

++Анализ нормативного расчета по образованию трещин гибких железобетонных стоек при разных напряженно-деформированных состояниях конструкций

С.В. Георгиев, А.И. Соловьева, А.Ю.Кубасов

Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону.

Аннотация: Рассмотрены результаты экспериментальных исследований по образованию трещин железобетонных стоек двух гибкостей $\lambda_n=10$ и 20 , испытанных при трех эксцентриситетах приложения нагрузки $e_0=0; 2,0\text{см} (0,16h)$ и $4,0\text{см} (0,32h)$. На основании экспериментальных данных и результатов расчета по образованию трещин было установлено, что значения теоретических моментов трещинообразования опытных сжатых элементов существенно отличаются от экспериментальных. Был выполнен анализ влияния эксцентриситета приложения нагрузки и гибкости образцов на сходимость теоретических и экспериментальных моментов трещинообразования в образцах, а также рассмотрены возможные причины изменения несущей способности образцов.

Ключевые слова: бетон, железобетон, сжатые элементы, гибкость, эксцентриситет, трещина, трещиностойкость.

В современном строительстве подавляющее количество несущих конструкций изготавливается из железобетона [1,2]. Наибольшая доля относится к изгибаемым железобетонным элементам, для которых необходимыми требованиями являются обеспечение прочности и деформативности [3-4], т.е. выполнение требований расчёта по двум группам предельных состояний. В области сжатых элементов в основном используются конструкции малой и средней гибкости, которые разрушаются от действия продольных сил и изгибающих моментов. В качестве основного несущего материала в сжатых конструкциях выступает бетон, на который приходится 70-80% обеспечения несущей способности. Известны результаты ряда научных исследований по увеличению характеристик прочности и деформативности материала, с целью дальнейшего увеличения прочности конструкций. В ряде случаев весьма эффективно использование высокопрочного бетона [5], высокую эффективность показала конструкция колонн без поперечной арматуры, но с увеличенной толщиной защитного слоя бетона, выполняющего роль сдерживающего фактора от потери

устойчивости продольной арматуры [6, 7], ведутся работы по исследованию новых методов повышения прочности бетона на сжатие с использованием углеродных холстов [8-10]. Однако существует ряд сжатых конструкций большой гибкости, в которых проектирование выполняется по методикам расчета изгибаемых элементов, особенно это касается образцов, работающих с большим эксцентриситетом приложения нагрузки.

По результатам обследования и оценки технического состояния строительных конструкций [11], часто, причиной усиления конструкций, является нарушение требований норм к предельному прогибу гибких сжатых элементов. Согласно СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» (Приложение Д), для сжатых железобетонных колонн существуют ограничения горизонтальных предельных прогибов от крановых нагрузок от $h/500$ до $h/2500$, где h – высота колонны. Значение предельного прогиба зависит от режима работы крана (от 1К до 8К), но при этом значение предельного прогиба не должно быть меньше 6 мм. Данные ограничения заставляют выполнять расчет по второй группе предельных состояний железобетонных колонн промышленных зданий, по методике, разработанной для гибких железобетонных элементов, точность которой остается под вопросом в данной области. На практике, актуальность данного исследования можно подтвердить на примере колонны промышленного здания с мостовыми кранами [12].

Рассмотрим типовой проект промышленного здания с мостовыми кранами. Крайняя колонна, с консолью для опирания подкрановой балки, имеет высоту 8 м от подошвы фундамента до головки подкранового рельса, то есть предельные прогибы, согласно приведенным ранее ограничениям, составляют от 16 до 6 мм, в зависимости от группы режимов работы крана. Высота сечения колонны составляет 0,8 м, следовательно данная колонна является гибкой ($\lambda_h=10$). Учитывая, что нагрузка от крана передается на

консоль колонны, по результатам вычислений, эксцентриситет приложения нагрузки равен 0,575 м, т.е. нагрузка выходит за пределы ядра сечения, следовательно, колонна относится к гибкой конструкции, работающей с большим эксцентриситетом приложения нагрузки, и, учитывая ограничения по прогибам, требуется расчёт по второй группе предельных состояний, в который входит расчёт по образованию трещин.

Для решения данного вопроса на кафедре «Железобетонных и каменных конструкций» Донского государственного технического университета были выполнены экспериментальные исследования [13], одной из целей которых было определение момента трещинообразования железобетонных гибких стоек при разных гибкостях λ_h и эксцентриситетах приложения нагрузки e_0 .

Опытные образцы были выполнены двух гибкостей $\lambda_h=10$; 20 и испытывались при трех начальных эксцентриситетах приложения нагрузки $e_0=0$; 2,0см (0,16h) и 4,0см (0,32h). Конструкции каркасов опытных образцов приведены в работе [14]. Было принято решение провести анализ результатов расчетов и сравнение их с экспериментальными значениями моментов трещинообразования при 2-х уровнях нагрузки (0,8 и 0,95 N_{ult}), то есть на эксплуатационной и предразрушающей стадии нагружения.

Всего было испытано 6 образцов. В процессе испытания были определены «чистые» прогибы стоек (исключались смещения на приопорных участках) по прогибомерам, установленным в трёх точках по длине конструкций. Дополнительно были установлены тензодатчики в середине по длине стоек, для выявления момента появления поперечной трещины. Тензодатчики устанавливались последовательно в количестве 3-х штук, с базой 5 см. Методика испытания представлена в работе [15]. В результате эксперимента были зафиксированы на этапах, равных 10 % от разрушающей нагрузки, экспериментальные прогибы и момент трещинообразования. Если

трещина в образце образовывалась, используя экспериментальные значения прогибов, по формуле $M^{exp} (e_0 + f^{exp})$ были получены моменты при уровнях нагрузки 0,8 и 0,95 N_{ult} . Согласно показаниям тензодатчиков, было установлено, появилась ли трещина в сечении или нет, и, в случае появления определён уровень нагрузки, с последующим вычислением момента трещинообразования M_{crc}^{exp} через экспериментальные прогибы при соответствующем уровне нагрузки по формуле $M_{crc}^{exp} = N_{crc} * f_{exp}$.

С другой стороны, были рассчитаны теоретические моменты трещинообразования M_{crc}^{theor} согласно методике СП 63.13330.2018 (рис.1). Значения теоретических моментов сравнивались с экспериментальными и был сделан анализ актуальности расчетных методик в области расчета гибких внецентренно сжатых элементов.

Целью данного исследования является определение точности расчётной методики по образованию трещин, согласно СП 63.13330.2018 для внецентренно сжатых железобетонных стоек большой гибкости при разных эксцентриситетах приложения нагрузки, используя экспериментальные значения моментов трещинообразования. Алгоритм расчета момента трещинообразования M_{crc}^{theor} представлен на рис. 1.

На блок-схеме слева, указана цепочка формул для расчета теоретического значения момента образования поперечных трещин M_{crc}^{theor} , справа – экспериментального M^{exp} . Оба момента определяются при одинаковом уровне нагрузки N^{exp} . Результаты расчета M_{crc}^{theor} и M^{exp} при двух уровнях нагрузки приведены в табл. 1

Экспериментальные значения моментов M_{crc}^{exp} , определенных по тензодатчикам, представлены в ст. 12, Табл. 1.

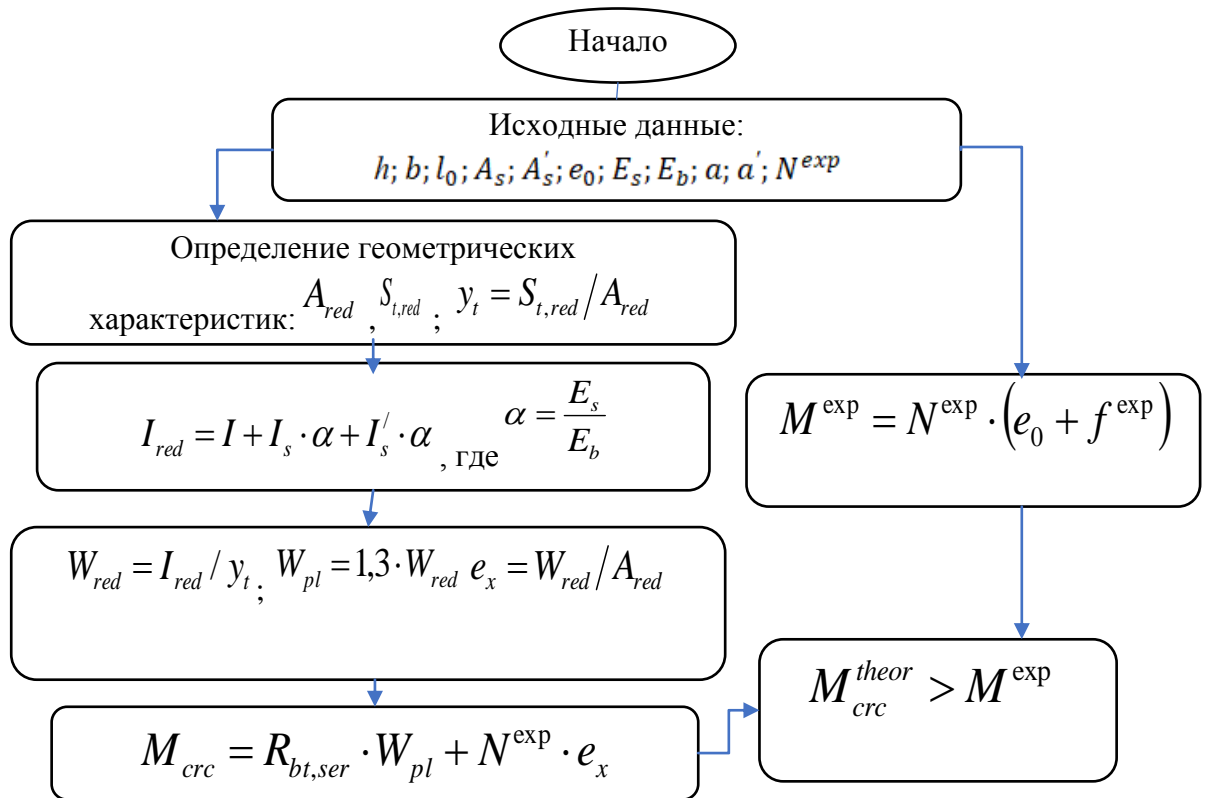


Рис. 1. Блок-схема нормативного расчета железобетонных конструкций по образованию трещин.

Таблица 1

Результаты расчетов стоек по образованию трещин

№ п/п	Шифр образца	Параметры расчета			0,8N _{ult}			0,95N _{ult}			M _{crc} ^{exp} , H·м
		λ _h	e ₀ , мм	R _{b,n} ^{exp} , МПа	M _{crc} ^{theor} , H·м	M _{exp} , H·м	трещи на	M _{crc} ^{theor} , H·м	M _{exp} , H·м	трещи на	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	АК	10	2	43,5	20900	2300,0	нет	24400	3168,3	нет	нет
2	БК	10	22	38,92	11600	12466,2	да	13400	15422,8	да	нет
3	ВК	10	42	43,5	8700	15744,0	да	10000	20020,3	да	7260
4	АГ	20	4	39,16	15100	6809,4	нет	17500	12739,6	нет	нет
5	БГ	20	24	39,16	8600	11873,6	да	9800	16748,5	да	14500
6	ВГ	20	44	43,44	6000	12047,4	да	6700	17047,8	да	7900

Примечания: 1. Шифр опытных стоек принят следующим: Первая буква шифра, заглавная буква русского алфавита, обозначает, при каком осевом эксцентриситете (e_0) приложения нагрузки испытывалась конструкция. Литер «А» - стойки, испытанные при случайном эксцентриситете приложения нагрузки, «Б» - образцы, испытанные при приложении нагрузки 2 см относительно оси ($e_0=2\text{см}$), В - тоже при $e_0=4\text{см}$. Вторые буквы шифра, также заглавные буква русского алфавита, обозначают гибкость конструкции. «К» - короткие стойки гибкостью ($\lambda_h=10$), «Г» - гибкие стойки ($\lambda_h=20$). 2. В столбцах 8, 11,7 под заголовком «трещина», слово «да» - означает, что трещина в стойке по результатам эксперимента появилась, «нет» - трещины нет.

Анализ результатов экспериментов и теоретических вычислений моментов трещинообразования удобно производить для стоек, объединённых эксцентриситетом приложения нагрузки.

Для образцов, испытанных при случайном эксцентриситете, то есть стоек АК и АГ, для случаев эксплуатационной и предразрушающей нагрузки, как, согласно результатам теоретического расчёта, так и согласно экспериментальным данным моментов трещинообразования, трещины в образцах не появились. Теоретические моменты трещинообразования при 2-х уровнях нагрузки существенно превышают экспериментальные моменты. Согласно показаниям тензодатчиков, трещины в процессе испытания не появились.

Для стоек, испытанных при начальном эксцентриситете приложения нагрузки, равном 2,0 см, наблюдается разная картина. Для образца шифра ВГ трещина в процессе эксперимента появилась при уровне нагрузке 14,5кНм, что примерно совпадает с моментом при уровне нагрузки $0,95N_{ult}$. Однако, сравнивая теоретические моменты трещинообразования M_{crc}^{theor} с экспериментальными M_{exp} было выявлено, что теоретические моменты занижены на 38% для эксплуатационной и на 70% для предразрушающей нагрузки, то есть результаты нормативного расчета занижают моменты

трещинообразования. Можно сделать вывод, что нормативная методика расчета несовершенна и разработана таким образом, что конструкции проектируются с дополнительным запасом прочности.

Согласно теоретическим M_{crc}^{theor} и, соответствующим экспериментальным M_{exp} моментам, для стойки БК трещина должна была появиться, однако, согласно данным тензодатчиков, она не была обнаружена. При этом теоретические моменты M_{crc}^{theor} по сравнению с экспериментальными значениями M_{exp} занижены на 7% и 15% при эксплуатационной и разрушающей нагрузке соответственно. Можно сделать вывод, что и в этом случае нормативный расчёт существенно занижает теоретические моменты трещинообразования M_{crc}^{theor} , отсюда и, согласно результатам расчётов, делается неправильный вывод о том, что трещина в процессе эксперимента должна появиться. Это подтверждается моментом трещинообразования M_{crc}^{exp} , определенного согласно тензодатчиков, для стоек, испытанных при большом эксцентриситете и приложении нагрузки, равном 4,0 см (0,32h). Для стоек обеих гибкостей результаты расчёта показывают достаточно неплохое совпадение с экспериментальными данными. В обоих случаях трещина образовалась и теоретические моменты трещинообразования M_{crc}^{theor} при обоих уровнях нагрузки существенно меньше экспериментальных M_{exp} и достаточно близки к экспериментальному моменту трещинообразования M_{crc}^{exp} . Расхождение составляет 19% и 37% для короткой стойки при уровнях нагрузки 0,8 и 0,95 и 31; 17% - для гибкой стойки.

В результате анализа проведенных выше экспериментов и теоретических расчетов можно сделать следующие выводы: методика нормативного расчета по образованию трещин актуальна для центрально сжатых стоек и стоек, работающих с большим эксцентриситетом приложения нагрузки $4,0\text{см}(0,32h)$. Для образцов, работающих с малым эксцентриситетом приложения нагрузки, имеются большие расхождения, а для короткой стойки имеет место неправильный вывод появления трещины в сечении. Это является проблемой для дальнейшего вычисления прогиба образца, в методику расчета которого входят результаты расчёта стоек по образованию трещин. В процессе неправильного вывода по результатам расчёта по образованию трещин меняются расчетные формулы по вычислению величины прогибов. Следовательно, для стоек, работающих как изгибаемый элемент, то есть с большим эксцентриситетом приложения нагрузки и гибкости, методика расчета по образованию трещин актуальна и не требует предложений по совершенствованию.

Для центрально сжатых стоек теоретические моменты трещинообразования $M_{сгс}^{theor}$ больше экспериментальных в 9 и 7,7 раз для эксплуатационной и разрушающей нагрузки соответственно, следовательно, выполнение расчёта по образованию трещин, является неактуальным для центрально сжатых конструкций.

Для образцов, работающих с небольшим эксцентриситетом приложения нагрузки $2,0\text{см}(0,16h)$, имеет место существенное расхождение результатов теоретического расчета и экспериментальных моментов, при этом делается неправильный вывод по определению образования трещины, что в дальнейшем приведет к неправильному вычислению прогибов данных конструкций. Следовательно, данная методика расчёта для подобных конструкций требует дополнительной доработки.

Литература

1. Гвоздев А.А. Новое в проектировании бетонных и железобетонных конструкций // М.: Стройиздат, 1978. 208с.
 2. Плевков В.С., Колмогоров А.Г. Расчет железобетонных конструкций по Российским и зарубежным нормам // Учебное пособие. Томск: Изд-во «Печатная мануфактура». 2009. 496с.
 3. Залесов А.С. Развитие методов расчета железобетонных конструкций в России // 80-летие НИИЖБ им. А.А. Гвоздева, Сборник научных статей, 2007. С. 5-10.
 4. Аксенов В.Н., Аксенов Н.Б., Блягоз А.М., Хутыз А.М. Исследование работы сжатых железобетонных элементов из высокопрочного бетона // Новые технологии. 2012. № 4. С. 32-35.
 5. Muradyan V., Mailyan D., Osadchenko S., Mkrtchyan A. Investigation of reinforced concrete columns with recessed longitudinal rods without transverse reinforcement // MATEC Web of Conferences. 2017. С. 02008.
 6. Мурадян В.А. Расчет оптимальной величины защитного слоя бетона колонн квадратного сечения // Инженерный вестник Дона. 2013. № 3. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1846
 7. Костенко А.Н. Прочность и деформативность центрально и внецентренно сжатых кирпичных и железобетонных колонн, усиленных угле и стекловолокном // Автореферат. дисс. канд. техн. Наук, Москва, 2010. 26с.
 8. Benzaid R., Mesbah H.A., Amel B. Experimental investigation of concrete externally confined by CFRP composites // 5th International Conference on Integrity-Reliability-Failure (IRF). Inegiinst engenharia mecanica e gestao industrial, 2016. pp. 595-602.
 9. Mander J.B., Priestly Park R. Theoretical stress-strain model for confined concrete // ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 114 No. 8. 1988, pp. 1804-1826.
-

10. Аксенов В.Н., Аксенов Н.Б. Обследование и оценка технического состояния строительных конструкций // Ростов-на-Дону, 2018. 111с.
11. Заикин А.И. Проектирование железобетонных конструкций многоэтажных промышленных зданий // 2005. 200 с.
12. Польской П.П., Георгиев С.В. О программе исследования сжатых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами на основе углепластика // Научное обозрение, 2014, № 10-3. С. 662-666.
13. Маилян Д.Р., Польской П.П., Георгиев С.В. Конструкция каркасов и схемы испытания опытных стоек, усиленных углепластиком // Научное обозрение, 2014, №10-3. С. 667-670
14. Маилян Д.Р., Польской П.П., Георгиев С.В. Методики усиления углепластиком и испытания коротких и гибких стоек // Научное обозрение, 2014, № 10-2. С. 415-418.
15. Иванов Ю.В. Реконструкция зданий и сооружений: Усиление, восстановление, ремонт // А.С.В, 2012. 312с.
16. Михайлов В.В. Восстановление железобетонных конструкций с применением расширяющегося цемента // Стройиздат Наркомстроя -1945, 27с.
17. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона // Стройиздат. 1996. 412с.
18. Беккиев М.Ю. Методика расчетной оценки прочности подкрановых строительных конструкций здания ГЭС // Инженерный вестник Дона. 2012. № 2. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/809

References

1. Gvozdev A.A. Novoe v proektirovanii betonnyh i zhelezobetonnyh konstrukcij [New in the design of concrete and reinforced concrete structures]. М.: Strojizdat, 1978. P.208.
-



2. Plevkov V.S., Kolmogorov A.G. Raschet zhelezobetonnyh konstrukcij po Rossijskim i zarubezhnym normam [Calculation of reinforced concrete structures according to Russian and foreign standards]. Uchebnoe posobie. Tomsk: Izd-vo «Pechatnaja manufaktura». 2009. P. 496.
 3. Zalesov A.S. 80-letie NIIZhB im. A.A. Gvozdeva, Sbornik nauchnyh statej, 2007. pp.5-10.
 4. Aksenov V.N., Aksenov N.B., Bljagoz A.M., Hutyž A.M. Novye tehnologii. 2012. № 4. pp.32-35.
 5. Muradyan V., Mailyan D., Osadchenko S., Mkrtychyan A. MATEC Web of Conferences. 2017. C. 02008.
 6. Muradjan V.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013. № 3. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2013/1846
 7. Kostenko A.N. Prochnost' i deformativnost' central'no i vnecentrenno szhatyh kirpichnyh i zhelezobetonnyh kolonn, usilennyh ugle i steklovoloknom [Strength and deformability of centrally and eccentrically compressed brick and reinforced concrete columns reinforced with carbon and fiberglass]. Avtoreferat. diss. kand. tehn. Nauk, Moskva, 2010. P. 26
 8. Benzaid R., Mesbah H.A., Amel B. 5th International Conference on Integrity-Reliability-Failure (IRF). Inegiinst engenharia mecanica e gestao industrial, 2016. pp. 595-602.
 9. Mander J.B., Priestly Park R. ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 114 No. 8. 1988, pp. 1804-1826.
 10. Aksenov V.N., Aksenov N.B. Obsledovanie i ocenka tehničeskogo sostojanija stroitel'nyh konstrukcij [Inspection and assessment of the technical condition of building structures], Rostov-na-Donu, 2018.111p.
 11. Zaikin A.I. Proektirovanie zhelezobetonnyh konstrukcij mnogojetazhnyh promyshlennyh zdanij [Design of reinforced concrete structures for multi-storey industrial buildings]. 2005. P. 200.
-



12. Pol'skoj P.P., Georgiev S.V. Nauchnoe obozrenie, 2014, № 10-3. pp.662-666.
13. Mailjan D.R., Pol'skoj P.P., Georgiev S.V. Nauchnoe obozrenie, 2014, №10-3. pp.667-670.
14. Mailjan D.R, Pol'skoj P.P., Georgiev S.V. Nauchnoe obozrenie, 2014, № 10-2. pp. 415-418.
15. Ivanov Ju.V. Rekonstrukcija zdaniy i sooruzhenij: Usilenie, vosstanovlenie, remont [Reconstruction of buildings and structures: Strengthening, restoration, repair] A.S.V, 2012. P. 312
16. Mihajlov V.V. Vosstanovlenie zhelezobetonnyh konstrukcij s primereniem rasshirjajushhegosja cementa [Restoration of reinforced concrete structures with expanding cement]. Strojizdat Narkomstroja, 1945, P.27.
17. Karpenko N.I. Obshhie modeli mehaniki zhelezobetona [General models of reinforced concrete mechanics]. Strojizdat. 1996. P. 412.
18. Bekkiev M.Ju. Inzhenernyj vestnik Dona. 2012. № 2.
URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2012/809