

УДК 69.07, 624.014.2

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-1\(28\)-16-37](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-1(28)-16-37)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАЛЬНЫХ СТЕРЖНЕЙ НА ЦЕНТРАЛЬНОЕ И ВНЕЦЕНТРЕННОЕ СЖАТИЕ

EXPERIMENTAL STUDIES OF STEEL RODS FOR CENTRAL AND ECCENTRIC COMPRESSION

Д. В. КОНИН, канд. техн. наук

Приведен краткий анализ нормативных документов, действующих в настоящее время в РФ, Евросоюзе, США и КНР, по расчетам сжатых стальных стержней. Установлено, что нормы РФ нуждаются в уточнении ввиду появления за последние годы новых сталей и поперечных сечений в виде, например, «тяжелых» двутавров и труб из сталей с пределом текучести до 600 МПа. Показано, что испытания двутавровых стоек из высокопрочных сталей хорошо коррелируют с нормативным расчетом на внецентренное сжатие (расхождение не более 10%). Наименьший запас 1,1% соответствует стержням, эксцентриситет в которых приложен в плоскости полка. Малый резерв несущей способности следует уточнить путем изучения остаточных напряжений. Испытания труб показывают, что нормы не учитывают тонкостенность, диаграмму работы стали, наличие сварных швов, работу стержня как оболочки. Отклонения нормативного расчета от испытаний для труб с $D/t = 95$ составляет до 30%. Выявлены пути совершенствования расчетов центрально и внецентренно сжатых стержней на основании анализа испытаний за последние 100 лет.

The article provides a brief analysis of codes on calculations of compressed steel rods in Russia, EU, USA, PRC. It is established that Russian codes need to be clarified due to the appearance in recent years of new steels and cross-sections, for example, "heavy" I-beams and pipes made of steel with a yield strength of up to 600 MPa. It is shown that tests of H-beams made of high-strength steels correlate well with Russian code calculation for eccentrical compression – the discrepancy of no more than 10%. The smallest margin of 1.1% corresponds to rods whose eccentricity is applied in a plane of weak axes. The small load-bearing capacity reserve should be clarified by studying the residual stresses. Tests of pipes show that Russian codes do not take into account thinness, diagram of steel, weld, member work as a shell. Standard calculation deviations from tests are up to 30% for pipes with $D/t=95$. Ways to improve the calculations of centrally and eccentric compressed rods based on tests over the past 100 years are identified. It is shown that the coefficient of longitudinal bending should take into account: the "thinness" of box and tube sections, initial imperfections in the form of local threads, the type of I-beam profile, as well as the method of their manufacture (welded or rolled).

Показано, что коэффициент продольного изгиба должен учитывать: «тонкостенность» коробчатых и трубных сечений, начальные несовершенства в виде локальных погибей, тип двутаврового профиля, а также способ их изготовления (сварной или прокатной).

Ключевые слова:

Гибкость, двутавр, испытание, колонна, раскос, сжатие, сталь, стойка, устойчивость, эксперимент, эксцентриситет

Key words:

Brace, column, compression, experiment, H-beam, pillar, stability, slenderness, steel, test

Нормирование расчета сжатых стержней

Расчетам стальных стержней на центральное сжатие посвящено немало научных трудов. Многие из них опираются на нормативные коэффициенты продольного изгиба, полученные опытным путем. Даже при компьютерном моделировании следует учитывать случайные эксцентриситеты и погиби, неравномерность распределения свойств материала по сечению, остаточные напряжения и т. д. Влияние указанных случайных факторов (несовершенств) на напряженно-деформированное состояние сжатого стержня можно определить только экспериментальными исследованиями [1, 2, 3, 4, 5].

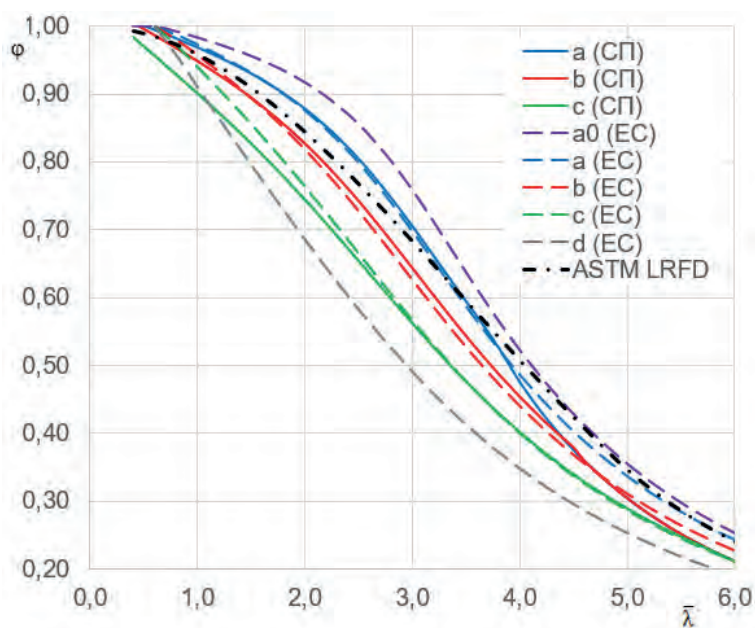
Учет влияния случайных несовершенств в нормах по расчету конструкций осуществляется интегральным коэффициентом продольного изгиба φ . В нормах России (СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции»), Евросоюза (Eurocode 3: Design of steel structures) и КНР (GB50017-2003 Code for design of steel structures) для различных поперечных сечений существует три основных кривых для коэффициента продольного изгиба. Наиболее подробная классификация сечений по различным видам поперечных сечений приведена в нормах Евросоюза. Нормативные документы США (ANSI/AISC 360-16 An American National Standard. Specification for Structural Steel Buildings) требуют выполнение расчета стержней на сжатие по единственной кривой. Сравнение кривых приведено на рис. 1.

Сравнение указанных кривых позволяет сделать следующие обобщения. В диапазоне условных гибкостей от 0,4 до 6 значение коэффициента φ по нормам США выше на 6,1% по сравнению с кривой b по СП 16.13330 и на 6,9% по сравнению с кривой b по Eurocode 3.

Соответственно, при проектировании колонн многоэтажных зданий, поясов и опорных раскосов ферм, опор большепролетных покрытий по нормам РФ или Евросоюза (которые преимущественно относят к кривым b) могут получаться менее экономичные сечения, чем по нормам США.

Кривые a и b в СП 16.13330 и Eurocode 3 идут практически по одной траектории, и отклонения в диапазоне условной гибкости от 0,4 до 4 составляет не более 3% (в среднем 0,8%), кривая c по СП 16.13330 имеет отличия от соответствующей кривой Eurocode 3 до 4,5%. Наиболее выгодными по расходу материала проектируемых конструкций являются кривые a и a_0 по Eurocode 3. К сечениям типа a в СП 16.13330 отнесены замкнутые трубы независимо от способа производства, а в нормах Евросоюза – горячекатаные трубы, прокатные

а



б

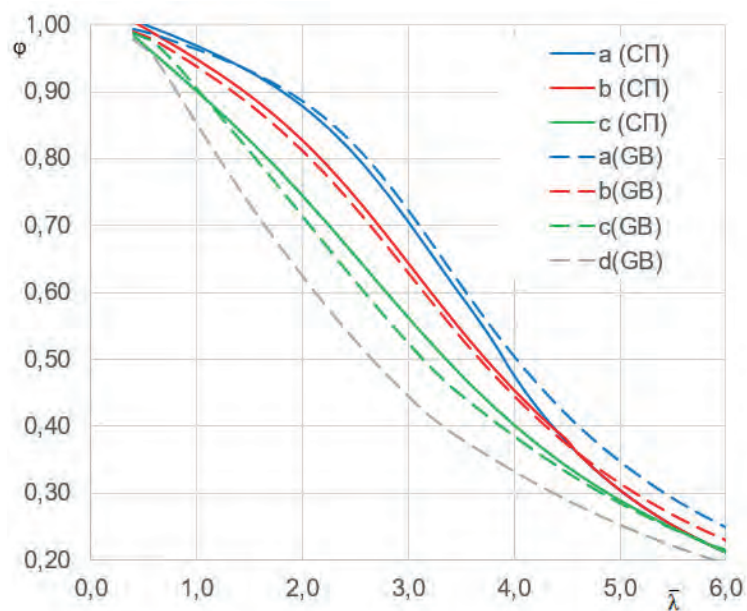


Рис. 1. Сопоставление кривых коэффициента продольного изгиба с условной гибкостью до 6:
а – по нормам РФ (сплошные линии), Евросоюза (прерывистые линии), США (штрихпунктирная линия);
б – то же для норм РФ (сплошные линии) и КНР (прерывистые линии)

двутавры балочного типа при расчетах в плоскости большей жесткости, а также любые двутавры из сталей S460 при расчетах в любом направлении. В Eurocode 3 для двутавров с равными высотами полок и стенок принимается менее «эффективная» кривая b , чем для аналогичного двутавра балочного типа (кривая a). Eurocode 3 имеет две дополнительные кривые a_0 и d , которые предназначены для учета эффекта от использования современных сталей высокой прочности S460 (кривая a_0), а также для учета негативных эффектов от появления остаточных напряжений в сварных двутаврах при расчетах в плоскости полок, которые составлены из двух и более листов. Для коробчатых сечений, составленных из листа, в Eurocode 3 введено ограничение по «тонкостенности» поперечного сечения. При этом для более тонкостенных сечений, в которых $h/t_w \geq 30$, принимается более эффективная кривая b .

Нормы РФ вообще не учитывают тип профиля прокатного двутавра, а также особенности производства широкополочных двутавров из сталей повышенной и высокой прочности. В этом случае при расчете коэффициента φ_e все конструктивные особенности профилей учитываются коэффициентом влияния формы сечения η . Положительным моментом можно считать то, что отечественный СП 16.13330 не имеет ограничений по применению сталей, тогда как в Eurocode 3 дан строгий перечень, ограниченный S460. Кроме того, в отличие от Eurocode 3, СП 16.13330 предусматривает определение коэффициента продольного изгиба для составных сечений из прокатных профилей (спаренных швеллеров и уголков).

Сравнение кривых по нормам КНР и России показывает, что кривые a и b идут также практически по одной траектории в диапазоне условной гибкости от 0,4 до 3,14 (разница не более 2%). Существенные отличия (от 3 до 15%) выявлены для кривой a на диапазоне от 3,14 до 6. Так же как и в Eurocode 3, нормы КНР имеют дополнительную кривую d , которая необходима для учета особенностей работы двутавровых и коробчатых сечений с толстыми стенками (более 80 мм, ограничения по «тонкостенности» отсутствуют). В Eurocode 3 и нормах КНР электросварные круглые трубы, а также гнутосварные прямоугольные трубы отнесены к кривым типа b и c соответственно. Это обусловлено правильным учетом иностранными нормами остаточных напряжений в данных типах поперечных сечений, неравномерности свойств по сечению. В СП 16.13330.2017 гнутосварные прямоугольные и электросварные круглые трубы отнесены к наиболее «эффективному» типу поперечного сечения (кривая a). Это обстоятельство противоречит имеющимся результатам испытаний, которые будут рассмотрены далее.

Во всех рассмотренных выше нормах, кроме СП 16.13330.2017, расчет внецентренно сжатых стержней является логическим продолжением расчета центрально-сжатых стержней. При определении коэффициентов продольного изгиба для одних и тех же типов поперечных сечений при одинаковых внешних эксцентриситетах получаются отличающиеся результаты в случаях расчетов стержня как центрально или внецентренно сжатого. Несоответствие кривых «центрально» и внецентренно сжатых стержней отмечалось в работе В. В. Катюшина [6], где указано на выявленное разночтение коэффициентов φ и φ_e при малых относительных эксцентриситетах: для $\bar{\lambda} < 3$ разница 3-5%, а для $\bar{\lambda} > 6$ – свыше 20-30%. Аналогичный эффект был выявлен автором настоящей статьи при выполнении соответствующих научно-исследовательских работ.

Экспериментальные исследования других авторов

Рассмотрим наиболее интересные экспериментально-теоретические исследования стальных стоек, выполненные за последние 100 лет. Многие из рассмотренных работ яв-

ляются «классическими», и их результаты в свое время легли в основу современных норм проектирования конструкций. Значительное число отечественных и зарубежных авторов фундаментальных работ по устойчивости (например, К. Ежек, Ф. Блейх, Н. Н. Стрелецкий, А. В. Геммерлинг и др.) ссылались на эксперименты М. Роша [7] 1927-1928 гг. и использовали их при обосновании собственных исследований работы сжатых стоек. В рамках исследований были испытаны 28 стоек из прокатных двутавров INP 32, INP 22, шесть стержней с прямоугольным поперечным сечением размерами 16×4 см. На последнем этапе было испытано еще 8 стержней из двутавра IDip 14 с двухосным эксцентриситетом. Особенностью представленных испытаний является то, что автор не указывает индивидуальные значения пределов текучести для испытанных образцов, а только дает сведения о том, что использована сталь St.37. Как показывает практика, учет отклонений фактического предела текучести от номинального существенно повышает точность расчетов и обработки результатов. Обобщенные параметры данных и последующих испытаний сведены в табл. 1.

Нормативы по расчету стержней на сжатие в США формировались под влиянием экспериментов А. Станга [8] 1936 г., Б. Джонстона и Л. Чейни [9, 10, 11] 1939-1942 гг. А. Станг в рамках собственных испытаний [8] исследовал работу на сжатие крупных составных колонн малой гибкости. Исследователей при испытаниях интересовали в первую очередь вопросы возможности компоновки поперечных сечений из сталей различной прочности, а также обеспечение совместной работы клепаных сечений. Б. Джонстон и Л. Чейни [9, 10, 11] провели достаточно представительные испытания на сжатие 113 прокатных двутавров малой гибкости.

В СССР комплекс представительных испытаний был выполнен А. В. Геммерлингом и его соавторами. В работах [1, 2] и других обобщены результаты ряда отечественных испытаний, проведенных в 1939-1949 гг. для строительства Дворца Советов и здания МГУ. Были проведены испытания крупных спаренных двутавров, а также двутавров, составленных из листов и уголков на заклепках и сварных двутавров. В работе [4] 1961 года под руководством А. В. Геммерлинга были выполнены фундаментальные исследования сжато-изогнутых стержней, в том числе в составе сложных конструкций – рам и ферм. Всего было испытано 45 стержней прямоугольного сечения.

Масштабный эксперимент по изучению работы сжато-изогнутых стоек был выполнен в ЦНИИПСК [3] под руководством Н. П. Мельникова в 1954-1960 гг. Были подвергнуты испытаниям 120 стержней, изготовленных из двутавра №18 по ОСТ 10016-39 из Ст3. В результате испытаний получены критические силы, деформации в процессе нагружения, напряжения на краях полков, выведена эмпирически формула коэффициента φ . В развитие этой работы Г. М. Чувикиным [12] в 1960 г. была представлена серия испытаний 20 сварных двутавров на двухосный эксцентриситет. Для каждой величины гибкости испытывалась группа со стесненной деформацией концов стержня (опорная пластина приварена к торцу двутавра) и со свободной деформацией (пластина и торец двутавра пристроганы). Указанные работы положены в основу современных норм РФ по расчету конструкций на внецентренное сжатие.

Также несомненный интерес представляют результаты европейских исследований середины XX в.: К. Клеппеля и Э. Винкельмана [13] 1962 г. (27 двутавровых стоек с двухосными эксцентриситетами с пределом текучести 255...295 МПа); К. Бирнстила [14] 1963 г. (20 двутавров с двухосным эксцентриситетом и отличными концевыми эксцентриситетами,

сталь с пределом текучести 210 и 465 МПа). В США Е. П. Поповым в 1977 г. [15] были испытаны на сжатие 5 крупных прокатных колонных профилей W14×176 с толщиной полки 33 мм. Заметим, что испытания столь массивных поперечных сечений (площадь 334 см²) и стержней с такими сечениями длиной до 4,5 м достаточно редки даже при современном развитии металлургии и испытательной техники. Поэтому указанные результаты крайне полезны в дальнейшем анализе.

Исследования работы трубных профилей со сталями высокой прочности выполнялись в СССР под руководством проф. С. А. Ильсевича в 1970-х гг. Г. Е. Бельским и Л. Н. Дионисиади [16] были проведены исследования работы тонкостенных электросварных труб на внецентренное сжатие и растяжение (12 труб размером 160×5 мм из стали с условным пределом текучести 620 МПа). Особое внимание было уделено изучению особенностей физико-механических свойств термообработанной стали 14Г2Ф, которая в трубах не имеет площадки текучести. В работе А. М. Ривкина и Г. Е. Бельского [17] были изучены электросварные трубы из термоупрочненной стали 15ГС с пределом текучести от 470 до 575 МПа. Всего было испытано 38 моделей стоек.

Фундаментальные исследования работы внецентренно сжатых стержней были проведены проф. Г. И. Белым и его учениками в 1980-х гг. В рамках работы [5] проведены испытания на внецентренное сжатие 42 алюминиевых двутавровых стоек, 36 стоек из гнуто-сварного прямоугольного профиля. Также в [5] критически разобраны и проанализированы материалы ранее выполненных экспериментальных исследований внецентренно сжатых стержней Г. М. Чувикина [12], С. Бирнстила [14], К. Клеппеля [13].

Все представленные испытания (кроме испытания трубных профилей, выполненных в СССР) были проведены с применением сталей с явно выраженной площадкой текучести и зоной упруго-пластических деформаций. Испытания стоек из сталей с пределом текучести более 390 МПа до 1980-х гг. вообще не выполнялись ввиду отсутствия соответствующих материалов для строительной отрасли. Одними из первых экспериментов сжатых стоек, изготовленных с применением высокопрочной стали, были выполненные Т. Юсами, Ю. Фукумото и др. [18, 19, 20] в 1981-1984 гг. Эксперименты, описанные в [19], были проведены в общей сложности с 30 стержнями для коробчатых сечений в виде квадрата или прямоугольника из стального листа толщиной 6 мм с пределом текучести 750 МПа. В рамках этой работы нет ни одной группы стержней с одинаковыми параметрами для оценки разброса получаемых в ходе эксперимента результатов. Если оценить гибкость стенки испытанных стоек в соответствии с требованиями СП 16.13330.2011, то окажется, что из 27 проведенных экспериментов всего 4 соответствуют требованиям по предельной гибкости стенки. Для остальных стержней гибкость стенки значительно больше предельной и, как показали эксперименты, локальная потеря устойчивости в них происходит значительно раньше, чем общая. По этой причине столь обширные экспериментальные исследования практически невозможно анализировать в дальнейшем.

Испытания 5 коробчатых сварных профилей из листовой стали с пределом текучести 760 МПа толщиной 6 мм, приведенные в [18], выполнялись на центральное сжатие. В следующей работе [20] проведены испытания 23 стержней из листа толщиной 4,5 мм с пределом текучести 580 МПа. По причине гибкости стенок, запроектированных во всех испытанных моделях, использовать результаты испытаний из [20] для оценки коэффициента продольного изгиба не представляется возможным. Однако полученные данные по изучению остаточных

напряжений и местной потери устойчивости стенок представляют несомненный практический интерес. Опыты К. Расмуссена и соавторов [21] проведены в 1995 г. для 6 сварных коробчатых и 5 сварных двутавровых профилей, составленных из листовой стали толщиной 5 мм (с пределом текучести 720 МПа) и 8 мм (с пределом текучести 675 МПа) соответственно. Установлено, что элементы, изготовленные из высокопрочных сталей, работают эффективнее ввиду более благоприятного распределения остаточных напряжений по сравнению с «обычными» сталями.

Испытания ученых из КНР Ганга Ши и Х. Бана, представленные в работе [22], одними из первых в 2012 г. провели эксперименты на внецентренное сжатие для 8 стоек из высокопрочных сталей S690 и S960 (с пределами текучести соответственно около 800 и 1000 МПа). На основании экспериментальных данных построена конечно-элементная модель с моделированием работы стали по диаграмме Прандтля. Установлено, что нормы КНР и Eurocode 3 показывают существенный запас для сварных колонн, для которых предложено применять наиболее «экономичную» кривую a_0 . В работе Х. Бана [23] также от 2012 г. испытаны 12 коробчатых сварных колонн из стали S460 и 7 двутавров. По итогам эксперимента [23] были построены конечно-элементные модели, а результаты расчетов сравнивались с кривыми коэффициента продольного изгиба для соответствующих типов профилей по Eurocode 3, ANSI/AISC 360-10 и стандартом КНР – GB50017-2003. Моделирование работы стали выполнялось по четырехлинейной диаграмме, учитывающей упрочнение стали после преодоления предела текучести. Изменение модуля деформации в зоне упругопластических деформаций стали не учитывалась, а площадка текучести принималась без уклона. Кроме моделей колонн, аналогичных испытанным, были созданы дополнительные КЭ-модели, более широкого размерного ряда (отношение $h/t \approx 10...38$, что существенно отличается от испытанных профилей). Для сечений со стороной коробки 392, 320, 380 мм гибкость стенки, определенная по СП 16.13330.2011, получится больше предельной гибкости по табл. 9.

Остается неясным, по какой причине авторы эксперимента сначала испытали профили с относительно толстыми стенками, а затем моделировали стержни с тонкими стенками, для которых потеря устойчивости может быть вызвана, в том числе, местными погибами листов, составляющих сечение. Такого рода несовершенства авторы не обсуждают и не анализируют. При этом делается обобщение по всем коробчатым сечениям. Для всех конечно-элементных расчетов колонн из стали высокой прочности делается вывод, что они дают большую несущую способность, чем это предусмотрено проанализированными нормами. Авторы находят объяснение данному эффекту в том, что несовершенства конечно-элементных моделей были значительно меньше используемых несовершенств в расчетах по нормам. Этот вывод не вполне точен, так как принятые при моделировании диаграммы работы стали не имели зону упруго-пластических деформаций, которые оказывают существенное влияние на результаты расчета на устойчивость, особенно для «коротких» стержней. «Нормативные» кривые коэффициента продольного изгиба как в Eurocode 3, так и в отечественных нормах строились на основе диаграмм, имеющих плавный переход от упругой к пластической стадии работы материала.

Следующий эксперимент 2013 г. Х. Бана и соавторов, представленный в работе [24], интересен, прежде всего, тем, что в нем приведены испытания трех коробчатых и трех двутавровых профилей, изготовленных из стали с пределом текучести 960 МПа. Также

после экспериментальной работы следует численное моделирование, сделанное по методике работы [23].

Поиск оптимальной кривой для расчета центрально сжатых стержней из сталей высокой прочности также был выполнен в работах Ю. Б. Ванга и соавторов [25, 26]. В выводах авторы сравнивают данные численных расчетов для обеих главных плоскостей двутавра, а экспериментальные данные – только для плоскости малой жесткости (вдоль полков).

Испытания коробчатых и двутавровых колонн из листовой стали толщиной 16 мм с пределом текучести более 770 МПа были выполнены также под руководством Т. Г. Ли [27] в 2016 г. Авторы работы провели сравнение результатов испытаний и расчетов аналогичных стоек по нормативным кривым стандарта КНР, Еврокода, норм США и определили, что для сварных коробчатых сечений из исследованной стали применение кривой α является «весьма консервативным», и рекомендовано применять кривую α , как для более эффективных сечений (прокатных двутавров). Единственная кривая в нормах США также признана авторами [27] консервативной, т. е. не реализующей потенциал использования сталей повышенной и высокой прочности. Затем те же выводы были подтверждены в последующих работах путем выполнения численных расчетов большого количества стоек с моделированием остаточных напряжений, защемления конечной жесткости по концам стержней. Свойства материала смоделировано двухлинейной диаграммой Прандтля.

Всего автором настоящей статьи проанализированы данные по 656 испытаниям центрально и внецентренно сжатых стальных стержней. Обращает на себя внимание, что с учетом существенной дороговизны указанных исследований авторы, как правило, испытывают небольшое число стоек (до 10, а чаще – 6-8 штук). Это затрудняет анализ ввиду разницы в использованном оборудовании, в способах наложения граничных условий, скорости нагружения и фиксации наступления предельных состояний. Также существенное число экспериментов было спланировано неверно и вообще не вошло в данный обзор, так как разрушение наступало в местах смятия опорных частей моделей стоек или происходило существенное локальное выпучивание стенок и полков из-за невыполнения конструктивных требований норм.

Таблица 1

**Сводные данные по экспериментам с центрально
и внецентренно сжатыми стальными стержнями**

Источник	Год	Число моделей, шт.	Тип сеч. ¹	σ_m , МПа	A , см ²	$\bar{\lambda}$	Относительный эксцентриситет m	
							БЖ ²	МЖ
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Талбот А. Н.	1910	5	Короб. клеп.	200	113,8	1,18-1,47	0	
Хьюбер Д.	1912	14	Круг	252-501	3,35	1,53-8,63	0	
Бок П.	1913	7	Круг	255	3,35	0,70-2,95	0	
Рош М. [7]	1929	28	ДБ	260	42,9-78,5	0,6-5,7	0; 1; 3	-
То же	1929	6	Прямоуг.	240	64,0	2,55-4,50	0; 1; 2; 3	-

Источник	Год	Число моделей, шт.	Тип сеч. ¹	σ_m , МПа	A , см ²	$\bar{\lambda}$	Относительный эксцентриситет m	
							БЖ ²	МЖ
1	2	3	4	5	6	7	8	9
То же	1929	8	ДК	260	42,9	0,98-2,86	0; 1; 1,5	0; 1
Станг А. [8]	1936	8	Двут. клеп.	352-422	871-935	1,08-1,20	0	
Джонстон Б. [9, 10]	1942	20	ДК	275-315	48,1-67,6	0,70-0,83	0; 1	-
Джонстон Б. [11]	1942	87	ДК	280	10,54	0,4-5,8	0; 1; 1,5; 2; 3; 5; 7	0; 0,4; 0,8; 1,2; 1,6; 2,5; 4; 6
То же	1942	6	ДК	275	37,5	1,0-2,85	0; 1; 2	0; 1; 2
Геммерлинг А.В. [1]	1949	9	Двут. клеп.	360	114,7-118,9	1,03-1,84	0... 0,33	-
То же	1949	4	Двут. клеп.	250	53,0	0,96	0	
То же	1949	14	ДК-С	215-265	24,7-42,2	0,67-0,88	0	0...1,74
Мельников Н.П. [3]	1954	120	ДБ	230-270	30,6	0,46-5,44	0; 0,5; 1; 2	0; 0,5; 1; 2; 3
Геммерлинг А.В.	1958	9	ДБ-С	220-235	101,6-264,1	1,35-2,76	0	-
Чувикин Г. М. [12]	1960	20	ДК-С	240-262	34,0	1,01-3,54	3,9	0,8
Геммерлинг А.В.	1961	51	Прямоуг.	215-260	3,48-4,75	1,84-4,56	-	0...2
Клёппель К. [13]	1962	27	ДК	255-295	26,4-58,4	1,24-2,85	0... 1,78	0... 9,64
Бирстил С. [14]	1963	16	ДК	210-465	24,8-47,1	1,09-4,06	0,15...1,4	3,7...6,5
Попов Е.П. [15]	1972	5	ДК	260	334	1,06-1,54	0	-
Бельский Г.Е. [16]	1973	6	Труба	620	24,1	2,3-4,6	0,2... 1,0	-
Ривкин А.М. [17]	1973	38	Труба	470-575	4,65-7,05	2,1-4,1	0,2... 1,1	-
Юсами Т. [19]	1981	27	Короб. сварн.	750	29,4-65,4	0,51-3,9	-	0; 0,3
Юсами Т. [18]	1982	5	Короб. сварн.	760	32,0	2,1-3,0	0,02; 0,26	-
Юсами Т. [20]	1984		Короб. сварн.	580	21,2-47,8	0,5-3,4	-	0; 0,3; 0,6
Белый Г.И. [5]	1987	36	ГСВ	310-365	15,0	1,44-3,86	0,6	1,15
Расмуссен К. [21]	1995	6	Короб. сварн.	720	18,8	1,75-5,21	0; 0,1	-
То же	1995	5	ДК-С	675	32,6	1,7-5,5	-	0; 0,15
Ши Г., Бан Х. [22]	2012	8	ДБ-С	750-1050	7,7-28,4	1,54-6,15	0,12... 2,1	-
Бан Х. [23]	2012	5	Короб. сварн.	500-545	39,5-74,9	0,95-3,08	-	0... 0,4
То же	2012	1	ДБ-С	545	39,2	3,98	-	0,2

Источник	Год	Число моделей, шт.	Тип сеч. ¹	σ_m , МПа	A , см ²	$\bar{\lambda}$	Относительный эксцентриситет m	
							БЖ ²	МЖ
1	2	3	4	5	6	7	8	9
То же	2012	6	ДК-С	500-545	38,6-89,2	1,05-3,15	-	0... 0,22
Ванг Ю.Б. [25]	2012	6	ДК-С	460-550	79,8-162,3	2,1-4,2	-	0...0,1
Бан Х. [24]	2013	3	Короб. сварн.	975	72,0	2,44-5,75	0; 0,1; 0,66	-
То же	2013	3	ДК-С	975	84,1	2,56-5,91	-	0,2; 0,77
Жоу Ф., Тонг Л. [29]	2013	6	ДК-С	520-560	52,5-63,9	3,16-5,03	-	0,14... 0,22
Ванг Ю.Б. [26]	2014	6	Короб. сварн.	515	45,1-96,0	1,90-4,05	0; 0,1	-
Ли Т.Г., Чан С.Л. [27]	2016	6	Короб. сварн.	630-770	80,2-142,6	1,72-4,30	0... 0,4	
То же	2016	6	ДК-С	770	96,1-121,8	1,96-4,22	-	0... 0,11
Ние С., Канг С. [30]	2017	8	Короб. сварн.	560-570	54,2-127,5	1,8-3,99	0,6... 3,2	
Конин Д.В.	2016	12	ДК	480	214	0,9-1,9	1,6	4,8
Олуромби А.Р., Конин Д.В.	2017	20	Труба	430-620	89,4-178,9	0,6-1,5	0,1... 2,0	-
Всего испытаний		143						
Примечания: 1. В столбце 4 в качестве условных обозначений для поперечных сечений приняты: «Короб. клеп.» – коробчатое клепаное; «ДБ» и «ДК» – двутавр прокатной балочного или колонного типа; «Прямоуг.» – прямоугольное сплошное сечение; «ДК» – двутавр колонного типа прокатной; «Двут. клеп.» – двутавр составной клепаный; «ДБ-С» и «ДК-С» – двутавр сварной балочного или колонного типа; «Короб. сварн.» – коробчатое сварное; «ГСВ» – гнутосварная прямоугольная труба. 2. Направление эксцентриситета (приложение моментной нагрузки) в плоскости большей (БЖ) и меньшей (МЖ) жесткости профиля.								

Эксперименты, выполненные в ЦНИИСК

Исследования двутавров. В 2016 г. для установления достоверности коэффициентов продольного изгиба, приведенных в нормах РФ и других государств, были проведены испытания на внецентренное сжатие 12 стоек. Стержни были изготовлены из сталей 14Г2АФ-1 (6 шт.) и 17Г1САНФ (6 шт.) в виде горячекатаных двутавров 40К2 по проекту ГОСТ Р 57837. Используемая сталь наиболее близка к стали С440 по ГОСТ 27772-2015 и имела условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 481$ МПа.

Испытуемые модели запроектированы в виде стержней с гибкостью в диапазоне 16...35 (условная гибкость $\bar{\lambda} = 0,7...1,6$). Моделировался относительный эксцентриситет m , равный 1,6 и 4,8, который прикладывался как в плоскости стенки двутавра, так и в плоскости полок двутавра (рис. 2). До проведения испытаний все модели колонн были тщательно обмерены,

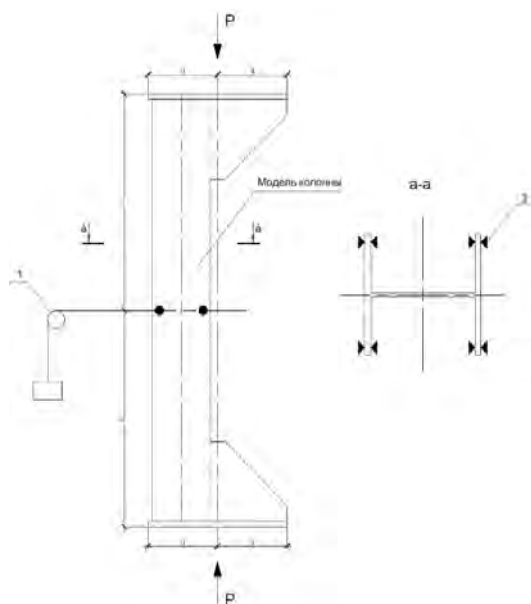


Рис. 2. Общая схема испытательной установки: 1 – прогибомер; 2 – тензометр

также проведены подробные исследования сталей на свариваемость, хладостойкость и фактические значения прочности в зависимости от места отбора пробы (подробнее см. в работе [28]). Модели устанавливались на ножевые опоры, которые моделировали шарнирное закрепление в плоскости, в которой моделировался эксцентриситет. Для подтверждения точности результатов испытаний, а также исключения влияния случайных факторов (заедание шарнира, неправильная центровка, ошибки измерений) модель каждой длины (330, 360, 395, 405 см между осями ножевых опор) испытывали в двух экземплярах для соответствующего эксцентриситета.

В процессе испытаний, которые проводились на прессе с максимальной сжимающей нагрузкой 10 МН, фиксировались выгибы, укорочение моделей, велась тензометрия. Во время эксперимента общая локальная устойчивость в полках и стенках стоек не наблюдалась, происходило равномерное наступление текучести в наиболее сжатых волокнах. На поверхностях каждого стального образца (обработанного предварительно тальком) в характерных местах появлялись следы в виде темных линий Чернова-Людерса, которые указывают на достижение предела текучести (см. рис. 3), что также фиксировалось тензоизмерительным комплексом и нарастанием прогибов в силовой плоскости. При наступлении текучести 60-70% от поперечного сечения испытания прекращались.

Сопоставление полученных результатов испытаний и расчетов приведены в табл. 2. Расчеты выполнены в соответствии с нормативной методикой для фактических значений пределов текучести сталей, а также с учетом фактических размеров поперечных сечений с осреднением по высоте измеренных геометрических размеров. Там же представлены результаты расчета соответствующих стоек в ПК ANSYS 2020 R2. При КЭ-моделировании конструкций стоек учтены их фактические размеры, граничные условия при испытании, фактические значения прочности материала и параметры диаграммы работы стали.

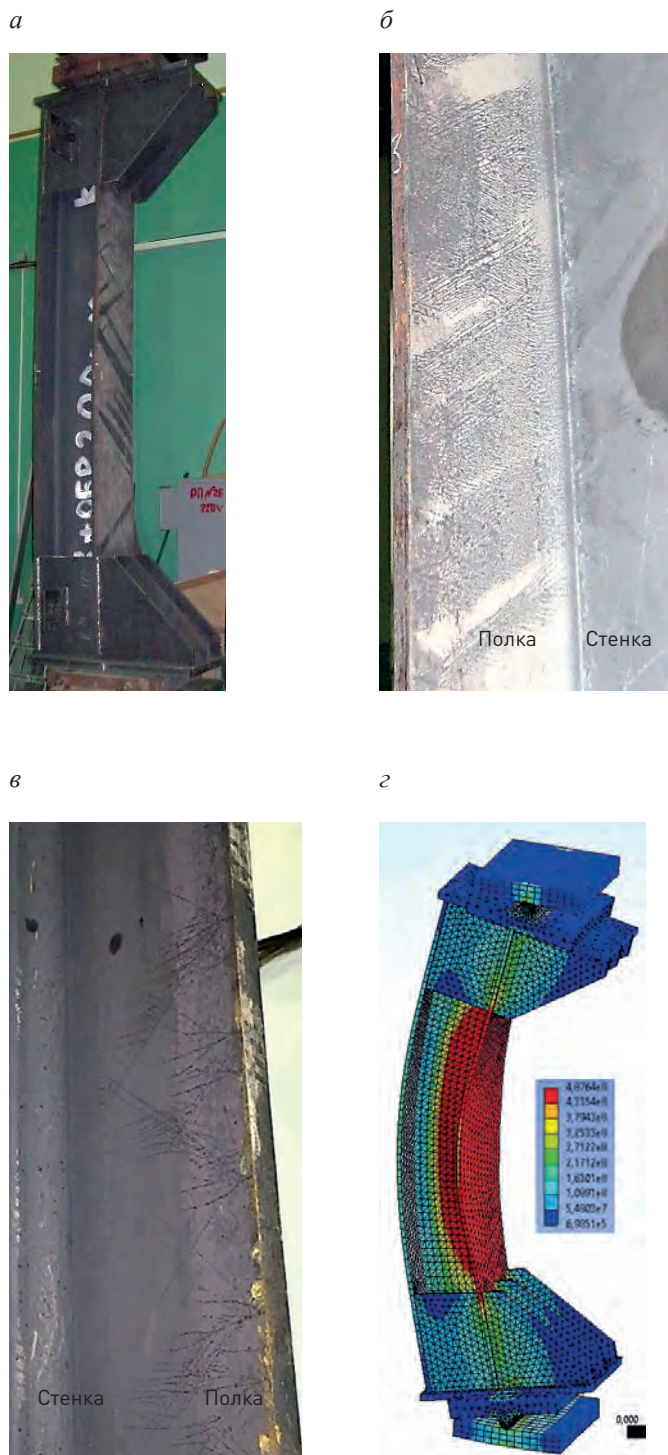


Рис. 3. Стойка К3.1 после испытаний с линиями Чернова-Людерса (а), внутренняя поверхность полки К3.1 (б), то же – для стойки К5.2 (в), КЭ-модель стойки К1 (г)

Таблица 2

**Сравнение результатов испытаний и расчетов двутавровых стоек
по нормам и при КЭ моделировании**

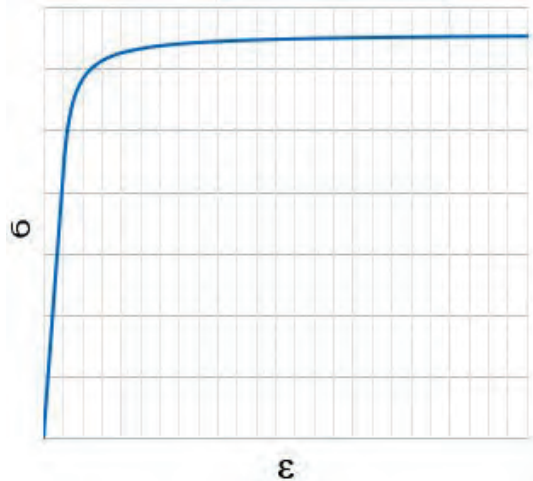
№ модели	Плоскость действия момента	$\bar{\lambda}$	m	m_{ef}	$N_{СП}^T$	φ_e (по СП)	N_{test}^T	$\varphi_{test} = N_{test} / \sigma_y A$	N_A^T	$\varphi_A = N_A / \sigma_y A$	$\Delta_1 = 1 - \varphi_e / \varphi_{test}$	$\Delta_2 = 1 - \varphi_e / \varphi_A$	$\Delta_3 = 1 - \varphi_A / \varphi_{test}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1.1, 1.2	БЖ	0,91	1,65	2,73	423	0,413	456	0,445	420	0,411	7,3%	-0,6%	7,8%
2.1, 2.2	БЖ	1,12	1,65	2,70	406	0,399	448	0,441	409	0,403	9,5%	0,9%	8,6%
3.1, 3.2	БЖ	0,99	1,65	2,72	414	0,408	450	0,443	417	0,410	7,9%	0,6%	7,4%
4.1, 4.2	БЖ	1,09	1,64	2,70	411	0,402	450	0,441	411	0,403	8,8%	0,1%	8,7%
5.1, 5.2	МЖ	1,91	4,89	4,86	231	0,230	237	0,235	251	0,250	2,4%	8,0%	-6,0%
6.1, 6.2	МЖ	1,91	4,87	4,83	237	0,231	240	0,234	251	0,245	1,3%	5,8%	-4,8%
Примечания: 1. Направление эксцентриситета (приложение моментной нагрузки) в плоскости большей (БЖ) и меньшей (МЖ) жесткости профиля. 2. Предельное усилие $N_{СП}$ определено по преобразованной формуле 109 из СП 16.13330.2011, п. 9.2.2, табл. Д.2 и Д.3, как для сечений типов 5 и 8 соответственно. 3. Величины N_A и φ_A – определены путем расчета в ПК ANSYS; N_{test} – предельная несущая способность, определенная по результатам испытаний; σ_y – предел текучести материала.													

По результатам выполненных расчетов и сопоставления полученных данных при испытаниях можно сделать следующие обобщения. Существующая нормативная расчетная методика по СП 16.13330 для внецентренно сжатых элементов малой гибкости дает запас от 7 до 9,5% для двутавров, изгибаемых в плоскости большей жесткости; для плоскости меньшей жесткости запас составляет от 1,3 до 2,4%. Расчет моделей в КЭ программном комплексе также дает некоторый запас расчета конструкций (от 0,1 до 8%) по сравнению с нормативной методикой даже без учета остаточных напряжений. Текущая технология производства прокатных двутавров в РФ из сталей с пределом текучести до 500 МПа) практически не оказывает влияние на результаты расчета конструкций. Поэтому выделение высокопрочных сталей в отдельную кривую, как это предлагают зарубежные исследователи, на взгляд автора преждевременно. Для оценки влияния технологии изготовления двутавров на предельную несущую способность необходимо экспериментально изучить величины остаточных напряжений в прокатных и сварных профилях.

Исследования труб. В 2017 г. для изучения особенностей работы спирально- и прямошовных электросварных труб был проведен комплекс испытаний на центральное и внецентренное сжатие 23 стоек [32]. До испытаний были проведены тщательные обмеры труб, изучен материал основного металла и сварных швов. Получена статистически достоверная

диаграмма работы стали изученных труб, которая имеет выраженную зону упругопластических деформаций и не имеет участка упрочнения после достижения условного предела текучести (рис. 4, а).

а



б

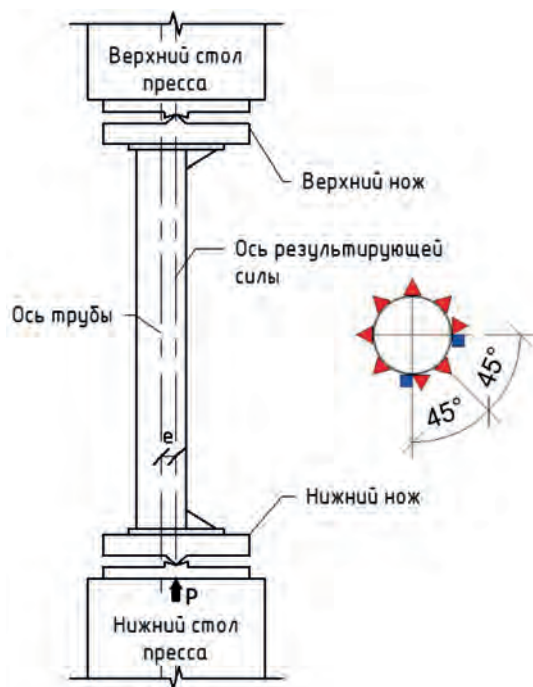


Рис. 4. Диаграмма работы трубной стали с пределом текучести до 600 МПа (а) и общий вид испытательной установки со схемой расположения датчиков (б)

Общий вид испытательной установки представлен на рис. 4, б. В процессе испытаний на прессе с максимальной нагрузкой до 10 МН измеряли фибровые напряжения в характерных точках сечения, а также выгибы конструкции по двум направлениям. Общий вид некоторых испытанных моделей приведен на рисунке 5, а-в. После испытаний были проведены расчеты в соответствии с требованиями норм и в ПК ANSYS в результате которых установлены существенные расхождения с результатами эксперимента. Для случаев центрального сжатия расчет выполнен в соответствии с п. 7.1.3, а для внецентренно сжатых труб – по п. 9.1.2 из СП 16.13330.2017, как для сжато-изогнутого элемента, теряющего устойчивость в плоскости изгиба. Соответствующие коэффициенты влияния формы сечения и продольного изгиба были приняты по таблицам Д.2 и Д.3. Обобщенные результаты испытаний и расчетов приведены в табл. 3. Выявлено расхождение результатов эксперимента на устойчивость труб с численными и нормативными расчетами. В большинстве случаев действительная потеря устойчивости (общая или местная) происходит раньше, чем это должно произойти по расчету. Наибольшее расхождение эксперимента с нормами (51%) зафиксировано в самой тонкостенной трубе 720×7,5 (№20) при значительном эксцентриситете приложения сжимающей нагрузки. Для той же самой трубы отмечается максимальная разница результатов (33%) испытаний и расчета по методу КЭ, модель для которого создана в виде идеальной цилиндрической оболочки без учета начальных локальных погибей стенок труб (рис. 5, г). Отмечается, что расхождение между нормативными и КЭ-расчетами и результатами эксперимента возрастает с увеличением тонкостенности (D/t), эксцентриситета и предела текучести. Кроме того, по результатам испытаний установлено, что прямошовным трубам при потере местной устойчивости свойственно выпучивание стенки. Для спиральношовных труб, наоборот, характерны вмятины, что является следствием значительных начальных несовершенств.

Таблица 3

**Сравнение результатов испытаний труб
по нормам и при КЭ-моделировании**

№ модели	Труба, мм	σ_y , МПа	$\bar{\lambda}$	m	m_{ef}	$N_{СП}$, Т	φ_e (по СП)	N_{test} , Т	$\varphi_{test} = N_{test} / \sigma_A$	$\varphi_A = N_A / \sigma_A$	$\Delta_1 = 1 - \varphi_e / \varphi_{test}, \%$	$\Delta_2 = 1 - \varphi_e / \varphi_A, \%$	$\Delta_3 = 1 - \varphi_A / \varphi_{test}, \%$
1		2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13	14
1	325×9	600	1,6	1,56	1,90	242	0,443	210	0,384	0,444	-15,4	0,1	-15,5
2	325×9	600	1,6	0,91	1,13	306	0,560	270	0,494	0,561	-13,3	0,2	-13,5
3	325×9	600	1,6	0,13	0,16	455	0,833	480	0,878	0,878	5,2	5,1	0,0
4	325×9	520	0,9	1,56	1,94	239	0,504	208	0,439	0,465	-14,8	-8,4	-5,9

№ модели	Труба, мм	σ_y , МПа	$\bar{\lambda}$	m	m_{ef}	$N_{сп}$, Т	φ_e (по СП)	N_{rest} , Т	$\varphi_{rest} = N_{rest} / \sigma_A$	$\varphi_A = N_A / \sigma_A$	$\Delta_1 = 1 - \varphi_e / \varphi_{rest}$, %	$\Delta_2 = 1 - \varphi_e / \varphi_A$, %	$\Delta_3 = 1 - \varphi_A / \varphi_{rest}$, %
1		2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13	14
5	325×5	555	1,5	1,52	1,86	129	0,455	120	0,422	0,443	-7,9	-2,7	-5,0
6	325×5	555	1,5	0,89	1,10	163	0,573	165	0,580	0,564	1,3	-1,5	2,8
7	325×5	555	1,5	0,13	0,16	240	0,844	276	0,971	0,888	13,0	4,9	8,5
8	530×8	555	0,9	1,63	2,02	363	0,489	294	0,396	0,454	-23,5	-7,8	-14,6
9	530×8	555	0,9	1,17	1,47	428	0,577	370	0,499	0,536	-15,7	-7,6	-7,5
10	530×8	555	0,9	0,10	0,13	681	0,917	650	0,876	0,928	-4,7	1,2	-6,0
11	630×8	380	0,6	0,10	0,13	572	0,945	584	0,964	0,938	2,0	-0,7	2,7
12	630×8	380	0,6	1,17	1,48	367	0,606	315	0,520	0,556	-16,5	-9,0	-6,9
13	530×10	429	0,8	0,10	0,13	662	0,927	648	0,907	0,932	-2,2	0,6	-2,8
14	530×10	504	0,9	0,10	0,13	772	0,920	760	0,906	0,930	-1,6	1,0	-2,7
15	530×10	504	0,9	0,94	1,19	527	0,628	480	0,572	0,601	-9,8	-4,5	-5,1
16	530×10	429	0,8	0,94	1,19	455	0,637	400	0,560	0,608	-13,7	-4,7	-8,6
17	530×10	504	0,9	1,41	1,76	446	0,531	380	0,453	0,504	-17,4	-5,4	-11,3
18	530×10	429	0,8	1,41	1,76	385	0,539	339	0,475	0,512	-13,5	-5,2	-7,9
19	720×7,5	573	0,7	0,10	0,13	984	0,941	832	0,796	0,936	-18,2	-0,6	-17,6
20	720×7,5	573	0,7	1,28	1,61	605	0,579	400	0,383	0,512	-51,3	-13,1	-33,8

При дальнейших исследованиях [33, 34] установлено, что на несущую способность влияет состояние поставки труб (объемная термическая обработка, нормализация), а создание численной модели элементов, подверженных внецентренному сжатию, следует сопровождать моделированием локальных погибей стенки труб в виде осесимметричной синусоидальной складки. При расчетах трубчатых элементов конструкций из сталей повышенной и высокой прочности следует учитывать как стержневые, так и оболочечные особенности их работы.

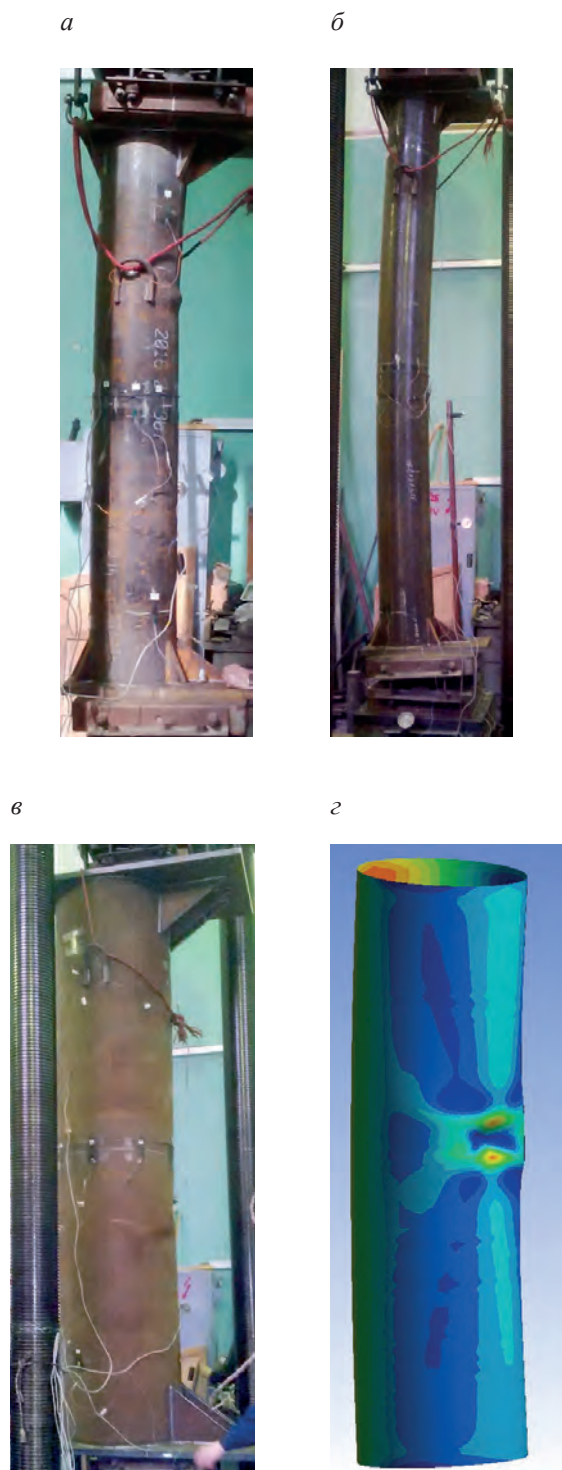


Рис. 5. Труба 325×9-Б-120 по завершению испытаний (а); то же – труба 325×9-А-70 (б); то же – труба 720×7,5-225 (в); деформации при потере устойчивости трубы 720×7,5-0 (г)

Обсуждение и обобщение экспериментов

Выберем из экспериментов, ранее представленных в разд. 2 настоящей статьи, только те, при которых случайные эксцентриситеты малы или практически равны нулю. Это частный случай внецентренного сжатия, который в отечественной литературе принято называть «центральное» сжатие. Окажется, что из 656 ранее рассмотренных экспериментов только 184 можно отнести к указанному виду. При этом из них 30 стержней коробчатого сечения (гнутоварных и составных из листа), 23 стержня сплошного сечения (круг, прямоугольник). 134 стержня с поперечным сечением в виде двутавров различной конфигурации. Только 17% из них (23 шт.) испытаны на действие малого эксцентриситета в плоскости большей жесткости ввиду сложности правильного устройства раскрепления в плоскости меньшей жесткости. Проанализируем график, представленный на рис. 6, где показана зависимость $\Delta\varphi = \varphi_{\text{СП}} / \varphi_{\text{test}}$ от условной гибкости. Установлено, что: максимальные отклонения возникают в диапазоне $\bar{\lambda}$ от 2 до 4 (вблизи 3,14); минимальные отклонения соответствуют минимальной гибкости от 0,5 до 1,5; двутавры балочного типа практически не дают выбросов в зону $\Delta_1 > 1$, т. е. существующие формулы относительно неплохо описывают работу стоек подобного сечения. Статистическая обработка полученных результатов показывает, что формулы для центрально-сжатых стержней из СП 16.13330 подтверждают несущую способность: в 80% случаев для двутавров (106 из 134 экспериментов); в 56,6% случаев для коробчатых сечений (17 из 30 экспериментов); в 70% случаев для сплошных сечений (16 из 23 экспериментов).

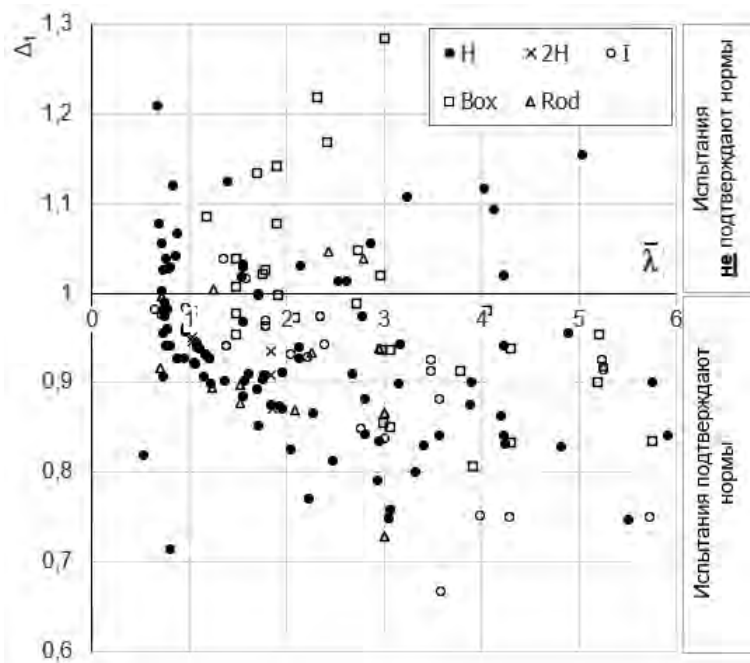


Рис. 6. Отношение коэффициентов продольного изгиба $\Delta\varphi = \varphi_{\text{СП}} / \varphi_{\text{test}}$, вычисленных по СП 16.13330 ($\varphi_{\text{СП}}$) и полученных по результатам испытаний (φ_{test})

Для двутавров получена лучшая сходимость между экспериментальными и «теоретическими» расчетами, так как указанный тип сечения является наиболее полно изученным. Обращает на себя внимание плохая сходимость результатов расчетов по СП 16.13330 с опытными данными для составных и гнутых коробчатых сечений. Это обстоятельство объясняется существенным влиянием остаточных сварочных напряжений в составных коробках, а также явлениями наклепа в углах гнутых сечений. По мнению автора, ошибочным является отнесение коробчатого типа сечения в виде гнутосварной трубы к наиболее эффективным сечениям, рассчитываемым по кривой типа a , в то время как работа коробчатого сечения под внецентренной нагрузкой не отличается от работы двутавров в плоскости стенки.

Заключение и выводы

1. В нормы на проектирование конструкций (СП 16.13330) следует внести уточнения коэффициента продольного изгиба на основании обобщения экспериментальных данных. При вычислении этого коэффициента следует учитывать:

а) тип двутаврового профиля (балочный или колонный по соотношению высоты профиля к ширине полки);

б) способ изготовления поперечного сечения (для двутавров – сварной или прокатной, для труб – горячедеформированные или электросварные, состояние поставки);

в) «тонкостенность» коробчатого сечения, составленного из четырех листов на сварке (по соотношению ширины поперечного сечения к толщине стенки);

г) «тонкостенность» и необходимость учета начальных погибей стенки при расчете трубчатых стержней;

д) влияние технологии изготовления прокатных двутавров из сталей с пределом текучести до 500 МПа на распределение остаточных напряжений по сечению и их влияние на напряженно-деформированное состояние стержня;

е) фактическую диаграмму работы сталей повышенной и высокой прочности.

2. Нормы по расчету центрально и внецентренно сжатых стержней следует увязать путем корректировки коэффициента φ с учетом особенностей, указанных в п. 1, а также коэффициентов влияния формы поперечного сечения для круглых труб и двутавров, изготовленных из сталей повышенной и высокой прочности.

3. Нормы по проектированию конструкций (СП 16.13330) следует дополнить правилами создания КЭ-моделей внецентренно сжатых стержней, в том числе следует ввести правила учета начальных несовершенств стержней в виде локальных погибей, а также четко определить необходимость учета зоны упругопластических деформаций (для трубчатых элементов и двутавров).

Библиографический список

1. Геммерлинг А.В. Несущая способность сжатых и сжато-изогнутых элементов стальных конструкций // Экспериментальные исследования стальных конструкций (сб. статей) под ред. В. А. Балдина. – М.-Л.: Гос. изд-во строительной литературы. 1950. С. 5-69.

2. Геммерлинг А.В. Несущая способность балок двутаврового сечения // Экспериментальные исследования стальных конструкций (сб. статей) под ред. В.А. Балдина. – М.-Л.: Гос. изд-во строительной литературы. 1950. С. 70-98.

3. Экспериментально-теоретическое исследование общего случая потери устойчивости внецентренно сжатого двутаврового стержня (1-й этап) / под ред. Н. П. Мельникова, В. М. Вахуркина, Г. М. Чувикина – М.: ГПИ Проектстальконструкция. 1954. 387 с.
4. Бельский Г.Е. Теоретические и экспериментальные исследования деформативности и устойчивости упруго заземленных стержней // Расчет конструкций, работающих в упруго-пластической стадии (труды института); под ред. А. В. Геммерлинга. – М.: Гос. изд-во лит-ры по строительству, архитектуре и строительным материалам. 1961. С. 125-238.
5. Белый Г.И. Пространственная работа и предельные состояния стержневых элементов металлических конструкций: дисс. ... докт. техн. наук: 05-23-01 / Белый Григорий Иванович. – Л.: 1987. 464 с.
6. Катюшин В.В. О коэффициентах продольного изгиба при центральном и внецентренном сжатии в области малых эксцентриситетов // Строительная механика и расчет сооружений. 2015. №6. С. 7-10.
7. Ros M. Die Bemessung zentrisch und exzentrich gedruckten Stabe auf Knickung // Bericht über die II Internationale Tagung für Brückenbau und Hochbau. – Wien: Springer-Verlag. 1928. Pp. 282-303.
8. Stang A.H., Whittemore H.L., Sweetman L.R. Tests of Eight Large H-Shaped Columns Fabricated from Carbon-Manganese Steel // Journal of Research of National Bureau of Standards. 1936. Vol. 16. pp. 595-626.
9. Johnston B.G., Cheney L.T. Steel Columns of Rolled Wide-Flange Section Progress Report No.1 // AISC Research Report No. 190, Lehigh University. Lehigh, 1942. 39 p.
10. Cheney L. T. Short steel columns progress report // Fritz Laboratory Reports, Paper 1222, Lehigh University. Lehigh, 1939. 27 p.
11. Johnston B.G., Cheney L.T. Steel Columns of Rolled Wide-Flange Section Progress Report No. 2 / AISC Research Report No. 191 (Nov. 1942), Lehigh University. Lehigh, 1942. 39 p.
12. Чувикин Г.М. Экспериментальное исследование устойчивости внецентренно-сжатых стальных одностенчатых стержней при двухосном эксцентриситете // Расчет пространственных конструкций. 1960. Вып. 5. С. 57-78.
13. Kloppel K., Winkelmann E. Experimentelle und the oretische Untersuchungen uber die Traglast von zweichzig ausermitting gedruckten Stahlsaben // Der Stahlbau. 1962. №2-3. Pp. 78-87.
14. Birnstiel C., Michalos J. Ultimate load of H-columns under biaxial bending // A.S.C.E.: Structural Division Journal. 1963. Vol. 89, ST. (N) 2. Pp. 161-197.
15. Popov E. P., Stephen R.M. Capacity of Columns with Splice Imperfections / Popov, E.P. // Engineering Journal. American Institute Of Steel Construction. 1977. Q1. Pp. 16-23.
16. Бельский Г.Е., Дионисиади Л.Н. Исследование несущей способности стержней кольцевого сечения // Стальные конструкции из труб. Экспериментально-теоретические исследования. Под ред. С. А. Ильясевича. М.: ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. 1973. С. 84-92.
17. Ривкин А.М., Бельский Г.Е. Исследование устойчивости внецентренно сжатых стержней трубчатого кольцевого сечения из стали 15ГС // Стальные конструкции из труб. Экспериментально-теоретические исследования. Под ред. С.А. Ильясевича. М.: ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. 1973. С. 92-106.

18. *Usami T., Fukumoto Y.* Local and overall buckling of welded box columns // J. Struct. Div. 1982. 108 (ST3). Pp. 525–542.
19. *Usami T., Fukumoto Y., Aoki T.* Tests on the interaction strength between local and overall buckling of welded box columns // 土木学会論文報告集 (Сборник докладов общества гражданских строителей). 1981. №308 (апрель). Pp. 47–58.
20. *Usami T., Fukumoto Y.* Welded box compression members// Journal Struct. Eng. 1984. 110 (10). Pp. 2457–2470.
21. *Rasmussen K.J.R., Hancock G.J.* Tests of high strength steel columns // J. Constr. Steel Res. 1995. 34 (1). Pp. 27–52.
22. *Shi G., Ban H.Y., Bijlaard F.S.K.* Tests and numerical study of ultra-high strength steel columns with end restraints // J. Constr. Steel Res. 70. 2012. Pp. 236–247.
23. *Ban H.Y., Shi G., Shi Y.J., Wang Y.Q.* Overall buckling behavior of 460 MPa high strength steel columns: experimental investigation and design method // J. Constr. Steel Res. 2012. 74. Pp. 140–150.
24. *Ban H.Y., Shi G., Shi Y.J., Bradford M.A.* Experimental investigation of the overall buckling behavior of 960 MPa high strength steel columns // J. Constr. Steel Res. 2013. 88. Pp. 256–266.
25. *Wang Y.B., Li G.Q., Chen S.W., Sun F.F.* Experimental and numerical study on the behavior of axially compressed high strength steel columns with H-section // Eng. Struct. 2012. 43. Pp. 149–159.
26. *Wang Y.B., Li G.Q., Chen S.W., Sun F.F.* Experimental and numerical study on the behavior of axially compressed high strength steel box-columns // Eng. Struct. 2014. 58. Pp. 79–91.
27. *Tian-Ji Li, Si-Wei Liu, Guo-Qiang Li, Siu-Lai Chan, Yan-Bo Wang.* Behavior of Q690 high-strength steel columns: Part 1: Experimental investigation // Journal of Constructional Steel Research. 2016. №123. Pp. 18–30.
28. *Одесский П.Д., Конин Д.В., Кони́на С.М., Шведов К.Н., Соколов К.Е.* Горячекатаный прокат высокой прочности двутаврового профиля с параллельными гранями полок для строительных конструкций массового применения // Сталь. №6. 2017. С. 56–63.
29. *Zhou F., Tong L.W., Chen Y.Y.* Experimental and numerical investigations of high strength steel welded H-section columns// Int. J. Steel Struct. 2013. 13 (2) Pp. 209–218.
30. *Nie S.D., Kang S.B., Shen L., Yang B.* Experimental and numerical study on global buckling of Q460GJ steel box columns under eccentric compression // Eng. Struct. 2017. 142. Pp. 211–222.
31. *Ведяков И.И., Одесский П.Д., Конин Д.В., Егорова А.А.* Стали для прокатных двутавров с параллельными гранями полок. // Промышленное и гражданское строительство. 2015. №6. С. 30–35.
32. *Конин Д.В., Олуромби А.Р.* Анализ устойчивости прямошовных и спиральношовных труб из высокопрочных сталей при центральном и внецентренном сжатии на примере натурных экспериментов // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2018. №6 (714). С. 106–116.
33. *Ведяков И.И., Олуромби А.Р., Конин Д.В.* Сравнительный анализ устойчивости стальных труб малой гибкости при действии продольных сжимающих сил / Сборник научн. трудов РААСН: Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли российской федерации в 2017 году. 2018. С. 161–170.

34. *Олуромби А.Р.* Влияние состояния поставки стальных труб на несущую способность при сжатии с изгибом // Строительная механика и расчет сооружений. 2016. №5 (286). С. 57-63.

Автор

Денис Владимирович КОНИН, канд. техн. наук, заведующий сектором высотных зданий и сооружений лаборатории металлических конструкций, ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Denis KONIN, Ph. D. (Engineering), Chief manager of Sector, TSNIISK named after V. A. Koucherenko JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: konden@inbox.ru

тел.: +7 (926) 853-99-73