

УДК 005.584.1:624.042.42

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ, ВЫЗВАННЫХ СНЕГОВОЙ НАГРУЗКОЙ

Рудольф В.С., Кондратович А.А., Каминский А.А.,
Суриков А.В., Кудряшов В.А.

Проведен анализ статистических данных по обрушению кровель зданий, произошедших в результате сильных снегопадов. Произведен анализ системы технического нормирования и стандартизации Республики Беларусь в области воздействий снеговой нагрузки, деформаций строительных конструкций. Обоснована необходимость регулярной уборки снега толщиной более 30 см при эксплуатации кровель, а также необходимость использования системы мониторинга горизонтальных стальных строительных конструкций. Спланированы и проведены экспериментальные исследования по проверке соответствия показаний системы мониторинга горизонтальных стальных строительных конструкций реальным и расчетным деформациям конструкций. Зафиксировано, что деформации стальной стропильной фермы под нагрузкой, определенные с применением системы мониторинга, соответствуют показаниям поверочного оборудования, а также удовлетворительно сходятся с результатами расчета.

Ключевые слова: чрезвычайные ситуации, кровля, покрытие, обрушение, снеговая нагрузка, воздействия, деформации, система мониторинга, экспериментальные исследования.

(Поступила в редакцию 22 декабря 2017 г.)

Введение. Природные чрезвычайные ситуации в Республике Беларусь происходят довольно редко, однако наносят значительный ущерб. В последние годы территория Республики Беларусь регулярно оказывается под действием циклонов («Хавьер» (2013 г.), «Даниелла» и «Эмма» (2016 г.), «Аксель» (2017 г.)), приводящих к значительному увеличению снежного покрова за довольно короткий промежуток времени и, как следствие, к разрушению кровель и покрытий зданий и сооружений.

По данным Республиканского центра управления и реагирования на чрезвычайные ситуации МЧС Республики Беларусь, за последние 10 лет в нашей стране произошло 130 обрушений кровли по причинам, связанным с увеличением нагрузки снежного покрова: 58 % обрушений пришлось на сельскохозяйственные здания, 28 % – на жилые дома и хозпостройки, 6 % – на гаражи и навесы, 5 % – на складские здания, по 2 % – на общественные и производственные объекты.

Не обходится без подобных чрезвычайных ситуаций и за рубежом. Так, в январе 2006 года обрушилась крыша ледового катка в Германии, что произошло вследствие обильного снегопада и неверной оценки количества снега на крыше [1]. 25 января 2011 года в гипермаркете «О'Кей» в спальном Выборгском районе Санкт-Петербурга произошло обрушение более полутора тысяч квадратных метров кровли, в результате которого один человек погиб и 13 были ранены.

Однако наиболее трагический случай произошел 28 января 2006 года. Трагедия, унесшая жизни 65 человек, была связана с обрушением крыши торгового зала в г. Катовице, Польша. По данным следствия, причинами явились ошибки в проектировании (недостаточная несущая способность ферм покрытия и возникновение значительных горизонтальных сил, приведших к потере устойчивости колонн), а также превышение расчетного значения снеговой нагрузки вследствие обильного снегопада [2, 3].

Обрушение во всех случаях происходит ввиду недостаточной прочности конструктивных элементов относительно действующей в рассматриваемый момент времени нагрузки либо воздействия. Поэтому можно выделить следующие основные причины обрушений:

– некорректный учет возможной нагрузки (воздействий) при расчете и проектировании конструктивных элементов, которые будут действовать в течение проектного срока эксплуатации;

– ошибки при расчете, проектировании и возведении конструктивных элементов, в том числе при назначении надежностных параметров, рассчитанных на проектный срок эксплуатации;

– внесение изменений либо повреждение конструкций запроектными воздействиями в ходе эксплуатации либо ремонтных работ, в том числе при искусственном перемещении или перераспределении снега в ходе уборки;

– нарушение проектного срока эксплуатации, сроков ремонта конструкций, а также эксплуатационных требований, в том числе своевременной уборки снега с кровли;

– некорректный учет нагрузки (воздействий) в технических нормативных правовых актов (далее – ТНПА), вызванный либо изменением климатических условий в ходе проектного срока эксплуатации, либо изменением надежностных параметров, определяемых как способами проектирования, так и требованиями к эксплуатации и ремонту конструкций.

Очевидно, что в ходе проектирования, возведения и эксплуатации конструкций всегда присутствует человеческий фактор, а поэтому полностью избежать вышеперечисленных ошибок невозможно. Понимание основных положений действующих ТНПА в области снеговых воздействий, надежностных параметров и проектного срока эксплуатации конструкций, а также особенностей поведения конструкций при повышенных нагрузках является ключом к предотвращению чрезвычайных ситуаций, в том числе их неконтролируемого (прогрессирующего) развития.

Основная часть. В Республике Беларусь нормативные значения снеговой нагрузки определяют в соответствии с положениями двух независимых документов – либо СНиП 2.01.07, либо ТКП EN 1991-1-3 (совместно с ТКП EN 1990 и прочими взаимосвязанными документами) [4–6]. Это обусловлено тем, что с 2010 года в нашей стране допускается альтернативное проектирование конструкций зданий и сооружений – либо по комплексу устоявшихся «отечественных» ТНПА, разработанных преимущественно во времена существования СССР (применяется только для легких железобетонных, стальных конструкций); либо по комплексу так называемых «Еврокодов», разработанных техническим комитетом по стандартизации СЕН/ТС 250 «Еврокоды конструкций» (применяется для любых видов конструкций); либо по белорусским ТНПА в области проектирования конкретных видов конструкций, сочетающих в себе одновременно советскую школу проектирования конструкций и надежностные подходы «Еврокодов» (применяется для бетонных, железобетонных, каменных, армокаменных и деревянных конструкций).

В соответствии с положениями СНиП 2.01.07 [4], в зависимости от продолжительности действия нагрузок следует различать постоянные и временные (длительные, кратковременные, особые) нагрузки. Длительность действия нагрузки в ходе проектного срока эксплуатации определяет надежностные подходы к их учету для корректного назначения прочности и жесткости строительных конструкций и как результат – надежную их эксплуатацию в ходе проектного срока.

Снеговые нагрузки согласно СНиП 2.01.07 [4] принято относить к временным нагрузкам, в зависимости от расчетной ситуации – к длительным либо кратковременным, в соответствии с нормативным районированием. Следует учитывать, что с 2004 года на территории Республики Беларусь было введено собственное, отличное от советских норм, районирование по весу снегового покрова, предполагающего только два района: ИБ (80 кг/м²) и ИБ (120 кг/м²) (рисунок 1). По сравнению с советскими нормами [4, 7, 8], с одной стороны, нормативное значение снегового покрова было значительно увеличено (ранее – I (50 кг/м²), II (70 кг/м²) и III (100 кг/м²)), а с другой стороны – фактически исключено нормирование длительно действующей части снеговой нагрузки для снеговых районов III-V (ранее длительно действующая временная нагрузка составляла для III района (северо-восточная и восточная часть Могилевской и Гомельской областей) 0,3 от полного нормативного значения). Таким образом, для зданий, спроектированных согласно положениям СНиП 2.01.07 [4] в 2004 и более поздних годах, снеговая нагрузка учитывалась только как временная (кратковременная) нагрузка с нормативными значениями в 1,7–2,4 раза большими, чем в предыдущие года.

Важно также учитывать, что нормативное значение веса снегового покрова не является прямой величиной, используемой в расчетах несущей способности (прочности и жесткости) конструкций покрытий. В соответствии с п. 5.1 СНиП 2.01.07 [4] полное нормативное значение снеговой нагрузки на горизонтальную проекцию покрытия s следует определять по формуле (1) с последующим переводом в расчетное значение путем умножения на коэффициент надежности по нагрузке γ_f .

$$s = S_0 \mu, \quad (1)$$

где S_0 – нормативное значение веса снегового покрова на 1 м^2 горизонтальной поверхности земли, принимаемое в соответствии с картой районирования (рисунок 1), μ – коэффициент перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие, принимаемый в соответствии с профилями покрытий и нормативными схемами снеговых нагрузок, средней скоростью ветра.



— граница районов с различным весом снегового покрова

Рисунок 1. – Районирование территории Республики Беларусь по весу снегового покрова с 2004 года согласно изменению к СНиП 2.01.07 [7]

Коэффициент перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие μ может принимать различные значения в диапазоне от 0 до:

- 3,0 – для покрытий с парапетами;
- 4,0 – для покрытий зданий с перепадом высот;
- 6,0 – для навесов с перепадом высот относительно основного здания.

Максимальные значения, как правило, принимаются локально (с последующим линейным снижением в сторону плоской части кровли с коэффициентом $\mu = 1,0$) и, соответственно, имеют название «зона снеговых мешков».

Коэффициент надежности по нагрузке γ_f для снеговой нагрузки в соответствии с положениями СНиП 2.01.07 [4, 7] принимается равным 1,5–1,6 – для расчетов по несущей способности (на прочность и устойчивость – первая группа предельных состояний), и 1,0 – для расчетов по эксплуатационной пригодности (по деформациям, на выносливость – вторая группа предельных состояний) и в условиях пожара, а также других особых воздействий. Важно понимать, что для расчетов по эксплуатационной пригодности и в условиях пожара, а также других особых воздействий с точки зрения надежных подходов кратковременные нагрузки не учитываются, а учитывается только длительно действующие нагрузки.

Таким образом, при проектировании покрытий на территории Республики Беларусь в соответствии с положениями СНиП 2.01.07 [4, 7, 8] в расчетах по несущей способности вес снегового покрова без учета понижающих коэффициентов, вызванных ветровым сдуванием и сдвигом под действием силы тяжести, составит – минимум (максимум):

– до 2004 года – до $80 (160) \text{ кг/м}^2$ в плоской части кровель, а в «зоне снеговых мешков» $240 (480) \text{ кг/м}^2$ для покрытий с парапетами и $480 (960) \text{ кг/м}^2$ для навесов с перепадом высот относительно основного здания;

– с 2004 года и позднее – до $128 (192) \text{ кг/м}^2$ в плоской части, а в «зоне снеговых

мешков» 384 (576) кг/м² для покрытий с парапетами и 768 (1152) кг/м² для навесов с перепадом высот относительно основного здания.

В соответствии с положениями ТКП EN 1990, ТКП EN 1991-1-3 [5, 6], снеговые нагрузки следует классифицировать как переменные, стационарные воздействия. Предусматривается также рассмотрение снеговых нагрузок в качестве особой (чрезвычайной) расчетной ситуации, однако национальное приложение, действующее на территории Республики Беларусь, не допускает (не предполагает) учитывать такие ситуации: «На территории Республики Беларусь нет чрезвычайных снеговых заносов, подразумеваемых настоящим пунктом, поэтому настоящий пункт не применяется на территории Республики Беларусь».

В целом, подход по оценке снеговых нагрузок в соответствии с ТКП EN 1990, ТКП EN 1991-1-3 [5, 6] аналогичен СНиП 2.01.07 [4], однако имеет свои особенности. Так, например, учет длительности действия снеговой нагрузки производится в зависимости от вида расчетной ситуации и осуществляется посредством умножения нормативных значений на коэффициенты:

ψ_0 – коэффициент, учитывающий комбинационное значение временного воздействия (на территории Республики Беларусь принимается равным 0,6);

ψ_1 – коэффициент, учитывающий частоту повторения временного воздействия (на территории Республики Беларусь принимается равным 0,5);

ψ_2 – коэффициент, учитывающий практически постоянное значение временного воздействия (на территории Республики Беларусь принимается равным 0,0).

Учет коэффициентов ψ_i является основой надежностных подходов в «Еврокодах» и в некотором плане является более подробным, но статистически выверенным способом оценки длительности действия воздействий в ходе проектного срока эксплуатации. Важно также понимать, что согласно положениям ТКП EN 1990 [6] для снеговой нагрузки в обязательном порядке проверяется прочность конструкций в ведущем сочетании, т. е. без коэффициентов ψ_i .

В соответствии с Национальным приложением к ТКП EN 1991-1-3 [5] районирование территории Республики Беларусь по снеговой нагрузке принимается отличным от положений СНиП 2.01.07 [4, 7] (рисунок 2). При этом в соответствии с Изменением № 2 к ТКП EN 1991-1-3 [9] значения снеговой нагрузки следует уточнить по таблице НП.1.1 (ВУ) в зависимости от высоты местности над уровнем моря. Например, г. Минск находится в районе 2В с номинальным значением снеговой нагрузки 1,45 кПа, учитывая, что высота над уровнем моря г. Минска составляет в среднем 220 м, уточненная снеговая нагрузка составит 1,51 кПа. Уточненное значение снеговой нагрузки для более низких отметок может уменьшаться, при этом нижний предел ограничен значением 1,0 кПа.

Нормативное значение снеговой нагрузки на горизонтальную проекцию покрытия s в соответствии с положениями ТКП EN 1991-1-3 [5, 9] следует определять по формуле

$$s = \mu_i C_e C_t s_k, \quad (2)$$

где μ_i – коэффициент формы снеговых нагрузок; s_k – характеристическое (нормативное) значение снеговых нагрузок на грунт; C_e – коэффициент окружающей среды (принимается равным 0,8 для обдуваемых ветром кровель и 1,0 – для закрытых от ветра кровель); C_t – температурный коэффициент (принимается равным 0,8 для покрытий с повышенной теплопередачей, способствующей таянию снега (например, стеклянные покрытия), и равным 1,0 – для остальных кровель).

Коэффициент перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие μ_i может принимать различные значения в диапазоне от 0 до:

- 2,0 – для покрытий с парапетами;
- 2,9 – для покрытий зданий с перепадом высот.

Как и для СНиП 2.01.07 [4, 7], максимальные значения принимаются только в зоне «снеговых мешков», с последующим линейным снижением в сторону плоской части кровли с коэффициентом $\mu = 0,8$ (в СНиП 2.01.07 – к 1,0).

Коэффициент надежности по нагрузке γ_f для снеговой нагрузки в соответствии с положениями ТКП EN 1990 [6] принимается равным 1,5 – для расчетов по несущей способности (на прочность и устойчивость – первая группа предельных состояний), и 1,0 – для расчетов по эксплуатационной пригодности (по деформациям, на выносливость – вторая группа предельных состояний) и в условиях пожара, а также других особых воздействий. Для расчетов по эксплуатационной пригодности и в условиях пожара,

а также других особых воздействий с точки зрения надежных подходов учитываются только длительно действующие нагрузки посредством введения коэффициентов ψ_1 либо ψ_2 .

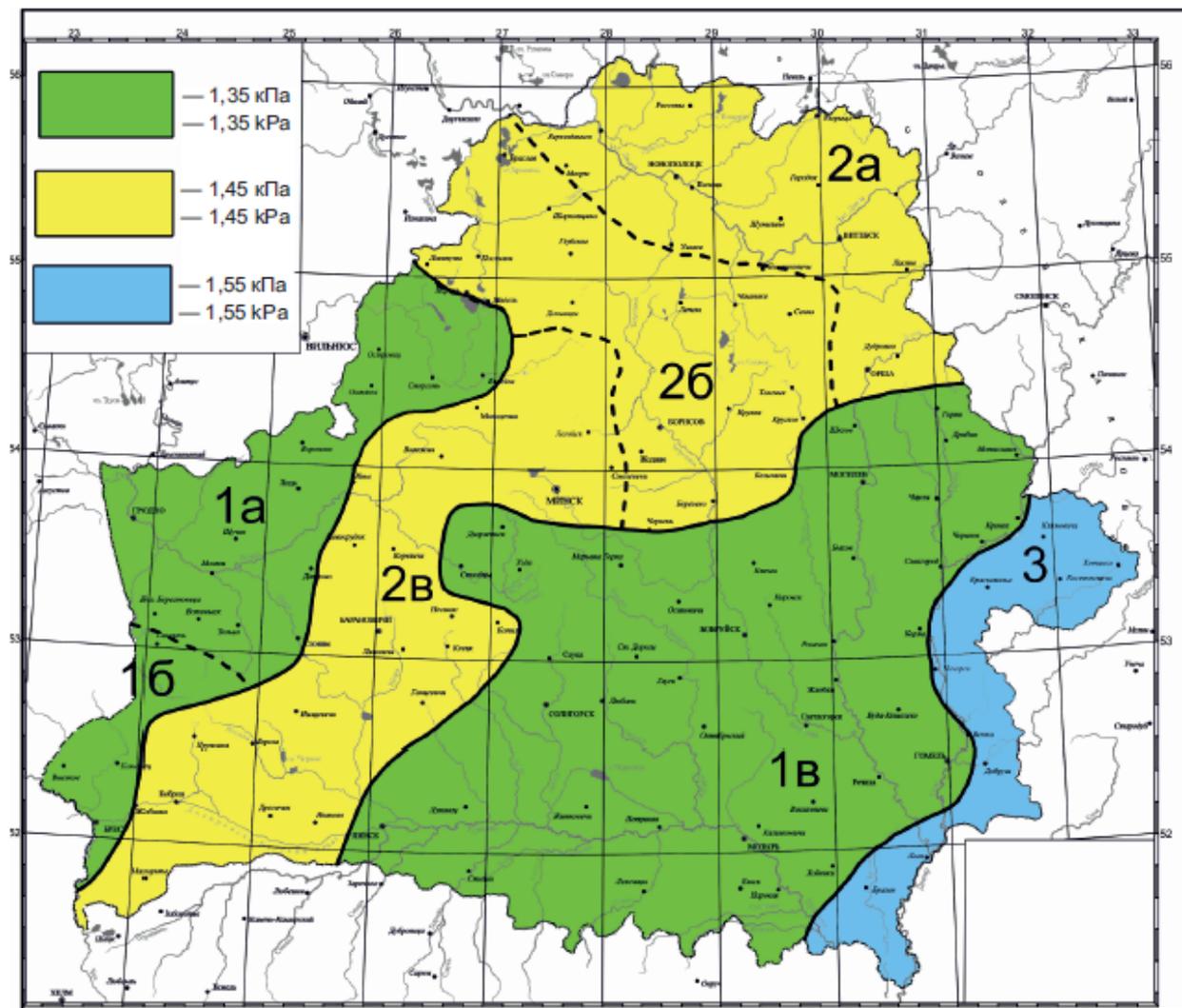


Рисунок 2. – Районирование территории Республики Беларусь по весу снегового покрова согласно Национальному Приложению к ТКП EN 1991-1-3 [5, 9]

Таким образом, при проектировании покрытий на территории Республики Беларусь в соответствии с положениями ТКП EN 1990, ТКП EN 1991-1-3 [5, 6, 9] в расчетах по несущей способности вес снегового покрова без учета понижающих коэффициентов, вызванных ветровым сдуванием и сдвигом под действием силы тяжести, составит – минимум (максимум): до 120 (255) кг/м² в плоской части кровель, а в «зоне снеговых мешков» 300 (640) кг/м² для покрытий с парапетами и 435 (926) кг/м² для покрытий зданий с перепадом высот (максимальное значение условно приведено для наивысшей точки Беларуси – гора Дзержинская, 345 м над уровнем моря).

Сопоставив предельные значения, полученные по ТКП EN 1991-1-3 [5, 9] и СНиП 2.01.07 [4, 7], можно сделать вывод о том, что при проектировании согласно положениям ТКП EN 1991-1-3 нагрузка принимает, как правило, большие значения в плоской части кровель и несколько меньшие значения для «зон снеговых мешков» (особенно для навесов).

Примечательным является факт, что достаточно подробные указания по определению снеговой нагрузки в соответствии со СНиП 2.01.07 [4, 7] не содержат никаких рекомендаций по эксплуатации кровель, а именно – какую предельную величину снегового покрова допускается сохранять без последующей уборки. В этом плане положения ТКП EN 1991-1-3 [5, 9] также не содержат конкретных рекомендаций по эксплуатации, но в Приложении Е приведены значения удельного веса снега (таблица 1).

Согласно требованиям технических нормативных правовых актов [10, 11] при эксплуатации зданий крыши должны очищаться от снега, не допускается образование снегового покрова толщиной более 30 см (при оттепелях, если наблюдается обледенение свесов и водоотводящих устройств, снег должен сбрасываться и при меньшей толщине снегового покрова). Это соответствует нагрузке в 60 кг/м^2 для осевшего снега (через несколько часов или суток после выпадения), либо 120 кг/м^2 для влажного снега. Очевидно, что несущая способность покрытий в большинстве случаев будет достаточной для восприятия указанной нагрузки и сам процесс уборки снега не будет представлять большой опасности. При этом необходимо с предельной осторожностью производить уборку влажного снега для старых зданий южных районов Республики Беларусь, т.к. несущей способности покрытия может быть недостаточно, тем более с учетом накопления усталостных повреждений в конструкциях и наличием дополнительной нагрузки от людей, убирающих снег. Следует также ограничивать локальное увеличение снеговой нагрузки при искусственном перемещении или перераспределении снега в процессе уборки. В случае отсутствия в штате организации, эксплуатирующей здание, соответствующих специалистов, реализация требований по контролю нормативных нагрузок на кровлю здания [10, 11] видится довольно проблематичной.

Таблица 1. – Удельный вес снега

Вид снега	Удельный вес, кН/м ³ *
Свежий	1,0
Осевший (через несколько часов или суток после выпадения)	2,0
Старый (через несколько недель после выпадения)	2,5 – 3,5
Влажный	4,0

Примечание: * – соответствует весу в кг 1 см слоя снега.

Надзорные органы МЧС и Минздрава Республики Беларусь осуществляют проверки соблюдения законодательства в части эксплуатации кровель, качество их очистки от снега и наледи. Результатом данной работы зачастую становится приостановка эксплуатации объектов. К примеру, в январе 2016 года после циклона «Даниэлла» в г. Минске была приостановлена работа 6 объектов.

Очевидно, что недостаточная прочность и жесткость конструкций не всегда может быть выявлена визуально. В этом плане поведение конструкций при повышенных нагрузках и предотвращение значительной части чрезвычайных ситуаций возможно путем контроля основных деформаций (прогибов, перемещений, в т.ч. вибрации) и их сопоставления с критическими величинами. Следует отметить, что это актуально для конструкций, не имеющих склонности к хрупкому (быстрому) разрушению. Учитывая, что нормальное проектирование конструкций не допускает возможности хрупкого разрушения, указанный подход является вполне оправданным.

Эксплуатационная пригодность конструкций определяется допустимыми критическими деформациями исходя из следующих предпосылок ТКП EN 1990 [6]:

- внешний вид строительного объекта;
- комфорт пользователя;
- функционирование конструкций (включая функционирование оборудования, инженерных сетей и обслуживающего персонала), или которые вызывают повреждения отделочных слоев или неконструктивных элементов.

Интересным является факт, что конкретные значения деформаций приведены только в «Еврокодах» по проектированию железобетонных конструкций ТКП EN 1992-1-1 [12] (1/250 расчетного пролета исходя из требований к внешнему виду, либо 1/500 расчетного пролета если могут быть повреждены смежные части конструкции) и деревянных конструкций ТКП EN 1995-1-1 [13] (1/250 расчетного пролета), в то время как ТКП EN 1993-1-1 [14], регламентирующем проектирование стальных конструкций предполагается определить указанные значения в Национальном приложении (хотя в Национальном приложении для Республики Беларусь не определены). Кроме того, в «Еврокодах» имеется ссылка на международный стандарт ISO 4356 [15], в котором изложены основные подходы к оценке критических деформаций, и критические значения для элементов покрытий предполагается выбирать в диапазоне от 1/250 до 1/125 пролета в общем случае, 1/300 пролета для обеспечения устойчивости либо исключения повреждений опорных участков, и 10–15 мм при наличии перегородок снизу.

Перечисленные предпосылки во многом перекликаются с требованиями СНиП 2.01.07 [16], в котором деформации классифицируют исходя из следующих причин:

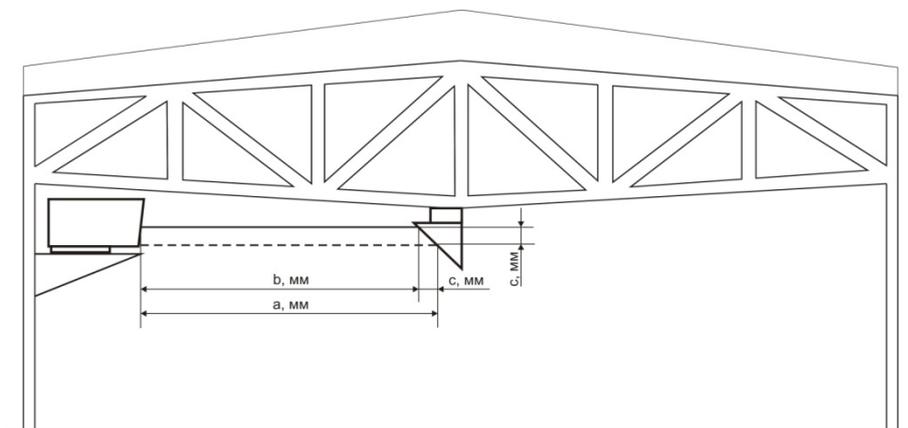
- технологических (обеспечение условий нормальной эксплуатации технологического и подъемно-транспортного оборудования, контрольно-измерительных приборов и т. д.);
- конструктивных (обеспечение целостности примыкающих друг к другу элементов конструкций и их стыков, обеспечение заданных уклонов);
- физиологических (предотвращение вредных воздействий и ощущений дискомфорта при колебаниях);
- эстетико-психологических (обеспечение благоприятных впечатлений от внешнего вида конструкций, предотвращение ощущения опасности).

Критические значения деформаций в СНиП 2.01.07 [16] для эстетико-психологических требований составляют от 1/300 до 1/120 расчетного значения пролета в зависимости от величины пролета (1/300 для пролета более 36 м), при наличии элементов, подверженных растрескиванию (стяжек, полов, перегородок), – 1/150 расчетного пролета. В соответствии с п. 6 Приложения 6 СНиП 2.01.07 [16] «Прогиб элементов покрытий и перекрытий, ограниченный исходя из конструктивных требований, не должен превышать расстояния (зазора) между нижней поверхностью этих элементов и верхом перегородок, витражей, оконных и дверных коробок, расположенных под несущими элементами».

Очевидно, что конкретное значение критической деформации должно быть определено индивидуально для каждой конструкции, исходя из технологических, конструктивных, физиологических, а возможно и эстетико-психологических особенностей.

В связи с тем, что основные деформации строительных конструкций находятся в диапазоне малых величин, исчисляемых долями и целыми миллиметрами, визуальный контроль либо мониторинг подручными средствами во многом является нецелесообразным. Наиболее целесообразным является применение стационарных автоматизированных систем мониторинга, позволяющих обеспечивать диагностику несущих конструкций в режиме реального времени [18, 19].

В настоящей статье рассмотрена система мониторинга Sense S-One, принцип действия которой основан на измерении расстояний лазерным дальномером (рисунок 3). Система мониторинга состоит из лазерного дальномера, мишени-отражателя и информационно-измерительного комплекса (персональный либо планшетный компьютер).



a – расстояние между дальномером и мишенью-отражателем при исходных условиях, мм;

b – расстояние между дальномером и мишенью-отражателем при нагрузке на кровлю, мм; *c* – прогиб, мм.

Рисунок 3. – Принцип действия системы мониторинга строительных конструкций

Датчик устанавливается на смежную несущую конструкцию (рисунок 4), мишень – в зоне контроля критических деформаций. Мишень-отражатель представляет собой металлическую треугольную прямую призму со специальным покрытием с боковыми гранями, расположенными под углом 45° к основанию (рисунок 5). Таким образом, при вертикальном перемещении мишени изменяется контролируемое прибором расстояние, что в свою очередь интерпретируется системой как деформация конструкции. Результирующее значение выдается исходя из статистической обработки 20 измерений.



Рисунок 4. – Внешний вид лазерного датчика



Рисунок 5. – Внешний вид мишени-отражателя

Основные технические характеристики системы мониторинга Sense S-One приведены в таблице 2. Имеется возможность мониторинга состояния строительной конструкции в нескольких режимах: «нормальный летний», «нормальный зимний», «буря», «сильный снегопад» и «уборка снега» – т. е. контролировать различные значения критических деформаций. Кроме того, в зависимости от текущего значения деформации (диапазон отклонения: 0–30 %, 30–50 %, 50–70 %, 70–100 % от проектного максимума) и режима отличается цикл опроса состояния конструкции – от 12 часов до 15 секунд (рисунок 6).

Таблица 2. – Основные технические характеристики системы

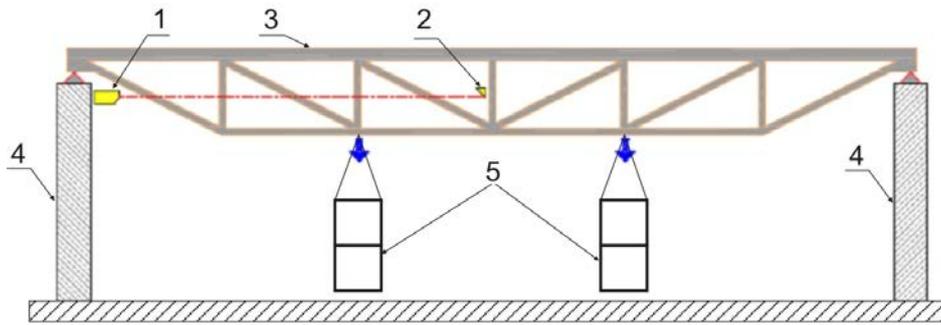
Параметры	Значение
Диапазон измерения, м	0,1 – 30,0
Погрешность измерения, мм	±2
Разрешающая способность, мм	0,1
Электропитание, В	10 – 30
Температура эксплуатации, °С	-40 – +50

Авторами статьи проведены экспериментальные исследования рассматриваемой системы мониторинга для строительной конструкции (фермы) в условиях, имитирующих снеговую нагрузку. Экспериментальные исследования проведены на полигоне оперативно-тактической подготовки филиала «Институт переподготовки и повышения квалификации» Университета гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь в д. Светлая Роща Борисовский район Минской области.

Методика проведения исследования и их результаты. Для проведения экспериментальных исследований был использован фрагмент здания без ограждающих конструкций, состоящий из шести железобетонных колонн, каждая высотой 8,5 м, и сечением 500×500 мм, соединенных поверху стропильными и подстропильными фермами типа «Молодечно» [19]. Железобетонные колонны совокупно с подстропильными фермами представляли собой три однопролетных плоских рамы (каждая пролетом 11,0 м), соединенные между собой четырьмя стропильными фермами. Ввиду отсутствия ограждающих конструкций (в том числе кровельного покрытия), действию нагрузки подвергали только одну крайнюю стропильную ферму, путем подвешивания пластиковых емкостей объемом 1 м³ с последующим постепенным заполнением водой.

Стальные стропильные фермы покрытия изготовлены с пролетом 22,0 м, с переменной высотой подъема между осями нижнего и верхнего пояса 1,3...1,6 м, с 16 раскосами, выполненными из профилей стальных гнутых замкнутых сварных квадратных по ГОСТ 30245 [20]. Верхний и нижний пояс ферм выполнен из профиля 120×5 марки стали С255 по ГОСТ 27772 [21], раскосы – из профиля 100×4 марки стали С255 (крайние два) и из профиля 80×3 марки стали С255 (средние 12), а также центральный дополнительный раскос из профиля 60×2 марки стали С255.

Принципиальная схема экспериментальных исследований представлена на рисунке 6, общий вид экспериментальных исследований – на рисунке 7.



1 – лазерный дальномер; 2 – мишень-отражатель; 3 – ферма; 4 – колонна; 5 – груз (емкости)

Рисунок 6. – Принципиальная схема экспериментальных исследований (ферма показана условно)

В качестве дополнительного средства измерения деформаций использовали тахеометр SOKKIA CX-105 (с точностью измерения 0,001 м и дальностью 1,3–5000 м), а также был произведен поверочный расчет в некоммерческой версии ЛИРА-САПР 2013 R5.

Для проведения измерений деформаций на примыкающей железобетонной колонне был неподвижно закреплен кронштейн, на котором установлен лазерный дальномер, GSM-модем и свитч. Мишени-отражатели для исследуемой системы и для тахеометра были неподвижно закреплены на кронштейне в среднем сечении фермы (см. рисунок 5).

Нагрузка размещалась симметрично от центра и последовательно увеличивалась заливом в емкости воды от 0 до 2000 кг с шагом 200 кг на каждое плечо. Измерения прогиба фермы проводилось относительно колонны – с помощью лазерного дальномера Sense S-One, и относительно земли – с помощью тахеометра SOKKIA CX-105. Показания приборов фиксировались синхронно при увеличении нагрузки на каждый шаг, т. е. на каждые 400 кг.

Для расчета фермы была построена ее конечно-элементная модель. Граничные условия на опорах были приняты шарнирными. Собственный вес фермы не учитывался, т.к. экспериментальные исследования проводились без учета исходного прогиба от собственного веса. Результаты расчета для максимальной нагрузки приведены на рисунке 8.



Рисунок 7. – Внешний вид экспериментальной установки

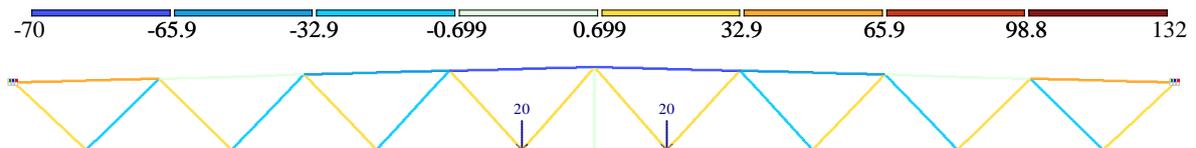


Рисунок 8. – Расчетные напряжения в элементах фермы

Видно, что напряжения сжатия в верхнем поясе фермы не превышают 70 кН, напряжения растяжения в нижнем поясе – 132 кН. Расчеты показали:

– напряжения сжатия 70 кН соответствуют для профиля 120×5 марки стали С255 длиной 2,75 м 24 % от полной несущей способности (с учетом возможной потери устойчивости стержня – 287 кН);

– напряжения растяжения 132 кН соответствуют для профиля 120×5 марки стали С255 30 % от полной несущей способности (437 кН);

– напряжения сжатия 30 кН соответствуют для профиля 100×4 марки стали С255 длиной 1,94 м 14 % от полной несущей способности (с учетом возможной потери устойчивости стержня – 207 кН);

– напряжения растяжения 31 кН соответствуют для профиля 100×4 марки стали С255 11 % от полной несущей способности (293 кН);

– напряжения сжатия 27 кН соответствуют для профиля 80×3 марки стали С255 длиной 2,00 м 25 % от полной несущей способности (с учетом возможной потери устойчивости стержня – 111 кН);

– напряжения растяжения 28 кН соответствуют для профиля 80×3 марки стали С255 16 % от полной несущей способности (176 кН);

– напряжения растяжения 0,3 кН соответствуют для профиля 60×2 марки стали С255 0,3 % от полной несущей способности (89 кН).

В таблице 4 приведены средние значения показаний лазерного дальномера, полученные по трем измерениям прогиба фермы, в сопоставлении с расчетными значениями деформаций. Значения показаний системы мониторинга на основе лазерного дальномера соответствовали показаниям более точного измерительного прибора – тахеометра. Следует учесть, что погрешность системы мониторинга на основе лазерного дальномера не позволяет оценивать результаты со значением (либо шагом) менее 2,0 мм.

Таблица 4. – Результаты измерений прогиба фермы

№ шага	Нагрузка, кг	Показания тахеометра SOKKIA CX-105, мм	Показания системы мониторинга Sense S-One, мм	Расчетный прогиб, мм
1	400	1	1	1,4
2	800	2	1,8	2,9
3	1200	3	3	4,3
4	1600	4	4	5,8
5	2000	5	5	7,2
6	2400	6	5,5	8,6
7	2800	7	6,8	10,1
8	3200	8	7,8	11,5
9	3600	9	8,5	13,0
10	4000	10	10	14,4

Также следует отметить, что расчетный прогиб в сопоставлении с экспериментальным во всех случаях был выше на 44 %, что свидетельствует о корреляции результатов расчета с экспериментом. Более высокие расчетные значения прогиба допустимы, т.к. они получены для идеализированных условий шарнирного опирания и дают запас в зону безопасности. Результаты обратного расчета стропильной фермы показали, что аналогичный прогиб (с меньшими напряжениями) достигается для равномерно распределенной линейной нагрузки сверху фермы 2,94 кН/м, что соответствует равномерно распределенной нагрузке от покрытия (при шаге ферм 4,0 м) 73,5 кг/м².

Заключение. Проведенные исследования показали, что снеговая нагрузка на кровле является одной из причин возникновения чрезвычайных ситуаций, связанных с обрушениями конструкций. Среди наиболее вероятных нужно выделить следующие причины обрушений:

– некорректный учет возможной нагрузки (воздействий) при расчете и проектировании конструктивных элементов, которые будут действовать в течение проектного срока эксплуатации;

– ошибки при расчете, проектировании и возведении конструктивных элементов, в том числе при назначении надежностных параметров, рассчитанных на проектный срок эксплуатации;

– внесение изменений либо повреждение конструкций запроектными воздействиями

в ходе эксплуатации либо ремонтных работ, в том числе при искусственном перемещении или перераспределении снега в ходе уборки;

– нарушение проектного срока эксплуатации, сроков ремонта конструкций, а также эксплуатационных требований, в том числе своевременной уборки снега с кровли;

– некорректный учет нагрузки (воздействий) в технических нормативных правовых актов (далее – ТНПА), вызванный либо изменением климатических условий в ходе проектного срока эксплуатации, либо изменением надежностных параметров, определяемых как способами проектирования, так и требованиями к эксплуатации и ремонту конструкций.

В Республике Беларусь нормативные значения снеговой нагрузки определяют в соответствии с положениями двух независимых документов – либо СНиП 2.01.07, либо ТКП EN 1991-1-3 (совместно с ТКП EN 1990 и прочими взаимосвязанными документами). Сопоставив предельные значения, полученные по ТКП EN 1991-1-3 и СНиП 2.01.07, можно сделать вывод о том, что при проектировании согласно положений ТКП EN 1991-1-3 нагрузка принимает, как правило, большие значения в плоской части кровель и несколько меньшие значения для «зон снеговых мешков» (в особенности для навесов).

Необходимо с предельной осторожностью производить уборку влажного снега для старых зданий южных районов Республики Беларусь, т.к. несущей способности покрытия может быть недостаточно, тем более с учетом накопления усталостных повреждений в конструкциях и наличием дополнительной нагрузки от людей, убирающих снег. Следует также ограничивать локальное увеличение снеговой нагрузки при искусственном перемещении или перераспределении снега в процессе уборки.

Недостаточная прочность и жесткость конструкций не всегда может быть выявлена визуально. В этом плане поведение конструкций при повышенных нагрузках и предотвращение значительной части чрезвычайных ситуаций возможно путем контроля основных деформаций (прогибов, перемещений, в т.ч. вибрации) и их сопоставления с критическими величинами. В связи с тем, что основные деформации строительных конструкций находятся в диапазоне малых величин, исчисляемых долями и целыми миллиметрами, визуальный контроль либо мониторинг подручными средствами во многом является нецелесообразным. Наиболее целесообразным является применение стационарных автоматизированных систем мониторинга, позволяющих обеспечивать диагностику несущих конструкций в режиме реального времени.

Авторами статьи проведены экспериментальные исследования системы мониторинга на основе лазерного дальномера Sense S-One для строительной конструкции (фермы) в условиях, имитирующих снеговую нагрузку. В качестве поверочного средства измерения деформаций использовали тахеометр SOKKIA CX-105 (с точностью измерения 0,001 м и дальностью 1,3–5000 м), а также был произведен поверочный расчет в некоммерческой версии ЛИРА-САПР 2013 R5.

Значения показаний системы мониторинга на основе лазерного дальномера соответствовали показаниям более точного измерительного прибора – тахеометра. Погрешность системы мониторинга на основе лазерного дальномера не позволяет оценивать результаты со значением (либо шагом) менее 2,0 мм. Расчетный прогиб в сопоставлении с экспериментальным во всех случаях был выше на 44 %, что свидетельствует о корреляции результатов расчета с экспериментом. Более высокие расчетные значения прогиба допустимы, т.к. они получены для идеализированных условий шарнирного опирания и дают запас в зону безопасности. Результаты обратного расчета стропильной фермы показали, что аналогичный прогиб (с меньшими напряжениями) достигается для равномерно распределенной линейной нагрузки сверху фермы 2,94 кН/м, что соответствует равномерно распределенной нагрузке от покрытия (при шаге ферм 4,0 м) 73,5 кг/м².

ЛИТЕРАТУРА

1. Джамбулатов, Р.Г. Анализ причин обрушения покрытий общественных зданий / Р.Г. Джамбулатов // Молодой ученый. – 2015. – № 10. – С. 197–200.
2. Biegus, A. Collapse of Katowice fair building / A.Biegus, K.Rykaluk // Engineering Failure Analysis. – 2013. – № 16 (5). – P. 1643–1654.
3. Holicky, M. Failures of roofs under snow load: Causes and reliability analysis. / M. Holicky, M. Sykora // In Proc. Fifth Congress on Forensic Engineering. – 2009. – P. 11–14.
4. Строительные нормы и правила. Нагрузки и воздействия: СНиП 2.01.07-85. – Введ. 01.01.1987. – М.: Госстрой СССР, 1987. – 46 с.

5. Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Часть 1-3. Общие воздействия. Снеговые нагрузки: ТКП EN 1991-1-3-2009 (02250). – Введ. 01.01.2010. – Минск: Минстройархитектуры, 2009. – 48 с.
6. Еврокод. Основы проектирования строительных конструкций (EN 1990:2002, IDT): ТКП EN 1990-2011* (02250). – Введ. 01.07.2012. – Переизд. с Изменением № 1 (введ. 01.04.2015). – Минск: Минстройархитектуры, 2015. – 94 с.
7. Строительные нормы и правила. Нагрузки и воздействия: Изменение № 1 к СНиП 2.01.07-85. – Введ. 01.07.2004. – Минск: Минстройархитектуры, 2004. – 5 с.
8. Карты районирования территории СССР по климатическим характеристикам: Приложение 5 к СНиП 2.01.07-85. – Введ. 01.01.1987 – М.: Госстрой СССР, 1987. – 9 л.
9. Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Часть 1–3. Общие воздействия. Снеговые нагрузки: Изменение № 2 к ТКП EN 1991-1-3-2009 (02250). – Введ. 01.07.2015. – Минск: Минстройархитектуры, 2015. – 9 с.
10. Техническая эксплуатация производственных зданий и сооружений. Порядок проведения: ТКП 45-1.04-78-2007 (02250). – Введ. 01.04.2008. – Минск: Минстройархитектуры, 2008. – 56 с.
11. Техническая эксплуатация жилых и общественных зданий и сооружений. Порядок проведения: ТКП 45-1.04-14-2005 (02250). – Введ. 01.07.2006. – Минск: Минстройархитектуры, 2006. – 44 с.
12. Еврокод 2. Проектирование железобетонных конструкций. Часть 1–1. Общие правила и правила для зданий (EN 1992-1-1:2004+AC:2010, IDT): ТКП EN 1992-1-1-2009* (02250). – Введ. 01.01.2010. – Переизд. с Изменением № 1 (введ. 01.04.2015). – Минск: Минстройархитектуры, 2015. – 219 с.
13. Еврокод 5. Проектирование деревянных конструкций. Часть 1–1. Общие правила и правила для зданий (EN 1995-1-1:2004+AC:2006+A1:2008, IDT): ТКП EN 1995-1-1-2009* (02250). – Введ. 01.01.2010. – Переизд. с Изменением № 1 (введ. 01.09.2014). – Минск: Минстройархитектуры, 2014. – 106 с.
14. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий (EN 1993-1-1:2005+AC:2009, IDT): ТКП EN 1993-1-1-2009* (02250). – Введ. 01.01.2010. – Переизд. с Изменением № 1 (введ. 01.09.2014). – Минск: Минстройархитектуры, 2014. – 96 с.
15. Bases for the design of structures – Deformations of buildings at the serviceability limit states: ISO 4356:1977. – Publication date: 1977-11. – Geneva: ISO, 1977. – 18 p.
16. Нагрузки и воздействия (Дополнения. Раздел 10. Прогобы и перемещения): СНиП 2.01.07-85. – Введ. 01.01.1987 – М.: ЦИТП Госстрой СССР, 1988. – 8 с.
17. Martins, N. Dynamic monitoring of a stadium suspension roof: Wind and temperature influence on modal parameters and structural response / N. Martins, E. Caetano, S. Diord, F. Magalhães, A. Cunha // Engineering Structures. – 2014. – № 59. – P. 80–94.
18. Крытый стадион ОАО «Спорткомплекс Олимпийский» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.inkommet.ru/drupal/olimp>. – Дата доступа: 10.11.2017.
19. Типовая документация на конструкции, изделия и узлы зданий и сооружений. 1.460.3-14. Стальные конструкции покрытий производственных зданий пролетами 18, 24 и 30 м с применением замкнутых гнутосварных профилей прямоугольного сечения типа «Молодечно». Чертежи КМ. – Введ. 01.06.1982. – Л.: Госстрой СССР ГПИ Ленстройпроектстальконструкция, 1982. – 135 л.
20. Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные для строительных конструкций: ГОСТ 30245-2003 Межгосударственный стандарт. – Введ. 01.10.2003 г. – М.: Межгос. научн.-техн. комиссия по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве, 2001. – 8 с.
21. ГОСТ 27772-88. Государственный стандарт. Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия. – Введ. 01.01.89. – Минск: Изд-во стандартов, 1990. – 28 с.

SNOW LOAD EMERGENCY SITUATIONS PREVENTION WITH THE MONITORING SYSTEM EQUIPMENT FOR STEEL HORIZONTAL STRUCTURES

Valeriy Rudolf

Andrey Kaminskiy

Alexander Kondratovich, PhD in Technical Sciences, Associate Professor

Andrey Surikov

Branch «Institute for retraining and professional development»
of the state educational establishment «University of Civil Protection
of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus», Svetlaya Rocsha, Belarus

Vadim Kudryashov, PhD in Technical Sciences, Associate Professor

The state educational establishment «University of Civil Protection
of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus», Minsk, Belarus

Purpose. The article is devoted to snow load emergency situations prevention using the laser rangefinder monitoring system equipment for steel horizontal structures.

Methods. Experimental and theoretical studies on the steel roof truss deflections under snow load using the monitoring system equipment.

Findings. It was found that the steel roof truss deflections under snow load, obtained with the laser rangefinder monitoring system equipment Sense S-One, correspond to the data of a more accurate measuring instrument – a TST (total station theodolite), and conform satisfactorily with the calculation results.

Conclusions. The values of the laser rangefinder monitoring system data correspond to the data of a more accurate measuring instrument – a TST (total station theodolite). It might be mentioned that the error of the laser rangefinder monitoring system does not allow to evaluate the results with a value (or step) less than 2.0 mm. The calculated deflection in comparison with the experimental data was constantly 44 % higher, which indicates a correlation between the calculation results and experiment. Higher calculated values of deflection are acceptable, because they are obtained for idealized hinge support conditions and give a safety margin.

Keywords: emergencies, roofing, roof covering, failure, snow load, actions, deformations, monitoring system, experimental studies.

(The date of submitting: December 22, 2017)

REFERENCES

1. Dzhambulatov R.G. Analiz prichin obrusheniya pokrytiy obshchestvennykh zdaniy [Analysis of the causes of collapse of public building coverings]. *Molodoy uchenyy*, 2015. No. 10. Pp. 197-200. (rus)
2. Biegus A., Rykaluk K. Collapse of Katowice fair building. *Engineering Failure Analysis*. 2013. No. 16 (5). Pp. 1643–1654.
3. Holicky M., Sykora M. Failures of roofs under snow load: Causes and reliability analysis. *In Proc. Fifth Congress on Forensic Engineering*. 2009. Pp. 11–14.
4. *Stroitel'nye normy i pravila. Nagruzki i vozdeystviya* [Building regulations. Loads and impacts]: SNiP 2.01.07-85. Implemented on 01/01/1987. Moscow: USSR State Construction Committee. 1987. 46 p. (rus)
5. *Eurocode 1. Impact on the structure. Part 1-3. General effects. Snow loads*: Technical Code of Good Practice EN 1991-1-3-2009 (02250). Implemented on 01/01/2010. Minsk: Ministry of Architecture. 2009. 48 p.
6. *Eurocode. Fundamentals of structural design (EN 1990: 2002, IDT)*: Technical Code of Good Practice EN 1990-2011* (02250). Implemented on 01/07/2012. Re-issue with Amendment No. 1 (Implemented on 04/01/2015). Minsk: Ministry of Architecture. 2015. 94 p.
7. *Building regulations. Loads and impacts*: Ammendment No. 1 to SNIP 2.01.07-85. Implemented on 01/07/2004. Minsk: Ministry of Architecture. 2004. 5 p.
8. *Maps of the regionalization of the territory of the USSR on climatic characteristics*: Appendix 5 to SNIP 2.01.07-85. Implemented on 01/01/1987. Moscow: Gosstroy USSR. 1987. 9 p.
9. *Eurocode 1. Impact on the structure. Part 1–3. General effects. Snow loads*: Amendment No. 2 to the Technical Code of Good Practice EN 1991-1-3-2009 (02250). Implemented on 07/01/2015. Minsk: Ministry of Architecture. 2015. 9 p.

10. *Technical operation of industrial buildings and structures. Order of conduct*: Technical Code of Good Practice 45-1.04-78-2007 (02250). Implemented on 01/04/2008. Minsk: Ministry of Architecture. 2008. 56 p.
11. *Technical operation of residential and public buildings and structures. Order of conduct*: Technical Code of Good Practice 45-1.04-14-2005 (02250). Implemented on 01/07/2006. Minsk: Ministry of Architecture. 2006. 44 p.
12. *Eurocode 2. Design of reinforced concrete structures. Part 1-1. General rules and rules for buildings (EN 1992-1-1: 2004 + AC: 2010, IDT)*: Technical Code of Good Practice EN 1992-1-1-2009* (02250). Implemented on 01/01/2010. Re-issue with Amendment No. 1 (Implemented on 04/01/2015). Minsk: Ministry of Architecture. 2015. 219 p.
13. *Eurocode 5. Design of wooden structures. Part 1-1. General rules and rules for buildings (EN 1995-1-1: 2004 + AC: 2006 + A1: 2008, IDT)*: Technical Code of Good Practice EN 1995-1-1-2009* (02250). Implemented on 01/01/2010. Re-issue with Amendment No. 1 (Implemented on 01/09/2014). – Minsk: Ministry of Architecture. 2014. 106 p.
14. *Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-1. General rules and rules for buildings (EN 1993-1-1: 2005 + AC: 2009, IDT)*: Technical Code of Good Practice EN 1993-1-1-2009* (02250). Implemented on 01/01/2010. – Re-issue with Amendment No. 1 (Implemented on 01/09/2014). Minsk: Ministry of Architecture. 2014. 96 p.
15. *Bases for the design of structures*: ISO 4356 : 1977. Publication date: 1977-11. Geneva: ISO. 1977. 18 p.
16. *Loads and effects (Additions, Section 10. Deflections and Displacements)*: SNiP 2.01.07-85. Implemented on 01/01/1987. Moscow: TsITP Gosstroy USSR, 1988. 8 p.
17. Martins N., Caetano E., Diord S. Dynamic monitoring of a stadium suspension roof: Wind and temperature influence on modal parameters and structural response. *Engineering Structures*. 2014. No. 59. Pp. 80–94.
18. *The indoor stadium of JSC «Sports Complex Olympic»*, available at: <http://www.inkommet.ru/drupal/olimp> (accessed: November 10, 2017). (rus)
19. *Typical documentation for structures, products and units of buildings and structures. 1.460.3-14. Steel structures of coatings of industrial buildings with spans of 18, 24 and 30 m with the use of closed bent welded profiles of rectangular cross section of the «Molodechno» type. Drawings of CM*. Implemented on 06/01/1982. Leningrad: Gosstroy USSR GPI Lestroiproektstalkonstruksiya. 1982. 135 p.
20. *Profiles steel curved closed welded square and rectangular for building constructions*: GOST 30245-2003. Interstate Standard. Implemented on 01/10/2003. Moscow: Interstate Scientific and Technical Commission for Standardization, Technical Regulation and Certification in Construction. 2001. 8 p.
21. *Rolled steel for construction steel structures. General specifications*: GOST 27772-88. State standard. Implemented on 01/01/1969. Minsk: Publishing house of standards. 1990. 28 p.