



*А.А. Соловьева¹,
В.А. Смирнов²*

¹*Вологодский государственный университет,*

²*НИУ Московский государственный строительный университет*

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ БАЗИСНОЙ ПЕРЕМЕННОЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРИМЕРЕ СНЕГОВОЙ НАГРУЗКИ ПРИ ВЕРОЯТНОСТНОМ АНАЛИЗЕ НАДЕЖНОСТИ СООРУЖЕНИЙ

В статье представлен алгоритм формирования базисной переменной воздействия на примере снеговой нагрузки в задачах вероятностного анализа надежности. Путем статистического анализа веса снегового покрова по различным метеостанциям РФ предложены варианты формирования стохастической модели снеговой нагрузки на покрытие. Выполнен сравнительный анализ расчетного и нормативного значения снеговой нагрузки по данным карты районирования на основе СП и данным метеостанций. Представленный подход может быть использован при анализе и подборе вероятностной модели нагрузки в задачах расчета надежности строительных конструкций.

Надежность, вероятностное проектирование, снеговая нагрузка, модель воздействия, распределение Гумбеля, предельное состояние, неопределенность.

Для применения вероятностных методов расчета требуется формирование моделей базисных переменных. Обычно выделяют две группы базисных переменных: первые определяют модели воздействия (например, нагрузку), вторые – модели сопротивления (например, несущую способность).

Модель воздействия определяется нагрузками и воздействиями на строительную конструкцию. 14–18 % аварий и обрушений в ряде основных причин имеют превышение кратковременной нагрузки [1], которая в Вологодской области, как правило, определяется снеговой. Рассмотрение статистической информации по снеговой нагрузке способствует предварительному составлению вероятностной (стохастической) модели данной нагрузки.

Основными показателями снеговой нагрузки, влияющими на безопасность строительных конструкций, являются высота снежного покрова, количество воды в снеге, плотность снежного покрова.

Первые неинструментальные ежедневные записи за погодой велись примерно с 1650 г., инструментальные – с 1695 г. Регулярные инструментальные метеорологические наблюдения начали производить примерно с 1724 г., результаты которых, к сожалению, не сохранились. В 1834 г. зарождается регулярная геофизическая сеть в России [2], а уже в 1872 г. началось создание полноценной сети метеорологических станций [3]. К концу XIX века метеорологическая сеть в России насчитывала 839 станций, 1020 дождемерных и 1830 снегомерных постов, которые проводили первые снегосьемки с 1924 г., а регулярность приобрели к 1935 г. К концу 1970 г. число стан-

ций превысило 6000, а максимального развития сеть достигла к 1986 г. – 2308 станций и 3274 поста [2].

В настоящее время насчитывается около 5736 пунктов. Из общего числа пунктов 1628 (в 2021 г.) и 1660 (в 2023 г.) производят снегосьемки, которые включают в себя высоту снежного покрова на различных участках [2].

Данные о запасах воды в снежном покрове ведут с 1976 года, начиная с 6-ти стоковых площадок и на водосборах [2].

Статистические данные за период 1976–2022 гг. по показателям продолжительности залегания снежного покрова, значений максимальной высоты имеют тенденции к изменению своих средних значений как в большую, так и в меньшую стороны в зависимости от района [4] (рис. 1). Также по данным [4] в среднем по России наблюдается тенденция к увеличению запаса воды в снеге примерно на 2,71 мм за 10 л, что достаточно сильно может изменить средний показатель нагрузки от снежного покрова.

Графически оценим изменчивость параметров снежного покрова на примере Вологодской области.

По данным архива погоды [5] определена изменчивость высоты снежного покрова (по средним и максимальным значениям).

По данным [6] количество воды в снежном покрове бассейна Северной Двины и Рыбинского водохранилища распределяется согласно рисунку 2.

По данным [4] определяются отклонения от объявленного среднего за период в 30 лет параметров:

- максимальной за год высоты снежного покрова (рис. 3);

- запаса воды в снежном покрове (рис. 4).

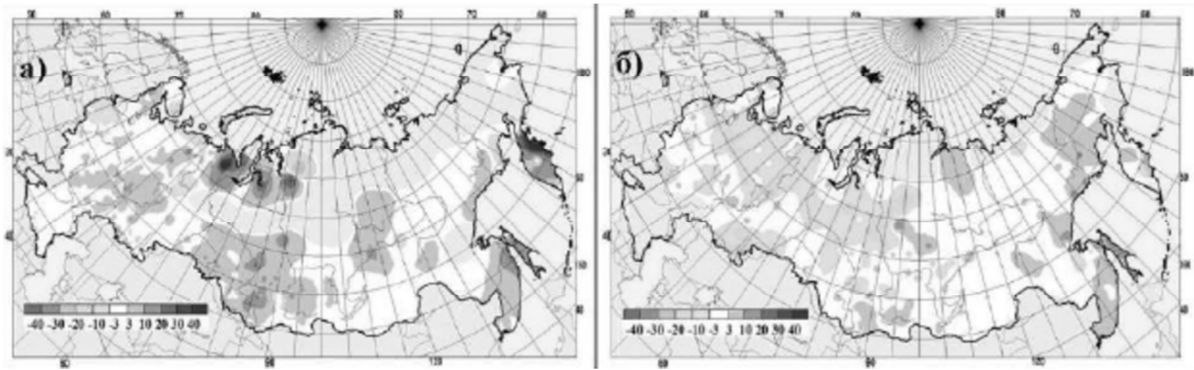


Рис. 1. Изменение запаса воды в снежном покрове за зиму 2022–2023 гг. [4]

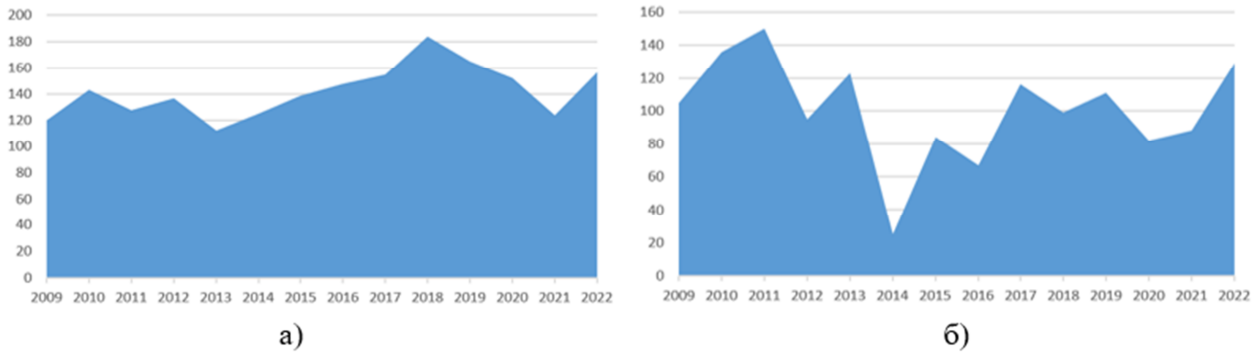


Рис. 2. Количество воды в снежном покрове бассейна Северной Двины (а) и Рыбинского водохранилища (б), мм [6]

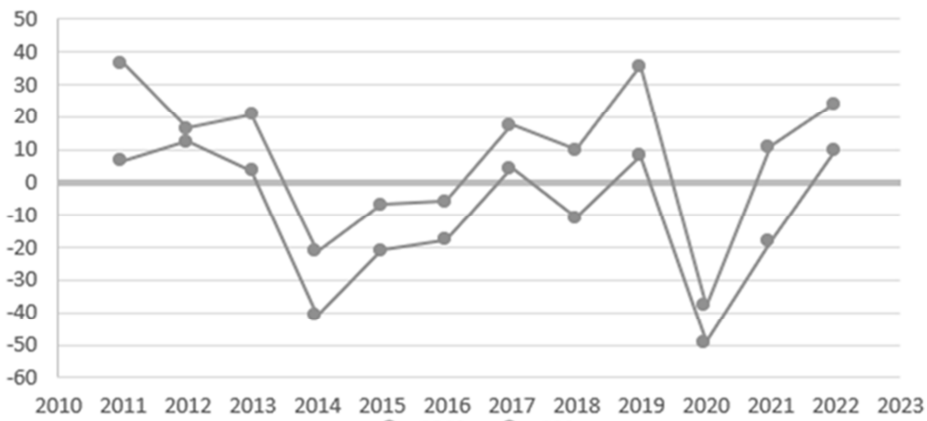


Рис. 3. Отклонение максимальной за год высоты снежного покрова от среднего значения на период с 2011–2013 от среднего значения периода 1961–1991, с 2014–2021 от среднего значения периода 1971–2000, 2022 от среднего значения периода 1991–2020 (нижний график – поле, верхний график – лет)

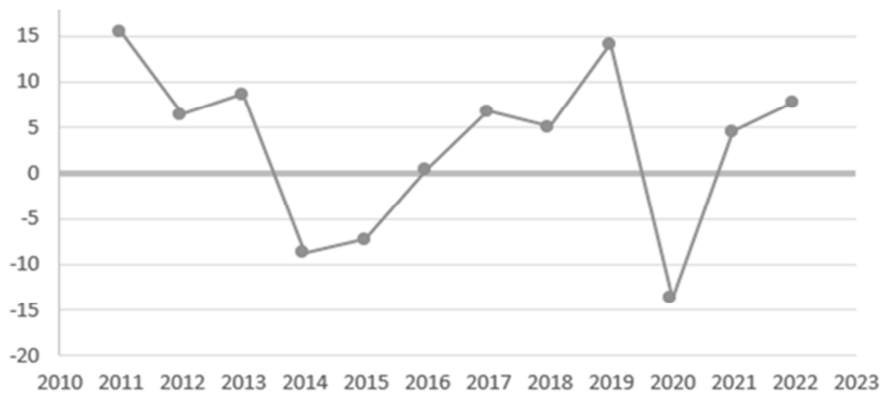


Рис. 4. Отклонение запаса воды в снежном покрове от среднего значения на период с 2011–2021 от среднего значения периода 1971–2000, 2022 от среднего значения периода 1991–2020

Можно отметить большой разброс параметров, влияющих на значение среднего снеговой нагрузки. Также довольно широкий диапазон отклонений проявляется в частных случаях (годах) даже в короткие (рассматриваемый участок на рисунках 4, 5 – 12 лет) промежутках. Использование средних значений параметров без учета данных отклонений негативно сказывается на несущей способности зданий и сооружений, что может привести как авариям и отказам строительных конструкций, так и к необоснованному запасу.

В связи с небольшой продолжительностью наблюдения за параметрами снежного покрова и их малого объема, а также сильной изменчивостью представление снеговой нагрузки в качестве случайной величины является актуальной темой исследований [7, 8]. Попытка учета пиковых значений параметров встречается в исследованиях [9, 10].

В ряде исследований [7–10] отмечается, что наиболее подходящим для вероятностного моделирования снеговой нагрузки является закон распределения Гумбеля (или двойной экспоненциальный закон) с аналитическим видом:

$$F_s(s) = \exp\left[-\exp\left(\frac{\alpha - s}{\beta}\right)\right], \quad (1)$$

где α – параметр центра; β – параметр сдвига.

Параметры закона распределения Гумбеля могут быть вычислены по статистической выборке следующим образом:

$$\beta = (0,78 + 1,54 \cdot N^{-0,75}) \cdot \sigma_s, \quad (2)$$

$$\alpha = m_s - [0,45 + 0,34 \cdot N^{-0,69}] \cdot \sigma_s,$$

где N – количество значений в выборке, m_s – математическое ожидание случайной величины, σ_s – среднее квадратическое отклонение случайной величины.

В связи с этим в статье предлагается рассмотреть изменчивость веса снежного покрова, найденного по различным подходам, и сходимость полученных значений с нормативными и расчетными.

Вес снежного покрова можно найти как произведение плотности снега на его высоту. Высоту снега по разным метеостанциям, относящихся к одному снеговому району, определяем согласно данным [5], плотность согласно ГОСТ 53613-2009 «Воздействие природных внешних условий на технические изделия. Общая характеристика. Осадки и ветер» п. 5.3 – «плотность свежеснежавшего снега изменяется в пределах от 70 до 150 кг/м³, а плотность слежавшегося снега изменяется в пределах от 200 до 400 кг/м³».

По данным различных метеостанций, расположенных в Вологодской области, определим значение снеговой нагрузки с обеспеченностью 0,98 для каждого населенного пункта за рассматриваемый период в 19 лет. Вес снежного покрова определяется также по запасу воды в снежном покрове по [6] для всех населенных пунктов, относящихся к одному бассейну (в

связи с недостатком данных метеостанций о запасе воды в снежном покрове).

Сравнивать полученные значения будем с нормативными и расчетными параметрами, определенными по СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия».

Полученные результаты представлены графически на рисунке 6.

Снеговая нагрузка – случайная величина с большим коэффициентом вариации [9]. Рассмотрение данного параметра в детерминистической постановке вводит большую неопределенность в математическую модель предельного состояния, что может привести к крайним ситуациям: авариям и отказам или необоснованным запасам строительных конструкций.

Представление базисных переменных математических моделей предельных состояний дает возможность применения вероятностных методов как современного шага в развитии расчета и проектирования строительных конструкций для оценки уровня надежности объекта в различные периоды его эксплуатации. Представленный подход может быть использован при анализе и подборе вероятностной модели нагрузки в задачах расчета надежности строительных конструкций [11–13] и при анализе промышленной безопасности [14]. Для северных регионов РФ снеговая нагрузка зачастую является главным фактором, определяющим надежность покрытия [15, 16], что делает вопрос построения достоверной модели веса снежного покрова и его распределения по сооружению актуальным при обеспечении необходимого уровня безопасности.

Литература

1. Еремин, К. И. Систематизация научных исследований в области комплексной безопасности объектов строительства / К.И. Еремин // *Материалы круглого стола «Комплексная безопасность в строительстве»* [Электронный ресурс]. – Москва. – Режим доступа: https://profi.erzrf.ru/upload/iblock/97d/Eremin-K.I._Sistematizatsiya-nauchnykh-issledovaniy_-v-oblasti-kompleksnoi_-bezopasnosti-v-stroitelstve.pdf.
2. *Очерки по истории гидрометеорологической службы России*. Том 1 – СПб.: Гидрометеоиздат, 1997. – 343 с.
3. *Климат. Сеть метеостанций* [Электронный ресурс]. – Национальный Атлас России. – Режим доступа: <https://nationalatlas.ru/tom2/151.html>.
4. *Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации – Москва* : Росгидромет, 2023. – 109 с.
5. *Архив погоды в Вологде (аэропорт)* [Электронный ресурс]. – Вологда. – Режим доступа: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Вологде_%28аэропорт%29?ysclid=lqf6car1qw843778095.
6. *Сведения о запасах воды в снежном покрове по бассейнам крупных рек и водохранилищ России* [Электронный ресурс]. – Росгидромет, 2020. – 1 с. – Режим доступа: <https://www.meteorf.gov.ru/special/press/news/20708/?ysclid=ls8yk34ico883685186>.
7. Qiang S. Research on reliability of steel roof structures subjected to snow loads at representative sites in

China / S. Qiang, X. Zhou, M. Gu // *Cold Regions Science and Technology*. – 2018. – Vol. 150. – Pp. 62-69.

8. Wolinski S. Evaluation of load values using the Gumbel model / S. Wolinski, T. Pytlowany // *Archives of Civil Engineering*. – 2012. – Vol. 58. – Issue 2. – Pp. 199–208.

9. Золина, Т. В. Моделирование снеговой нагрузки на покрытие промышленного здания / Т. В. Золина, П. Н. Садчиков // *Вестник МГСУ*. – 2016. – № 8. – С. 25–33.

10. Мкртычев, О. В. Теория надежности в проектировании строительных конструкций: монография / О. В. Мкртычев, В. Д. Райзер. – Москва : Изд-во АСВ, 2016. – 906 с.

11. Шевцов, Л. С. Вероятностный подход в проектировании изгибаемых элементов из армированного арболита / Л. С. Шевцов, А. А. Соловьева, С. А. Соловьев // *Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки*. – 2023. – № 2(20). – С. 15–17.

12. Соловьев, С. А. Неклассические методы анализа надежности строительных конструкций /

С. А. Соловьев. – Вологда : Вологодский государственный университет, 2022. – 135 с.

13. Соловьева, А. А. Вероятностные модели случайных величин в строительном проектировании / А. А. Соловьева, С. А. Соловьев. – Вологда : Вологодский государственный университет, 2024. – 144 с.

14. Соловьев, С. А. Вероятностная оценка промышленной безопасности при неполной статистической информации / С. А. Соловьев // *Безопасность труда в промышленности*. – 2020. – № 9. – С. 88–93.

15. Соловьева, А. А. Расчет надежности элементов стальных ферм по критерию устойчивости с использованием р-блоков / А. А. Соловьева, С. А. Соловьев // *Строительная механика и расчет сооружений*. – 2021. – № 1(294). – С. 45–53.

Соловьев, С. А. Моделирование случайной статической нагрузки на покрытия сооружений при неполной статистической информации / С. А. Соловьев // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. – 2020. – Т. 16, № 4. – С. 243–249.

A.A. Solovyova¹, V.A. Smirnov²

¹*Vologda State University,*

²*Moscow State University of Civil Engineering*

METHODOLOGY OF BASIC IMPACT VARIABLE FORMATION ON THE EXAMPLE OF SNOW LOAD WHEN CONDUCTING STRUCTURES RELIABILITY PROBABILISTIC ANALYSIS

The article presents an algorithm for the formation of a basic impact variable using the example of snow load in the tasks of probabilistic reliability analysis. By statistical analysis of the weight of snow cover at various weather stations of the Russian Federation, options for the formation of a stochastic model of snow load on the coating are proposed. A comparative analysis of the design and normative values of snow load was performed according to the zoning map data based on a Set of Rules and data from weather stations. The presented approach can be used in the analysis and selection of a probabilistic load model in the tasks of reliability analysis of buildings and structures.

Reliability, probabilistic design, snow load, impact model, Gumbel distribution, limit state, uncertainty.