

прикладывалась нагрузка. Увеличение прогибов на начальных этапах нагружения непропорционально увеличению нагрузки. Однако при значении узловой нагрузки  $P = (0,25 - 0,35) \cdot P_{пред}$  устанавливается линейная зависимость, которая сохраняется вплоть до потери устойчивости наиболее нагруженным стержнем.

Проблема превышения экспериментальных прогибов над теоретическими исследовалась в работе [3] и связывалась с узловой податливостью. Ранее было решено принимать податливость как возможные деформации, обусловленные начальной работой узлового элемента, либо его работой под нагрузкой. В данном случае деформациями, вызванными работой узла под нагрузкой, можно пренебречь. Это объясняется тем, что максимальное усилие, прикладываемое к узлам, для которых измеряются вертикальные перемещения, не превышает 80кН. В то же время в [3] установлено, что для узлового элемента с толщиной стенки сферы равной 16мм максимальная величина упругих деформаций составляет: при растяжении не более 1,81мм, при сжатии – 2,1 мм, при уровне нагрузки 550 кН. Таким образом, при усилии  $N = +80кН$  упругие деформации сферы составят не более 0,27мм.

Наступление предельного состояния в испытаниях первой группы определялось потерей устойчивости сжатого опорного раскоса, в испытаниях второй группы – потерей устойчивости сжатого стержня верхней поясной сетки. При достижении усилием своего критического значения стержень начинал выгибаться без приращения нагрузки. Давление в домкратах при этом снижалось на 5-10%. В результате потери устойчивости одного из элементов фрагмента происходило перераспределение усилий. При этом потери устойчивости других сжатых элементов, значительных нарушений геометрии пирамид, поворота узлов, изогнутости стержневых элементов и болтов не наблюдалось.

#### Выводы

1. Характер напряженно-деформированного состояния опытного фрагмента структуры системы «БрГТУ» соответствует результатам, полученным для его расчетной схемы, моделирующей шарнирное сопряжение стержней в узлах. Предельное состояние фрагмента структуры системы «БрГТУ» наступает в результате потери устойчивости одного из наиболее нагруженных стержневых элементов. Во всех испытаниях потеря устойчивости стержня происходила при усилии, соответствующем усилию, рассчи-

танному по формуле Эйлера для стержня с шарнирно закрепленными концами. При этом во всех случаях наблюдалось некоторое превышение на 8-32% экспериментального значения  $N_{пред}^{экс}$  по сравнению с критической силой Эйлера  $N_{кр}$ . При

- расчете длина стержня принималась равной расстоянию между центрами узлов структуры. Таким образом, вполне обоснованным становится утверждение о работе стержней в составе конструкций системы «БрГТУ» только на растяжение-сжатие.
2. Измеренные вертикальные перемещения нижних узлов структуры превышают расчетные в 1,13-1,4 раза. Таким образом, узловая податливость в большей степени влияет на деформативность структуры системы «БрГТУ» и в меньшей степени на распределение усилий в элементах.
  3. Определение внутренних усилий необходимо производить по расчетной схеме с шарнирным сопряжением стержней в узлах. Возможным вариантом учета узловой податливости структур системы «БрГТУ», при проверке конструкций по второй группе предельных состояний, является увеличение прогибов, полученных для модели с шарнирными узлами, в 1,4 раза.
  4. При выполнении проверки на устойчивость сжатых стержневых элементов структур системы «БрГТУ» коэффициент расчетной длины необходимо принимать равным  $\mu = 1$ . При этом длина стержня принимается равной расстоянию между центрами узлов.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Узел соединения полых стержней пространственного каркаса: пат. 2489 Респ. Беларусь / Драган В.И., Левчук А.А., Шалобыта Н.Н., Пчѐлин В.Н.; заявитель Брестский гос. тех. ун-т.– опубл. 28.02.06 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці.– 2006.–№ 1.
2. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81\* "Стальные конструкции") // ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. –148 с.
3. Провести теоретические и экспериментальные исследования работы стальных конструкций покрытия летнего амфитеатра в г. Витебске: отчет о НИР (II этап) / Брестский государственный технический университет; рук. темы В.И.Драган. – Брест, 2007. – 189 с.– № ГР 2007457.

Материал поступил в редакцию 10.01.08

#### DRAGAN V.I., LUISTIBER V.V. Peculiarities of the work of the structural metal constructions of BrSTU system

The junction of the BrSTU system has an original constructive solution and has a number of advantages in comparison with the junctions of the known metal spatial constructions. Despite the conducted real experiences of the roofing of the erected objects, numerous experimental and theoretical researches of the deflected mode of separates elements and the whole fragments of the structures of the BrSTU system, there is a number of questions, which demand a more precise and deeper analysis and the necessity of the acknowledgement of the authenticity of the accepted assumptions. The most actual issues are the following: a calculated model of s structural construction, calculated lengths of the rods, the influence of the ductility of the junction on the deflected mode of the construction, the definition of the character of the limiting state of the structure.

The experimental research includes seven separate tests of the fragment of the BrSTU system. The confrontation of the experimental and theoretical values shows quite a high degree of the correspondence of the received results, and their analysis confirms the authenticity of the assumptions accepted for the calculation of the structures of BrSTU system.

УДК 624.014.27(476.7)

Драган В.И., Шурин А.Б.

## ВЛИЯНИЕ ПОДАТЛИВОСТИ УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ КОМБИНИРОВАННОГО СТРУКТУРНОГО ПОКРЫТИЯ КОМПЛЕКСА «ВИКТОРИЯ» НА ЕЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ

**Введение.** Комбинированное структурное покрытие универсального спортивного комплекса «Виктория» разработано на кафедре строительных конструкций УО БрГТУ в 2004 году и представляет собой квадратную в плане структурную плиту, состоящую из двух складок 66 х 66 х 93 м, соединенных в коньке и создающих два ската с уклонами в 15°.

В средней части структурная плита поддерживается двумя металллическими арками пролетом 80,62 м. По контуру она опирается на четыре диафрагмы жесткости и сталежелезобетонные колонны, установленные с шагом 6м. Конструкция покрытия более подробно описана в [1, 2].

Шурин Андрей Брониславович, старший преподаватель кафедры строительных конструкций Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

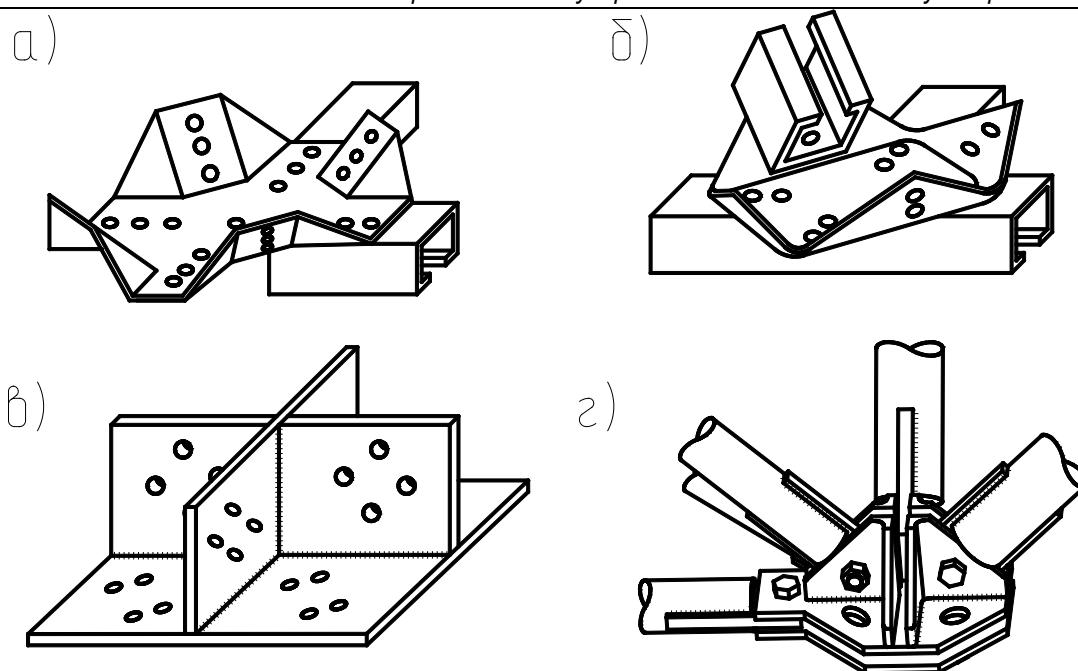


Рис. 1. Узловые соединения, воспринимающие усилия за счет среза и смятия болтового соединения а) «Юнистрат»; б) «КИСИ»; в) на пространственной листовой фасонке; г) «Брестпроект».

В структурной плите покрытия применен узловой элемент типа «Брестпроект» (рис. 1г). Данный узловой элемент относится к группе элементов, в которых усилия воспринимаются болтовыми соединениями, работающими на срез и смятие (рис. 1). Структурные конструкции с такими соединениями легко собираются и имеют менее жесткие допуски на изготовление.

Общим недостатком таких узлов является податливость соединения, возникающая из-за разности диаметра отверстия в фасонке и диаметра болта, в результате в конструкции появляются дополнительные прогибы. Часть стержней структурной конструкции вступает в работу только после выбора зазоров в соединении. Все это приводит к перераспределению усилий, и действительная картина становится отличной от ожидаемой.

Влияние податливости узловых соединений на работу структурных конструкций исследовалось Ефимовым О.И., Трофимовым В.И. [3], Зуевой И.И. [3], Клячиным А.З., Агафонкиным В.С.

В соответствии с рекомендациями [4], при определении прогиба структурных конструкций с податливыми узлами, слагаемые в формуле Мора, учитывающие деформации решетки, рекомендуется определять следующим образом

$$\Delta_{id} = \sum \frac{\bar{N}_i N_d I_d}{EA} + 2\Delta, \quad (1)$$

где  $\Delta$  – величина зазора между отверстием и болтом.

Трофимов В.И. в работе [3] моделировал податливость при теоретических расчетах изменением фактической площади сечения  $F$ , определяемой по формуле:

$$F' = \left( \frac{1}{F} + \Delta I_{H.Y.} \frac{E}{N} \right)^{-1}, \quad (2)$$

где  $\Delta I_{H.Y.}$ ,  $I$  и  $N$  – соответственно заданная податливость болтового соединения, длина стержня, действующее в нем усилие. Расчет показал, что податливость одних элементов приводит только к увеличению прогибов и не вызывает перераспределения усилий, других – к перераспределению усилий за счет высокой внутренней статической неопределимости.

Анализ проведенных авторами исследований показал, что все они были проведены на моделях или фрагментах структурных конструкций с величиной зазора между диаметром отверстия и болта 1,5 мм. На комбинированных натуральных конструкциях покрытий такие исследования не проводились.

**Методика исследования и анализ.** Узловой элемент типа «Брестпроект», примененный в конструкции покрытия, законструирован по принципу двухсрезного болтового соединения и состоит из четырех уголков, приваренных к плите (рисунок 1г). Из условия сборки, расстояние между уголками на 0,5 мм больше толщины фасонки раскоса. Соединение стержней поясов обеспечивается применением узловых накладок с отверстиями. Несущая способность узла определяется по прочности на срез болтов или на смятие болтовых соединений узлов. Сварные соединения узлов при этом всегда имеют значительный запас прочности. Несущая способность большинства узлов обеспечивается применением одного болта класса прочности 8.8 диаметром 24 мм, при применении для деталей узла стали С345 по ГОСТ 27772-88. Наиболее нагруженные узлы структуры в зоне диафрагм жесткости законструированы с двумя болтами класса прочности 8.8 диаметром 30 мм.

В данном болтовом соединении, кроме смещений, определенных разностью диаметра отверстия и диаметра болта  $\Delta$  (смещение 1 рода), наблюдается смятие по контуру загружаемых отверстий, удлинение соединяемых элементов на участке между болтами и вблизи ослабленного сечения, изгиб болтов (т.к. соединение двухсрезное), деформации среза болтов (смещения 2 рода). С целью уменьшения деформативности структурного покрытия, зазор между диаметром болта и диаметром отверстия  $\Delta$  в узловом соединении был принят равным 1 мм, что соответствует классу точности В [2].

Для определения влияния податливости был разработан ряд конечно-элементных моделей. Статический расчет комбинированной конструкции покрытия выполнялся с помощью программного комплекса «Lira 9.2» с использованием стержневых конечных элементов.

Конечно-элементные модели первого этапа расчетов использовались для проработки конструктивного решения комбинированного покрытия (рис. 2). Стержневые элементы описывались отдельными стержнями. При этом, кривизна названных элементов на участках между узлами не учитывалась.

В первой модели для описания стержневых элементов арок и структурной конструкции использовались универсальные пространственные стержневые конечные элементы (КЭ 10). Диафрагмы жесткости описывались универсальным четырехугольным конечным элементом оболочки (КЭ 44). Узлы опирания структуры на затяжки арок, заданы конечным элементом, моделирующим упругую связь между узлами (КЭ 55), в которых допускаются повороты.

Вторая модель получена из первой путем введения угловых шарниров в стержневых элементах структурной конструкции.

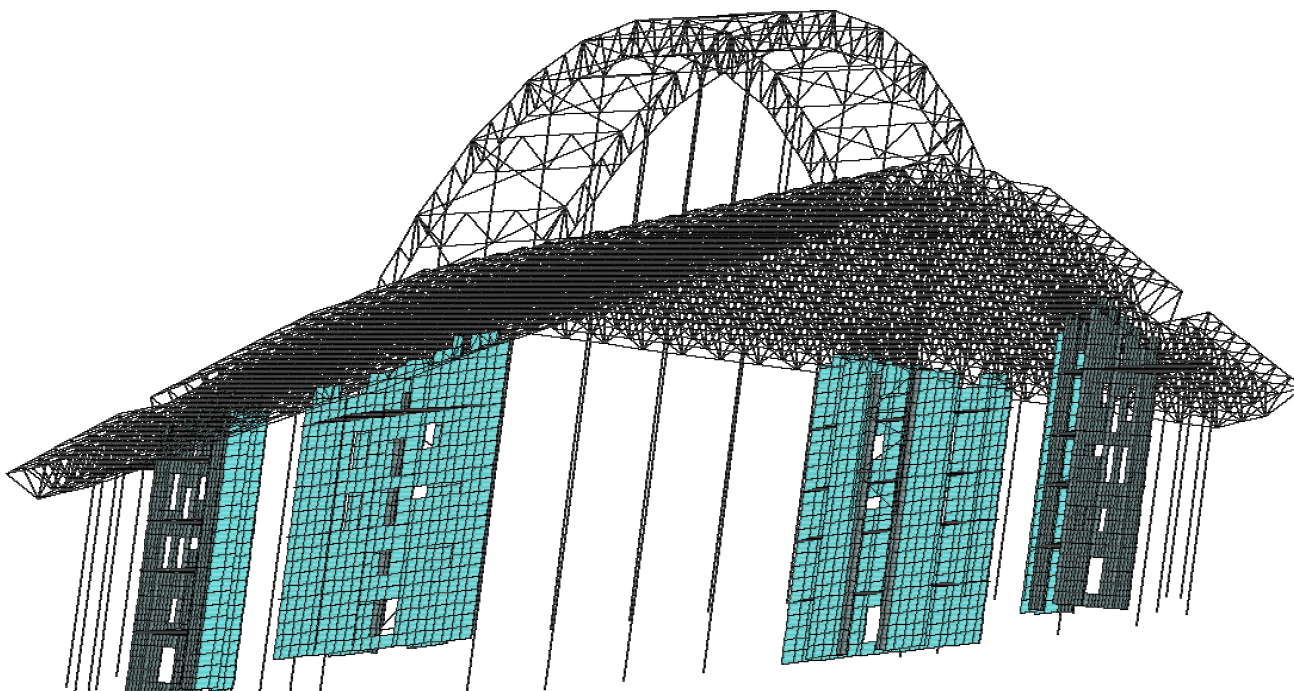


Рис. 2. Общий вид конечно-элементной модели первого этапа расчетов

В результате теоретического анализа получили, что применение второй модели по сравнению с первой приводит к незначительному увеличению прогибов покрытия (до 1%). Усилия в элементах арок увеличиваются на (0,5...1)%, усилия в элементах структурной плиты увеличиваются на (1..5)%.

На основании анализа моделей 1 и 2 установлено, что описание стержневых элементов структурной плиты стержневыми конечными элементами с угловыми шарнирами не учитывает податливость болтовых соединений, вызванную разницей между диаметром отверстия и болта. Для оценки степени влияния податливости на напряженно-деформированное состояние конструкции была разработана третья конечно-элементная модель.

Третья модель получается из первой модели. Податливость узлов структурной плиты учитывалась введением упругоподатливых связей по концам стержневых элементов. Длина вставок равняется длине фасонки стержней. Жесткость вставки на осевое растяжение (сжатие)  $E\Gamma$  получена по испытаниям на растяжение болтового соединения узлового элемента и взята по зависимости 2 (рис. 3). В граничном случае структурная оболочка рассматривалась как шарнирно-стержневая система.

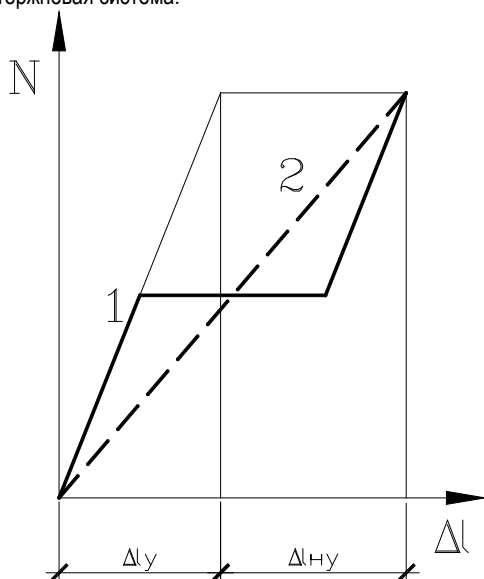


Рис. 3. График деформативности болтового соединения

Третья конечно-элементная модель предполагает, что податливость элементов вырабатывается при загрузке конструкции покрытием полной расчетной нагрузкой. Заранее предсказать, при каких усилиях в элементах начнутся сдвиги в болтовых соединениях и какова будет их последовательность – маловероятно. Однако, как показали исследования, полная выработка сдвиговых перемещений в узлах происходит на начальном этапе строительства или эксплуатации сооружения, при нагрузках, составляющих 0,3...0,4 от расчетных. В последующем, когда прорабатываются все сдвиговые перемещения, происходит выравнивание усилий, т.е. действительные усилия оказываются близкими к усилиям, определенным при условии неподатливых узлов [4]. Для учета данных факторов был проведен четвертый этап расчетов, разделенный на две стадии.

На первой стадии расчета вводились три предположения:

- податливость элементов вырабатывается при загрузке конструкции покрытием собственным весом, т.е. сдвиговые перемещения в узлах полностью прорабатываются при нагрузке, примерно 0,4 от расчетной;
- деформативность болтового соединения пропорциональна усилию, т.е. деформации развиваются не по зависимости 1 (рис. 3), а происходят по прямой 2, т.е. деформации будут складываться из упругой и неупругой части;
- для получения граничного случая принимаем, что податливость вырабатывается во всех элементах структурной конструкции.

Расчет велся по конечно-элементной модели третьего этапа расчетов на нагрузку от собственного веса конструкции покрытия, с введением упругоподатливых связей по концам стержневых элементов. На второй стадии предполагалось, что податливость элементов структурной плиты, вызванная сдвиговыми деформациями в узлах, исчерпана, что позволило описать работу стержневых элементов как работу шарнирных стержней (конечно-элементная модель 2, КЭ 4). По окончании расчетов усилия в стержнях и деформации узлов суммировались.

Введение упругоподатливых связей по концам стержневых элементов структурной плиты привело к увеличению прогибов конструкции до 7%. Усилия в затяжках и опорном стержне нижнего пояса арок увеличились на 4%, усилия в подвесках арок – на 5..6%. В результате дополнительного прогиба структурной плиты, вызванного податливостью ее узлов, произошло перераспределение усилий. В наиболее нагруженных стержнях структурной плиты у диафрагм жесткости (стержневые элементы Ск-7 – труба 203x10) усилия уменьшились на 20%. В части наименее нагруженных стержней произошло изменение знака усилия.

**СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

**Выводы**

1. Податливость элементов структурного покрытия привела к увеличению прогиба конструкции, и в свою очередь, к перераспределению усилий за счет высокой степени статической неопределенности.
2. Учет податливости болтовых соединений структурной конструкции позволил приблизить расчетную схему к действительной работе конструкции. Однако из-за неравномерного включения стержней в работу точно описать жесткость узлов и стержней не представляется возможным.
3. Учитывая возможное перераспределение усилий и изменение знака усилия, стержни структурной плиты рекомендуется подбирать по предельной гибкости для сжатых стержней.

1. Драган, В.И. Конструкции арок комбинированного покрытия универсального спортивного комплекса в г. Бресте / В.И. Драган, А.Б. Шурин // Вестн. Брест. гос. тех. ун-та. – 2006. – № 1(37): Строительство и архитектура. – С. 87–91.
2. Драган, В.И. Экспериментальное исследование несущей способности большепролетного металлического покрытия здания универсального спортивного комплекса в г. Бресте / В.И. Драган, А.Б. Шурин // Строительная наука и техника. – Мн., 2005. – № 2. – С. 9–14.
3. Трофимов, В.И. Учет влияния податливости болтового соединения на работу структурной конструкции / В.И. Трофимов, Э.В. Третьякова, И.И. Зуева // Строительная механика и расчет сооружений. – 1976. – №7. – С. 24–26.
4. Рекомендации по проектированию структурных конструкций / ЦНИИСК им. Кучеренко. – М.: Стройиздат, 1984. – 304 с.

*Материал поступил в редакцию 03.01.08*

**DRAGAN V.I., SHURYN A.B. The account of influence of a ductility of central connection combined a structural shell on its is intense-deformed status**

The description of constructive solution of a combined structures in Brest is presented in this paper. The review of researches of influence of a ductility of bolts of connections on operation of structural constructions is fulfilled. The FEM of a combined structural shell is offered. The results of influence of a pliability of nodal connection of a combined structural construction on its intense deformed status are given.

УДК 624.014.27

**Драган В.И., Морилова Н.Л.**

**ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО БОЛЬШЕПРОЛЕТНОГО ПОКРЫТИЯ СПОРТИВНОГО КОМПЛЕКСА «ВИКТОРИЯ» В г. БРЕСТЕ**

**Введение.** Одной из важнейших задач безопасности строительства является улучшение характеристик зданий по замедлению или предупреждению прогрессирующего разрушения. Решить эти проблемы невозможно без разработки специальных методов оценки стойкости зданий против прогрессирующего обрушения при комбинированных особых воздействиях. Поэтому необходимо выполнять расчеты не только в установившемся режиме, но и в аварийном режиме, вызванном чрезвычайной ситуацией при расчетных схемах, когда один из несущих элементов или их сочетание... разрушены.

Здания должны быть защищены от прогрессирующего (цепного) обрушения в случае локального разрушения их несущих конструкций при аварийных воздействиях, не предусмотренных условиями нормальной эксплуатации зданий (пожары, взрывы, ударные действия транспортных средств, несанкционированная перепланировка). Конструктивная схема здания должна обеспечивать его прочность и устойчивость в случае локального разрушения несущих конструкций как минимум на время, необходимое для эвакуации людей.

**1. Методика расчета на прогрессирующее обрушение.** Использование в строительстве методики нормирования, основанной на коэффициентах надежности, теоретически обеспечивает безопасность строительных конструкций. Однако опыт эксплуатации конструкций показывает, что надежность является необходимым, но не достаточным условием безопасности.

Конструкции зданий и сооружений первой категории ответственности рассчитываются с учетом таких экстремальных природных воздействий, как максимальное расчетное землетрясение, ураганы, экстремальные ветровые, снеговые нагрузки. Помимо того, учитываются воздействия, вызываемые деятельностью человека: максимальная проектная авария, падение на здание самолета, воздушная ударная волна при взрыве твердых веществ или газопаровоздушных смесей внутри здания или за ее пределами.

Другой способ применяется, когда может быть установлена вероятность реализации экстремальных событий. В некоторых странах достаточно «осторожным» значением считается величина  $10^{-7}$  событий год на одно здание. Другой уровень вероятности, начиная с ко-

торого событие обязательно должно учитываться, является проектная вероятность. Обычно она примерно на порядок больше, чем отобранный уровень.

Прогнозирование безопасности сооружений заключается в определении зоны риска и скорости ее роста до допускаемой величины, установленного для каждого конкретного случая.

Ключевым вопросом является выбор нормативных значений для показателей риска и безопасности объектов различного назначения. Это — трудная техническая и социально-экономическая задача, для решения которой в настоящее время предлагаются различные подходы.

Для объектов с повышенной ответственностью (многофункциональные высотные здания, ответственные инженерные и другие уникальные сооружения) предложены значения приемлемого риска порядка  $10^{-4}$ - $10^{-5}$  событий год. Нормативный риск ( $10^{-6}$ - $10^{-7}$  событий год).

Обрушение сооружений может происходить по двум схемам: либо с постепенным накоплением напряжений и деформаций и последующим обрушением несущих конструкций, либо быстротечно (прогрессирующее обрушение) при возможно даже кратковременном, но существенном перегрузе важного несущего элемента конструкций, при разрушении которого и возможно последующее прогрессирующее обрушение.

При первом способе обрушения, как показывает многолетний опыт обследования и мониторинга зданий и сооружений, нет необходимости вести непрерывный контроль деформаций конструкций, достаточно его вести регулярно периодически, что и заложено в разрабатываемые нормы многофункциональных зданий.

Защитой от второго способа обрушения может быть надежный расчет несущих элементов конструкций только на основе риск-анализа и разработка соответствующих конструктивных мероприятий, обеспечивающих недопустимость прогрессирующего обрушения, поскольку при такой схеме обрушения не могут помочь какие-либо системы контроля деформаций строительных конструкций, так как если процесс начался, то в силу его скоротечности, равносильной взрыву, даже предварительное обнаружение не дает возможности предпринять какие-либо предотвращения или спасения людей и оборудования.

**Морилова Наталья Леонидовна**, ассистент кафедры экономики и организации строительства Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.