Определение нормативных и расчетных значений снеговых нагрузок

И. Д. ГРУДЕВ, д-р техн. наук, проф., почетный чл. РААСН (ЦНИИПСК им. Мельникова)

В. В. ФИЛИППОВ, д-р техн. наук, проф., чл.-кор. РАН

Т. А. КОРНИЛОВ, канд. техн. наук, доц.

А. В. РЫКОВ, канд. техн. наук

(Якутский гос. ун-т)

Назначение нормативных значений снеговых нагрузок в любых нормах основывается на анализе опытных данных, полученных на метеостанциях [1]. Обычно используются максимальные значения снеговых отложений по годам за период N от 25 до 100 лет. Учитывая ограниченность величины снеговых нагрузок, задача составителя норм состоит в определении наибольшей (нормативной) нагрузки s_0 (Па или кгс/м^2) и назначении коэффициента надежности к ней для получения расчетной нагрузки $s_p = \gamma_f s_0$.

Для решения этой задачи необходимо рассмотреть принятые гипотезы и те математические операции, которые используются при обработке опытных данных. Первой является гипотеза о равноправности, или о независимости опытных данных. В силу этой гипотезы каждой опытной точке следует сопоставить одинаковую вероятность $\Delta P = 1/N$, а не $\Delta P = 1/(N+1)$, как это делается для сомнительного удобства в большинстве работ. Несмотря на то, что $N >> 1$, замену N на $N + 1$ делать не следует, так как в рассматриваемой задаче она имеет существенные последствия. Интегральную вероятность $0 \leqslant P \leqslant 1$ в соответствии с принятыми в справочной литературе [2] традициями, будем откладывать по оси ординат. Каждой опытной точке соответствует полоса ΔP, а опытное значение, как во всех физических экспериментах, относится к середине этой полосы, т. е. опытные данные следует располагать на следующих уровнях:

$$P_i = \Delta P \cdot i - \frac{\Delta P}{2} = \Delta P\left(i - \frac{1}{2}\right) \ (i = 1, \ldots, N). \quad \textbf{(1)}$$

В силу гипотезы о равноправности опытных данных их можно менять местами и, в частности, упорядочить в возрастающем порядке, а затем нанести на график *(см. рисунок а)*. Для примера в *табл. 1* приведена уже упорядоченная весьма характерная статистика по метеостанции «Якутск».

Кроме опытных точек, соединенных прямыми отрезками, на *рис. 1* показано распределение Гумбеля с поправками на величину выборки $N = 60$ [1].

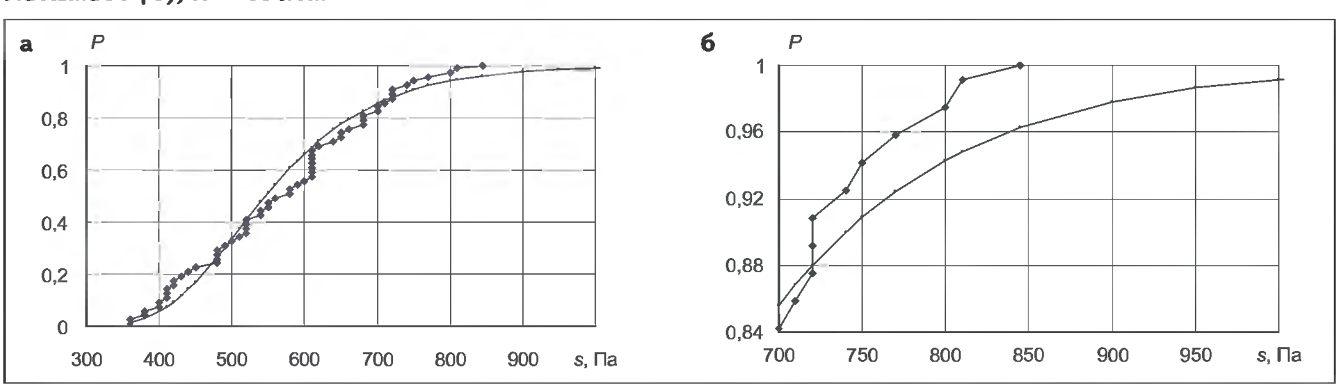
Обратим внимание на то, что последнее, наибольшее (N) опытное значение располагается посередине последнего интервала на уровне $P_N = 1 - \Delta P/2 = 1 - 1/(2N)$, а нас интересует край этого интервала $P = 1$, отстоящий от последней опытной точки на величину $1/(2N)$. Таким образом, задача сводится к экстраполяции опытных данных до величины $P = 1$ на малом интервале $\Delta P/2 = 1/(2N)$. При замене N на $N + 1$, интервал экстраполяции увеличился бы вдвое (!) и был равен ΔP. Если непредвзято посмотреть на опытные точки многих выборок, сформулированная задача выглядит почти тривиальной. В качестве характерного примера на *рисунке б* в крупном масштабе показан «хвост» распределения, приведенного на *рисунке а*.

К большому удивлению, в такой постановке задача никем до сих пор не была сформулирована. Никто из авторов не решился искать значение нагрузки для $P = 1$, хотя хорошо известны ограниченные распределения, например, биномиальное, и не смог себе позволить отказаться от представления опытных данных при помощи «классических» законов распределения. Они утверждали: «Изменчивость максимумов веса снегового покрова наилучшим образом аппроксимируется двойным экспоненциальным распределением Гумбеля» [3]. И далее об опытных точках забывалось, а все выкладки основывались лишь на кривой распределения Гумбеля.

Авторов не смущало то обстоятельство, что параметры распределения Гумбеля определяются через среднее значение и стандартное отклонение всей выборки, а следовательно, окончательный результат зависит от статистики как многоснежных, так и малоснежных зим, чего по сути рассматриваемой задачи не должно быть.

Более того, даже в тех случаях, когда распределение Гумбеля в интересующей нас «хвостовой» области шло совсем в разрез с опытными данными — приблизительно так, как показано на *рисунке*, авторы не усомнились в

Вероятностное распределение (а), по данным метеостанции «Якутск», и его «хвост» в укрупненном масштабе (б), N = 60 лет



1. Исходные опытные значения s, Па, по годам (за 60 лет)

360	420	510	580	610	700
360	430	520	580	620	710
380	440	520	590	640	720
380	450	520	600	650	720
400	480	520	610	650	720
400	480	540	610	660	740
410	480	540	610	680	750
410	480	550	610	680	770
410	490	550	610	680	800
420	500	560	610	700	810

2. Значения s_{ij}, Па, К = 4

i	*j*			
	N-1	**N-2**	**N-3**	**N-4**
Метеостанция «Покровск»				
N	1015	995	995	989
N-1	–	895	925	910
N-2	–	–	995	932
N-3	–	–	–	820
Метеостанция «Якутск»				
N	815	820	820	819
N-1	–	845	838	830
N-2	–	–	820	808
N-3	–	–	–	785

справедливости полученных результатов и опубликовали их [4].

Для того чтобы разрешить противоречия между ограниченными опытными данными и неограниченным распределением Гумбеля авторам приходилось вводить ниоткуда не следующие сроки повторяемости (например 50 лет) или произвольно взятые долговечности сооружений [3]. При этом авторы не обращали внимания на то обстоятельство, что если срок наблюдений оказывался больше выбранного срока повторяемости – например, срок наблюдений равен 33 годам (метеостанция «Лосиноостровская»), а срок повторяемости принят равным 25 годам, – то для получения соответствующей снеговой нагрузки не требуется никакой теории, достаточно поставить точку между двумя имеющимися опытными данными. Если же в такой ситуации использовать распределение Гумбеля, то можно получить для срока повторяемости 25 лет снеговую нагрузку даже большую, чем для срока повторяемости 33 года (см. табл. 2, 3, 4 [4]).

После всего изложенного остается лишь сформулировать какой-нибудь простейший способ экстраполяции опытных точек, как это сделано, например, в работе [7], а об использовании распределения Гумбеля для определения снеговых нагрузок лучше забыть как о дурном сне.

При разработке метода экстраполяции опытных данных совершенно естественно потребовать выполнения следующих двух принципов:
• необходим учет конечности снеговой нагрузки;
• величина нормативного значения не должна зависеть от статистики малоснежных зим.

В соответствии с последним требованием для экстраполяции отбираются только последние («хвостовые») точки в количестве не более 10 штук ($K \leqslant 10$). В большинстве случаев искомый результат получается по двум последним точкам. Так как интервал экстраполяции весьма мал, вполне возможно воспользоваться линейной экстраполяцией, хотя, если бы последние точки показывали наличие определенной кривизны, можно воспользоваться и схемами более высокого порядка. В проведенных многочисленных расчетах такой необходимости не обнаружилось.

Линейную экстраполяцию можно осуществить несколькими способами, поэтому логичнее воспользоваться стратегией наименьшего риска, которая заключается в следующем. Через каждую пару (ij) из отобранных точек проводят прямую до пересечения с горизонталью $P = 1$, точка пересечения дает значение

$$s_{ij} = \frac{\left(j+\frac{1}{2}\right)s_{N-i} - \left(i+\frac{1}{2}\right)s_{N-j}}{j-i}$$

$$(j > i) \quad (i = 0,\ldots, K\text{-}1;\ j = 1,\ldots, K) \qquad \textbf{(2)}$$

В качестве иллюстрации в *табл. 2* приведены такие значения.

Из всех этих величин выбирают наибольшую, которую и принимают в качестве нормативного значения $s_0 = \max\{s_{ij}\}$. Как правило, s_0 определяется по последней и предпоследней опытным точкам, хотя встречаются и исключения. Другие способы линейной экстраполяции, например метод наименьшего квадратичного отклонения с использованием нескольких хвостовых точек, приводят к несколько меньшим значениям s_0, поэтому предлагаемый метод предпочтителен, так как дает хоть и небольшой, но все-таки запас.

Теперь следует учесть, что опытные данные получены с некоторой точностью, определяемой величиной ошибки измерения Δs, вследствие чего к величине s_0 необходимо ввести возможную поправку Δs_0. Легко показать, что эта поправка получается наибольшей в том случае, когда линейная экстраполяция основывается на двух последних точках: s_N и s_{N-1}. При этом увеличение нормативного значения в самой неблагоприятной ситуации будет равно:

$$\Delta s_0 = 2\Delta s. \qquad \textbf{(3)}$$

Представленная выше *табл. 1* исходных опытных данных претендует на точность порядка 10^{-2}, а в статье [4] эта же точность принята равной 10 % $=10^{-1}$, т. е. эти оценки различаются в 10 раз. До конкретизации на метеостанциях с большим запасом можно принять точность определения снегоотложений равной 5 %. Тогда из формулы (3) для коэффициента надежности получается значение $\gamma_f = 1{,}1$.

Описанный метод достаточно прост, поэтому он может быть использован при определении снеговой нагрузки для конкретного места строительства, на основании данных ближайших метеостанций. В настоящее время уже имеется опыт составления норм для выбранных населенных пунктов [5, 6]. Однако метод можно использовать и при составлении карт районирования величин снеговых нагрузок. Последний вопрос выходит за рамки настоящей статьи.

В целом предлагаемый алгоритм определения нормативного и расчетного значений снеговой нагрузки сводится к следующему: через точки правого конца опытного распределения проводится прямая с наименьшим наклоном, точка пересечения которой с прямой $P = 1$ дает нормативное значение s_0. Принимая точность опытных данных по определению максимального веса снегового покрова равной 5 %, для коэффициента надежности получается значение $\gamma_f = 1{,}1$.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Гордеев В. Н.* и др. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения. М.: Изд-во АСВ, 2006.
2. *Вентцель Е. С.* Теория вероятностей. М.: Физматгиз, 1958.
3. *Малый В. И., Мейтин В. И., Калашников Г. В., Павлов А. Б., Савельев В. А.* Предложения по назначению расчетной снеговой нагрузки // Пром. и гражд. стр-во. 2004. № 5.
4. *Лебедева И. В., Назаров Ю. П., Попов Н. А.* Региональное нормирование снеговых нагрузок в России // Строит. механика и расчет сооружений. 2006. № 3.
5. ТСН 20-301-97. Нагрузки и воздействия. Снеговые нагрузки. Якутск, 1998.
6. ТСН 20-303-2002. Нагрузки и воздействия. Ветровая и снеговая нагрузки. Краснодар, 2003.
7. *Корнилов Т. А.* Вероятностная оценка общих искривлений стержней стропильных ферм // Исследование прочности и надежности энергетических установок и специальных сооружений: Сб. науч. тр. М.: ЦНИИПСК им. Мельникова, 1987.