УДК 624.04

© М. Б. Москалев, канд. техн. наук, доцент
© М. В. Горюнов, магистрант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: cosccc@gmail.com, maxgo-14@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-6-70-76

© М. B. Moskalev, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
© M. V. Goriunov, undergraduate
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: cosccc@gmail.com, maxgo-14@mail.ru

К ВОПРОСУ О РЕГУЛИРОВАНИИ НДС КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО ОБРУШЕНИЯ

ON THE ISSUE OF REGULATING THE STRESS-STRAIN STATE OF STRUCTURES TAKING INTO ACCOUNT PROGRESSIVE COLLAPSE

Управление НДС конструкции с помощью регуляторов позволяет создавать уникальные конструкции, быстро реагирующие на изменение внешней среды, а значит, регуляторы могут эффективно применяться во всех сферах строительства. В связи с распространением автоматизации и средств быстрой передачи информации данные конструкции будут становиться все более актуальными. Проанализированы критерии установки регуляторов на основе возникающих усилий в стержнях фермы, подсчитаны разгрузки в данной ферме от действия регуляторов, выявлены недостатки регуляторов. Полученные результаты могут быть применены в проектировании управляемых конструкций, для защиты от лавинообразного обрушения и стабилизации деформаций и усилий в фермах.

Ключевые слова: деревянные конструкции, регулируемая конструкция, металлодеревянная ферма, регулирование НДС, критерий регулирования, прогрессирующее обрушение.

The control of the stress-strain state of the structure using regulators allows creating unique structures that quickly respond to changes in the external environment, and, therefore, can be effectively used in all areas of construction. Due to the advancement of automation and information fast transmission means, these structures are going to become more and more relevant. The authors have analyzed the criteria for setting the regulators based on the arising forces in the truss rods, the removal of load in the given truss from the action of the regulators has been calculated, and disadvantages have been identified. The results obtained can be applied in the design of controlled structures to protect against avalanche collapse and ensure a proper stabilization of deformation and forces in trusses.

Keywords: wooden structures, adjustable structure, metal-wood truss, SSS regulation, regulation criterion, progressive collapse.

Управление НДС строительных конструкций — одно из быстроразвивающихся направлений технологического процесса, которое позволяет обеспечить высокий технологический уровень строительных конструкций.

Наиболее изученными являются преднапряженные фермы с затяжками (рис. 1), но они не позволяют конструкции работать в предельном состоянии. Данные конструкции способны задать основные регуляторы, которые могут работать по главным направлениям.

Перед подбором и анализом схемы регулирования необходимо задаться граничными услови-

ями регулирования. Так как задача регулирования будет анализироваться в программе ЛИРА-САПР, то оценкой устойчивости системы будет служить коэффициент общей устойчивости, равный 1,3 по подп. 4.3.2 СП 16.13330.2017¹. Подобного коэффициента в нормах по деревянным конструкциям нет, поэтому (условно) ограничимся данным значением для получаемых форм колебаний конструкций. Характерное граничное значение по усмотрению инженера может быть

¹ СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции. М.: ФГУП ЦПП, 2017.

Рис. 1. Преднапряженные фермы покрытий с использованием затяжек, разгрузка до 40–45 % на стержень, 8–10 % на ферму [1]: а — преднапряжение отдельных стержней; б, г, д — преднапряжение в нижнем поясе; в — преднапряжение с нахлестом нижнего пояса; е, ж — преднапряжение в ферме

изменено в пользу конструкции, но не менее 1,3, поэтому справедливо следующее уравнение:

$$y_i \geq y_s = 1,3. \quad (1)$$

Программный комплекс вычисляет переменную без учета коэффициентов α и β по подп. 7.1.3 СП 16.13330.2017, а посредством формулы устойчивости Эйлера [5], вычисляя критические напряжения:

$$\sigma_3 = \frac{P_3}{F} = \frac{\pi^2 EI_{\min}}{(\mu l)^2 F} = \frac{\pi^2 E i_{\min}^2}{(\mu l)^2} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad \text{при } i_{\min}^2 = \frac{I_{\min}}{F}, \lambda = \frac{\mu l}{i_{\min}}, \quad (2)$$

где E — модуль Юнга; $I_{\min}$ — минимальный главный момент инерции стержня; μ — коэффициент приведения длины, зависящий от формы потери устойчивости; l — длина стержня.

По формуле Эйлера вычисляют величину нагрузки, при которой происходит потеря устойчивости, в случае если гибкость стержня больше или равна гибкости материала, из которого он изготовлен, то есть ее применимость можно записать следующим образом:

$$\lambda \geq \lambda_{\text{пр}}, \lambda_{\text{пр}} = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_{\text{пр}}}} = \pi \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_{\text{пр}}}} = \text{const}, \quad (3)$$

где $\sigma_{\text{пр}}$ — напряжение, возникающее в стержне, эквивалентное окончанию (упругой, пластической и т. д.) работы материала; $\varepsilon_{\text{пр}}$ — относительные деформации (при заданной работе).

Коэффициент запаса показывает, во сколько раз нужно пропорционально увеличить всю нагрузку, чтобы реализовалась данная форма потери устойчивости [5].

Коэффициенты свободной длины для стержневых элементов могут быть выражены следующим образом:

$$\mu_c = \frac{\pi}{l_i} \sqrt{\frac{EI_{\min}}{N_{\text{пр}}}}, N_{\text{пр}} = y_i N_{ij}, \quad (4)$$

где l_i — длина стержня; y_i — коэффициент запаса устойчивости для i -го нагружения; $N_{\text{пр}}$ — критическое продольное усилие сжатия в j -м стержне для i -го нагружения.

Анализируя формулы (2)–(4), можно заметить, что гибкость и коэффициенты свободной длины стержня обратно пропорциональны возникающим в них усилиям и деформациям, поэтому регулирование рационально производить, воздействуя на усилия в стержнях, при этом сигналом для регулирования может служить деформация стержней конструкции.

Первоначальными критериями могут служить единичные эпюры от единичных нагрузок. Эффективность разгрузки для конкретных элементов каркаса и фермы определяется с помощью двух оценок: знакопеременности возникающих усилий в стержнях фермы относительно расчетной нагрузки и разгрузки основных предельно нагруженных стержней фермы.

Так как ферма работает преимущественно на продольные усилия, критерии регулирования могут выглядеть следующим образом [1, 2, 6]:

$$|N_i| = |N_{i+1}| = \begin{cases} N_i^P + \overline{N}_i x_1^П + \overline{N}_i x_2^П, \\ N_{i+1}^P + \overline{N}_{i+1} x_1^П + \overline{N}_{i+1} x_2^П, \end{cases};$$

$$x_1^П = \dots; x_2^П = \dots, \quad (5)$$

где N_i — продольное усилие в i -м стержне, которое задается проектировщиком; N_i^P — продольное усилие от нагрузки в i -м стержне; $\overline{N}_i$ — продольное усилие от единичного усилия в основной системе в i -м стержне; $x_1^П$ — величина неизвестного усилия, или же величина полного усилия от регулятора 1; $x_2^П$ — величина неизвестного усилия, или же величина полного усилия от регулятора 2.

Для деревянных сечений, испытывающих сжатие с изгибом (верхний пояс фермы, колонна каркаса), критическая нагрузка может описываться формулой вида

$$N_{кр} = N_{max} = \frac{\left(\begin{aligned} & - (6R_c W_{расч} (\varphi + 1)) + \\ & + \sqrt{(6R_c W_{расч} (\varphi + 1))^2 +} \\ & + 24(6M \varphi R_c W_{расч} - 2R_c^2 I_{расч} F_{расч} \varphi) \end{aligned} \right)}{-2h}$$

при

$$N_{кр} \neq \frac{M}{e}, \quad (6)$$

где изгибающий момент $M = eN$, если N лежит в плоскости сечения; $I_{расч}$ — момент инерции; h — высота сечения; φ — коэффициент продольного изгиба; R_c — расчетное сопротивление сжатию; $W_{расч}$ — момент сопротивления.

Наибольшей опасностью в данном методе обладают воздействия, которые могут приводить к знакопеременности работы стержней фермы, тогда, чтобы разгрузить конструкцию, регуляторы доведут ее до критических усилий. Наиболее опасным воздействием по анализу, проведенному автором, обладают лавинообразные, прогрессирующие (непропорциональные) обрушения^{2,3}.

² СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения. Минстрой России, 2018. 26 с.

³ МДС 20-2.2008. Временные рекомендации по обеспечению безопасности большепролетных сооружений от лавинообразного (прогрессирующего) обрушения при аварийных воздействиях.

Всего к конструкции здания после воздействия динамических нагрузок, приводящих к ослаблению несущих конструкций, может быть выдвинуто несколько уровней требований [3]:

- здание (сооружение) после аварийного воздействия не получает повреждений за пределами локального участка;
- здание после аварийного воздействия сохраняет несущую способность, но становится непригодным к дальнейшей нормальной эксплуатации;
- здание после аварийного воздействия непригодно к эксплуатации, но сохраняет свою форму (связность основных конструктивных элементов) в такой степени, что люди могут безопасно его покинуть.

В перспективе данные конструкции могут справляться и с этим воздействием, при условии что время регулирования будет эквивалентно с точностью до $(1/10)T$, где T — период собственных колебаний конструкции; согласно иностранному подходу⁴, получаемое время берется за расчетное в характерном обрушении. Данный подход к исследуемой конструкции находится в стадии анализа.

Регуляторы должны использоваться как во время эксплуатации, так и во время аварийных воздействий, поэтому необходимо рационально их расставить.

План анализа [4]:

- построить каркас в программном комплексе;
- замерить усилия, возникающие в элементах;
- определить критерии регулирования;
- выбрать оптимальные места постановки регуляторов;
- пересчитать несущие элементы фермы;
- убедиться в разгрузке элементов решетки;
- выключить наиболее нагруженную колонну;
- проверить работу регуляторов при выключении элементов.

В данном случае анализируемой конструкцией станет двухпролетная металлодеревянная ферма (рис. 2).

Автором данной работы предлагаются следующие критерии установки регуляторов:

1) наиболее рациональное расположение, при котором в сечениях элементов образуются эпю-

⁴ GSA Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects. Washington, DC: General Services Administration, 2003.

Рис. 2. Двухпролетная металлодеревянная ферма:
а — анализируемый каркас, б — рама по оси Г-Г

ры с противоположным знаком: чем на большее количество сечений данное разгружение влияет, тем экономичнее и эффективнее работа фермы;

2) наиболее опасные сечения, в которых возникают наибольшие сечения, для формирования равнопрочного сечения элементов;

3) догрузка элементов фермы неэффективно для сечений по критерию 2. Увеличение напряжений в слабонагруженных элементах допустимо при условии $\sigma < R$;

4) эффективная разгрузка фермы при локальном обрушении, для минимизации разрушений или недопущения прогрессивного обрушения.

В ходе предварительного анализа конструкции наиболее чувствительным элементом к нагрузкам стала средняя колонна по осям В-В, Г-Г. Коэффициент общей устойчивости составляет 1,44, что больше 1,3 (сколько должно быть по СП 16.13330.2017).

В ходе анализа до обрушения было принято расположение регуляторов, показанное на рис. 3.

Для получения графиков разгружения стержней (рис. 4, 5) применено усилие в 1 кН.

Разгружение найдем по формуле

$$x = \left(1 - \frac{N_1}{N_2}\right) \times 100 \%, \quad (7)$$

где N_1 — усилия в стержнях с учетом регуляторов; N_2 — усилия в стержнях без учета регуляторов.

После расчета общей устойчивости каркаса при выключении (исключении из схемы) колонны на пересечении осей 2-2 и В-В был получен коэффициент $\gamma_c = 1,02$, что менее 1,3. Наиболее чувствительный к регулированию элемент — колонна на пересечении осей 2-2 и Г-Г, по 1-й форме потери устойчивости, что указывает на необходимость регулирования данного сечения.

Как видно из данной системы, наибольшее разгружение можно получить воздействием двух регуляторов, применение 3-го регулятора оправ-

Рис. 3. Схема расстановки регуляторов в каркасной ферме (без блока связи) по оси Г-Г

Рис. 4. Разгрузка стержней плоской рамы в процентах от номера конечных элементов (см. рис. 3) введенных в систему по формуле (7) регуляторов (стержни, дающие 0 %, это стержни с малыми усилиями, которые показывают переменные по знаку усилия либо большие проценты изменения от усилия из-за малого усилия в стержне)

Рис. 5. Степень разгрузки при установке нескольких регуляторов после обрушения системы

дано для тонкой настройки и большего разгрузки определенных стержней. Регуляторы 1, 3 наиболее рационально работают при регулировании НДС рамы (см. рис. 4, 5), ослабляя усилия на колонны каркаса, чем ограничивают возникновение аварийного воздействия вследствие обрушения остальных колонн, но общая разгрузка фермы не такая впечатляющая, как в остальных случаях. Поэтому для анализа рационально принять регуляторы № 1, 3.

Первоначальное нагружение от регулятора № 3 примем величиной 200 кН, с шагом в 20 кН (рис. 6).

Как видно, регулирование носит линейный характер до перенапряжения данным регулятором других элементов рамы либо же каркаса. При усилии регулирования в 500 кН наиболее чувствительным элементом становится центральная колонна по оси Г-Г, что ограничивает применение данного регулятора в дальнейшем нагружении и, соответственно, устанавливает

Рис. 6. Поэтапное нагружение системы регулятором № 3 при преднапряжении регулятора № 1 = const = 140 кН, с аппроксимацией полученной функции (R — достоверность аппроксимации)

Рис. 7. Анализ чувствительности каркаса, наиболее чувствительный элемент — ферма по оси В-В, $u_c = 1,3002$, по 1-й форме потери устойчивости

экстремум (см. рис. 6) в данной функции зависимости между коэффициентом общей устойчивости и усилием в регуляторе № 3.

С помощью функции аппроксимации определим наиболее подходящие усилия регулирования для соблюдения критерия общей устойчивости. Таким образом найдено необходимо усилие от регулятора № 3, равное 409,43 кН, результирующий анализ чувствительности представлен на рис. 7.

В ходе анализа применения регуляторов при лавинообразном прогрессирующем обрушении были подобраны критерии регулирования для работы каркаса, также было выполнено выключение наиболее нагруженного элемента в каркасе с анализом возможности предотвращения прогрессирующего обрушения и обеспечения его устойчивости при постановке регуляторов в плоскости рамы. Данное техническое решение потенциально может быть рекомендовано для обеспечения безопасности конструкций от

анализируемого воздействия, но для подтверждения необходимо провести несколько дополнительных исследований.

Также работа регуляторов позволяет управлять НДС конструкции и экономично использовать материалы в системе при регулировании в процессе эксплуатации.

Библиографический список

1. Сазанцев Е. В. Регулирование напряженно-деформированного состояния строительных конструкций путем предварительного напряжения их элементов: дис. ... магистра. Красноярск, 2016. 118 с.
2. Дарков А. В., Шапошников Н. Н. Строительная механика. 8-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1986. 607 с.
3. Алмазов В. О., Плотников А. И., Расторгужев Б. С. Проблемы сопротивления зданий прогрессирующему разрушению // Вестник МГСУ. 2011. № 2–1. С. 16–20.
4. Руденко Д. В., Руденко В. В. Защита каркасных зданий от прогрессирующего обрушения // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 3 (5). С. 38–41.
5. Стрелец-Стрелецкий Е. Б., Журавлев А. В., Водопьянов Р. Ю. ЛИРА-САПР. Книга I. Основы / под ред. А. С. Городецкого. Б. м.: LIRALAND, 2019. 154 с.
6. Плотников Ю. Г. Матрицы в строительной механике. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2008. 111 с.

References

1. Sazantsev E. V. *Regulirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya stroitel'nykh konstruktсий putem predvaritel'nogo napryazheniya ikh elementov. Diss magistra* [Regulation of the stress-strain state of building structures by pre-stressing their members. MSc diss.]. Krasnoyarsk, 2016, 118 p.
2. Darkov A. V., Shaposhnikov N. N. *Stroitel'naya mekhanika* [Construction mechanics]. 8-th ed., revised. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1986, 607 p.
3. Almazov V. O., Plotnikov A. I., Rastorguev B. S. *Problemy soprotivleniya zdaniy progressiruyushchemu razrusheniyu* [Problems of building resistance to progressive fracture]. *Vestnik MGSU – Bulletin of MGSU*, 2011, no. 2(1), pp. 16–20.
4. Rudenko D. V., Rudenko V. V. *Zashchita karkasnykh zdaniy ot progressiruyushchego obrusheniya* [Protection of frame buildings from progressive collapse]. *Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal – Civil Engineering Journal*, 2009, no. 3 (5), pp. 38–41.
5. Strelets-Streletskiy E. B., Zhuravlev A. V., Vodop'yanov R. Yu. *LIRA-SAPR. Kniga I. Osnovy* [LIRA-CAD. Book I. The basics]. Ed. by Gorodetskiy A. S. Liraland Publ., 2019, 154 p.
6. Plotnikov Yu. G. *Matritsy v stroitel'noy mekhanike* [Matrices in construction mechanics]. Khabarovsk, DVGUPS Publ., 2008, 111 p.