

УДК 624.014:624.074.7:624.953

ПРОБЛЕМИ ПОСИЛЕННЯ КОРПУСІВ МЕТАЛЕВИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ РЕЗЕРВУАРІВ ФІБРОПЛАСТИКОВИМИ МАТЕРІАЛАМИ

к.т.н., доц. Дзюба С.В.

к.т.н., доц. Михайлов А.А.

Одеська державна академія будівництва і архітектури, м.Одеса

Анотація. Розглядаються особливості існуючого в Україні парку металевих вертикальний циліндричних резервуарів, аналізуються причини і характер зносу їх стінок, а також традиційні методи посилення. Оцінюється ефективність використання для посилення фібропластикових матеріалів

Ключові слова: металеві циліндричні резервуари, методи посилення стінок резервуарів, фібропластикові системи

ПРОБЛЕМЫ УСИЛЕНИЯ КОРПУСОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ ФИБРОПЛАСТИКОВЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

к.т.н., доц. Дзюба С.В.

к.т.н., доц. Михайлов А.А.

Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса

Аннотация. Рассматриваются особенности существующего в Украине парка металлических вертикальных цилиндрических резервуаров, анализируются причины и характер износа их стенок, а также традиционные методы усиления. Оценивается эффективность использования для усиления фибропластиковых материалов

Ключевые слова: металлические цилиндрические резервуары, методы усиления стенок резервуаров, фибропластиковые системы

THE PROBLEMS OF WALL STRENGTHENING OF METALLIC CYLINDRICAL RESERVOIRS BY FIBER REINFORCED PLASTICS

Ph. D. Dzyuba S.V.

Ph. D. Mikhailov A.A.

Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odessa

Abstract. The Ukraine has a large pool of metallic cylindrical reservoirs which have been estimated at 17...20 thousands of units by different analysts at the beginning of 2000th and more than 360 such structures had capacity of 2000...50000 m³ at that time. The normative term of their exploitation is 20 years but the actual middle age of national reservoir pool is about 30...40 years.

The wear and tear of metallic cylindrical reservoir walls that makes its need to strengthen is determined by two effects: corrosion and fatigue of steel in the places of stress concentration. The traditional methods of reservoir strengthening have a lot of drawbacks.

The modern alternative of traditional techniques of reservoir wall strengthening might be the complex elevation of load bear capacity by the external applying of high strength fiber reinforced plastic (FRP) materials on the most stressed belts of reservoir walls made orthogonally to the axes of the structures.

In this work there are some determinations of stress state characteristics of the FRP strengthened reservoir walls in the case of presence of initial internal pressure and applying of prestressed external FRP system.

The external reinforcement of the walls of metallic cylindrical reservoirs by high strength FRP materials makes it able to raise significantly their load bear capacity. The affectivity of such solutions could be obtained by use of prestressed or high modulus FRP elements.

The difference of parameters of thermal expansion of steel and reinforcing fibers affects essentially the stress distribution inside of construction layers and gives the high increase of strain in the case of use of high modulus fibers. The determination of the stress state changes of FRP reinforced reservoir walls that caused by thermal expansions is brought in this work.

The additional drawback of high modulus construction fibers is quite high price.

The use of the prestressing methods for FRP elements allows effective applying of more cheap construction fibers with Young's modulus of middle range for external strengthening of cylindrical reservoirs which characterized by limited dimensions.

Keywords: metallic cylindrical reservoirs, methods of wall strengthening of reservoirs, fiber reinforced plastic (FRP) systems

1. Проблема усиления корпусов металлических цилиндрических резервуаров

Повышение несущей способности конструкций металлических цилиндрических резервуаров является в настоящее время актуальной задачей [1-4]. Украина обладает обширным парком металлических цилиндрических резервуаров, насчитывавшим по различным оценкам на начало 2000-х годов порядка 17...20 тыс. штук, из которых более 360 сооружений имели вместимость 2000...50000 м³ [5]. При нормативном сроке службы 20 лет, средний возраст парка отечественных резервуаров составляет около 30...40 лет. Длительная эксплуатация их конструкций является одной из основных причин, определяющих физический износ и сопутствующую аварийность. Проблема в значительной мере осложняется неполной практической загруженностью парка резервуаров, составлявшей в течение последних 20-ти лет для различных отечественных предприятий нефтехимического комплекса 10...50% [6]. При этом длительный вывод сооружений из эксплуатации в большинстве случаев осуществлялся без соблюдения необходимых мер консервации, что способствовало ускоренному накоплению дефектов несущих конструкций.

Физический износ стенок металлических цилиндрических резервуаров, требующий реализации мероприятий по их усилению, определяется двумя основными причинами: коррозией и усталостью металла в местах концентрации напряжений.

Проблема коррозии стенок актуальна, главным образом, для резервуаров малой и средней вместимости (до 5000 м³), у которых толщина данных конструкций находится в пределах 4...10 мм [5, 7]. В обычных условиях средняя скорость коррозии стенок резервуаров составляет около 0,015 мм/год, а при неудовлетворительной эксплуатации, а также при хранении сероводородсодержащей нефти или легких бензинов плотностью менее 750 кг/м³, может достигать до 0,5 мм/год, имея тенденцию к кратному повышению в локальных зонах, что при незначительных абсолютных толщинах элементов может приводить к существенному росту кольцевых напряжений. Кроме того, некоторые исследования [8, 9] указывают на то, что коррозия тонкостенных листовых элементов ведет к сопутствующему снижению прочностных характеристик применяемого металла. Имеющийся анализ надежности эксплуатации резервуаров вместимостью 1000...5000 м³ [1], учитывающий данную проблему, свидетельствует о том, что по истечению 30 лет эксплуатации требуется понижение проектного уровня наполнения этих сооружений.

Вторая проблема, определяющаяся износом стенок цилиндрических резервуаров вследствие усталости металла вертикальных стыков при количестве заполнений и сливов порядка $5 \times 10^3 \dots 10^4$ циклов, характерна для более крупных сооружений [10]. При этом

наиболее опасными местами их конструкций являются вертикальные стыковые сварные швы рулонированных элементов стенки, в которых по причине геометрических несовершенств монтажа, при толщинах металла более 12 мм, возникают значительные изгибающие моменты [11, 12], сопровождаемые в дальнейшем образованием вертикальных усталостных трещин [10]. При действии гидростатического давления потеря устойчивости берегов указанных трещин наступает уже при их длинах более 1000 мм [13]. Широкое использование рулонированного способа сборки в отношении отечественных металлических резервуаров привело к тому, что в настоящее время в аварийном состоянии находится большого количества подобных сооружений, работавших в режиме интенсивного малоциклового нагружения (1...2 цикла налива-слива в сутки) [14].

2. Традиционные методы решения проблемы

Традиционные методы усиления стенок металлических резервуаров являются весьма дорогостоящими и, как правило, связаны с выполнением различных видов сварочных работ, для осуществления которых сооружения обычно надолго выводятся из эксплуатации: производится их слив, дегазация, зачистка от скопившейся на дне грязи (иногда составляющей сотни тонн) и внутренняя пропарка. Сами же сварочные работы сопряжены с рядом пожарных ограничений.

Наличие локальных зон, характеризующихся существенными коррозионными повреждениями нижних поясов стенок, заставляет реализовывать замену их отдельных участков, приводящую к накоплению в их стыках остаточных температурных напряжений и вероятному появлению выпуклостей листовых элементов. Кроме того, используемые технологии замены элементов, предусматривающие выполнение нахлесточных соединений [15, 16], приводят к образованию концентраций напряжений и способствуют процессам развития местной усталости металла при малоцикловых режимах нагружений.

Равномерное коррозионное разрушение стенок на практике обычно компенсируется применением методов бандажирования [15, 16, 17], предусматривающих внешнее усиление стальными кольцами, стягиваемыми резьбовыми соединениями. Использование отстоящих друг от друга колец также может способствовать трещинообразованию совмещенных в одну линию сварных швах, а также проявлению местной потери устойчивости прокорродировавших участков стенки.

Развитием идеи внешнего усиления корпусов цилиндрических резервуаров явилось предложение навивки на их поверхностях высокопрочных проволок и лент, устанавливаемых с предварительным напряжением [18-25]. Однако в силу сложности крепления на поверхностях оболочек таких конструкций предварительно напрягаемых гибких элементов, а также в связи с неотработанностью соответствующих технологических процессов, реализация данного метода повышения несущей способности ограничилась только возведением экспериментальных сооружений.

С наиболее опасными дефектами стенок, определяемыми возникновением вертикальных усталостных трещин сварных соединений, в настоящее время эффективно удается бороться только методом вварки по всей высоте резервуаров специальных листовых «гребенчатых» вставок, позволяющих добиться разбежности вертикальных швов по поясам их конструкций [10, 12, 26]. При этом подобное усиление является крайне сложной технологической задачей, требующей придания участкам стенки, расположенным по сторонам от ее выреза, правильной геометрической формы (чему противодействуют выгибающие моменты), а также нуждающейся в точной подгонке и фиксации положения элементов листовых вставок [12]. Рассматриваемое усиление также существенно осложняется наличием значительных (до 2 мм) поперечных усадок сварных швов, приводящих к нарушению кривизны фрагментов стенки резервуара.

3. Повышение несущей способности стенок цилиндрических резервуаров внешним фибропластиковым армированием

Концепция. Современной альтернативой описанным выше решениям может служить комплексное усиление стенок металлических цилиндрических резервуаров внешним армированием высокопрочными фибропластиковыми материалами, размещаемыми по высоте наиболее нагруженных их поясов перпендикулярно осям сооружений [1]. Подобные усиления позволяет осуществлять эффективное восполнение материала, утраченного в процессе коррозии, а также консервацию дефектов, обусловленных процессами усталостного разрушения соединений листовых элементов [2, 3]. Немаловажной также является сопутствующая «не силовая» реабилитация, обеспечивающая герметизацию и необходимую антикоррозионную защиту внешних поверхностей стенок резервуаров.

Напряженное состояние. В стальном цилиндрическом резервуаре (рис. 1), имеющем радиус r и толщину стенок t_s , находящемся под действием начального внутреннего давления P' и усиливаемом внешним непрерывным поперечным армированием фибропластиковыми элементами, установленными с предварительным напряжением σ_{f0} , при повышении внутреннего давления на величину ΔP действуют напряжения, составляющие для элементов фибропластикового усиления и стальной стенки резервуара, соответственно [2],

$$\sigma_f = \sigma_{f0} + \frac{m[N_{f-x,z} + t_s E_s (\alpha_s \Delta T_{s2} - \alpha_f \Delta T_{f2})]}{t_s + t_f m}, \quad (1)$$

$$\sigma_s = \frac{P' r}{t_s} - \sigma_{f0} \frac{t_f}{t_s} + \frac{N_{s-x,z} + t_f E_f (\alpha_f \Delta T_{f2} - \alpha_s \Delta T_{s2})}{t_s + t_f m}, \quad (2)$$

где: $N_{f-x,z} = (\Delta P)r(1 - \mu/2)$, $N_{s-x,z} = (\Delta P)r \left[1 + m \frac{t_f}{t_s} \frac{\mu}{2} \right]$ — условные кольцевые усилия единицы сечения фибропластикового и стального слоев стенки резервуара, возникающие при изменении внутреннего давления на величину ΔP , определенные с учетом действия кольцевых и продольных напряжений в стальной части конструкции; E_s , E_f — соответственно, модули упругости стали и элементов фибропластикового усиления; $m = E_f/E_s$ — соотношение модулей упругости составляющих слоев стенки; μ — коэффициент Пуассона стальной составляющей стенки резервуара; σ_{f0} — предварительные напряжения в элементах фибропластикового усиления; α_s , α_f — коэффициенты линейного температурного деформирования стали и слоя усиливающего фибропластика; ΔT_{s1} , ΔT_{f2} — наиболее невыгодные изменения температур стальной и фибропластиковой составляющих оболочки, вызывающие дополнительное обжатие конструкции; ΔT_{s2} и ΔT_{f2} — наиболее невыгодные изменения температур стальной и фибропластиковой составляющих оболочки, вызывающие распор конструкции.

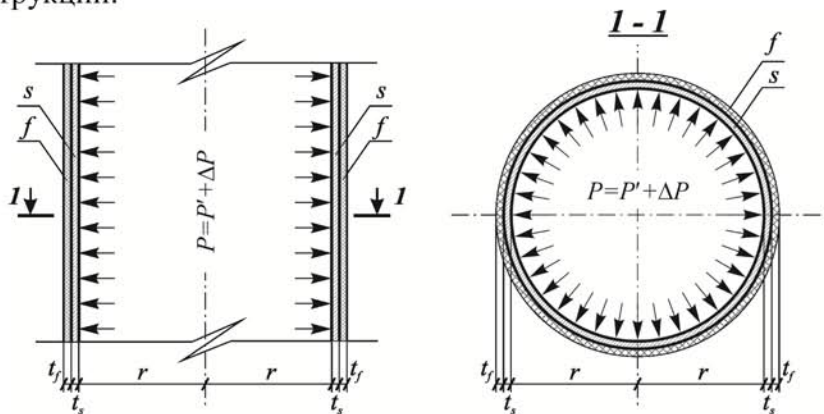


Рис. 1. Расчетная схема стальной оболочки цилиндрического резервуара, усиленной внешним поперечным фибропластиковым армированием: s — стальная оболочка резервуара, f — слой внешнего поперечного фибропластикового усиления

Факторы, определяющие эффективность фибропластикового усиления металлических резервуаров. Как видно из вышеприведенных формул наибольшей эффективности фибропластикового усиления возможно достичь при использовании предварительного напряжения или высокомодульного внешнего армирования. Придание предварительного напряжения фибропластиковому усилению становится возможным при применении соответствующих ламинированных элементов заводской готовности, в то время как «мокрые» технологии изготовления фибропластиков непосредственно на поверхности конструкции, основанные на применении армирующих тканей и лент, как правило, такой возможности не предоставляют. Компенсирование отсутствия предварительного напряжения может быть достигнуто использованием высокомодульного углеродного волокна, модуль упругости которого может превышать соответствующий показатель стали в 3 и более раз, позволяя перераспределять на внешнее армирование большую долю действующих усилий.

Изготовление фибропластикового усиления возможно с использованием различных видов армирующих волокон [27-37], при этом наибольшую прочность и модуль упругости ему придают стойкие к различным видам воздействий углеродные волокна (табл. 1). Значительно меньшая жесткость высокопрочных фибропластиков достигается при применении стеклянных волокон, отличающихся большей механической повреждаемостью и чувствительностью к вредным воздействиям окружающих сред. Промежуточные жесткостные характеристики данных материалов могут быть получены при использовании арамидных волокон, выделяющихся стойкостью к абразивным и ударным воздействиям.

Таблица 1

Характерные показатели физико-механических свойств конструкционных волокон в сравнении со сталью; адаптировано по [37]

Материал	Модуль упругости, E , ГПа	Прочность при растяжении, σ_r , МПа	Относительная деформация при разрыве, ε_r , %	Плотность, ρ , гр./см ³
Е-стекловолокно	70...80	2000...3500	3,5...4,5	2,5...2,6
S-стекловолокно	85...90	3500...4800	4,5...5,5	2,46...2,49
Высокомодульное углеродное волокно	390...760	2400...3400	0,5...0,8	1,85...1,9
Высокопрочное (нормально модульное) углеродное волокно	240...280	4100...5100	1,6...1,73	1,75
Арамидные волокна	62...180	3600...3800	1,9...5,5	1,44...1,47
Сталь	206	230...400 – предел текучести; 350...600 – предел прочности	20...30	7,8

В тоже время конструкционные волокна демонстрируют существенные отличия от сталей в температурном деформировании, приводящие к значительному перераспределению напряжений в составе усиленных фибропластиками оболочек цилиндрических резервуаров [4]. Так, при отсутствии на момент усиления начального давления в резервуаре и установке фибропластиков без предварительного напряжения, взаимосвязь между напряжениями в металлическом и фибропластиковом слоях комплексной конструкции стенки, абстрагированная от продольных напряжений, составит:

$$\sigma_s = \frac{\sigma_f}{m} - (\alpha_s - \alpha_f) \Delta T E_s . \quad (4)$$

где: ΔT — величина равномерного изменения температуры всех слоев стенки резервуара.

Таким образом изменение напряжений в металлической составляющей усиленной стенки цилиндрического резервуара $\Delta\sigma_T = (\alpha_s - \alpha_f) \Delta T E_s$, обусловленное температурными колебаниями $\Delta T = \pm 40^\circ\text{C}$, для различных видов конструкционных волокон может достигать величин представленных в таблице 2. При этом наибольшее изменение параметров напряженного состояния имеет место при использовании углеродных и арамидных волокон, а наименьшее — при изготовлении усиливающих фибропластиков на основе стекловолокна.

Таблица 2

Коэффициенты линейных температурных деформаций различных видов конструкционных волокон и сопряженные с ними колебания напряжений в металлических составляющих цилиндрических оболочек, усиленных внешним поперечным фибропластиковым армированием

Конструкционные волокна	Коэффициент линейных температурных деформаций, α_f , $10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	Температурные колебания, $^\circ\text{C}$	Колебания температурных напряжений, $\Delta\sigma_T$, кН/см^2
Е-стекловолокно	5,4	± 40	$\pm 4,1$
S-стекловолокно	2,9		$\pm 6,2$
Высокомодульное углеродное волокно	-1,45		$\pm 9,8$
Высокопрочное (нормальномульское) углеродное волокно	-0,9		$\pm 9,3$
Арамидные волокна	-2,0		$\pm 10,2$

Еще одним недостатком наиболее высокомульских конструкционных волокон является их высокая стоимость (табл. 3, рис. 2), многократно превосходящая стоимость высокопрочного стекловолокна и таким образом оставляющего за последним дальнейшие перспективы при выполнении усиливающих аппликаций. При этом практическое использование относительно низкомульских стеклянных волокон возможно только при наличии предварительного напряжения фибропластиковых элементов, беспрепятственное достижение которого удается только для конструкций незначительных диаметров. При усилении крупногабаритных резервуаров создание предварительного напряжения фибропластиковых элементов сопряжено с рядом технологических и конструктивных сложностей, усугубляемых не всегда правильной геометрической формой реальных сооружений.

Таблица 3

Сравнение ценовых показателей различных видов конструкционных волокон и арматурной стали; адаптировано по [38]

Конструкционные волокна / Арматурная сталь	Цена, евро/кг
Е-стекловолокно	1,25...2,5
S-стекловолокно, R-стекловолокно	15...25
Углеродные волокна	10...45
Арамидные волокна	18...30
Борные волокна	70...500
Арматурная сталь	0,6...0,7

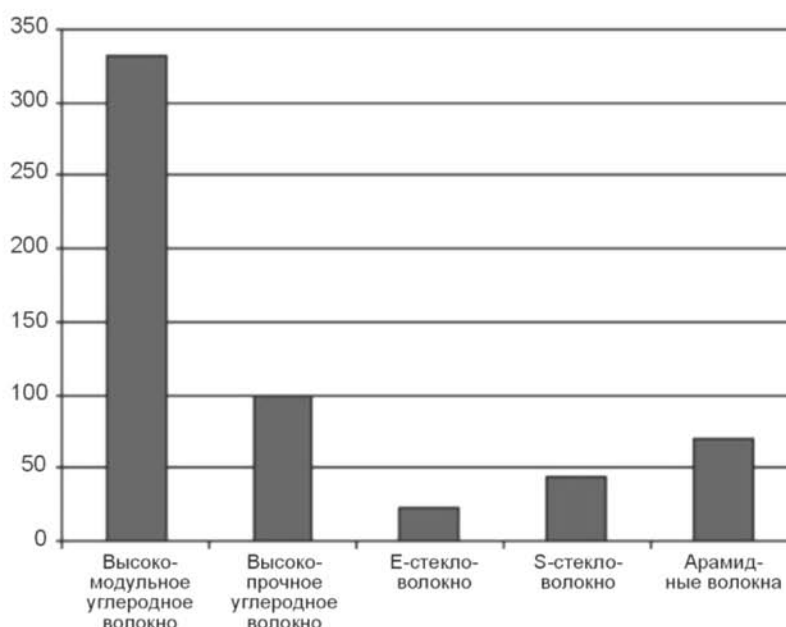


Рис. 2. Соотношение условных коэффициентов стоимости различных видов конструкционных волокон; адаптировано по [38]

Вывод

Внешнее армирование стенок металлических цилиндрических резервуаров высокопрочными фибропластиковыми материалами позволяет в значительной степени увеличить их несущую способность. Эффективность подобных решений достигается при использовании предварительного напряжения фибропластиковых элементов, а также при применении в их составе высокомодульных конструкционных волокон. При этом различия в параметрах термического деформирования сталей и армирующих волокон существенно влияют на распределение напряжений в слоях соответствующих конструкций, давая максимальный прирост усилий при использовании высокомодульных материалов. Применение методов предварительного напряжения фибропластиковых элементов позволяет эффективно использовать при внешнем усилении цилиндрических резервуаров ограниченных габаритных размеров значительно более дешевые конструкционные волокна, отличающиеся средними величинами модулей упругости.

Литература

1. Дзюба С.В., Стоянов В.В. Проблемы усиления стенок металлических цилиндрических вертикальных резервуаров // Современные строительные конструкции из металла и древесины / Сб. научных трудов ОГАСА. – Одеса: ОДАБА, 2015. – С. 40-65
2. Дзюба С.В., Стоянов В.В. Усиление стенок металлических цилиндрических резервуаров направленно-ориентированными фибропластиковыми материалами // Современные строительные конструкции из металла и древесины / Сб. научных трудов ОГАСА. – Одеса: ОДАБА, 2015. – С. 66-78.
3. Дзюба С.В. Консервация усталостных дефектов стенок металлических цилиндрических резервуаров предварительно напряженными фибропластиковыми материалами // Современные строительные конструкции из металла и древесины / Сб. научных трудов ОГАСА. – Одеса: ОДАБА, 2015. – С. 32-39.
4. Дзюба С.В., Михайлов А.А. Влияние термических деформаций на напряженное состояние стенок металлических цилиндрических резервуаров, усиленных направленно-ориентированными фибропластиковыми материалами // Современные строительные конструкции из металла и древесины / Сб. научных трудов ОГАСА. – Одеса: ОДАБА, 2016. – С. 39-50.

5. Стан та залишковий ресурс фонду будівельних металевих конструкцій в Україні / А.В. Перельмутер, В.М. Гордеев, Є.В. Горохов та ін.; За ред. д.т.н. Перельмутера А.В. – К.: Сталь, 2002. – 166 с.
6. Современное состояние нефтеперерабатывающей промышленности и рынка нефтепродуктов в государствах — участниках СНГ (информационно-аналитический обзор) / Исполнительный комитет Содружества независимых государств. – М., 2015. – 31 с.
7. Егоров Е.А., Анализ надежности стальных резервуаров для хранения товарных нефтепродуктов // Современные строительные конструкции из металла и древесины / Сб. науч. тр. ОГАСА. – Одесса: ОГАСА, 1999. – С. 61-65.
8. Егоров Е.А. Исследования и методы расчетной оценки прочности, устойчивости и остаточного ресурса стальных резервуаров, находящихся в эксплуатации / Сб. науч. тр. – Днепропетровск: ПГАСА, 1996. – 99 с.
9. Егоров Е.А. Некоторые результаты и проблемы технического диагностирования стальных резервуаров для хранения нефтепродуктов // Зб. наук. праць Придніпровської ДАБА та Варшавського технічного ун-ту. – Дніпропетровськ: ПДАБА, 1999. – С. 77-82.
10. Барвинко Ю.П., Голинько В.М., Барвинко А.Ю. О работоспособности вертикальных монтажных стыков стенки цилиндрических резервуаров большой емкости, построенных из рулонных заготовок // Нові рішення в проектуванні та будівництві металевих резервуарів / Зб. тез міжнародного колоквиуму. – К., Одеса: ІАСС, 2000. – С. 11-12.
11. Почтовик П.Г., Шаршунов Г.К. Повышение надежности резервуаров нефтеперекачивающих станций путем проведения промежуточных обследований // Металлические конструкции. / Сб. тр. МИСИ им. Куйбышева. – М.: МИСИ, 1984. – С. 127-132.
12. Барвинко Ю.П., Голинько В.М., Барвинко А.Ю., Перельмутер А.В., Кулеба Г.В. Повышение работоспособности вертикальных монтажных сварных соединений стенки стальных цилиндрических резервуаров, построенных из рулонных заготовок // Автоматическая сварка, 2001, №7(589). – С. 27-32.
13. Розенштейн И.М. Ремонт стенок вертикального стального резервуара без вывода его из эксплуатации // Нові рішення в проектуванні та будівництві металевих резервуарів / Зб. тез міжнародного колоквиуму. – К., Одеса: ІАСС, 2000. – С. 24-25.
14. Билецкий С.М., Голинько В.М., Барвинко Ю.П. Пути повышения эксплуатационной надежности сварных цилиндрических резервуаров, изготавливаемых из рулонированных заготовок // Автоматическая сварка, 1990, №3. – С. 50-52.
15. Правила технической эксплуатации резервуаров и инструкции по их ремонту. – М.: «Недра», 1988. – 182 с.
16. Рекомендации по усилению и ремонту строительных конструкций инженерных сооружений. – М.: ЦНИИПромзданий, 1990.
17. Рекомендации по восстановлению несущей способности цилиндрических резервуаров способом усиления стенки стальными кольцевыми бандажами. – Астрахань: ЦНИЛ, 1984.
18. Беленя Е.И., Астряб С.М., Рамазанов Э.Б. Предварительно напряженные металлические листовые конструкции. – М.: Сиройиздат, 1979. – 192 с.
19. Металлические конструкции: Спец. курс / Е.И. Беленя, Н.Н. Стрелецкий, Г.С. Веденников и др.; Под ред. Е.И. Беленя. – М.: Стройиздат, 1991. – 687 с.
20. Астряб С.М. Исследование прочности тонкостенных предварительно напряженных цилиндрических оболочек, работающих под равномерным внутренним давлением // Труды III Международной конференции по предварительно напряженным металлическим конструкциям. СССР, т. 1. – М.: 1971.

21. Астряб С.М., Гусев Б.М. Экспериментально-теоретическое исследование прочности предварительно-напряженной цилиндрической оболочки // Труды НИИХИММаш, №56. –М.: 1972.
22. Беленя Е.И. Предварительно-напряженные несущие металлические конструкции. –М.: 1975.
23. Беленя Е.И., Купалов К.К., Соболев Ю.В. Изыскание рациональной предварительно-напряженной конструкции аппарата высокого давления с цилиндрическим корпусом // Труды III Международной конференции по предварительно напряженным металлическим конструкциям. СССР, т. 2. –М.: 1971.
24. Беленя Е.И., Сафарян М.К., Рамазанов Э.Б. Экспериментальные исследования предварительно-напряженного стального резервуара // Экспрессинформация Мингазпрома, №23. –М.: 1968.
25. Ищенко Ю.К., Зайцева Л.Л., Астряб С.М. Опыт усиления стенки стального резервуара вместимостью 1000 м³ путем обмотки проволокой // Исследования новых методов сварки и процессов монтажа резервуаров / Труды ВНИИМСС, № 20. – М.: 1977.
26. Лялин К.В. Некоторые аспекты совершенствования конструкций и технологии сборки и сварки цилиндрических резервуаров // Монтажные и специальные работы в строительстве, 1997, №7. – С. 10-13.
27. Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre-reinforced polymer (FRP) composites. Edited by L.C. Hollaway and J.G. Teng. – Woodhead Publishing Limited and Maney Publishing Limited on behalf of The Institute of Materials, Minerals & Mining, 2008. – 398 p.
28. Handbook of Composites. Edited by Peters, S.T. Second edition. – London: Chapman & Hall, 1998. – 1118 p.
29. Bryan Harris. Engineering Composite Materials. – London: The Institute of Materials, 1999. – 194 p.
30. FRP Design Guide, S&P Clever Reinforcement Company, Brunnen, Switzerland, June 2000. – 70 p.
31. Cripps, A., Harris, B. and Ibell, T. Fibre-reinforced polymer composites in construction, C564. – London: CIRIA, 2002.
32. Shcnoi, R.A., Moy, S.S.J., Hollaway, L.C. Advanced polymer composites for structural application. – Thomas Telford, 2002.
33. Mortensen A. Concise Encyclopedia of Composite Materials. – Pergamon, 2007. – 958 p.
34. High-Performance Construction Material. Edited by Caijun Shi and Y.L. Mo. –World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2008. – 431 p.
35. Fibrous and composite materials for civil engineering applications. Edited by R. Figueiro. – Woodhead Publishing Limited, 2011. – 401 p.
36. Advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composites for structural applications. Edited by Jiping Bai. – Woodhead Publishing Limited, 2013. – 906 p.
37. CNR-DT 200/2004 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. Materials, RC and PC structures, masonry structures. ROME – CNR, July 13th, 2004. – 144 p.
38. Friberg E., Olsson J. Application of fiber reinforced polymer materials in road bridges – General requirements and design considerations // Master of Science Thesis in the Master's Programme of Structural Engineering and Building Technology / Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Structural Engineering, Chalmers University of Technology: Göteborg, Sweden, 2014. – 359p.