

## Сравнение живучести различных типов стальных арочных конструкций

*С.Б. Мозучев<sup>1</sup>, А.М. Ибрагимов<sup>2</sup>*

*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

**Аннотация:** Арочные конструкции покрытий зданий пролётного типа являются весьма выгодными по затрате материала в сравнении с балочными и рамными системами. Во многих случаях высокие архитектурные качества арочных конструкций позволяют получить выразительные интерьеры крупных залов. Вместе с тем, строительство большепролетных зданий всегда сопряжено с большими рисками, предъявляются высокие требования к безопасности таких зданий, а, следовательно, и повышенные требования по надёжности к несущим конструкциям, в том числе при возможных локальных разрушениях. Актуальным становится вопрос обеспечения живучести строительных конструкций в целом, и конструкций покрытий большепролетных зданий в частности. Для анализа живучести пологих арочных покрытий рассмотрен ряд конструктивных решений арочных конструкций различного типа. Рассмотрена работа арочных конструкций различного типа при возможных локальных обрушениях ряда элементов. Представлены пять конструктивных схем арочных конструкций, и рассмотрена работа каждой из них при исключении из работы наиболее нагруженных элементов (затяжек, стоек или подвесов). В том числе рассмотрена работа арочной конструкции с веерными затяжками с разрезным верхним поясом. Представлен сравнительный анализ живучести рассматриваемых конструктивных решений.

**Ключевые слова:** Арочное покрытие, арочная конструкция с веерными затяжками, живучесть, локальное разрушение, конструктивное решение, большепролетное покрытие, прогрессирующее обрушение.

### Введение

В качестве исходных данных для сравнительного анализа живучести рассматривается задача разработки конструкции большепролётного светопрозрачного покрытия Старого Гостиного Двора в Москве [1].

Предлагается рассмотреть живучесть следующих конструктивных схем арочных систем:

Схема 1 – двухшарнирная арочная система с лучевыми затяжками;

Схема 2 – арочная система с вспарушенным нижним поясом:

- а) нижний пояс объединен с верхним поясом жестко заземленными подвесами;

- б) нижний пояс объединен с верхним поясом шарнирно заземленными подвесами;

Схема 3 – арочная система с провисающим нижним поясом, объединенным с верхним поясом распорками:

- а) нижний пояс объединен с верхним поясом жестко заземленными распорами;
- б) нижний пояс объединен с верхним поясом шарнирно заземленными распорами;

Схема 4 – арочная система с провисающим нижним поясом, объединенным с верхним поясом двумя V-образными стойками;

Схема 5 – арочная система с разрезным верхним поясом и веерными затяжками.

Сравнительный анализ выполняется по следующим исходным данным для выбранных схем: пролет  $L = 70$  м; стрела подъема  $f_1 = 7$  м (1/10 от пролета). Работа конструктивных схем рассматривается под единичной равномерно-распределенной погонной нагрузкой  $p = 1$  кН/м и под полезной равномерно-распределенной погонной нагрузкой  $p = 20$  кН/м. В качестве сечений пояса арки используется прокатный профиль по СТО АСЧМ. Материал для всех конструкций арок принимается сталь С345.

### **Методология**

Для предварительной оценки живучести численные расчеты выполнялись в линейной постановке на равномерно-распределенную нагрузку. В каждой конструктивной схеме пошагово исключались наиболее нагруженные элементы распорок, подвесов и затяжек.

### **Основная часть**

Типы обозначенных конструктивных схем арочных конструкций представлены на Рис.1

Схема 1

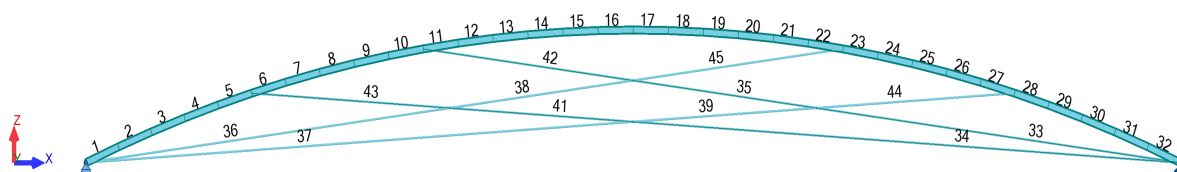


Схема 2

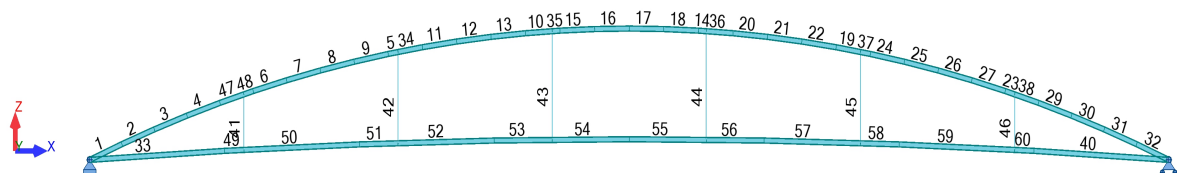


Схема 3

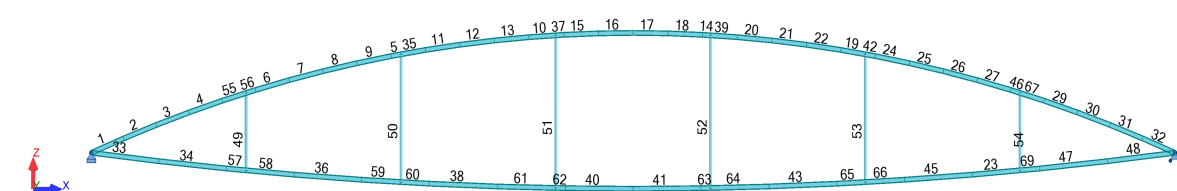


Схема 4

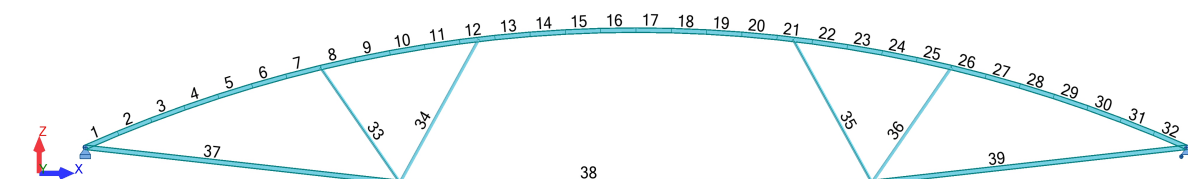


Схема 5

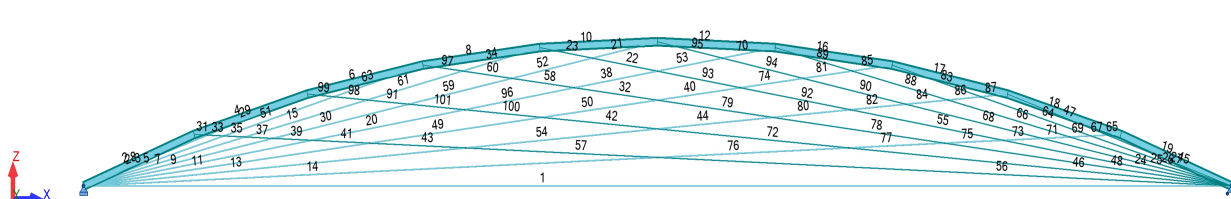


Рис. 1. – Типы конструктивных схем стальных арочных конструкций

По результатам линейного расчета на равномерную полезную нагрузку были приняты следующие сечения элементов рассматриваемых конструктивных схем (Табл. 1).

Таблица № 1

Сравнение вариантов конструктивных решений арочных конструкций по результатам линейного расчета на равномерную нагрузку

№ Схемы	$L$ , м	$f_1$ , м	$f_2$ , м	$p$ , кН/м	Верх ний пояс	Нижн ий пояс	Распоры	Подвесы	Затяжки	
1	70	7	–	20	I40K5	–	–	–	Круг 120	
2	а	70	7	1,1	20	I30K2	I30K2	–	Круг 60	–
	б					I30K2	I30K2	–	Круг 60	–
3	а	70	7	2,1	20	I30K2	I30K2	Тр180x5	–	–
	б					I30K2	I30K2	Тр180x5	–	–
4	70	7	2,1	20	I30K2	I30K2	Тр180x5			
5	70			20	I40K2	–	–	–	Круг 120	

Для анализа живучести рассматриваемых схем, пошагово исключаем из работы каждой из них наиболее нагруженные элементы распорок, подвесов и затяжек. Представлены результаты анализа (Табл. 2).

Для Схемы 1 при исключении наиболее нагруженного на этапе нормальной работы стержня №45, в верхнем поясе арки возникают разрушающие внутренние усилия [2,3], что приводит к выводу из работы участка верхнего пояса в зоне элемента №27 (рис. 2), а, следовательно, к лавинообразному обрушению верхнего пояса и всей конструкции арки [4-6].

Для Схемы 2а допускается исключение из работы одного из подвесов (№44), при котором схема остаётся геометрически не изменяемой [7,8], т.е.

демонстрирует определенную живучесть, однако, при исключении из работы следующего стержня (№43) происходит полное обрушение элементов верхнего и нижнего пояса. Для Схемы 2б допускается обрушение двух подвесов (№ 44, 43), после чего также происходит лавинообразное обрушение конструкций арки [9].

Таблица № 2

Анализ живучести конструктивных схем стальных арочных конструкций

№ Схемы / Шаг	№ Стержня									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	45	–	–	–	–	–	–	–	–	–
2	а	44	43	–	–	–	–	–	–	–
	б	44	43	42	–	–	–	–	–	–
3	а	52	51	53	–	–	–	–	–	–
	б	52	51	50	–	–	–	–	–	–
4	34	–	–	–	–	–	–	–	–	–
5	1	20	21	23	26	24	25	5	–	–

В Схеме 3а при выводе из работы второго подвеса №51, теряет устойчивость элемент №53, что приводит к лавинообразному обрушению поясов арки. В Схеме 3б конструкция сохраняет целостность при исключении элементов №№ 52, 51, однако при выводе из работы стержня № 50 также происходит лавинообразное обрушение конструкции [10].

В Схеме 4 достаточно исключения из работы одного из распоров (№34) для обрушения участка верхнего пояса, а, следовательно, для инициирования реакции лавинообразного обрушения [11].

Схема 1

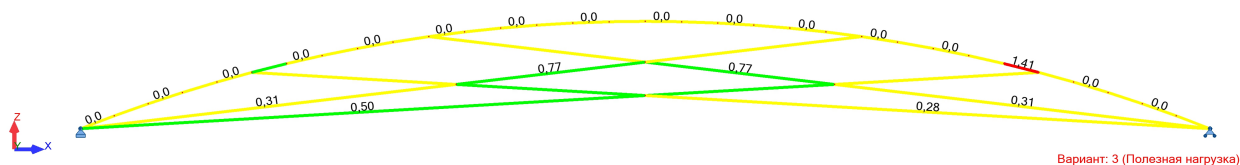


Схема 2а

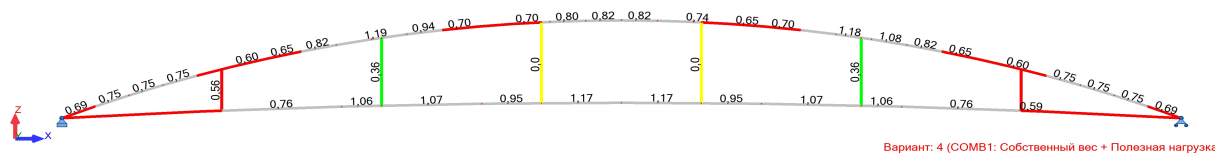


Схема 2б

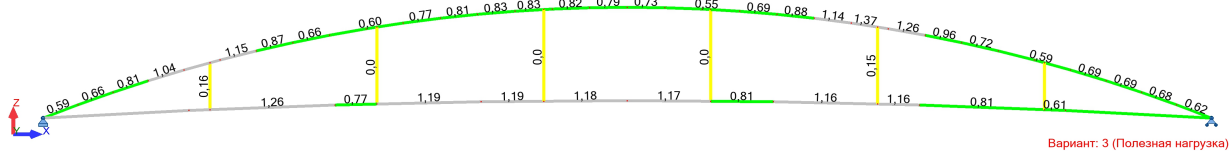


Схема 3а

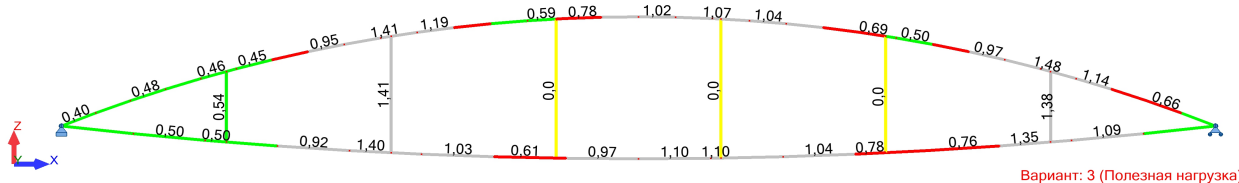


Схема 3б

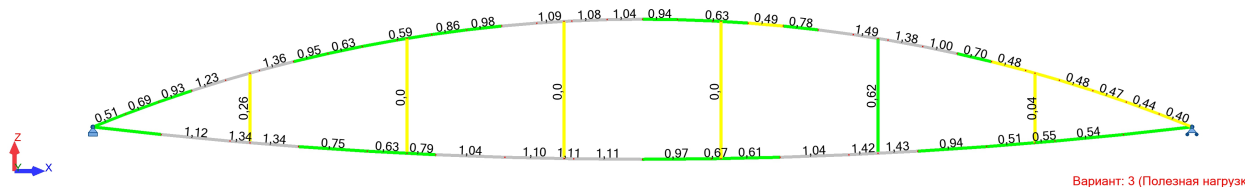


Схема 4

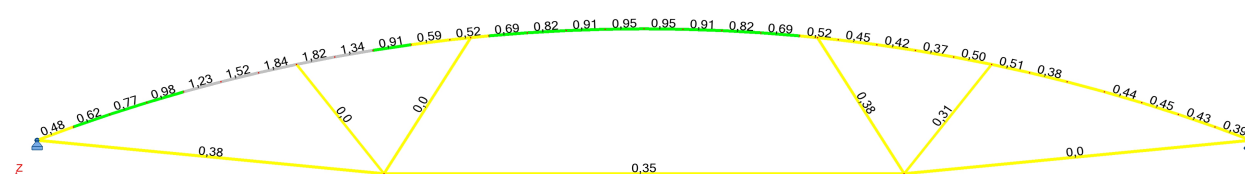


Схема 5

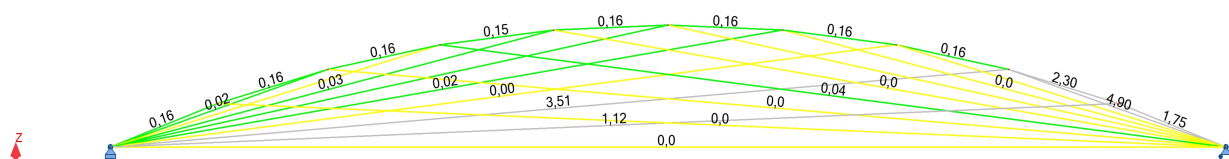


Рис. 2. – Коэффициент использования несущей способности сечения

При анализе Схемы 5 – арочная конструкция с веерными затяжками – последовательно исключаются затяжки № 1, 20, 21, 23, 26, 24, т.е. допускается 6 шагов обрушения, при которых конструкция арки сохраняет свою геометрическую неизменяемость - т.е. демонстрирует живучесть. Затяжка №25 теряет прочность в следствие перераспределения разрушающих усилий, в результате чего выходит из работы самостоятельно, таким образом шаг 7 становится началом прогрессирующего обрушения конструкции арки [12]. В шаге 8 происходит разрушение стержня №5, после чего из работы выходят элементы верхнего пояса – конструкция разрушается.

### **Выводы**

Представлен сравнительный анализ живучести пяти конструктивных схем арочных конструкций, и рассмотрена работа каждой из них при исключении наиболее нагруженных элементов (затяжек, стоек или подвесов). В результате данного анализа установлено, что арочная система с разрезным верхним поясом и веерными затяжками (Схема 5) обладает наибольшей живучестью, а именно – при выведении из работы наиболее нагруженных стержней система изменяется статически, но геометрия самой конструкции не нарушается. Таким образом, при использовании конструкций данного типа в строительстве можно предотвратить возможность лавинного обрушения покрытий зданий большого пролета.

## Литература

1. Еремеев П.Г. Особенности проектирования уникальных большепролетных зданий и сооружений. Современное промышленное и гражданское строительство. 2006. № 1. Т. 2. С. 5-15.
2. Кудишин Ю.И., Дробот Д.Ю. Живучесть строительных конструкций - важный фактор снижения потерь в условиях аварийных ситуаций. Металлические конструкции. 2009. Т. 15. № 1. С. 59-71.
3. Назаров Ю.П., Городецкий А.С., Симбиркин В.Н. К проблеме обеспечения живучести строительных конструкций при аварийных воздействиях. Строительная механика и расчет сооружений. 2009. № 4. С.5-9
4. Еремеев П.Г. Справочник по проектированию современных металлических конструкций большепролетных покрытий. М. : Изд-во АСВ, 2011. 256 с.
5. Ибрагимов А.М., Кукушкин И.С. Анализ живучести лучевой арки. Промышленное и гражданское строительство. 2013. №8 С.63-65
6. Ибрагимов А.М., Кукушкин И.С. Стропильная конструкция — лучевая хордовая арка. Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 9. С. 49-51.
7. Ибрагимов А.М., Кукушкин И.С. Сравнительный анализ вариантов конструктивных решений пологих арочных покрытий зданий. Вестник МГСУ. 2014. № 3. С. 59-66.
8. Де Бьяджи В. Повышение живучести сооружений с помощью усложнения конструктивных схем. Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 4 (51). С. 92-100.
9. Туснин А.Р., Бергер М.П. Испытания плоских ферм с повреждениями. Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 10. С. 12-18.
10. Трастян Н.А., Линьков Н.В. Разработка рамных узлов стальных конструкций с учетом пластических деформаций. Инженерный вестник Дона.



2019. № 1, URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5646](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5646)

11. Доронин С.В., Филиппова Ю.Ф. Оценка живучести структурно-сложных силовых конструкций на основе сценариев накопления повреждений. Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2019. № 4 (41). С. 39-54.

12. Доронин С.В., Филиппова Ю.Ф. Оценка живучести повреждаемых колебательных систем стержневого типа. Динамика систем, механизмов и машин. 2019. Т. 7. № 1. С. 48-54.

### References

1. Yermeev P.G. Osobennosti proektirovaniya unikal'nyh bol'sheproletnyh zdaniy i sooruzhenij. Sovremennoe promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2006. No 1, Vol. 2, pp. 5-15.

2. Kudishin Yu.I., Drobot D.Yu. ZHivuchest' stroitel'nyh konstrukcij - vazhnyj faktor snizheniya poter' v usloviyah avarijnyh situacij. Metallicheskie konstrukcii. 2009. Vol. 15, No. 1, pp. 59-71

3. Nazarov Yu.P., Gorodetsky AS, Simbirkin V.N. K probleme obespecheniya zhivuchesti stroitel'nyh konstrukcij pri avarijnyh vozdeystviyah. Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij. 2009. No. 4, pp. 5-9

4. Yermeev P.G. Spravochnik po proektirovaniyu sovremennykh metallicheskih konstruktsiybol'sheproletnykh pokrytij [The manual on designing of wide-span roofs modern metal structures]. Moscow: Publ. ASV, 2011. 256 pp.

5. Ibragimov A.M., Kukushkin I.S. Analiz zhivuchesti luchevoy arki. Industrial and Civil Engineering. 2013. No. 8, pp. 63-65.

6. Ibragimov A.M., Kukushkin I.S. Stropil'naya konstruktsiya — luchevaya khordovaya arka. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2013. No. 9, pp. 49-51.

7. Ibragimov A.M., Kukushkin I.S. Sravnitel'nyy analiz variantov



konstruktivnykh resheniy pologikh arochnykh pokrytiy zdaniy. Vestnik MGSU. 2014. No. 3, pp. 59-66.

8. De Biagi V. Povyshenie zhivuchesti sooruzhenij s pomoshch'yu uslozhneniya konstruktivnyh skhem. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2015. No. 4 (51), pp.92-100.

9. Tusnin A.R., Berger M.P. Ispytaniya ploskih ferm s povrezhdeniyami. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2019. No. 10, pp. 12-18.

10. Trastyan N.A., Lin'kov N.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, No. 1, URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5646](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5646)

11. Doronin Pp.V., Filippova YU.F. Ocenka zhivuchesti strukturno-slozhnyh silovyh konstrukcij na osnove scenarijev nakopleniya povrezhdenij. Vestnik Inzhenernoj shkoly Dal'nevostochnogo federal'nogo universiteta. 2019. No. 4 (41), pp. 39-54.

12. Doronin Pp.V., Filippova YU.F. Ocenka zhivuchesti povrezhdaemyh kolebatel'nyh sistem sterzhneвого типа. Dinamika sistem, mehanizmov i mashin. 2019. T. 7. No. 1, pp. 48-54.