

ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

WATER SUPPLY, SEWERAGE, BUILDING SYSTEMS OF WATER RESOURCE PROTECTION

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 2. С. 132–147.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (2): 132–147.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 628.171.001.24

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-132-147

EDN: LBCJAF

МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ И ЧАСТОТЫ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ РАЗЛИЧНЫМИ ВОДРАЗБОРНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

Дмитрий Евгеньевич Поливанов

*Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
г. Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация. *Постановка задачи.* Значения расчетных расходов воды, получаемые при помощи существующих детерминированных моделей и методов, не могут отразить фактическую изменчивость режимов работы водопроводной сети. Однако данная задача может быть решена при помощи имитационного моделирования. Стохастическая природа процесса водопотребления подразумевает использование при его описании ряда случайных величин с определенными законами распределения, характеризующими основные составляющие данного процесса: интенсивность, продолжительность и частоту.

В настоящей работе рассматриваются вопросы математического описания продолжительности и частоты водопотребления наиболее распространенными типами водоразборных устройств: смесителями кухонной мойки и ванны (душевой кабины), унитазами со смывным бачком, стиральной и посудомоечной машинами.

Цель работы – обоснование метода математического моделирования продолжительности водопотребления различными водоразборными устройствами, а также частоты (вероятности) их использования в течение суток.

Результаты. Приведены результаты исследования продолжительности и частоты водопотребления различными водоразборными устройствами, использующими воду из внутрен-

ней системы водоснабжения здания. Представлены результаты анализа эмпирических данных, полученных в ходе исследования, а также расчетов, выполненных на их основе.

Выводы. Предложен и обоснован метод математического моделирования продолжительности непрерывного водопотребления наиболее распространенными типами водоразборных устройств, а также частоты (вероятности) их использования в течение суток.

Ключевые слова: частота, продолжительность, система водоснабжения, водопотребление, расход воды, вероятностная модель, стохастический процесс

Для цитирования: Поливанов Д.Е. Метод моделирования продолжительности и частоты водопотребления различными водоразборными устройствами // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 2. С. 132–147. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-132-147. EDN: LBCJAF

ORIGINAL ARTICLE

MATHEMATICAL SIMULATION OF DURATION AND FREQUENCY OF WATER CONSUMPTION BY VARIOUS WATER DISPENSERS

Dmitry E. Polivanov

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

Abstract. Water flow rates calculated by using deterministic models and methods do not describe the real variability in the water supply operation. This problem can be solved by mathematical simulation. The stochastic nature of the water consumption process implies involves random variables with certain distribution laws describing the main process components, namely intensity, duration and frequency.

This paper discusses the mathematical simulation of the duration and frequency of water consumption by the most common types of water dispensers (kitchen sink and bathtub faucets (shower cubicle), toilet bowl with flush tank, washing machine and dishwasher).

Purpose: The aim of this work is to evaluate and substantiate theoretical laws of the water consumption by the most common types of water dispensers as well as the frequency (probability) of their daily use.

Research findings: The duration and frequency are determined for water consumed by various water dispensers using water supply systems of buildings. The empirical data are analyzed. Mathematical simulation method is proposed and justified for the water consumption process.

Keywords: frequency, duration, water supply system, water consumption, probabilistic model, stochastic process

For citation: Polivanov D.E. Mathematical simulation of duration and frequency of water consumption by various water dispensers. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (2): 132–147. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-132-147. EDN: LBCJAF

Введение

Применение информационных технологий набирает все большую популярность во всех сферах жизни современного человека. Растущие в геометрической прогрессии вычислительные мощности компьютеров открывают новые возможности, а их повсеместная распространенность делает эти возможности доступными почти каждому [1].

В сфере проектирования и строительства, например, как следствие данных изменений происходит постепенный переход от 2D-чертежей планов, разрезов и схем зданий и инженерных систем к их информационному моделированию (BIM) [2]. Не менее важным шагом в развитии и расширении возможностей анализа работы зданий и сооружений на этапе их проектирования, а соответственно, и обеспечения их дальнейшего комфортного и безопасного использования может стать переход от аналитических расчетных методик непосредственно к моделированию процессов, протекающих в них в период эксплуатации. Так, 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 [3]. 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 [4].

Стохастическая природа процесса водопотребления во многом обусловлена его зависимостью от огромного количества факторов [5, 6, 7, 8]. Высокая степень неопределенности и стохастический характер данного процесса подчеркивались многими отечественными [9, 10] и зарубежными [11, 12, 13, 14, 15] авторами. Среди опубликованных за последнее десятилетие можно выделить работы [16, 17].

Учесть большинство факторов, оказывающих влияние на водопотребление, не представляется возможным из-за их большого количества и неоднозначного влияния на конечный результат. При этом, по мнению автора, решить задачу детального рассмотрения и оценки прогнозных режимов работы систем водоснабжения возможно при помощи вероятностного моделирования процесса водопотребления и его изменчивости во времени.

Внутренняя система водоснабжения любого здания или сооружения, использующего воду для удовлетворения хозяйственно-питьевых нужд потребителей, включает трубопроводы (разводящую сеть, стояки и подводки к санитарным приборам и технологическим установкам) и водоразборные устройства. Все трубопроводы могут быть разделены на отдельные участки, заключенные между характерными точками, расположенными в местах ответвлений трубопроводов. Среди выделенных участков ряд трубопроводов будут подавать воду только к одному водоразборному устройству (элементарный расход), ряд – к двум устройствам и т. д. (далее – трубопроводы первого порядка, трубопроводы второго порядка и т. д.). Соответственно, для трубопроводов первого порядка расход транспортируемой воды и время работы будут зависеть только от одного водоразборного устройства, для трубопроводов второго порядка – от двух и т. д. В итоге все трубопроводы здания объединятся в один – водопроводный ввод, по которому водой будет обеспечиваться все здание. Аналогичная ситуация наблюдается и в наружной сети водоснабжения, где количество абонентов увеличивается по направлению к резервуару чистой воды или насосной станции (РЧВ или НС) от наиболее удаленного от РЧВ или НС абонента [13].

Наличие сведений о величине каждого из обеспечиваемых по трубопроводу второго и выше порядка 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. Построение данных графиков для существующих объектов может быть выполнено на основании проведенных натурных измерений, а для проектируемых объектов – при помощи имитационного моделирования работы системы водоснабжения.

Таким образом, моделирование расходов воды в трубопроводах второго и выше порядка возможно осуществить лишь при наличии данных о временных интервалах, в которых возникает элементарный расход (или, другими словами, используется водоразборное устройство) с привязкой каждого из интервалов к конкретной точке наиболее характерного периода водопотребления (сутки).

Рассмотрению вопросов интенсивности водопотребления для различных типов водоразборных устройств посвящен ряд работ автора данной статьи, например [18].

В настоящей статье представлены результаты исследования продолжительности и частоты водопотребления различными типами водоразборных устройств, использующими воду из внутренней системы водоснабжения здания.

Целью работы является обоснование метода математического моделирования продолжительности водопотребления различными водоразборными устройствами, а также частоты (вероятности) их использования в течение суток.

Объект данного исследования – наиболее распространенные типы водоразборных устройств.

Предмет исследования – величина продолжительности периодов непрерывного водопотребления, а также частота (вероятность) водопотребления наиболее распространенными типами водоразборных устройств в течение суток.

Задачи исследования:

- получение статистических данных о продолжительности периодов непрерывного водопотребления наиболее распространенными типами водоразборных устройств;
- построение графиков (гистограмм и кривых) плотности распределения продолжительности периодов непрерывного водопотребления на основе эмпирических данных;
- анализ эмпирических данных и результатов расчетов, выполненных на их основе;
- математическое описание характера изменчивости продолжительности периодов непрерывного водопотребления наиболее распространенными типами водоразборных устройств, а также частоты (вероятности) их использования в течение суток (оценка и обоснование законов распределения рассматриваемых случайных величин).

Материалы и методы

Описание условий, в которых выполнялось наблюдение за работой наиболее распространенных типов водоразборных устройств (смеситель кухонной мойки, смеситель ванны (душевой кабины), унитаз со смывным бачком, стиральная машина, посудомоечная машина), представлено в табл. 1.

Таблица 1

Условия выполнения измерений

Table 1

Measurement conditions

Наименование показателя	Значение
Назначение здания	Жилое
Место расположения водоразборных устройств	Квартира
Типы установленных смесителей	Рычажные (набортный и настенный с душевой сеткой на гибком шланге)
Количество потребителей	2 человека
Места установки датчиков	Трубопроводы систем холодного и горячего водоснабжения непосредственно перед подключением к каждому из рассматриваемых водоразборных устройств

Наблюдение выполнялось круглосуточно, без перерывов. Непрерывность наблюдения была обеспечена путем применения разработанной автором системы, подробное описание которой представлено в работе [19].

Обработка полученных эмпирических данных выполнялась в разработанной автором программе на языке C#, визуализация (построение гистограмм и графиков) и анализ данных – в авторской программе на языке R.

При анализе данных и обосновании выдвинутых гипотез применялись методы теории вероятностей и математической статистики.

Основой для выдвижения гипотезы о виде закона распределения послужили соображения о природе рассматриваемого процесса и его составляющих, а также гипотезы и обоснования, приведенные в ряде ранее опубликованных работах других авторов [11, 12, 15, 16, 20].

Оценка вида теоретических законов распределения продолжительности и частоты водопотребления была выполнена в результате сравнения эмпирических графиков плотности вероятности рассматриваемых выборок с известными теоретическими законами распределения случайных величин, а также на основании анализа рассчитанных по эмпирическим данным оценок основных числовых характеристик [21].

Оценка параметров теоретических законов распределения осуществлялась по эмпирическим данным методом максимального правдоподобия, ввиду его наилучших асимптотических свойств [22].

Расщепление смесей распределений было выполнено в программе на языке R, разработанной автором. В качестве метода декомпозиции смесей распределений применялся ЕМ-алгоритм [23], реализованный в виде функции `normalmixEM` из пакета `mixtools`.

Уровень значимости, используемый при оценке однородности эмпирических данных и теоретических законов распределения, гипотезы о которых были выдвинуты в ходе исследования, был принят $\alpha = 0,05$.

Для оценки принадлежности рассматриваемых выборок нормальному закону распределения использовалась функция `shapiro.test` из пакета `stats`, позволяющая рассчитать уровень значимости для критерия Шапиро – Уилка.

Оценка однородности эмпирических выборок и теоретических законов распределения (за исключением нормального) была выполнена путем расчета уровня значимости критерия Колмогорова [24] и сравнения полученного значения с принятым ($\alpha = 0,05$).

Расчет уровня значимости и статистики критерия Колмогорова был выполнен в разработанной автором программе на языке R с помощью функции `ks.test` из пакета `stats`.

Результаты и обсуждение

В ходе исследования автором в сумме выполнено 12 746 измерений продолжительности периодов непрерывного водопотребления. Полученные результаты были сгруппированы по типам водоразборных устройств. После группировки количество значений в каждой из выборок составило:

- 1) для $СмКх$ (смесителя кухонной мойки при использовании воды из системы холодного водоснабжения (ХВС)) – 4053;
- 2) для $СмКг$ (смесителя кухонной мойки при использовании воды из системы горячего водоснабжения (ГВС)) – 2715;
- 3) для $СмВх$ (смесителя ванны (душевой кабины) при использовании воды из системы ХВС) – 837;
- 4) для $СмВг$ (смесителя ванны (душевой кабины) при использовании воды из системы ГВС) – 1628;
- 5) для $Ух$ (смывного бачка унитаза при использовании воды из системы ХВС) – 2321;
- 6) для $Пмх$ (посудомоечной машины при использовании воды из системы ХВС) – 469;
- 7) для $Стх$ (стиральной машины при использовании воды из системы ХВС) – 723.

Чувствительность установленных датчиков позволяет фиксировать даже самые незначительные колебания его крыльчатки, в том числе вызванные резкими изменениями давления в системе водоснабжения здания при выключенном водоразборном устройстве. Как правило, продолжительность данного явления составляет от 1 до 4 с подряд, но при этом количество зафиксированных случаев за определенный период часто превышает количество случаев фактического использования водоразборного устройства. Для исключения влияния таких показаний на конечный результат анализа рассматриваемых данных и дальнейшие выводы было принято решение исключить все зафик-

сированные периоды непрерывной работы водоразборных устройств продолжительностью менее 5 с.

Эмпирические данные были сгруппированы по интервалам, обработаны и проанализированы в разработанной автором в среде R Studio программе на языке R.

Для повышения наглядности и простоты визуального восприятия по эмпирическим данным были построены гистограммы и кривые плотности вероятности продолжительности периодов непрерывного водопотребления. Ось ординат соответствует значениям плотности вероятности, ось абсцисс – продолжительности периода непрерывного водопотребления водоразборным устройством (единица измерения – секунда) (рис. 1).

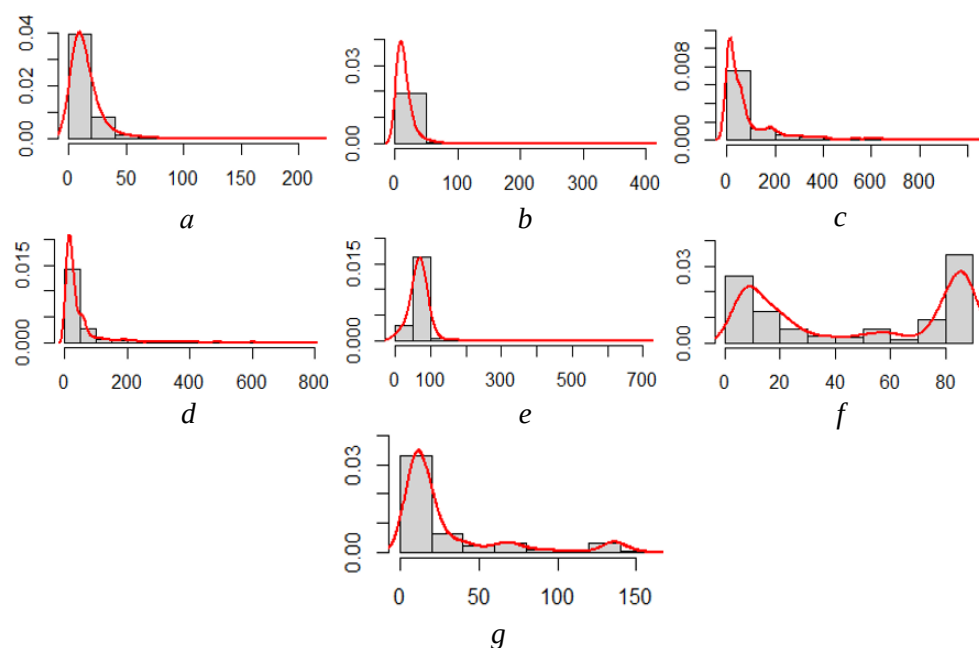


Рис. 1. Гистограммы и кривые плотности вероятности эмпирических значений продолжительности непрерывного использования водоразборных устройств:

a – СмКх; *b* – СмКг; *c* – СмВх; *d* – СмВг; *e* – Ух; *f* – Пмх; *g* – Стх

Fig. 1. Block diagrams and probability density curves of empirical values of continuous use of water dispensers:

a – MiKc; *b* – MiKh; *c* – MiBc; *d* – MiBh; *e* – Tc; *f* – Dwc; *g* – Wmc

Первичная оценка вида теоретического закона распределения выполнялась по оценкам основных числовых характеристик продолжительности непрерывного водопотребления наиболее распространенными типами водоразборных устройств, рассчитанным по эмпирическим выборкам. Для получения исправленных (несмещенных) числовых характеристик случайной величины, при расчете оценок основных числовых характеристик, была сделана поправка.

Проанализировав полученные значения, можно утверждать, что средняя продолжительность непрерывного использования водоразборного устройства

(математическое ожидание) и среднеквадратичное отклонение имеют наименьшие значения для смесителя кухни, а наибольшие – для смесителя ванной (душевой кабины). Данный факт указывает на то, что смеситель кухни задействован меньшее количество времени, а длительность периодов непрерывного использования для данного устройства имеет наименьший разброс абсолютных значений. Однако наименьший разброс продолжительности непрерывного водопотребления относительно математического ожидания имеет смывной бачок унитаза. На время его заполнения оказывает влияние в основном неполный спуск накопленного объема воды (заниженное время наполнения) или повторный спуск воды при неполном заполнении объема бачка после первого спуска (завышенная продолжительность непрерывного водопотребления), что случается достаточно редко относительно суммарного времени использования устройства, а изменение периода непрерывного водопотребления в основном составляет несколько десятков секунд. На продолжительность периодов непрерывного водопотребления стиральной и посудомоечной машин непосредственный пользователь влияет лишь косвенно (только при установке режимов стирки и мойки), но при этом среднеквадратичное отклонение относительно математического ожидания данных выборок имеет гораздо большее значение, чем для смывного бачка унитаза, что в основном определяется программами, заложенными в основу их работы. Отрицательные коэффициенты асимметрии и эксцесса характерны только для посудомоечной машины.

Среди рассматриваемых водоразборных устройств нельзя явно выделить какие-либо группы по характеру изменчивости времени непрерывного использования. Для всех водоразборных устройств продолжительность периодов непрерывного водопотребления является случайной величиной. При этом характер ее изменчивости различен для всех устройств и определяется разными факторами. Так, для смесителей кухни и ванной (душевой кабины) основным определяющим фактором продолжительности периодов непрерывного использования является непосредственный пользователь и его психофизиологические потребности, для смывного бачка унитаза – достаточно редко возникающая потребность в неполном или повторном использовании накопленного в нем объема воды, а для посудомоечной и стиральной машин – программы, заложенные в основу их работы. Данные отличия существенны и должны быть учтены при разработке модели водопотребления.

Для включения обнаруженных характерных признаков каждого из водоразборных устройств в вероятностную модель водопотребления требуется описать каждую из рассматриваемых эмпирических выборок некоторым теоретическим законом распределения.

Внешний вид гистограмм и кривых плотности вероятности, представленных на рис. 1, дает первичное представление о том, какими теоретическими законами распределения может быть описана рассматриваемая случайная величина. При этом стоит отметить, что выборка продолжительности периодов непрерывного водопотребления посудомоечной машиной имеет явные признаки того, что ее математическое описание потребует применения смеси теоретических законов распределения. К таким признакам можно отнести, например, наличие двух ярко выраженных вершин.

В ходе выполнения статистического анализа полученных данных гипотеза о принадлежности всех рассматриваемых эмпирических выборок к закону нормального распределения была отвергнута на основании рассчитанного критерия Шапиро – Уилка.

В результате расчетов, выполненных по эмпирическим данным, а также сравнительной оценки графиков плотности вероятности известных теоретических законов распределения случайных величин с кривой плотности вероятности, построенной по эмпирическим данным, автором был выдвинут ряд гипотез о возможном теоретическом законе распределения, которым могут быть описаны рассматриваемые выборки. В качестве нулевых были взяты гипотезы о соответствии эмпирических выборок следующим теоретическим законам распределения:

- 1) логнормальному распределению ($X \sim \log N(\mu, \sigma^2)$);
- 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 табл. 2.

Таблица 2

Значения оценок параметров теоретических законов распределения

Table 2

Theoretical distribution parameters

Наименование теоретического закона 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 о наличии или отсутствии статистически значимых различий эмпирических выборок и рассматриваемых теоретических законов распре-

ления принималось на основании рассчитанного уровня значимости критерия Колмогорова для каждой из выборок.

Для эмпирических выборок продолжительности периодов непрерывного водопотребления смесителями кухни и ванной (душевой кабины) не было выявлено оснований для отклонения нулевой гипотезы о логнормальном теоретическом законе распределения. Рассчитанный уровень значимости α составил:

- 1) для C_{MKx} – 0,072;
- 2) для C_{MKr} – 0,057;
- 3) для C_{MVx} – 0,062;
- 4) для C_{MBr} – 0,209.

Для нулевых гипотез об однородности данных выборок и теоретических законов распределения Вейбулла, гамма-распределения и экспоненциального распределения были выявлены статистически значимые различия. Уровень значимости критерия Колмогорова во всех рассматриваемых случаях имеет значение менее принятого $\alpha = 0,05$, а следовательно, есть достаточные основания для отклонения этих гипотез.

Все нулевые гипотезы о виде теоретического закона распределения, которым могут быть описаны выборки продолжительности периодов непрерывного водопотребления смывным бачком унитаза и стиральной машиной, были отклонены, поскольку выполненные расчеты во всех рассматриваемых случаях показали наличие статистически значимых отклонений.

Таким образом, описание изменчивости продолжительности непрерывного водопотребления может быть выполнено:

- 1) для смесителя кухни при потреблении воды из системы холодного водоснабжения – логнормальным законом с параметрами $\mu = 2,45$, $\sigma = 0,676$;
- 2) для смесителя кухни при потреблении воды из системы горячего водоснабжения – логнормальным законом с параметрами $\mu = 2,51$, $\sigma = 0,675$;
- 3) для смесителя ванны (душевой кабины) при потреблении воды из системы холодного водоснабжения – логнормальным законом с параметрами $\mu = 3,66$, $\sigma = 1,31$;
- 4) для смесителя ванны (душевой кабины) при потреблении воды из системы горячего водоснабжения – логнормальным законом с параметрами $\mu = 3,44$, $\sigma = 1,13$.

По внешнему виду гистограммы и кривой плотности вероятности, построенной для эмпирической выборки продолжительности периодов непрерывного водопотребления посудомоечной машиной, можно предположить, что данная выборка может быть описана смесью распределений (имеются две ярко выраженные вершины кривой). Резкий обрыв гистограммы в правой части свидетельствует о том, что следует применять усеченную смесь распределений с ограничением значений продолжительности непрерывной работы водоразборного устройства не более 90 с. Также, учитывая, что для выборок продолжительности периодов непрерывного водопотребления смывным бачком унитаза и стиральной машиной все нулевые гипотезы о виде теоретического закона распределения были отклонены, автор принял решение рассмот-

реть вариант математического описания данных выборок смесью теоретических законов распределения. В силу наличия физических особенностей рассматриваемой случайной величины (продолжительность периода), которая не может принимать отрицательные значения, было введено еще одно ограничение – усечение смесей снизу значением 0.

В результате расщепления смесей распределений и рассчитанного уровня значимости критерия Колмогорова было выявлено, что нет оснований для отклонения статистических гипотез о том, что рассматриваемые выборки могут быть описаны:

1) для смывного бачка унитаза при потреблении воды из системы холодного водоснабжения – усеченной снизу значением 0 смесью нормальных распределений с весами $w_1 = 0,47$, $w_2 = 0,53$ и параметрами $\mu_1 = 67,15$, $\mu_2 = 67,39$, $\sigma_1 = 3,76$, $\sigma_2 = 36,45$ соответственно;

2) для посудомоечной машины при потреблении воды из системы холодного водоснабжения – усеченной снизу и сверху значениями 0 и 90 соответственно смесью нормальных распределений с весами $w_1 = 0,26$, $w_2 = 0,17$, $w_3 = 0,15$, $w_4 = 0,12$, $w_5 = 0,30$ и параметрами $\mu_1 = 7,63$, $\mu_2 = 19,04$, $\mu_3 = 51,85$, $\mu_4 = 80,36$, $\mu_5 = 86,98$, $\sigma_1 = 1,79$, $\sigma_2 = 3,98$, $\sigma_3 = 15,57$, $\sigma_4 = 1,77$, $\sigma_5 = 1,64$ соответственно;

3) для стиральной машины при потреблении воды из системы холодного водоснабжения – усеченной снизу значением 0 смесью нормальных распределений с весами $w_1 = 0,53$, $w_2 = 0,21$, $w_3 = 0,07$, $w_4 = 0,12$, $w_5 = 0,07$ и параметрами $\mu_1 = 9,95$, $\mu_2 = 19,56$, $\mu_3 = 37,13$, $\mu_4 = 70,36$, $\mu_5 = 136,50$, $\sigma_1 = 1,82$, $\sigma_2 = 3,02$, $\sigma_3 = 5,46$, $\sigma_4 = 15,96$, $\sigma_5 = 8,17$ соответственно.

Рассмотренные выше теоретические законы распределения позволяют описать время непрерывного водопотребления наиболее распространенными типами водоразборных устройств. Однако сведений только о продолжительности использования водоразборных устройств недостаточно для описания процесса водопотребления. Необходимо также выполнить описание частоты водопотребления данными водоразборными устройствами или, другими словами, распределения вероятностей использования водоразборных устройств в течение наиболее характерного периода водопотребления (сутки).

Возникновение расхода воды в трубопроводе (т. е. включение того или иного водоразборного устройства) в разные периоды суток не является равновероятным, поскольку напрямую зависит от режима жизни (работы) пользователей. Разные помещения эксплуатируются различным количеством пользователей, имеющих собственный уклад жизни, потребности и т. д. Даже в одном и том же помещении с течением времени могут меняться пользователи и их количество. Соответственно, распределение вероятностей потребления воды (использования водоразборных устройств) в течение суток будет изменяться как в каждом помещении, так и во времени [25].

Учесть индивидуальные особенности каждого конкретного помещения при моделировании водопотребления не представляется возможным, в том числе в силу крайне высокой трудоемкости данной задачи. Однако, по мнению автора, охарактеризовать частоту использования водоразборных

устройств в течение суток можно на основании данных о фактическом распределении суточного объема водопотребления для конкретного типа зданий. Так, для зданий жилого фонда такие сведения приведены в относительно недавно выполненном исследовании, авторы которого утверждают, что для рабочих и выходных дней в распределении суточного объема водопотребления наблюдаются отличия, а соответственно, данный факт должен быть учтен и при определении распределения вероятностей действия водоразборных устройств [25].

Графики, представленные в работе [25], можно рассматривать как эмпирическую кривую плотности вероятности действия водоразборного устройства или, другими словами, вероятности возникновения импульса, характеризующего водопотребление для конкретного устройства.

С учетом того, что все выполняемое исследование строится на допущении о том, что минимальным временным интервалом для оценки водопотребления является секунда, а одной из основных итоговых целей разработки модели водопотребления – оценка максимального секундного расхода воды, условные сутки, как наиболее характерный период водопотребления, были разделены на 86 400 равных временных интервалов, каждый из которых соответствует одной секунде.

По внешнему виду графиков фактического распределения суточного объема водопотребления можно предположить, что как для рабочих, так и для выходных дней описание вероятности водопотребления водоразборным устройством в течение суток можно выполнить с применением смесей теоретических законов распределения. Учитывая, что рассматриваемая величина представляет собой количество секунд в сутках и может принимать значения от 0 до 86 399 включительно, смесь распределений должна быть усечена снизу и сверху соответствующими значениями.

Описание вероятности водопотребления водоразборными устройствами в течение суток для рабочих и выходных дней, как показали выполненные расчеты и проверка выдвинутых статистических гипотез, может быть выполнено:

1) для рабочих дней – усеченной снизу и сверху значениями 0 и 86 399 соответственно смесью нормальных распределений с весами $w_1 = 0,05$, $w_2 = 0,05$, $w_3 = 0,51$, $w_4 = 0,15$, $w_5 = 0,24$ и параметрами $\mu_1 = 2529$, $\mu_2 = 27\,889$, $\mu_3 = 39\,772$, $\mu_4 = 66\,167$, $\mu_5 = 77\,376$, $\sigma_1 = 2308$, $\sigma_2 = 698$, $\sigma_3 = 14\,579$, $\sigma_4 = 6726$, $\sigma_5 = 4305$ соответственно;

2) для выходных дней – усеченной снизу и сверху значениями 0 и 86 399 соответственно смесью нормальных распределений с весами $w_1 = 0,06$, $w_2 = 0,68$, $w_3 = 0,22$, $w_4 = 0,04$ и параметрами $\mu_1 = 3237$, $\mu_2 = 45\,539$, $\mu_3 = 74\,686$, $\mu_4 = 76\,337$, $\sigma_1 = 2842$, $\sigma_2 = 16\,349$, $\sigma_3 = 667$, $\sigma_4 = 5337$ соответственно.

Визуализация результатов исследования представлена на рис. 2 в виде графиков эмпирических (ступенчатый график черного цвета) и теоретических (красная кривая) функций распределения.

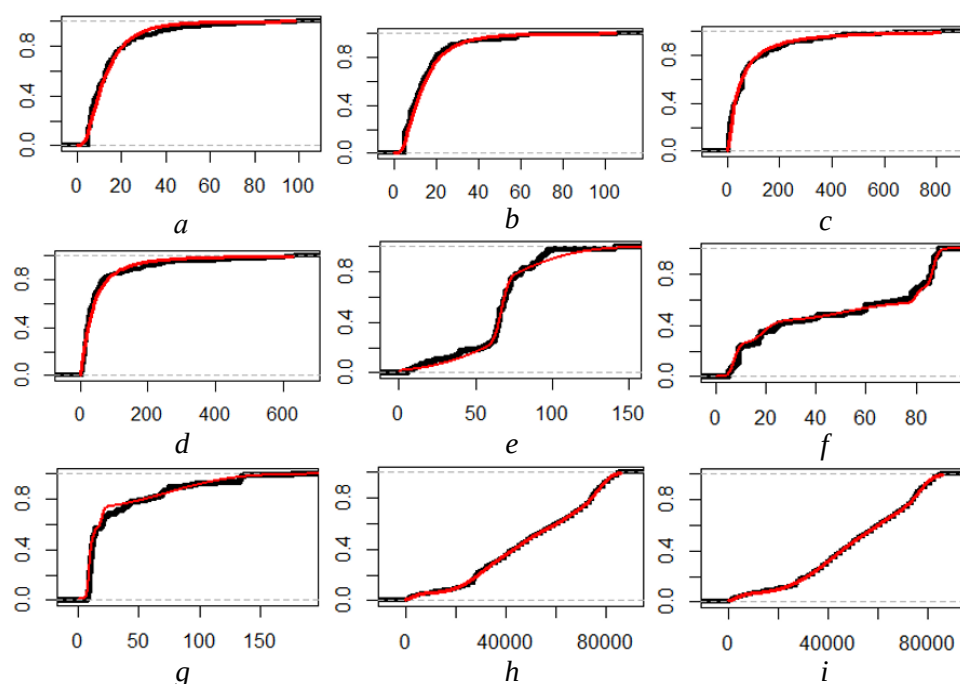


Рис. 2. Графики эмпирической и теоретической функций распределения рассматриваемых выборок:

a – СмКх; b – СмКг; c – СмВх; d – СмВг; e – Ух; f – Пмх; g – Стх; h – рабочие дни; i – выходные дни

Fig. 2. Empirical and theoretical curves of distribution functions:

a – MiKc; b – MiKh; c – MiBc; d – MiBh; e – Tc; f – Dwc; g – Wmc; h – working days; i – weekend

Ось ординат соответствует значениям функции распределения, ось абсцисс – продолжительности периода непрерывного водопотребления водоразборным устройством (единица измерения – секунда) или, для рабочих и выходных дней, времени суток, выраженном в секундах.

Заключение

В ходе исследования автором был получен набор данных о продолжительности периодов непрерывного водопотребления наиболее распространенными типами водоразборных устройств. По полученным эмпирическим данным построены гистограммы и кривые плотности распределения. На основании анализа построенных графиков, эмпирических данных и результатов расчетов, выполненных на их основе, выдвинуты статистические гипотезы о виде теоретического закона распределения, которым могут быть описаны рассматриваемые выборки.

В результате выполненного исследования предложен метод математического моделирования продолжительности непрерывного водопотребления наиболее распространенными типами водоразборных устройств, а также частоты (вероятности) их использования в течение суток. Как показали расчеты уровня значимости для рассматриваемых выборок и теоретических законов

распределения, для описания изменчивости продолжительности периодов непрерывного водопотребления смесителями кухни и ванны (душевой кабины) может быть применен логнормальный закон распределения, а для смывного бачка унитаза, стиральной и посудомоечной машин – усеченная смесь нормальных распределений. Описание частоты использования водоразборных устройств в течение суток (как в рабочие, так и выходные дни) также может быть выполнено с применением смесей нормальных распределений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Heidari A., Navimipour N.J., Unal M. Applications of ML/DL in the management of smart cities and societies based on new trends in information technologies: A systematic literature review // *Sustainable Cities and Society*. 2022. V. 85. P. 104089.
2. Гвоздицкий М.А., Огороднова Ю.В., Лейтес Д.С. Принципы построения среды общих данных информационной модели строительного объекта в облачном сервисе // *Архитектура, строительство, транспорт*. 2022. № 3. С. 74–81. DOI: 10.31660/2782-232X-2022-3-74-81
3. СП 30.13330.2020. Внутренний водопровод и канализация зданий. 2020.
4. Новицкий Н.Н., Вантеева О.В. Задачи и методы вероятностного моделирования гидравлических режимов трубопроводных систем // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета*. 2008. № 1 (53). С. 68–75.
5. Салугин А.Н., Балкушкин Р.Н. О применении искусственных нейронных сетей для моделирования водопотребления // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2021. № 1. С. 70–85. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-1-5
6. Карамбиров С.Н., Уманский П.М., Бекишева Л.Б. Распределение гидравлических параметров в системе подачи и распределения воды при штатных и послеаварийных режимах работы // *Природообустройство*. 2012. № 4. С. 48–51.
7. Николенко И.В., Рыжаков А.Н. Нелинейная модель оптимизации параметров силовых агрегатов насосной станции подкачки системы водоснабжения // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2019. № 4 (724). С. 47–63.
8. Чупин В.Р., Душин А.С. Оценка надежности водообеспечения эксплуатируемых систем подачи и распределения воды // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2009. № 3 (39). С. 186–191.
9. Карамбиров С.Н., Манукьян Д.А., Бекишева Л.Б. Оценка надежности подачи воды системами водоснабжения // *Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук*. 2013. № 6. С. 63–65.
10. Новицкий Н.Н., Вантеева О.В. Моделирование стохастичности потокораспределения в гидравлических цепях // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2011. № 2. С. 122–131.
11. Buchberger S.G., Wu L. Model for instantaneous residential water demands // *Journal of Hydraulic Engineering*. 1995. V. 121. № 3. P. 232–246. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:3(232)
12. Alvisi S., Franchini M., Marinelli A. A stochastic model for representing drinking water demand at residential level // *Water Resources Management*. 2003. V. 17. P. 197–222.
13. Vertommen I. et al. Water demand uncertainty: the scaling laws approach. Rijeka, Croatia, 2012. 160 с.
14. Buchberger S.G., Wells G.J. Intensity, duration, and frequency of residential water demands // *Journal of Water Resources Planning and Management*. 1996. V. 122. № 1. P. 11–19. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1996\)122:1\(11\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1996)122:1(11))
15. Blokker E., Vreeburg J. Monte Carlo simulation of residential water demand: A stochastic end-use model // *Impacts of global climate change*. 2005. P. 1–12.
16. Mazzoni F. et al. Exploiting high-resolution data to investigate the characteristics of water consumption at the end-use level: A Dutch case study // *Water Resources and Industry*. 2023. V. 29. P. 100198. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wri.2022.100198>

17. Vertommen I., Magini R., Cunha M. Scaling water consumption statistics // *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2014. V. 141. № 5. DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000467
18. Поливанов Д.Е., Семенов А.А. Исследование режима отбора воды смесителем из системы водоснабжения // *Известия КГАСУ*. 2023. № 2 (64). С. 60–69. DOI: 10.52409/20731523_2023_2_60
19. Поливанов Д.Е., Семенов А.А. BIM-технологии с элементами программирования при анализе режимов работы внутренних сетей водоснабжения зданий // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры (BIMAC 2023). Санкт-Петербург : СПбГАСУ, 2023. С. 81–91. DOI: 10.23968/BIMAC.2023.012
20. Garcia V.J. et al. Stochastic model to evaluate residential water demands // *Journal of water resources planning and management*. 2004. V. 130. № 5. P. 386–394.
21. Волгин П.Н., Масленникова Т.Н. Определение теоретического закона распределения случайных величин, используемых в имитационной модели // *Морская радиоэлектроника*. 2010. № 3–4 (33–34). С. 74–78.
22. Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б., Семенова М.А. К вопросу статистического анализа больших данных // *Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика*. 2018. № 44. С. 40–49. DOI: 10.17223/19988605/44/5
23. Dempster A.P., Laird N.M., Rubin D.B. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm // *Journal of the royal statistical society: series B (methodological)*. 1977. V. 39. № 1. P. 1–22.
24. Колмогоров А.Н. Теория вероятностей и математическая статистика : сб. статей. Москва : Наука, 1986. 535 с.
25. Игнатчик В.С., Саркисов С.В., Обвинцев В.А. Исследование коэффициентов часовой неравномерности водопотребления // *Вода и экология: проблемы и решения*. 2017. № 2 (70). С. 27–39. DOI: 10.23968/2305-3488.2017.20.2.27-39

REFERENCES

1. Heidari A., Navimipour N.J., Unal M. Applications of ML/DL in the management of smart cities and societies based on new trends in information technologies: A systematic literature review. *Sustainable Cities and Society*. 2022; 85: 104089.
2. Gvozdit'sky M.A., Ogorodnova Yu.V., Leites D.S. Principles of building shared data environment of information model of construction object in a cloud service. *Arkitektura, stroitel'stvo, transport*. 2022; (3): 74–81. DOI: 10.31660/2782-232X-2022-3-74-81 (In Russian)
3. SP 30.13330.2020 "Internal water supply and sewerage of buildings". 2020. (In Russian)
4. Novitsky N.N., Vanteeva O.V. Tasks and methods of probabilistic modeling of hydraulic modes of pipeline systems. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta*. 2008; 1 (53): 68–75. (In Russian)
5. Salugin A.N., Balkushkin R.N. Artificial neural networks for water consumption modeling. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*. 2021; (1): 70–85. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-1-5 (In Russian)
6. Karambirov S.N., Umansky P.M., Bekisheva L.B. Distribution of hydraulic parameters in water supply and distribution system under normal and post-emergency operating modes. *Prirodobustroistvo*. 2012; (4): 48–51. (In Russian)
7. Nikolenko I.V., Ryzhakov A.N. Nonlinear model for parameter optimization of pumping station units for water supply systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2019; 4 (724): 47–63. (In Russian)
8. Chupin V.R., Dushin A.S. Reliability assessment of water supply and distribution systems. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2009; 3 (39): 186–191. (In Russian)
9. Karambirov S.N., Manukyan D.A., Bekisheva L.B. Reliability assessment of water supply and distribution systems. *Doklady Rossiiskoi akademii sel'skokhozyaistvennykh nauk*. 2013; (6): 63–65. (In Russian)
10. Novitsky N.N., Vanteeva O.V. Modeling of flow distribution stochastics in hydraulic circuits. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Energetika*. 2011; (2): 122–131. (In Russian)

11. Buchberger S.G., Wu L. Model for instantaneous residential water demands. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1995; 121 (3): 232–246. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:3(232)
12. Alvisi S., Franchini M., Marinelli A. A stochastic model for representing drinking water demand at residential level. *Water Resources Management*. 2003; 17: 197–222.
13. Vertommen I., et al. Water demand uncertainty: The scaling laws approach. Rijeka, Croatia, 2012. 160 p.
14. Buchberger S.G., Wells G.J. Intensity, duration, and frequency of residential water demands. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 1996; 122 (1): 11–19. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1996\)122:1\(11\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1996)122:1(11))
15. Blokker E., Vreeburg J. Monte Carlo simulation of residential water demand: A stochastic end-use model. *Impacts of Global Climate Change*. 2005. Pp. 1–12.
16. Mazzoni F., et al. Exploiting high-resolution data to investigate the characteristics of water consumption at the end-use level: A Dutch case study. *Water Resources and Industry*. 2023; 29: 100198. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wri.2022.100198>
17. Vertommen I., Magini R., Cunha M. Scaling water consumption statistics. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2014; 141 (5). DOI: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000467
18. Polivanov D.E., Semenov A.A. Water extraction by mixer from water supply system. *Izvestiya KGASU*. 2023; 2 (64): 60–69. DOI: 10.52409/20731523_2023_2_60 (In Russian)
19. Polivanov D.E., Semenov A.A. BIM technologies with programming elements in analysis of operating modes of water supply in buildings. In: *BIM modeling in construction and architecture tasks*. Saint-Petersburg, 2023. Pp. 81–91. DOI: 10.23968/BIMAC.2023.012 (In Russian)
20. Garcia V.J., et al. Stochastic model to evaluate residential water demands. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2004; 130 (5): 386–394.
21. Volgin P.N., Maslennikova T.N. Definition of theoretical distribution law of random variables in simulation model. *Morskaya radioelektronika*. 2010; 3–4 (33–34): 74–78. (In Russian)
22. Lemesko B.Yu., Lemesko S.B., Semenova M.A. Statistical analysis of big data. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika*. 2018; (44): 40–49. DOI: 10.17223/19988605/44/5 (In Russian)
23. Dempster A.P., Laird N.M., Rubin D.B. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (methodological)*. 1977; 39 (1): 1–22.
24. Kolmogorov A.N. Probability theory and mathematical statistics. Moscow: Nauka, 1986. 535 p. (In Russian)
25. Ignatchik V.S., Sarkisov S.V., Accusantsev V.A. Coefficients of hourly unevenness of water consumption. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya*. 2017; 2 (70): 27–39. DOI: 10.23968/2305-3488.2017.20.2.27-39 (In Russian)

Сведения об авторе

Дмитрий Евгеньевич Поливанов, аспирант, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4, dmitry_polivanov@mail.ru

Author Details

Dmitry E. Polivanov, Research Assistant, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering 4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., 190005, Saint-Petersburg, Russia, dmitry_polivanov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13.02.2024
Одобрена после рецензирования 24.03.2024
Принята к публикации 25.03.2024

Submitted for publication 13.02.2024
Approved after review 24.03.2024
Accepted for publication 25.03.2024