

Математическое моделирование продолжительности и частоты водопотребления водоразборными устройствами жилого здания

Дмитрий Евгеньевич Поливанов [✉], Алексей Александрович Семенов,
Лия Витальевна Мовсесова

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия
Контакт для переписки: dmitry_polivanov@mail.ru [✉]

Аннотация. Фактические режимы работы систем водоснабжения не могут быть достаточно подробно и точно охарактеризованы несколькими значениями, полученными в ходе выполнения расчетов по традиционным детерминированным методикам и моделям. Тем не менее задача получения исчерпывающих сведений о режимах функционирования систем водоснабжения может решаться с помощью имитационного моделирования, позволяющего детально анализировать изменчивость водопотребления во времени. При этом наиболее важными составляющими данного процесса, которые должны учитываться при моделировании, являются интенсивность, продолжительность и частота водопотребления.

В настоящей статье рассматриваются вопросы математического описания изменчивости продолжительности и частоты водопотребления наиболее распространенными типами водоразборных устройств (смесителями кухонной мойки и ванны / душевой кабины, унитазом со смывным бачком, стиральной и посудомоечной машинами), использующими воду из системы водоснабжения жилого здания.

Целью работы является оценка и обоснование теоретических законов распределения продолжительности водопотребления наиболее распространенными типами водоразборных устройств, а также частоты (вероятности) их использования в течение наиболее характерного периода водопотребления (сутки).

В работе представлены результаты исследования продолжительности и частоты водопотребления наиболее распространенными типами водоразборных устройств. Приведен анализ построенных по полученным статистическим данным гистограмм и графиков, а также оценок основных числовых характеристик. Выполнена

оценка и обоснование теоретических законов распределения продолжительности и частоты (вероятности) водопотребления.

В результате выполненного исследования предложен вариант математического описания характера изменчивости продолжительности периодов непрерывного водопотребления наиболее распространенными типами водоразборных устройств, а также частоты (вероятности) их использования в течение суток.

Ключевые слова: моделирование, водопотребление, закон распределения, логнормальный закон распределения, смеси распределений, вероятностная модель

Цитирование: Поливанов Д. Е., Семенов А. А., Мовсесова Л. В. 2024. Математическое моделирование продолжительности и частоты водопотребления водоразборными устройствами жилого здания // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 10. № 2 (38). С. 69–87. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-2-69-87>

Поступила 15.02.2024; одобрена 20.05.2024; принята 24.05.2024

Mathematical modeling of the duration and frequency of water consumption by water collection devices of a residential building

Dmitrii E. Polivanov✉, Alexey A. Semenov, Liya V. Movsesova

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia

Corresponding author: dmitry_polivanov@mail.ru✉

Abstract. The actual operating modes of water supply systems cannot be characterized in sufficient detail and accurately by several values obtained during calculations using traditional deterministic methods and models. Nevertheless, the task of obtaining comprehensive information about the modes of operation of water supply systems can be solved using simulation modeling, which allows detailed analysis of the variability of water consumption over time. At the same time, the most important components of this process, which should be taken into account when modeling, are the intensity, duration and frequency of water consumption.

This article discusses the mathematical description of the variability of the duration and frequency of water consumption by the most common types of water collection

devices (kitchen sink and bathtub faucets / shower cubicle, toilet bowl with flush tank, washing machine and dishwasher) using water from the water supply system of a residential building.

The aim of the work is to evaluate and substantiate the theoretical laws of the distribution of the duration of water consumption by the most common types of water collection devices, as well as the frequency (probability) of their use during the most characteristic period of water consumption (day).

The paper presents the results of a study of the duration and frequency of water consumption by the most common types of water collection devices. The analysis of histograms and graphs based on the obtained statistical data, as well as estimates of the main numerical characteristics, is presented. The evaluation and substantiation of the theoretical laws of the distribution of duration and frequency (probability) of water consumption has been carried out.

As a result of the performed research, a variant of the mathematical description of the nature of variability in the duration of periods of continuous water consumption by the most common types of water collection devices, as well as the frequency (probability) of their use during the day, is proposed.

Keywords: modeling, water consumption, distribution law, lognormal law, mixtures of distributions, probabilistic model

Citation: Polivanov, D. E., Semenov, A. A., & Movsesova, L. V. (2024). Mathematical modeling of the duration and frequency of water consumption by water collection devices of a residential building. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 10(2), 69–87. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-2-69-87>

Received Feb. 15, 2024; Reviewed May 20, 2024; Accepted May 24, 2024

Введение

Прогнозирование водопотребления — одна из базовых задач, решаемых при выполнении инженерных расчетов для систем водоснабжения. От степени соответствия результатов, полученных в ходе ее решения, фактическим значениям расхода воды в трубопроводах при их эксплуатации будет зависеть качество выполнения системой водоснабжения возложенных на нее функций, экономическая эффективность капитальных и эксплуатационных затрат, а также надежность самой системы [Карамбиров, Бекишева, 2012; Moughton и др., 2012; Сайриллинов, 2020].

Работу системы водоснабжения и качество ее функционирования невозможно детально рассмотреть и оценить на основании всего нескольких значений расчетного расхода, полученных по имеющимся аналитическим методикам, изложенным в действующих нормативных документах [СП 30.13330.2020]. Традиционные детерминированные модели потокораспределения в системах водоснабжения также

не позволяют достаточно подробно и точно охарактеризовать фактические режимы их работы, которые формируются под влиянием случайных воздействий внешней среды [Новицкий, Вантеева, 2008].

В связи с этим для обеспечения возможности принятия наиболее обоснованных технических решений важным и актуальным вопросом является разработка математических моделей, способных описывать процесс водопотребления и его изменчивость во времени.

Помимо усовершенствования расчетных методик, подробная математическая модель, отражающая природу процесса потребления воды, позволит более детально рассматривать и анализировать данный процесс.

Водопотребление по своей природе является стохастическим процессом, зависящим от огромного количества факторов [Чупин, Душин, 2009; Карамбиров и др., 2012; Николенко, Рыжаков, 2019; Салугин, Балкушкин, 2021]. На изменчивость водопотребления влияет практически всё, что так или иначе сказывается на поведении потребителей или устройстве системы водоснабжения: от режима работы (жизни) потребителей до экономических и социально-демографических факторов [Исаев, Мхитарян, 2003; Mazzoni и др., 2023]. Неопределенность и стохастический характер данного процесса подчеркивались многими авторами, занимающимися вопросами разработки математических моделей водопотребления и определения расходов воды в системах водоснабжения [Buchberger, Wu, 1995; Alvisi и др., 2003; Новицкий, Вантеева, 2011; Карамбиров и др., 2013; Vertommen и др., 2015]. В период с 1995 по 2023 г. выделяются также работы зарубежных авторов, занимающихся исследованиями в области вероятностного моделирования процесса водопотребления [Buchberger, Wu, 1995; Buchberger, Wells, 1996; Alvisi и др., 2003; Blokker, Vreeburg, 2012; Vertommen и др., 2012; Mazzoni и др., 2023].

Исходной величиной, влияющей на формирование расхода воды в трубопроводах, является элементарный расход (т. е. расход воды одним водоразборным устройством). Однако в наиболее распространенном случае, когда вода по трубопроводу подается к нескольким водоразборным устройствам, наличие сведений о величине каждого из обеспечиваемых по трубопроводу элементарных расходов еще не дает представления о расходе воды непосредственно в самом трубопроводе. Причиной является возможное полное совпадение, несовпадение или частичное совпадение во времени элементарных расходов воды.

Выявить наличие таких совпадений можно путем построения графиков в виде прямоугольных импульсов, отражающих время начала и окончания работы прибора, а также ее продолжительность.

Рассмотрению вопросов интенсивности водопотребления для различных типов водоразборных устройств посвящены другие работы авторов настоящей статьи (см., например, [Поливанов, Семенов, 2023а, 2024]).

Целью данного исследования является оценка и обоснование теоретических законов распределения продолжительности водопотребления наиболее распространенными типами водоразборных устройств, а также частоты (вероятности) их использования в течение наиболее характерного периода водопотребления (сутки).

Методы

Для получения необходимых статистических данных было проведено наблюдение за наиболее распространенными типами водоразборных устройств в системе внутреннего водоснабжения здания, такими как смеситель кухонной мойки, смеситель ванны / душевой кабины, унитаз со смывным бачком, стиральная машина, посудомоечная машина.

Наблюдение выполнялось круглосуточно, без перерывов. Непрерывность наблюдения была обеспечена путем применения разработанной авторами системы, позволяющей в автоматизированном режиме фиксировать, обрабатывать, записывать, хранить и передавать данные, в том числе при помощи Интернета. Подробное описание данной системы представлено авторами ранее [Поливанов, Семенов, 2023б].

Анализ и обработка полученных данных были выполнены при помощи методов теории вероятностей и математической статистики. Первичная обработка статистической информации о временных показателях работы водоразборных устройств была выполнена в разработанной авторами программе на языке C#, а визуализация результатов (построение гистограмм, диаграмм размаха, графиков и т. д.) и статистический анализ данных (расчет основных числовых характеристик случайных величин, оценка параметров распределений по эмпирическим данным, расчет критериев согласия и т. д.) — в разработанной авторами программе на языке R.

Полученный в ходе исследования набор статистических данных был сгруппирован по типам рассматриваемых водоразборных устройств и типу системы водоснабжения. Затем для каждого водоразборного устройства и типа системы водоснабжения данные были обработаны и сгруппированы по интервалам. Количество интервалов для первичной группировки данных определялось по правилу Стёрджеса [Sturges, 1926]:

$$k = 1 + 3,322 \cdot \lg n,$$

где k — оптимальное количество интервалов, n — объем выборки. Полученное значение было округлено до ближайшего меньшего целого числа.

Первичная оценка теоретических законов распределения временных показателей работы водоразборных устройств была выполнена в результате комбинирования следующих двух способов [Волгин, Масленникова, 2010]: 1) анализа оценок основных числовых характеристик, рассчитанных по эмпирическим данным (оценки моды, медианы, математического ожидания, дисперсии и среднеквадратичного отклонения, коэффициента вариации, коэффициента асимметрии и эксцесса); 2) сравнительной оценки гистограмм и кривых плотности вероятности, построенных по эмпирическим данным, с известными теоретическими законами распределения.

В дополнение к указанным способам при первичном выдвижении гипотезы о теоретических законах распределения авторы руководствовались в том числе соображениями о природе исследуемых процессов и способах их дальнейшего представления в имитационной модели системы водоснабжения с учетом ранее опубликованных работ других авторов [Buchberger, Wu, 1995; Alvisi и др., 2003; García и др., 2004; Blokker, Vreeburg, 2012; Mazzoni и др., 2023].

Оценка параметров рассматриваемых видов распределений была выполнена методом максимального правдоподобия. Выбор данного метода обусловлен его наилучшими асимптотическими свойствами [Лемешко и др., 2018].

Для декомпозиции смесей вероятностных распределений применялся EM-алгоритм [Dempster и др., 1977]. Расщепление смесей нормальных распределений было выполнено в разработанной авторами программе на языке R с помощью функции `normalmixEM` из пакета `mixtools`.

Представление любого набора эмпирических данных в виде теоретического закона распределения всегда является некоторым приближением, и фактические отклонения эмпирических значений от теоретических неизбежны. Данный факт объясняется относительно малым количеством теоретических законов распределения (немного превышает 100), в том числе применяемых при статистическом анализе в научных исследованиях (порядка 30), которые не могут в точности описать все случайные величины, встречающиеся на практике [Лемешко, 1998].

Однако имеющиеся методы математической статистики позволяют оценить однородность эмпирических данных и теоретических законов распределения при заданном уровне значимости, который в данном исследовании был принят $\alpha = 0,05$. Оценка однородности эмпирических данных и теоретических законов распределения была выполнена по репрезентативным выборкам меньшего объема.

Оценка принадлежности рассматриваемых выборок нормальному закону распределения выполнялась на основании рассчитанного критерия Шапиро — Уилка. Критерий был рассчитан в разработанной авторами программе на языке R с помощью функции `shapiro.test` из пакета `stats`.

Оценка однородности эмпирических данных и теоретических законов распределения (за исключением нормального) была выполнена с применением критерия Колмогорова [1986]. Статистика критерия определялась по формуле

$$D_n = \sup_x |F_n(x) - F(x)|,$$

где $F_n(x)$ и $F(x)$ — эмпирическая и теоретическая функции распределения соответственно, D_n — статистика критерия.

Уровень значимости и статистика критерия были рассчитаны в разработанной авторами программе на языке R с помощью функции `ks.test` из пакета `stats`.

Результаты и обсуждение

При выполнении данного исследования было получено 12 746 результатов измерений продолжительности периодов непрерывного водопотребления для всех рассматриваемых водоразборных устройств. Количество периодов непрерывной работы с распределением по типам водоразборных устройств и типам системы водоснабжения представлено в таблице 1. Дальнейший анализ полученных значений выполнялся отдельно для каждого типа водоразборного устройства и системы водоснабжения.

Сведения об основных числовых характеристиках и значениях их оценок, рассчитанных по эмпирическим выборкам, приведены в таблице 2.

Таблица 1. Количество выполненных измерений для каждого из водоразборных устройств

Table 1. The number of measurements performed for each of the water sampling devices

Место установки датчика расхода воды	Условное обозначение	Количество измерений
Трубопровод холодного водоснабжения, подающий воду к смесителю кухонной мойки	СМКх	4 053
Трубопровод горячего водоснабжения, подающий воду к смесителю кухонной мойки	СМКг	2 715
Трубопровод холодного водоснабжения, подающий воду к смесителю ванны	СМВх	837
Трубопровод горячего водоснабжения, подающий воду к смесителю ванны	СМВг	1 628
Трубопровод холодного водоснабжения, подающий воду к смывному бачку унитаза	Ух	2 321
Трубопровод холодного водоснабжения, подающий воду к посудомоечной машине	Пмх	469
Трубопровод холодного водоснабжения, подающий воду к стиральной машине	Стх	723

Таблица 2. Оценки основных числовых характеристик продолжительности непрерывной работы водоразборных устройств

Table 2. Estimates of the main numerical characteristics of the duration of continuous operation of water sampling devices

Показатель	Место установки датчика расхода воды						
	СМКх	СМКг	СМВх	СМВг	Ух	Пмх	Стх
Характеристики положения							
Оценка моды (\hat{M}_{q_0} , с)	5	5	5	60	65	9	10
Оценка медианы ($\hat{M}e_{q_0}$, с)	11	12	41	25	68	52	13
Оценка математического ожидания (\hat{m}_{q_0} , с)	15,15	15,96	88,88	67,29	67,28	48,72	30,68
Характеристики рассеяния							
Оценка дисперсии (\hat{D}_{q_0} , с ²)	209	250	17 666	12 973	705	1 190	1 344
Оценка среднеквадратичного отклонения ($\hat{\sigma}_{q_0}$, с)	14,45	15,81	132,91	113,90	26,55	34,49	36,66
Оценка коэффициента вариации (\hat{C}_v)	0,95	0,99	1,50	1,69	0,39	0,71	1,20
Характеристики формы							
Оценка коэффициента асимметрии (\hat{C}_s)	4,18	7,57	3,10	3,32	5,52	-0,05	2,01
Оценка эксцесса (\hat{E}_{q_0})	28,96	138,05	12,25	11,96	127,11	-1,81	3,00

Диаграмма размаха, представленная на рис. 1, позволяет визуальнo оценить степень разброса продолжительности периодов непрерывного водопотребления для рассматриваемых выборок.

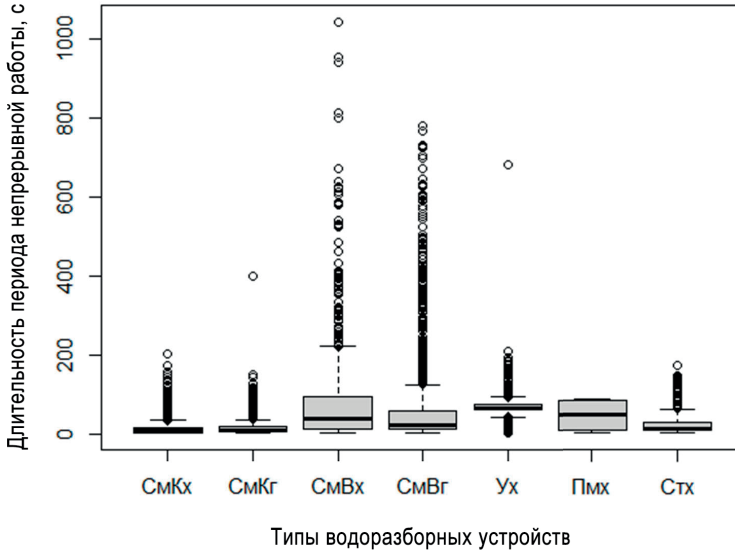


Рис. 1. Диаграмма размаха эмпирических выборок продолжительности непрерывной работы водоразборных устройств

Fig. 1. A diagram of the scope of empirical samples of the duration of continuous operation of water sampling devices

Поскольку выборка продолжительности периодов непрерывного водопотребления посудомоечной машиной имеет явные признаки того, что ее математическое описание потребует применения смеси теоретических законов распределения, статистические гипотезы о ее соответствии известным теоретическим законам распределения не выдвигались.

Гипотеза о принадлежности рассматриваемых эмпирических выборок закону нормального распределения была отвергнута на основании рассчитанного критерия Шапиро — Уилка. Сведения о рассчитанном уровне значимости критерия p_{value} приведены в таблице 3.

Таблица 3. Значения p_{value} , полученные в результате расчета критерия Шапиро — Уилка

Table 3. Values p_{value} obtained as a result of calculating the Shapiro–Wilk criterion

Выборка	p_{value}
СМКх	$8,90 \cdot 10^{-17}$
СМКг	$7,85 \cdot 10^{-17}$
СМВх	$1,47 \cdot 10^{-17}$
СМВг	$4,90 \cdot 10^{-20}$
Ух	$4,06 \cdot 10^{-9}$
Стх	$4,45 \cdot 10^{-17}$

На основании проанализированных оценок основных числовых характеристик, рассчитанных по эмпирическим выборкам (таблица 2), диаграмм размаха (рис. 1) и сравнительной оценки графиков плотности вероятности известных теоретических законов распределения случайных величин с кривой плотности вероятности, построенной по эмпирическим данным, авторами был выдвинут ряд гипотез о возможных законах распределения, которыми могут быть описаны рассматриваемые случайные величины. В качестве нулевых выдвигались гипотезы о соответствии рассматриваемых выборок следующим теоретическим законам распределения: 1) логнормальному распределению $X \sim \text{LogN}(\mu, \sigma^2)$; 2) распределению Вейбулла $X \sim W(k, \lambda)$; 3) гамма-распределению $X \sim \Gamma(k, \theta)$; 4) показательному (экспоненциальному) распределению $X \sim \exp(\lambda)$.

Рассчитанные оценки параметров рассматриваемых законов распределения для каждой из выборок приведены в таблице 4.

Таблица 4. Значения оценок параметров теоретических законов распределения

Table 4. Values of parameter estimates of theoretical distribution laws

Теоретический закон распределения	Обозначение параметра	СМКх	СМКг	СМВх	СМВг	Ух	Стх
Логнормальное распределение	μ	2,45	2,51	3,66	3,44	4,11	2,95
	σ	0,676	0,675	1,31	1,13	0,529	0,887
Распределение Вейбулла	k	1,30	1,30	0,782	0,798	2,31	1,01
	λ	16,63	17,51	75,39	57,05	74,37	30,78
Гамма-распределение	k	2,05	2,08	0,726	0,778	5,19	1,19
	θ	7,35	7,69	125	83,33	12,99	25,64
Экспоненциальное распределение	λ	0,066	0,063	0,011	0,015	0,015	0,033

Решение об отклонении или принятии нулевой гипотезы о виде теоретического закона распределения принималось на основании рассчитанного критерия Колмогорова для каждой из выборок. Сведения о рассчитанном уровне значимости критерия p_{value} приведены в таблице 5.

Таблица 5. Тип теоретического закона распределения и рассчитанный уровень значимости критерия Колмогорова

Table 5. Type of theoretical distribution law and calculated significance level of Kolmogorov criterion

Теоретический закон распределения	СМКх	СМКг	СМВх	СМВг	Ух	Стх
Логнормальное распределение	0,072	0,057	0,062	0,209	$1 \cdot 10^{-7}$	0,002
Распределение Вейбулла	$4 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	0,044	0,004	$9 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-5}$
Гамма-распределение	0,006	0,019	0,028	$8 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$
Экспоненциальное распределение	$1 \cdot 10^{-10}$	$7 \cdot 10^{-10}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-16}$	$7 \cdot 10^{-5}$

Результаты выполненных расчетов, приведенные в таблице 5, позволяют утверждать, что для эмпирических выборок продолжительности периодов непрерывного водопотребления смесителями кухни и ванной / душевой кабины нет оснований отвергать нулевую гипотезу о логнормальном теоретическом законе распределения. Для нулевых гипотез об однородности данных выборок и теоретических законов распределения Вейбулла, гамма-распределения и экспоненциального распределения были выявлены статистически значимые различия, а соответственно, есть достаточные основания для их отклонения.

Для выборок продолжительности периодов непрерывного водопотребления смывным бачком унитаза и стиральной машиной все рассматриваемые нулевые гипотезы о виде теоретического закона распределения были отклонены ввиду выявления статистически значимых различий.

Авторами была рассмотрена возможность применения смеси теоретических законов распределения как один из возможных вариантов описания изменчивости продолжительности периодов непрерывного водопотребления смывным бачком унитаза, стиральной и посудомоечной машинами.

Общий вид плотности вероятности смеси теоретических законов распределения случайной величины может быть представлен в виде

$$f(x) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot p_i(x),$$

где n — количество компонентов смеси, w_i — удельный вес i -го компонента смеси, $p_i(x)$ — i -й компонент смеси (плотность вероятности).

При выполнении декомпозиции смесей распределений предполагалось, что компоненты смесей однотипны, т. е. все $p_i(x)$ принадлежат одному и тому же семейству распределений — нормальному распределению.

В результате выполнения декомпозиции смесей распределений для выборок продолжительности периодов непрерывного водопотребления смывным бачком унитаза, посудомоечной и стиральной машинами были определены: количество компонентов смесей, оценки весов компонентов смесей, оценки параметров компонентов смесей, а также рассчитан уровень значимости критерия Колмогорова. Результаты выполненных расчетов сведены в таблицу 6.

Поскольку рассчитанный уровень значимости критерия Колмогорова превышает заданное значение $\alpha = 0,05$, отвергать нулевую гипотезу о том, что выборки продолжительности непрерывного водопотребления смывным бачком унитаза, посудомоечной и стиральной машинами распределены в соответствии с рассмотренными законами, оснований нет.

Полученные в результате выполнения исследования закономерности, отражающие характер изменчивости продолжительности непрерывного водопотребления наиболее распространенными типами водоразборных устройств, приведены в таблице 7.

Таблица 6. Результаты декомпозиции смесей распределений для выборок Ух, Пмх, Стх и значение p_{value}

Table 6. Results of decomposition of mixtures of distributions for samples of Ух, Пмх, Стх and the value of p_{value}

Порядковый номер (i) компонента смеси	Удельный вес i-го компонента смеси	Значение параметров i-го компонента смеси		Уровень значимости критерия Колмогорова p_{value}
		μ	σ	
Ух				
1	$w_1 = 0,47$	67,15	3,76	0,26
2	$w_2 = 0,53$	67,39	36,45	
Пмх				
1	$w_1 = 0,26$	7,63	1,79	0,17
2	$w_2 = 0,17$	19,04	3,98	
3	$w_3 = 0,15$	51,85	15,57	
4	$w_4 = 0,12$	80,36	1,77	
5	$w_5 = 0,30$	86,98	1,64	
Стх				
1	$w_1 = 0,53$	9,95	1,82	0,16
2	$w_2 = 0,21$	19,56	3,02	
3	$w_3 = 0,07$	37,13	5,46	
4	$w_4 = 0,12$	70,36	15,96	
5	$w_5 = 0,07$	136,50	8,17	

Усечение смесей распределений снизу значением 0 и сверху значением 90 (для посудомоечной машины) обусловлено физическими ограничениями рассматриваемой величины (значение времени не может быть отрицательным) и полученными данными по результатам исследования.

Охарактеризовать временную составляющую режимов функционирования водоразборных устройств невозможно только длительностью интервалов их непрерывной работы. Необходимо распределить данные интервалы по наиболее характерному периоду водопотребления (в данном случае — сутки).

При оценке распределения вероятностей использования водоразборных устройств в течение суток за основу, по мнению авторов, можно взять кривую фактического распределения суточного объема водопотребления для конкретного типа зданий, представленную, например, для зданий жилого назначения В. С. Игнатчиком и др. [2017]. Рассматриваемый период водопотребления (сутки) при этом был разбит на равные временные интервалы продолжительностью 1 с. Особенности распределения суточного объема водопотребления для рабочих и выходных дней, отраженные В. С. Игнатчиком и др. [2017], также были учтены при определении частоты (вероятности) использования водоразборных устройств в течение суток.

При выполнении декомпозиции смесей распределений предполагалось, что компоненты смесей однотипны и принадлежат закону нормального распределения.

Таблица 7. Сводные результаты исследования продолжительности периодов непрерывного водопотребления водоразборными устройствами

Table 7. Summary results of the study of the duration of periods of continuous water consumption by water collecting devices

Водоразборное устройство	Тип системы водоснабжения	Теоретический закон распределения	Математическое описание характера изменчивости (плотность вероятности) продолжительности интервалов непрерывного водопотребления (длины импульсов)
Смеситель кухонной мойки	холодная	логнормальное распределение	$f(x) = \frac{1}{x \cdot 0,676\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - 2,45)^2}{2 \cdot 0,676^2}}, x \in (0, +\infty)$
Смеситель кухонной мойки	горячая	логнормальное распределение	$f(x) = \frac{1}{x \cdot 0,675\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - 2,51)^2}{2 \cdot 0,675^2}}, x \in (0, +\infty)$
Смеситель ванны / душевой кабины	холодная	логнормальное распределение	$f(x) = \frac{1}{x \cdot 1,31\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - 3,66)^2}{2 \cdot 1,31^2}}, x \in (0, +\infty)$
Смеситель ванны / душевой кабины	горячая	логнормальное распределение	$f(x) = \frac{1}{x \cdot 1,13\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - 3,44)^2}{2 \cdot 1,13^2}}, x \in (0, +\infty)$
Смывной бачок унитаза	холодная	усеченная смесь нормальных распределений	$f(x 0 \leq X) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ \frac{f_1(x)}{\int_0^{+\infty} f_1(x) dx}, & x \in [0, +\infty) \end{cases}$
Посудомоечная машина	холодная	усеченная смесь нормальных распределений	$f(x 0 \leq X \leq 90) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ \frac{f_2(x)}{\int_0^{90} f_2(x) dx}, & x \in [0, 90] \\ 0, & x > 90 \end{cases}$
Стиральная машина	холодная	усеченная смесь нормальных распределений	$f(x 0 \leq X) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ \frac{f_3(x)}{\int_0^{+\infty} f_3(x) dx}, & x \in [0, +\infty) \end{cases}$

В таблице 7:

$$f_1(x) = 0,47 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-67,15)^2}{2 \cdot 3,76^2}}}{3,76\sqrt{2\pi}} + 0,53 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-67,39)^2}{2 \cdot 36,45^2}}}{36,45\sqrt{2\pi}};$$

$$f_2(x) = 0,26 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-7,63)^2}{2 \cdot 1,79^2}}}{1,79\sqrt{2\pi}} + 0,17 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-19,04)^2}{2 \cdot 3,98^2}}}{3,98\sqrt{2\pi}} + 0,15 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-51,85)^2}{2 \cdot 15,57^2}}}{15,57\sqrt{2\pi}} +$$

$$+ 0,12 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-80,36)^2}{2 \cdot 1,77^2}}}{1,77\sqrt{2\pi}} + 0,30 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-86,98)^2}{2 \cdot 1,64^2}}}{1,64\sqrt{2\pi}};$$

$$f_3(x) = 0,53 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-9,95)^2}{2 \cdot 1,82^2}}}{1,82\sqrt{2\pi}} + 0,21 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-19,56)^2}{2 \cdot 3,02^2}}}{3,02\sqrt{2\pi}} + 0,07 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-37,13)^2}{2 \cdot 5,46^2}}}{5,46\sqrt{2\pi}} +$$

$$+ 0,12 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-70,36)^2}{2 \cdot 15,96^2}}}{15,96\sqrt{2\pi}} + 0,07 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-136,50)^2}{2 \cdot 8,17^2}}}{8,17\sqrt{2\pi}}.$$

В таблице 8 представлены результаты расчетов, выполненных при расщеплении смесей распределений, характеризующих вероятность использования водоразборных устройств в течение суток отдельно для выходных и рабочих дней, а именно: оценки количества компонентов каждой смеси, оценки весов компонентов смесей, оценки параметров компонентов смесей и уровень значимости критерия Колмогорова p_{value} .

Учитывая, что рассчитанный уровень значимости критерия Колмогорова превышает заданное значение $\alpha = 0,05$, отвергать нулевую гипотезу о том, что вероятность водопотребления водоразборными устройствами в течение суток для рабочих и выходных дней может быть описана рассматриваемыми смесями распределений, оснований нет.

Математическое описание вероятности использования водоразборных устройств в течение суток для рабочих и выходных дней представлено в таблице 9.

Таблица 8. Результаты декомпозиции смесей распределений, характеризующих вероятность использования водоразборных устройств в течение суток

Table 8. Results of decomposition of mixtures of distributions characterizing the probability of using water sampling devices during the day

Порядковый номер (i) компонента смеси	Удельный вес i-го компонента смеси	Значение параметров i-го компонента смеси		Уровень значимости критерия Колмогорова p_{value}
		μ	σ	
Рабочие дни				
1	$w_1 = 0,05$	2 529	2 308	0,86
2	$w_2 = 0,05$	27 889	698	
3	$w_3 = 0,51$	39 772	14 579	
4	$w_4 = 0,15$	66 167	6 726	
5	$w_5 = 0,24$	77 376	4 305	
Выходные дни				
1	$w_1 = 0,06$	3 237	2 842	0,50
2	$w_2 = 0,68$	45 539	16 349	
3	$w_3 = 0,22$	74 686	667	
4	$w_4 = 0,04$	76 337	5 337	

Таблица 9. Сводные результаты исследования вероятности использования водоразборных устройств

Table 9. Summary results of the study of the probability of using water sampling devices

Период водопотребления	Теоретический закон распределения	Математическое описание вероятности использования водоразборных устройств в течение суток
Сутки (рабочий день)	усеченная смесь нормальных распределений	$f(x 0 \leq X \leq 86399) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ \frac{f_1(x)}{\int_0^{86399} f_1(x) dx}, & x \in [0, 86399] \\ 0, & x > 86399 \end{cases}$
Сутки (выходной день)	усеченная смесь нормальных распределений	$f(x 0 \leq X \leq 86399) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ \frac{f_2(x)}{\int_0^{86399} f_2(x) dx}, & x \in [0, 86399] \\ 0, & x > 86399 \end{cases}$

В таблице 9:

$$f_1(x) = 0,05 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-2529)^2}{2 \cdot 2308^2}}}{2308\sqrt{2\pi}} + 0,05 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-27889)^2}{2 \cdot 698^2}}}{698\sqrt{2\pi}} + 0,51 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-39772)^2}{2 \cdot 14579^2}}}{14579\sqrt{2\pi}} +$$

$$+ 0,15 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-66167)^2}{2 \cdot 6726^2}}}{6726\sqrt{2\pi}} + 0,24 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-77376)^2}{2 \cdot 4305^2}}}{4305\sqrt{2\pi}};$$

$$f_2(x) = 0,06 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-3237)^2}{2 \cdot 2842^2}}}{2842\sqrt{2\pi}} + 0,68 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-45539)^2}{2 \cdot 16349^2}}}{16349\sqrt{2\pi}} + 0,22 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-74686)^2}{2 \cdot 667^2}}}{667\sqrt{2\pi}} + 0,04 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-76337)^2}{2 \cdot 5337^2}}}{5337\sqrt{2\pi}}.$$

Усечение смесей распределений снизу и сверху значениями 0 и 83 999 обусловлено физическими ограничениями рассматриваемой величины: значение времени не может быть отрицательным и не может превышать продолжительность рассматриваемого периода (сутки), выраженную в секундах.

Заключение

В ходе выполненного исследования были получены подробные статистические данные о продолжительности периодов непрерывного водопотребления наиболее распространенными типами водоразборных устройств из систем холодного и горячего водоснабжения. Для полученных эмпирических выборок были определены оценки основных числовых характеристик, построены диаграммы размаха, выдвинуты статистические гипотезы о виде теоретического закона распределения, рассчитаны оценки параметров теоретических законов распределения.

Результаты выполненных расчетов уровня значимости критерия Колмогорова для каждой из выборок позволили обосновать выбор теоретического закона распределения продолжительности периодов непрерывного водопотребления наиболее распространенными типами водоразборных устройств.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Волгин П. Н., Масленникова Т. Н. 2010. Определение теоретического закона распределения случайных величин, используемых в имитационной модели // Морская радиоэлектроника. № 3–4 (33–34). С. 74–78.
- Игнатчик В. С., Саркисов С. В., Обвинцев В. А. 2017. Исследование коэффициентов часовой неравномерности водопотребления // Вода и экология: проблемы и решения. № 2 (70). С. 27–39.
- Исаев В. Н., Мхитарян М. Г. 2003. Анализ методик определения расходов во внутреннем водопроводе // Сантехника. № 5. С. 6–11.
- Карамбиров С. Н., Бекишева Л. Б. 2012. О некоторых статистических закономерностях водопотребления в системах водоснабжения // Природообустройство. № 4. С. 45–48.
- Карамбиров С. Н., Уманский П. М., Бекишева Л. Б. 2012. Распределение гидравлических параметров в системе подачи и распределения воды при штатных и послеаварийных режимах работы // Природообустройство. № 4. С. 48–51.

- Карамбиров С. Н., Манукьян Д. А., Бекишева Л. Б. 2013. Оценка надежности подачи воды системами водоснабжения // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. № 6. С. 63–65.
- Колмогоров А. Н. 1986. Теория вероятностей и математическая статистика: сб. ст. / отв. ред. Ю. В. Прохоров. М.: Наука. 534 с.
- Лемешко Б. Ю. 1998. Асимптотически оптимальное группирование наблюдений в критериях согласия // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. Том 64. № 1. С. 56–64.
- Лемешко Б. Ю., Лемешко С. Б., Семенова М. А. 2018. К вопросу статистического анализа больших данных // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. № 44. С. 40–49. <https://doi.org/10.17223/19988605/44/5>
- Николенко И. В., Рыжаков А. Н. 2019. Нелинейная модель оптимизации параметров силовых агрегатов насосной станции подкачки системы водоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. № 4 (724). С. 47–63.
- Новицкий Н. Н., Вантеева О. В. 2008. Задачи и методы вероятностного моделирования гидравлических режимов трубопроводных систем // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. № 1 (53). С. 68–75.
- Новицкий Н. Н., Вантеева О. В. 2011. Моделирование стохастики потокораспределения в гидравлических цепях // Известия Российской академии наук. Энергетика. № 2. С. 122–131.
- Поливанов Д. Е., Семенов А. А. 2023а. Исследование режима отбора воды смесителем из системы водоснабжения // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. № 2 (64). С. 60–69.
- Поливанов Д. Е., Семенов А. А. 2023б. BIM технологии с элементами программирования при анализе режимов работы внутренних сетей водоснабжения зданий // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры: материалы VI Международного науч.-практ. конф. / под общ. ред. А. А. Семенова. СПб.: СПбГАСУ. С. 81–91.
- Поливанов Д. Е., Семенов А. А. 2024. Интенсивность водопотребления в отдельных водоразборных точках системы внутреннего водоснабжения // Вестник МГСУ. Том 19. № 1. С. 94–104. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2024.1.94-104>
- Сайриллинов С. Ш. 2020. Об особенностях расчета водопотребления при проектировании систем водоснабжения высотных зданий // Градостроительство и архитектура. Том 10. № 2 (39). С. 29–35. <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2020.02.5>
- Салугин А. Н., Балкушкин Р. Н. 2021. О применении искусственных нейронных сетей для моделирования водопотребления // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. № 1. С. 70–85. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2021-1-5>
- СП 30.13330.2020. Внутренний водопровод и канализация зданий: свод правил от 30 декабря 2020 г. № 30.13330.2020. Минстрой России.
- Чупин В. Р., Душин А. С. 2009. Оценка надежности водообеспечения эксплуатируемых систем подачи и распределения воды // Вестник Иркутского государственного технического университета. № 3 (39). С. 186–191.
- Alvisi S., Franchini M., Marinelli A. 2003. A stochastic model for representing drinking water demand at residential level // Water Resources Management. Vol. 17. No. 3. Pp. 197–222. <https://doi.org/10.1023/A:1024100518186>

- Blokker E. J. M., Vreeburg J. H. G. 2012. Monte Carlo simulation of residential water demand: A stochastic end-use model // *Impacts of Global Climate Change*. Pp. 1–12. [https://doi.org/10.1061/40792\(173\)34](https://doi.org/10.1061/40792(173)34)
- Buchberger S. G., Wu L. 1995. Model for instantaneous residential water demands // *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 121. No. 3. Pp. 232–246.
- Buchberger S. G., Wells G. J. 1996. Intensity, duration, and frequency of residential water demands // *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 122. No. 1. Pp. 11–19. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1996\)122:1\(11\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1996)122:1(11))
- Dempster A. P., Laird N. M., Rubin D. B. 1977. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm // *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*. Vol. 39. No. 1. Pp. 1–38.
- García V.J., García-Bartual R., Cabrera E., Arregui F., García-Serra J. 2004. Stochastic model to evaluate residential water demands // *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 130. No. 5. Pp. 386–394. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2004\)130:5\(386\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2004)130:5(386))
- Mazzoni F., Alvisi S., Franchini M., Blokker M. 2023. Exploiting high-resolution data to investigate the characteristics of water consumption at the end-use level: A Dutch case study // *Water Resources and Industry*. Vol. 29. Article 100198. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2022.100198>
- Moughton L. J., Buchberger S. G., Boccelli D. L., Filion Y. R., Karney B. W. 2012. Effect of time step and data aggregation on cross correlation of residential demands // *Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006*. Pp. 1–11. [https://doi.org/10.1061/40941\(247\)42](https://doi.org/10.1061/40941(247)42)
- Sturges H. A. 1926. The choice of a class interval // *Journal of the American Statistical Association*. Vol. 21. No. 153. Pp. 65–66. <https://doi.org/10.1080/01621459.1926.10502161>
- Vertommen I., Magini R., da Conceição Cunha M., Guercio R. 2012. Water demand uncertainty: The scaling laws approach // *Water Supply System Analysis / A. Ostfeld (ed.)*. Rijeka: IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/51542>
- Vertommen I., Magini R., da Conceição Cunha M. 2015. Scaling water consumption statistics // *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 141. No. 5. Article 04014072. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000467](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000467)

References

- Volgin, P. N., & Maslennikova, T. N. (2010). Determination of theoretical law for random distribution in simulation model. *Morskaya radioelektronika*, (3–4), 74–78. [In Russian]
- Ignatchik, V. S., Sarkisov, S. V., & Obvintsev, V. A. (2017). Research of water consumption hour inequality coefficients. *Water and Ecology: Problems and Solutions*, (2), 27–39. [In Russian]
- Isaev, V. N., & Mkhitarian, M. G. (2003). Analysis of methods for determining costs in the internal water supply. *Santekhnika*, (5), 6–11. [In Russian]
- Karambirov, S. N., & Bekisheva, L. B. (2012). About some statistical regularities of water consumption in water supply systems. *Prirodoobustrojstvo*, (4), 45–48. [In Russian]
- Karambirov, S. N., Umansky, P. M., & Bekisheva, L. B. (2012). Distribution of hydraulic parameters in the water supply and distribution system under design mode and postfault conditions. *Prirodoobustrojstvo*, (4), 48–51. [In Russian]
- Karambirov, S. N., Manukyan, D. A., & Bekisheva, L. B. (2013). Evaluating the reliability of water delivery by water supply systems. *Doklady Rossijskoj akademii sel'skohozyajstvennyh nauk*, (6), 63–65. [In Russian]

- Kolmogorov, A. N. (1986). *Probability theory and mathematical statistics*. Nauka. [In Russian]
- Lemeshko, B. Yu. (1998). Asymptotically optimum grouping of observations in goodness-of-fit tests. *Industrial Laboratory*, 64(1), 59–67.
- Lemeshko, B. Yu., Lemeshko, S. B., & Semenova, M. A. (2018). To question of the statistical analysis of big data. *Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*, (44), 40–49. <https://doi.org/10.17223/19988605/44/5> [In Russian]
- Nikolenko, I. V., & Ryzhakov, A. N. (2019). Nonlinear model optimization parameters of power units a pump station pumping a water supply system. *News of Higher Educational Institutions. Construction*, (4), 47–63. [In Russian]
- Novitsky, N. N., & Vanteeva, O. V. (2008). Some problems and probabilistic techniques for simulating hydraulic regimes in pipeline systems. *Saint Petersburg Polytechnical University Journal*, (1), 68–75. [In Russian]
- Novitsky, N. N., & Vanteeva, O. V. (2011). Stochastic modeling of flow distribution in hydraulic circuit. *Izvestiâ akademii nauk SSSR. Énergetika*, (2), 122–131. [In Russian]
- Polivanov, D. E., & Semenov, A. A. (2023a). Investigation of the mode of water extraction by a mixer from the water supply system. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*, (2), 60–69. [In Russian]
- Polivanov, D. E., & Semenov, A. A. (2023b). BIM technologies with programming elements in the analysis of operating modes of internal water supply networks of buildings. In *BIM in Construction & Architecture: Proceedings of 6th International Conference (BIMAC 2023)* (pp. 81–91). Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. [In Russian]
- Polivanov, D. E., & Semenov, A. A. (2024). Intensity of water consumption in separate water collection points of internal water supply system. *Vestnik MGSU*, 19(1), 94–104. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2024.1.94-104> [In Russian]
- Sayriddinov, S. Sh. (2020). About features of water consumption calculation when designing water supply systems of high-rise buildings. *Urban Construction and Architecture*, 10(2), 29–35. <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2020.02.5> [In Russian]
- Salugin, A. N., & Balkushkin, R. N. (2021). On application of artificial neural networks for modeling of water consumption. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*, (1), 70–85. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2021-1-5> [In Russian]
- Ministry of Construction, Housing and Utilities. (2020). *Internal water supply and sewerage of buildings* (Code of rules No. 30.13330.2020). [In Russian]
- Chupin, V. R., & Dushin, A. S. (2009). The assessment of reliability of water provision of water supply and distribution systems under operation. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, (3), 186–191. [In Russian]
- Alvisi, S., Franchini, M., & Marinelli, A. (2003). A stochastic model for representing drinking water demand at residential level. *Water Resources Management*, 17(3), 197–222. <https://doi.org/10.1023/A:1024100518186>
- Blokker, E. J. M., & Vreeburg, J. H. G. (2012). Monte Carlo simulation of residential water demand: A stochastic end-use model. In *Impacts of Global Climate Change* (pp. 1–12). [https://doi.org/10.1061/40792\(173\)34](https://doi.org/10.1061/40792(173)34)
- Buchberger, S. G., & Wu, L. (1995). Model for instantaneous residential water demands. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(3), 232–246.

- Buchberger, S. G., & Wells, G. J. (1996). Intensity, duration, and frequency of residential water demands. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 122(1), 11–19. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1996\)122:1\(11\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1996)122:1(11))
- Dempster, A. P., Laird, N. M., & Rubin, D. B. (1977). Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 39(1), 1–38.
- García, V. J., García-Bartual, R., Cabrera, E., Arregui, F., & García-Serra, J. (2004). Stochastic model to evaluate residential water demands. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(5), 386–394. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2004\)130:5\(386\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2004)130:5(386))
- Mazzoni, F., Alvisi, S., Franchini, M., & Blokker, M. (2023). Exploiting high-resolution data to investigate the characteristics of water consumption at the end-use level: A Dutch case study // *Water Resources and Industry*. Vol. 29. Article 100198. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2022.100198>
- Moughton, L. J., Buchberger, S. G., Boccelli, D. L., Filion, Y. R., & Karney, B. W. (2012). Effect of time step and data aggregation on cross correlation of residential demands. *Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006* (pp. 1–11). [https://doi.org/10.1061/40941\(247\)42](https://doi.org/10.1061/40941(247)42)
- Sturges, H. A. (1926). The choice of a class interval. *Journal of the American Statistical Association*, 21(153), 65–66. <https://doi.org/10.1080/01621459.1926.10502161>
- Vertommen, I., Magini, R., da Conceição Cunha, M., & Guercio, R. (2012). Water demand uncertainty: The scaling laws approach. In A. Ostfeld (Ed.), *Water Supply System Analysis*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/51542>
- Vertommen, I., Magini, R., & da Conceição Cunha, M. (2015). Scaling water consumption statistics. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(5), Article 04014072. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000467](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000467)

Информация об авторах

Дмитрий Евгеньевич Поливанов, аспирант кафедры информационных систем и технологий, Факультет инженерной экологии и городского хозяйства, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия dmitry_polivanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4215-1208>

Алексей Александрович Семенов, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем и технологий, Факультет инженерной экологии и городского хозяйства, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия sw.semenov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9490-7364>

Лия Витальевна Мовсесова, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информатики, Факультет инженерной экологии и городского хозяйства, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия movse@lan.spbgasu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0776-0374>

Information about the authors

Dmitrii E. Polivanov, Postgraduate Student, Department of Information Systems and Technologies, Faculty of Environmental Engineering and Municipal Services, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia dmitry_polivanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4215-1208>

Alexey A. Semenov, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Department of Information Systems and Technologies, Faculty of Environmental Engineering and Municipal Services, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia
sw.semenov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9490-7364>

Liya V. Movsesova, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Informatics, Faculty of Environmental Engineering and Municipal Services, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia
movse@lan.spbgasu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0776-0374>