemical technology»*. 2021. No. 4 (12), pp. 66–74.

УДК 621.3.019:622:519.2

ЭКОНОМИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ РЕМОНТНО-ПРОФИЛАКТИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С ДИАГНОСТИКОЙ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

Г.С. Кузьмин

Тверской государственный технический университет (г. Тверь)

© Кузьмин Г.С., 2021

Аннотация. В статье представлены вероятностная экономико-математическая модель и целевая функция для оптимизации периодичностей технического обслуживания электродвигателей с учетом эксплуатационных профилактических испытаний электрической изоляции и полным аварийным ремонтом при отказе.

Ключевые слова: электродвигатель, ремонт, профилактика, обслуживание, функция распределения, надежность, наработка на отказ, электрическая изоляция, целевая функция, вероятностная модель.

DOI: 10.46573/2658-7459-2021-4-74-79