УДК 691.418

Работа связей в покрытии промышленного здания со стальным каркасом

Ольга Александровна ТУСНИНА, кандидат технических наук, доцент, e-mail: tusninaoa@gic.mgsu.ru

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», 129337 Москва, Ярославское ш., 26

Аннотация. *Рассмотрены особенности работы связей в покрытии промышленного здания на стальном каркасе. Горизонтальные связи проектируются для обеспечения общей устойчивости ферм покрытия, раскрепления их из плоскости рамы, а также для восприятия горизонтальных нагрузок, действующих на каркас. При традиционном подходе, в зависимости от типа решетки связей, они проектируются, как сжато-растянутые (треугольная решетка) либо как работающие только на растяжение, при этом допускается потеря устойчивости одного из элемента связей (крестовая решетка). Это классический подход, который применялся, когда при расчете сооружения рассматривались плоские рамы, а связи проектировались на действие горизонтальных нагрузок (ветровые, крановые). В настоящее время с развитием программных комплексов стало возможным выполнять расчет всего пространственного каркаса здания, позволяющий учесть включение в работу связей при действии всех типов нагрузок. В статье представлены результаты расчета пространственного каркаса промышленного сооружения. Установлено, что горизонтальные связи включаются в работу также при действии на покрытие вертикальных нагрузок (собственный вес, снег и т. д.), в результате чего и при крестовой решетке все связи при определенных сочетаниях нагрузок одновременно могут оказаться сжатыми и потерять устойчивость, что является недопустимым и требует выполнения усиления связевой системы. Приведен анализ возможности учета включения в работу на сдвиг жесткого диска покрытия из стальных щитов, приваренных к фермам, которые в некоторой степени разгружают горизонтальные связи.*

Ключевые слова: *стальной каркас, промышленное здание, горизонтальные связи, несущая способность, конечно-элементный расчет, жесткий диск покрытия.*

OPERATION OF BRACING SYSTEM IN THE ROOF OF INDUSTRIAL BUILDING WITH STEEL FRAME

Olga A. TUSNINA, e-mail: tusninaoa@gic.mgsu.ru

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoe shosse, 26, Moscow 129337, Russian Federation

Abstract. *Features of work of bracings in a covering of an industrial building with steel framework are considered. Horizontal bracings are designed to ensure the overall stability of the roof trusses, their unfastening from the plane of the frame, as well as for the perception of horizontal loads acting on the frame. At the traditional approach, depending on the type of bracing grid , they are designed as a compressed-stretched (triangular lattice), or as working only on the tension, in this case, the loss of stability of one of the bracing element (cross lattice) is allowed. This is a classic approach, which was used when calculating the structure considered flat frames, and the connections were designed for the action of horizontal loads (wind, crane). At present, with the development of computing software, it became possible to perform the calculation of the entire spatial framework of the building, making it possible to take into account the inclusion of the braces in the spatial work under the action of all types of loads. The results of analysis of the spatial framework of an existing industrial building are presented in the article. It is established that horizontal braces are included in the work also when vertical loads (dead load, snow, etc.) acting on the roof, as a result of which, even with a cross lattice, all braces can be compressed at the same time and lose stability, it is inadmissible and requires the implementation of the strengthening of the bracing system. Analysis of the possibility of taking into account the inclusion in spatial work of roof steel shields welded to the upper belt of trusses which to a certain extent unload horizontal braces is presented in the paper.*

Key words: *steel frame, industrial building, horizontal bracings, bearing capacity, finite element analysis, roof steel shield.*

Связи в покрытии промышленного здания обеспечивают пространственную жесткость каркаса и удобство монтажа конструкций, закрепляют сжатые элементы из плоскости рамы в случае потери устойчивости, перераспределяют нагрузку между всеми рамами каркаса [1]. Система связей в покрытии включает в себя горизонтальные связи по нижним и верхним поясам ферм, а также вертикальные связи между фермами.

Поперечные горизонтальные связи по нижним поясам ферм в торцах здания воспринимают ветровую нагрузку и передают ее со стоек фахверка на вертикальные связи по колоннам. Кроме того, они закрепляют нижний пояс ферм из плоскости, сокращают его расчетную длину и уменьшают вибрацию нижнего растянуто-

© ТУСНИНА О. А., 2019

го пояса. Продольные горизонтальные связи обеспечивают совместную работу поперечных рам при действии крановых нагрузок.

Горизонтальные связи по верхнему поясу ферм необходимы для предотвращения смещений сжатого верхнего пояса из плоскости и обеспечения его требуемой расчетной длины. От этих связей можно отказаться, если применить жесткий диск покрытия (профилированный настил, закрепленный в каждой гофре к прогонам, опирающимся в узлах ферм [2], плиты или щиты, приваренные к фермам не менее, чем в трех точках), либо если достаточным является закрепление верхнего пояса из плоскости в точках крепления вертикальных связей по фермам, через которые обеспечивается соединение с горизонтальными связями по нижним поясам [3].

Для горизонтальных связей по фермам применяют крестовую или треугольную решетку *(рис. 1).* Раскосы крестовой решетки принято проектировать работающими только на растяжение [3]. При этом принимается, что горизонтальные усилия перераспределяются между рамами через растянутые раскосы, в то время как допускается потеря устойчивости сжатых раскосов. Таким образом, основная задача связей в покрытии — восприятие горизонтальных нагрузок и обеспечение требуемого закрепления поясов ферм из плоскости.

Эти положения по проектированию связей формировались в то время, когда были распространены ручные расчеты, когда отдельно рассматривалась поперечная рама промышленного сооружения и методами строительной механики выполнялся ее расчет на действующие нагрузки. Пространственная работа каркаса учитывалась только при расчете на загружение крановой нагрузкой, так как в этом случае включение в работу соседних рам оказывается достаточно значительным и требует быть принятым во внимание. Учет пространственной работы при этом производился путем введения упругоподатливых опор рамы, жесткость которых назначалась с учетом жесткости и конструктивного решения продольных дисков здания — ограждающих конструкций покрытия, горизонтальных связей, тормозных конструкций и др. [4—7].

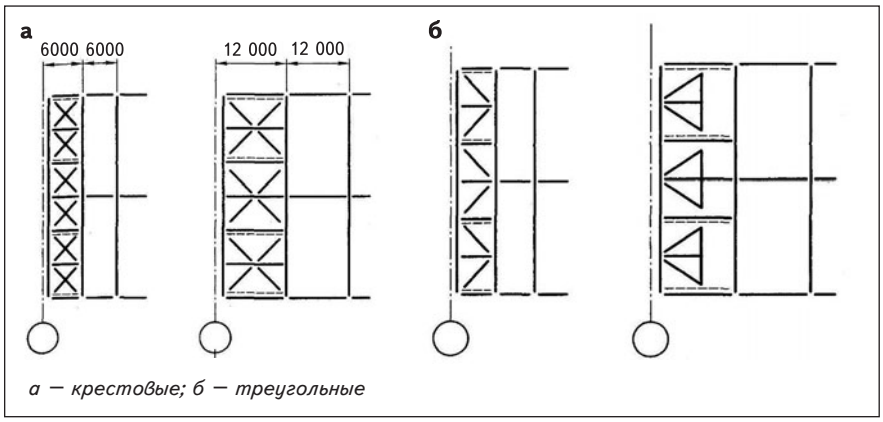


Рис. 1. ***Схемы связей по покрытию***

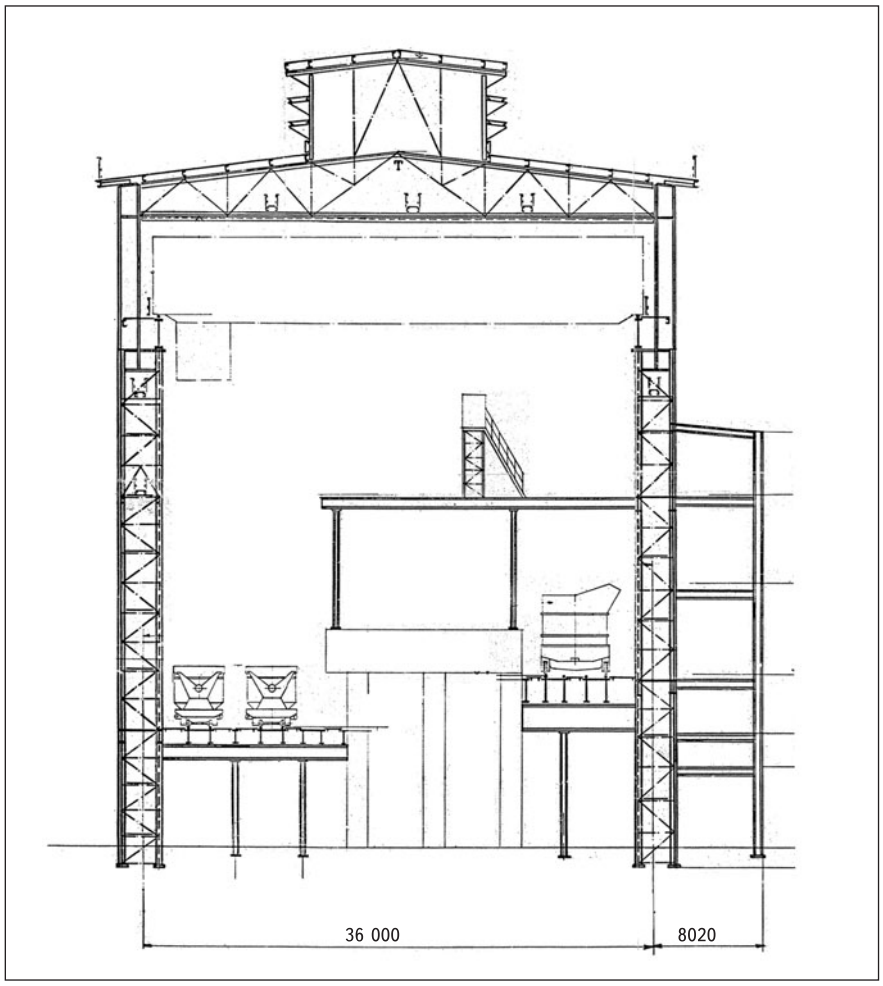


Рис. 2. ***Поперечный разрез цеха***

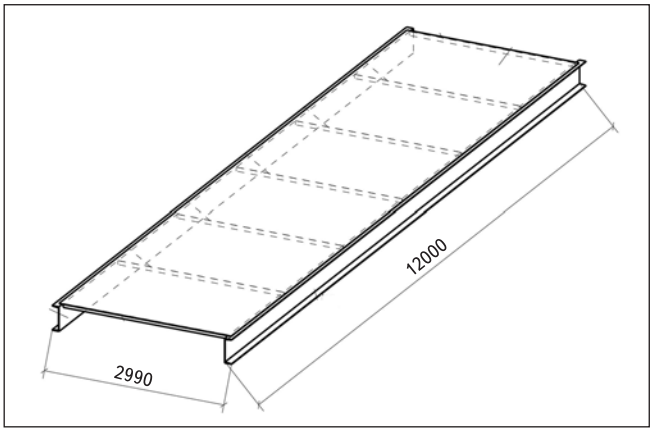


Рис. 3. *Стальной щит кровли*

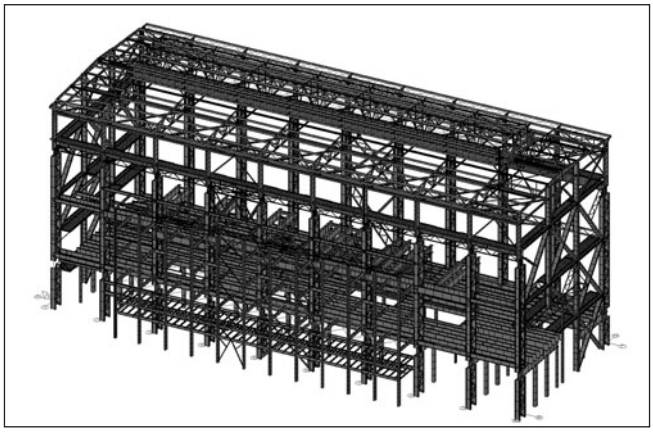
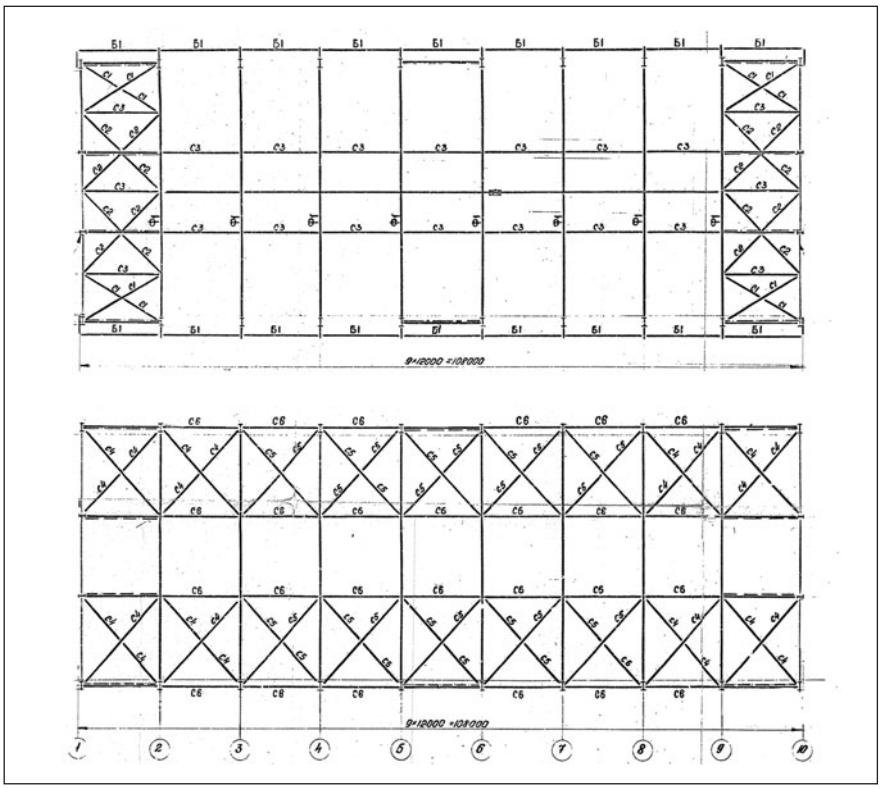


Рис. 5. *Расчетная схема миксерного отделения*

Однако в действительности при загружении каркаса сооружения всем комплексом нагрузок (постоянные, снеговые, ветровые, технологические и др.) продольные элементы включаются в работу при действии не только горизонтальных и крановых нагрузок, но и всех остальных. С развитием вычислительной техники появилась возможность проанализировать пространственную работу всего каркаса сооружения и оценить несущую способность конструкций.

Необходимость анализа несущей способности стальных каркасов промышленных зданий возникает при выполнении их реконструкции по причине технического переоснащения или изменения технологии производства, а также для оценки несущей способности конструкций с учетом фактического их состояния и соответствия современным строительным нормам и правилам [8—9]. В этой связи цель настоящей работы — анализ включения в пространственную работу каркаса горизонтальных связей в покрытии промышленного здания.

Рис. 4. *Схемы вертикальных и горизонтальных связей по фермам*

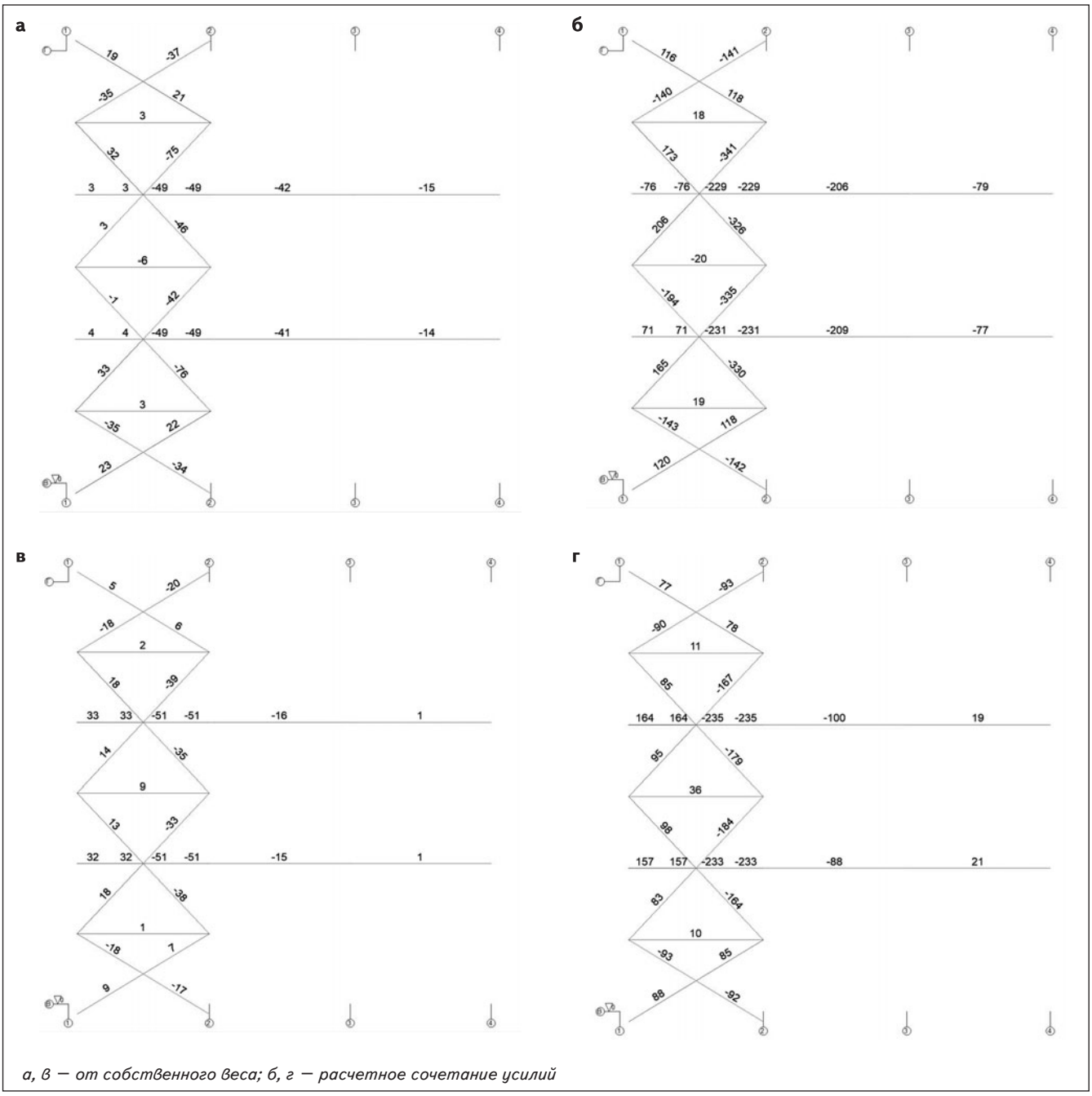


В качестве объекта исследования рассмотрен стальной каркас миксерного отделения конвертерного цеха № 2 Новолипецкого металлургического комбината (введен в строй в 1970-е гг.).

Покрытие цеха образовано стальными фермами с параллельными поясами пролетом 36 м *(рис. 2)*. Пояса и элементы решетки ферм выполнены из парных прокатных уголков. Ограждающие конструкции кровли — стальные щиты размером 3×12 м *(рис. 3)*. Щиты кровли привариваются к поясам стропильных ферм и являются развязкой верхнего пояса ферм.

Шаг колонн цеха в продольном направлении — 12 м. Горизонтальные связи по верхним поясам ферм имеют крестовую решетку, выполнены из одиночных прокатных уголков L160×10 и L140×9 и запроектированы, как работающие только на растяжение *(рис. 4)*. Вертикальные связи по фермам установлены с шагом 12 м.

Горизонтальные связи по нижним поясам ферм состоят из парных уголков L200×20 (тавр), а



а, в — от собственного веса; б, г — расчетное сочетание усилий

Рис. 6. ***Продольные усилия, кН, в связях по верхнему поясу ферм для схемы 1 (а, б) и схемы 2 (в, г)***

распорки имеют сварное сечение из четырех уголков L200×20, сваренных в коробку. У распорок по верхнему поясу ферм сечение состоит из двух гнутых швеллеров 200×100×6, а в пределах вертикальных связевых блоков, где они являются поясами вертикальных связевых ферм, — швеллер 20.

В программном комплексе SCAD 21.1 с использованием стержневых конечных элементов была составлена конечно-элементная модель каркаса цеха *(рис. 5)*. Были заданы следующие нагрузки, действующие на каркас: постоянные, снеговые, ветровые, крановые, температурные, полезные нагрузки на площадки, нагрузки от перемещающихся по площадкам на отметках +8.180 и +11.500 чугуновозных сцепок, технологические нагрузки от оборудования.

Для анализа включения в пространственную работу каркаса горизонтальных связей в покрытии, а также стальных щитов кровли, было выполнено три варианта расчета каркаса с учетом:

• всех горизонтальных связей без учета включения в работу на

Сравнение продольных усилий в элементах горизонтальных связей по покрытию

Загружение	Продольные усилия *N*, кН, при расчетных схемах		
	схема 1	схема 2	схема 3
По нижнему поясу ферм			
Собственный вес	–78/161	–70/175	–63/167
Снеговая нагрузка	–111/244	–94/268	–83/259
Ветровая нагрузка (по оси *X*)	–10/63	–10/59	–10/60
Ветровая нагрузка (по оси *Y*)	–147/175	–111/155	–109/150
Крановая (продольное торможение)	–5/5	–6/6	–6/6
Температурная нагрузка (–47,2 °С)	76	72	72
Расчетные сочетания усилий	–591/857	–521/921	–494/899
По верхнему поясу ферм			
Собственный вес	–76/33	–39/18	–
Снеговая нагрузка	–115/52	–56/27	–
Ветровая нагрузка (по оси *X*)	–6/5	–5/4	–
Ветровая нагрузка (по оси *Y*)	–89/90	–22/26	–
Крановая (продольное торможение)	–1/2	–2/2	–
Температурная нагрузка (–47,2 °С)	–15/10	–6/11	–
Расчетные сочетания усилий	–343/229	–184/98	–

Примечание. В числителе приведены значения максимальной сжимающей силы, в знаменателе – максимальная растягивающая сила.

сдвиг стальных щитов кровли *(схема 1);*

• всех горизонтальных связей и включения в работу на сдвиг щитов кровли *(схема 2);*

• горизонтальных связей только по нижнему поясу ферм, распорок, вертикальных связей по фермам и щитов кровли *(схема 3).*

Учет сдвиговой жесткости щитов покрытия выполнен путем рассмотрения ячейки, как шарнирно-стержневой системы, стержни которой имеют только продольную жесткость. Жесткости стержней назначены в соответствии с рекомендациями [10].

В *таблице* приведено сравнение продольных усилий в элементах связей, полученных по результатам расчета приведенных вариантов схем.

Из *таблицы* видно, что учет в работе щитов покрытия позволяет снизить усилие в раскосах горизонтальных связей по верхнему поясу ферм до 50 %, снижение продольных усилий в связях по нижнему поясу при этом менее значительно и составляет около 10 %.

Наибольшие усилия в распорках по верхнему и нижнему поясам ферм возникают в местах, где они являются поясами связевых ферм.

На *рис. 6* показаны эпюры продольных усилий в горизонтальных связях по верхнему поясу ферм от действия собственного веса, а также расчетные сочетания усилий. Раскосы связей включаются в работу при действии собственного веса, и при этом одновременно обе диагонали крестовой решетки связей могут оказаться сжатыми, что не учитывается при классическом подходе, при котором крестовая решетка связей рассматривается как работающая только на растяжение. При этом наибольшее значение сжимающего усилия может быть достаточно велико, что можно видеть на эпюре расчетных сочетаний усилий в связях.

Выводы

1. Горизонтальные связи в покрытии промышленного сооружения включаются в работу при загружении каркаса собственным весом, действии на покрытие снеговой нагрузки, нагрузки от технологической пыли и т. д. Традиционное представление о том, что при крестовой решетке часть связей растянуты и включены в работу, а остальные раскосы сжаты и возможно допустить их потерю устойчивости, не является верным, поскольку при действии на покрытие вертикальных нагрузок все элементы связей по верхним поясам оказываются сжатыми. При сочетаниях различных нагрузок сжатие, возникающее в связях от действия вертикальных нагрузок, может превосходить растяжение от действия горизонтальных нагрузок, и раскосы, которые должны включаться в работу как растянутые, по факту оказываются сжатыми и теряют устойчивость.

2. При потере устойчивости связей требуется выполнять их усиление, чтобы обеспечить работу этих элементов как на растяжение, так и на сжатие.

3. Учет в работе щитов покрытия позволяет снизить усилие в раскосах горизонтальных связей по верхнему поясу ферм до 50 %, снижение продольных усилий в связях по нижнему поясу ферм составляет около 10 %.

4. Принимать во внимание включение в пространственную работу на сдвиг стальных щитов покрытия возможно только в случае обеспечения их работоспо-

собного состояния и несущей способности, а также несущей способности узлов их крепления к фермам, с учетом усилий, которые они воспринимают и передают на каркас, при включении их в пространственную расчетную схему.

5. Учет работы стальных щитов как раскрепления верхнего пояса ферм возможен при обеспечении работоспособного состояния щитов и несущей способности сварных соединений щитов с фермами, которые обеспечат восприятие фиктивной силы, возникающей при потере устойчивости пояса фермы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гениев А. Н., Беленя Е. И.* Изучение пространственной работы конструкций промышленного цеха // Металлические конструкции : тр. МИСИ. М. : Госстройиздат, 1938. № 1. С. 81–105.
2. Рекомендации по применению стальных профилированных настилов нового сортамента в утепленных покрытиях производственных зданий. М. : Госстрой СССР, ЦНИИПроектстальконструкция им. Мельникова, 1985. 33 с.
3. *Кудишин Ю. И.* Металлические конструкции. М. : Академия, 2011. 688 с.
4. *Валь В. Н., Горохов Е. В., Уваров Б. Ю.* Усиление стальных каркасов одноэтажных производственных зданий при их реконструкции. М. : Стройиздат, 1987. 220 с.
5. *Гениев А. Н., Беленя Е. И.* Пространственная работа конструкций промышленного цеха: сб. тр. ЦНИИПС. М. : Стройиздат, 1940. С. 3–50.
6. *Беленя Е. И., Клепиков Л. В.* Исследования совместной работы оснований, фундаментов и поперечных рам стальных каркасов промышленных зданий. М. : Госстройиздат, 1967. 59 с.
7. *Бердичевский М. М.* Учет пространственной работы конструкций одноэтажных промышленных зданий // Материалы по стальным конструкциям : тр. ЦНИИПСК. М. : Госстройиздат, 1968. № 2. С. 101–121.
8. *Золина Т. В., Туснин А. Р.* Обоснование необходимости учета боковых сил, возникающих при крановых воздействиях на каркас здания // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 5. С. 17–23.
9. *Золина Т. В., Туснин А. Р.* Увеличение срока эксплуатации промышленного объекта введением конструктивных мер // Вестник МГСУ. 2015. № 6. С. 41–49.
10. Рекомендации по проектированию мембранных покрытий на прямоугольном плане для реконструируемых зданий и сооружений. М. : ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. 1986. 90 с.

REFERENCES

1. Geniev A. N., Belenya Ye. I. *Izuchenie prostranstvennoy raboty konstruktsiy promyshlennogo tsekha. Metallicheskie konstruktsii* [The study of spatial structures of industrial work shop]. Trudy MISI. Mosow, Gosstroyizdat Publ., 1938, no. 1, pp. 81–105. (In Russian).
2. *Recommendations for the use of steel profiled flooring of the new range in insulated coatings of industrial buildings*. Moscow, Gosstroy SSSR Publ., TsNIIProektstalkonstruktsiya im. Melnikova Publ., 1985. 33 p. (In Russian).
3. Kudishin Yu. I. *Metallicheskie konstruktsii* [Metal construction]. Moscow, Akademiya Publ., 2011. 688 p. (In Russian).
4. Val V. N., Gorokhov Ye. V., Uvarov B. Yu. *Usilenie stalnykh karkasov odnoetazhnykh proizvodstvennykh zdaniy pri ikh rekonstruktsii* [Strengthening of steel frames of single-storey industrial buildings during their reconstruction]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1987. 220 p. (In Russian).
5. Geniev A. N., Belenya Ye. I. The spatial structures of industrial work shop. *Sb. tr. TsNIIPS*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1940, pp. 3–50. (In Russian).
6. Belenya Ye. I., Klepikov L. V. *Research of joint work of bases, foundations and cross frames of steel frames of industrial buildings*. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1967. 59 p. (In Russian).
7. Berdichevskiy M. M. Account of spatial work of designs of one-storeyed industrial buildings. *Materialy po stalnym konstruktsiyam. Trudy TsNIIPSK*. Moscow, Gosstroyizdat Publ., 1968, no. 2, pp. 101–121. (In Russian).
8. Zolina T. V., Tusnin A. R. Justification for requested accounting side forces generated by crane impact on building frame. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*, 2015, no. 5, pp. 17–23. (In Russian).
9. Zolina T. V., Tusnin A. R. Increase in the service life of the industrial facility by the introduction of constructive measures. *Vestnik MGSU*, 2015, no. 6, pp. 41–49. (In Russian).
10. *Design recommendations membrane coatings on a rectangular plan for the reconstruction of buildings and structures*. Moscow, TsNIISK im. V.A. Kucherenko Publ., 1986. 90 p. (In Russian).

Для цитирования: *Туснина О. А.* Работа связей в покрытии промышленного здания со стальным каркасом // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 1. С. 37–42.

For citation: Tusnina O. A. Operation of Bracing System in the Roof of Industrial Building with Steel Frame. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2019, no. 1, pp. 37–42. (In Russian).