Т. Г. Рытова¹, Л. А. Максимова^{2,3}, А. Г. Николаева³, В. К. Смирнов³, Н. Г. Пфаненштиль⁴

ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ СПОСОБОВ УСИЛЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОКРЫТИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ОГНЯ

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

²Российский университет транспорта, Москва, Россия

³Чувашский госуниверситет им. И.Н. Ульянова, Чебоксары, Россия

⁴Казанский филиал Российского государственного университета правосудия, г. Казань, Россия

Аннотация. Приводятся результаты численного расчета оптимального способа усиления структурных конструкций покрытий на примере покрытия спортивного зала при воздействии огня при пожаре. Расчеты выполнены в программном комплексе ЛИРА-САПР. На основе выполненных численных исследований составлены рекомендации по усилению структурных конструкций покрытия.

Ключевые слова: температурные воздействия, пожар, структурные конструкции покрытий, перемещения, критическая нагрузка, живучесть.

DOI: 10.37972/chgpu.2021.1.47.009

УДК: 539.37

Введение

В современном мире, с развитием теоретических и численных методов расчета, появляется возможность описать напряженное состояние конструкций под такими нагрузками, которые раньше можно было вычислить только теоретически и сам расчет

© Рытова Т. Г., Максимова Л. А., Николаева А. Г., Смирнов В. К., Пфаненштиль Н. Г., 2021

Рытова Татьяна Георгиевна

e-mail: tanusha2884@mail.ru, кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций Национального исследовательского Московского государственного строительного университета, г. Москва, Россия,

Максимова Людмила Анатольевна

e-mail: maximova_ng@mail.ru, доктор физико-математических наук, профессор кафедры высшая математика и естественные науки Российского университета транспорта, профессор кафедры строительных конструкций ФГБОУ ВО «Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова», г. Чебоксары, Россия,

Поступила 10.02.2021

был довольно приближенным. Одним из видов таких нагрузок является температурная нагрузка или расчет на огнестойкость. Важной особенностью данных нагрузок является характер их приложения и последующего действия на конструктивные элементы.

Расчеты на нагрузки, способные вызвать прогрессирующее обрушение [1], также постепенно внедряются в проектирование современных зданий и сооружений. Стоит отметить, что пожарная нагрузка и расчеты на огнестойкость недостаточно хорошо изучены и нормированы в РФ. Большинство исследований были проведены в СССР и не получили дальнейшего развития, в то время как в Европе расчеты металлических конструкций на действие огня продолжали развиваться. Воздействие огня способно вызвать прогрессирующее обрушение конструкций и повлечь большие человеческие жертвы, поэтому расчеты на огнестойкость становятся также принципиально важными в настоящее время.

Цель настоящей работы - выполнение расчета и дальнейший анализ напряженно-деформированного состояния при воздействии огня на структурную конструкцию покрытия, и определение наиболее эффективного типа усиления данной конструкции.

Методы усиления структурных конструкций покрытия

К настоящему моменту разработаны рекомендации по проектированию и усилению металлических конструкций. Так как сама пространственная конструкция структуры состоит из большого числа плоских конструкций, то можно считать, что усиления, подходящие для ферм, также подойдут в качестве решения проблемы.

Согласно “Пособия по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81*)”:

1. Усиление стальных конструкций осуществляется заменой элементов конструкций, не подлежащих усилению, новыми или введением в усиливаемую конструкцию дополнительных элементов усиления.

2. Наиболее распространенными являются следующие методы усиления конструкций: а) введение дополнительных ненапрягаемых элементов; б) введение предварительно-напряженных элементов; в) подведение дополнительных разгружающих конструкций; г) усиление соединений.

3. Усиление ферм осуществляется введением в конструкцию фермы дополнительных ненапрягаемых, предварительно-напряженных элементов, разгружающих конструкций.

4. Усиление соединений осуществляется увеличением длины или толщины сварных швов, введением в конструкцию узла дополнительных болтов (заклепок).

При составлении расчетной модели предусматривались способы укрепления только что построенной конструкции покрытия, и оно должно справиться с тем, чтобы

Николаева Анастасия Георгиевна

e-mail: nag_sf@mail.ru, старший преподаватель ФГБОУ ВО “Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова”, г. Чебоксары, Россия,

Смирнов Виктор Константинович

e-mail: sm-viktor.flanker@mail.ru, магистрант ФГБОУ ВО “Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова”, г. Чебоксары, Россия,

Пфаненштиль Надежда Георгиевна

e-mail: pfedorova83@mail.ru, кандидат исторических наук, доцент кафедры социально-гуманитарных наук Казанского филиала Российского государственного университета правосудия, г. Казань, Россия, Россия

сохранить несущую способность под воздействием пожарной нагрузки и последующего прогрессирующего обрушения. Поэтому изначально предполагаем, что вводимые укрепления не несут задачи скрыть дефекты, а делаются с той целью, чтобы перераспределить усилия и внести дополнительные способы защиты помимо огнестойких покрытий и обшивки.

Расчетная модель и нагрузки

В “Пособии по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81*)” приводятся рекомендации по расчету и конструированию структурных покрытий из прокатных профилей. По расчету структурных плит можно выделить следующие пункты, применительно к расчету структурных конструкций покрытия.

1. Расчет структурной конструкции рекомендуется производить по недеформированной схеме без учета физической нелинейности работы стали.

2. В качестве расчетной модели конструкции принимается пространственный стержневой блок, опирающийся на четыре колонны, воспринимающий вертикальные нагрузки, а также горизонтальные воздействия от примыкающих элементов здания или оборудования с учетом особенностей их приложения и конструктивного решения узлов. Расчетная модель включает неразрезные поясные элементы, в том числе продольные изгибно-жесткие элементы верхнего пояса, загруженные по своей длине поперечной нагрузкой.

3. Для конструкций с регулярной решеткой допускается принимать шарнирно-стержневую расчетную модель с узловой передачей нагрузки.

4. В общем случае расчет вручную всех поясов и элементов следует производить согласно СП 16.13330.2017.

Пособие дает нам лишь основные определения и расчет актуальный для 1989 года. Тогда только начали внедрять данные типы конструкций массово, и не было широких технических возможностей проверить действие температурной нагрузки в программных комплексах. Тем более, сейчас большинство структурных перекрытий выполняются не с помощью открытых профилей, а с помощью профилей замкнутого сечения (круглого, прямоугольного). Для современных профилей следует обновить советские базы рекомендаций и уточнить способы расчета и введение дополнительных коэффициентов, учитывающих действие пожара (если это необходимо). Также стоит проверить, какие коэффициенты программные комплексы применяют при расчете на огневое воздействие в настоящее время. Всё это следует сделать по очевидной причине развития технологий изготовления металлопроката (улучшения его качества) и модернизации ЭВМ.

При проектировании структурной конструкции было принято решение взять за основу структурные конструкции типа “Кисловодск”. От данного типа конструкций взяты:

1. Габариты нижнего и верхнего поясов.
2. Размещение колонн и их закрепление в фундаменте.
3. Принятое сечение поясов.

Характеристика здания:

1. Размеры в плане – 24х30 м; h (от низа колонн до верхнего пояса) – 10.35 м; h_1 (высота колонны) – 8.9 м; Колонны расположены на расстоянии 1.5 м от сторон нижнего пояса.

2. Жесткости и материалы: Сечение верхнего пояса – труба 60х10; Сечение колонны – двутавр 30К1.

3. Закрепление колонн в фундаменте жесткое; опорных капителей нет

Рис. 1. Пространственная модель структурного покрытия

Рис. 2. Узел опирания

Так как конструкция структурного покрытия расположена внутри здания и не является частью основного несущего каркаса, к ней приложены следующие нагрузки и воздействия:

1. Собственный вес стальных элементов и вес кровельного пирога с учетом коэффициента условий работы 0,9.

2. Снеговая нагрузка

3. Температурная нагрузка (шаговая, выполняется в нелинейной постановке)

Зданию назначен III тип огнестойкости. Класс конструктивной пожарной опасности С1. Для каждого типа огнестойкости характерны свои временные требования для элементов конструкции по наступлению предельных состояний. При III типе несущие элементы должны иметь предел R 45; перекрытия междуэтажные REI 45; строительные конструкции бесчердачных покрытий R 15. Покрытие типа "Кисловодск" и другие виды структур подходят под определение бесчердачных, следовательно, необходимо, как минимум, обеспечить предел по несущей способности в течение 15 минут для верхнего и нижнего поясов.

Температурная нагрузка приложена от края к центру, начиная от колонны и распространяясь в двух взаимно-перпендикулярных направлениях. Данные по температуре и времени задавались согласно кривой стандартного действия пожара.

Нагрузка была задана шаговым методом. В комбинациях нелинейного нагружения температурная нагрузка была задана несколькими способами:

1) неравномерными шагами, число шагов 5; 2) равномерными шагами, число шагов 5; 3) неравномерными шагами, число шагов 10. Температурное воздействие идет от колонн к центру структурного покрытия в форме треугольника в плане. Максимальная температура была установлена в 600^0C , что соответствует предельной температуре для незащищенных конструкций, при которой наступает потеря несущей способности металлических элементов [2].

Результаты численного расчета

Данный расчет позволил выявить некоторые особенности структурных конструкций под воздействием температурной нагрузки:

1. Самые большие прогибы конструкций появлялись при расчете нагружения (температурная нагрузка) способом с максимальной разбивкой шагов.

2. Температурную нагрузку для большей точности и для введения запаса следует задавать согласно графику, деля его на как можно большее число элементов.

3. Менее затратные как с технической точки зрения, так и с экономической, следует признать подведение дополнительных опор и усиления в колонны данного структурного покрытия в виде стержней или решетчатых капителей для большего перераспределения нагрузок.

4. Расчет показал наиболее слабые места в конструкции, следовательно, в них можно применить усиление методом увеличения сечения.

5. Конструкция не обрушилась после приложения нагрузки в 600^0C , что говорит об эффекте перераспределения нагрузок и возможности увеличения времени действия условного пожара для анализа поведения конструкции

Для структурного покрытия предложены варианты усиления по повышению живучести конструкции [3]:

1 вариант - (подведение под колонны дополнительных подкосов) (рис. 3);

2 вариант - подведение под колонны дополнительных подкосов и увеличение в ответственных местах конструкции сечения структуры (рис. 4);

3 вариант - устройство дополнительных колонн по периметру покрытия с подведением подкосов) (рис. 5).

Рис. 3. Первый вариант усиления структурных конструкций покрытия

Для более наглядного представления насколько усиления помогают живучести и уменьшают прогибы и разрушения конструкции, ниже приведены сравнительные таблицы, получившихся значений вертикальных перемещений.

Максимальные вертикальные перемещения, мм			
Без усиления	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
391	156	105	31.8
396	166	108	33.6
438	172	112	34.7
466	175	115	35.7
473	176	115	35.4

Таблица 1. Вертикальные перемещения покрытия

В результате выполненных расчетов по усилению конструкций покрытия, можно сделать следующий вывод:

1. значения прогибов при 5 неравномерных шагов и 5 равномерных шагов комбинациях загрузжений получаются примерно одинаковыми, с разницей 10 мм.

Рис. 4. Второй вариант усиления структурных конструкций покрытия

2. Наибольшие значения прогибов наблюдаются при задании температурной нагрузки с помощью комбинации в 10 неравномерных шагов.

3. Все варианты усиления являются рабочими, так как уменьшают прогибы конструкций и число разрушенных элементов.

4. Каждый вариант усиления в порядке друг за другом соответственно значительно уменьшает предельные прогибы конструкции. 3 вариант усиления способен уменьшить прогиб структурного покрытия при 1 комбинации в 13.3 раза; при 2 комбинации в 14.8 раз; при 3 комбинации в 21.7 раза. Вызвана такая разница уменьшением пролета в результате установки колонн, и добавлением дополнительной жесткости всему покрытию.

5. 1 и 2 варианты усиления уменьшают прогиб в 3 и 4 раза соответственно, что является хорошим аргументом в пользу применения такого типа усиления.

Заключение. Важно отметить, что рекомендации по проектированию и расчету структурных конструкций уже присутствуют в нормативах, выпущенных ЦНИИСК им. Кучеренко [4]. С момента их выпуска за все это время изменились материалы, методы расчета, способы соединения элементов в конструкции, качество изготовления и монтажа покрытий. Расчет металлических конструкций на огнестойкость более развернуто представлен в Еврокодах [5, 6], и он более современный по отношению к вышеназванным нормам. В нём учитывается огромное количество факторов, типов,

Рис. 5. Третий вариант усиления структурных конструкций покрытия

воздействий пожара на конструкции. На данный момент представлено множество расчетных и модулирующих пожар программ, но нельзя сказать конкретно, какая из них эффективнее описывает данный процесс.

В связи с вышесказанным предлагаются следующие рекомендации по расчету такого типа покрытий/

1. Расчет следует выполнять по нескольким вариантам развития пожара, чтобы определить наиболее уязвимые места в конструкции.

2. При расчете необходимо учесть все возможные при задании температурной нагрузки коэффициенты, для создания более точной модели.

3. Расчет рекомендуется выполнять в нелинейной постановке, с делением нагрузки на как можно большее число шагов, для получения результатов с запасом. Также нелинейная постановка обеспечивает возможность задания нагрузки по различным типам пожара, отличающимися своими графиками кривых.

4. При проектировании усиления следует обращать внимание на подведение дополнительных опор и усиление сечения элементов конструкции.

5. При проектировании конструкции с учётом возникновения пожара, следует дополнительно запроектировать наличие огнезащиты.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Лепешкина Д. О. Прогрессирующее обрушение зданий и сооружений // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: сб. ст. по мат. XI междунар. студ. науч.-практ. конф. № 1(60).
- [2] Зайцев А. М. Методика расчета прогрева огнезащищённых стальных конструкций в условиях воздействия экстремального температурного режима пожара // Журнал Пожаровзрывобезопасность. 2006. Т. 15 (№6). С. 15-21.
- [3] Кудишин Ю. И. Живучесть конструкций – важный фактор снижения потерь в условиях аварийных ситуаций // Вопросы обеспечения надежности и живучести большепролетных конструкций покрытий: Тезисы к НТС МГСУ. М.: НТС МГСУ, 2008. С. 4-5.
- [4] ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР “Рекомендации по проектированию структурных конструкций”. М., 1984.
- [5] Еврокод 1 EN 1991-1-2:2002 Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire. 6. Еврокод 3 EN 1993-1-2:2005+AC 2005 (E)
- [6] Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-2: General rules. Structural fire design

T. G. Rytova¹, L. A. Maximova^{2,3}, A. G. Nikolaeva³, V. K. Smirnov³, N. G. Pfanenshtil⁴

NUMERICAL CALCULATION OF METHODS FOR STRENGTHENING THE STRUCTURAL STRUCTURES OF THE COATING UNDER THE INFLUENCE OF FIRE

¹*Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia*

²*Russian University of Transport, Moscow, Russia*

³*I.N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia*

⁴*Kazan Branch of the Russian State University of Justice, Kazan, Russia*

Abstract. The results of the numerical calculation of the optimal method for strengthening the structural structures of the coverings are presented on the example of the covering of a sports hall under the influence of fire in a fire. The calculations were performed in the LIRA-CAD software package. Based on the performed numerical studies, recommendations for strengthening the structural structures of the coating are made.

Keywords: temperature effects, fire, structural structures of coatings, displacement, critical load, survivability.

REFERENCES

©Rytova T. G., Maximova L. A., Nikolaeva A. G., Smirnov V. K., Pfanenshtil N. G., 2021
Rytova Tatyana Georgievna
e-mail: tanusha2884@mail.ru, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia,
Maximova Lyudmila Anatolyevna
e-mail: maximova_ng@mail.ru, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Russian University of Transport, Moscow, Russia, I.N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia,
Nikolaeva Anastasia Georgievna
e-mail: nag_sf@mail.ru, Senior Lecturer, I.N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia,
Smirnov Viktor Konstantinovich

- [1] Lepeshkina D. O. Progressing collapse of buildings and structures // Scientific community of students of the XXI century. Technical sciences: sat. st. on mat. XI International Student Scientific and Practical Conference-No. 1 (60) (In Russian)
- [2] Zaitsev A. M. Method of calculating the heating of unprotected steel structures under the influence of extreme temperature conditions of fire // Journal of Fire and Explosion Safety. 2006. Vol. 15. No. 6. pp. 15-21. (In Russian)
- [3] Kudishin Yu. I. Survivability of structures – an important factor in reducing losses in emergency situations // Issues of ensuring the reliability and survivability of large-span coating structures: Theses to the NTS MGSU. M.: NTS MGSU, 2008. pp. 4–5 (In Russian)
- [4] TSNIISK im. Kucherenko Gosstroya SSSR «Recommendations for the design of structural structures». Moscow, 1984. (In Russian)
- [5] Еврокод 1 EN 1991-1-2:2002 Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire. 6. Еврокод 3 EN 1993-1-2:2005+AC 2005 (E)
- [6] Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-2: General rules. Structural fire design

e-mail: sm-viktor.flanker@mail.ru, Master's Student, I.N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia,

Pfanenshtil Nadezhda Georgievna

e-mail: nfedorova83@mail.ru, Candidate of Historical Sciences, Associate Professor, Kazan Branch of the Russian State University of Justice, Kazan, Russia