

УДК 624.014:624.074.7:624.953

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ СТЕНОК МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ, УСИЛЕННЫХ ФИБРОПЛАСТИКАМИ

THE INFLUENCE OF THERMAL EXPANSION ON THE STRESSED STATE OF WALLS OF METALLIC CYLINDRICAL RESERVOIRS STRENGTHENED BY THE FIBER REINFORCED PLASTICS

Дзюба С.В., Михайлов А.А. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса)

Dzyuba S.V., Mikhailov A.A. (Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odessa)

Рассматривается расчет стенок металлических цилиндрических резервуаров, усиленных предварительно напряженными фибропластиковыми элементами; определяется взаимосвязь напряжений, действующих в комплексной конструкции при переменных температурных режимах эксплуатации; дается оценка степени влияния температурных деформаций на конечные величины параметров напряженного состояния

Ключевые слова: металлические цилиндрические резервуары, методы усиления стенок резервуаров, фибропластиковые системы, термические деформации, напряженное состояние

The estimation of wall strengthening of metallic cylindrical reservoirs by the prestressed fiber reinforced polymer (FRP) systems are examined; the interrelation between tensions operating in a complex construction at the variable temperature conditions is determined; the effect of thermal expansion on the eventual parameters of the tensed state is evaluated

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

Актуальность усиления. Отечественный парк металлических цилиндрических резервуаров, составлявший по различным оценкам на начало 2000-х годов около 17...20 тысяч штук, из которых более 360 штук характеризовались вместимостью 2000...50000 м³, отличается сравнительно длительными сроками эксплуатации. По состоянию на названный период около 75% из числа данных сооружений находились

в работе более 20 лет, что превышает нормативный срок службы, а 40% — более 30 лет [4]. В настоящее же время ситуация только усугубилась.

Длительная эксплуатация резервуаров обуславливает существенный физический износ их конструкций и сопутствующую аварийность [1-3]. В резервуарах малой и средней вместимости (до 5000 м³) основной причиной износа стенок сооружений является коррозия [4, 5]. Даже при относительно небольших средних скоростях ее проявления, малые толщины стенок (4...10 мм) способствуют существенной повреждаемости длительно эксплуатируемых сооружений. Кроме того, как свидетельствуют современные исследования [6, 7], коррозия тонкостенных листовых элементов, кроме уменьшения толщин, ведет и к снижению прочности используемого металла. Опасность отказа рассматриваемых конструкций, вызванная процессами коррозии, в большинстве случаев актуальна при объемах резервуаров 1000 м³ и более. Анализ надежности эксплуатации таких сооружений [4] указывает на существенное повышение рисков их использования после 20 лет службы, а также на необходимость понижения проектного уровня их наполнения по истечении 30 лет.

В резервуарах больших размеров (емкостью более 5000 м³) процесс коррозии стенок, в силу больших толщин листовых элементов и меньшей сопутствующей относительной повреждаемости, имеет второстепенное значение для обеспечения работоспособности конструкций. Для таких сооружений эксплуатационные риски в большинстве случаев обуславливаются проявлениями усталости металла. К числу подобных дефектов, развивающихся в процессе эксплуатации и потенциально способных вызвать лавинообразное разрушение всего сооружения [4], относятся усталостные трещины вертикальных стыковых соединений листовых элементов, вызванные геометрическими несовершенствами сборки стенок резервуаров и сопровождаемые появлением значительных по величине местных напряжений [8, 9]. Уже после 15...20 лет эксплуатации (т.е. 5×10^3 ... 10^4 рабочих циклов заполнения) во многих вертикальных стыках стенок резервуаров, изготовленных из рулонированных заготовок с толщиной листов 16 мм и более, зарождаются усталостные трещины [10]. Использование рулонной технологии при сборке большинства отечественных резервуаров привело к аварийному состоянию ряда таких сооружений, работающих в режиме интенсивной малоцикловой (1...2 цикла налива-слива в сутки) эксплуатации [11].

Проблемы, сопряженные с традиционными методами повышение несущей способности стенок резервуаров. Распространенными методами борьбы с дефектами стенок металлических цилиндрических резервуаров, обусловленными коррозионными воздействиями, является последовательная замена их поврежденных участков, а также поперечное бандажирование, выполняемое разъемными стальными кольцами, состоящими из полос, стянутых резьбовыми соединениями [1, 12, 13, 14]. Однако данные методы усиления сопряжены с рядом конструктивных и технологически трудностей.

Замена фрагментов стенок требует длительного вывода сооружений из эксплуатации, их слива, дегазации, зачистки от скопившейся на дне грязи (составляющей в крупных резервуарах сотни тонн), пропарки, а также выполнения жестких требования по пожарной защите при выполнении сварочных работ. Напряженное состояние накладок, заменяющих участки стенок, а также их монтажных соединений во многом определяется процессами усадки сварных швов и сопутствующими остаточными напряжениями, что в ряде случаев приводит к появлению выпуклостей в элементах стенок (обычно нижних, наиболее нагруженных зон).

Усиление стенок отдельными, отстоящими друг от друга бандажами, вызывает появление местных изгибающих моментов, действующих в направлении вертикальной оси резервуара и способствующих потере местной устойчивости прокорродировавших участков стенки, а также приводящих при малоцикловых загрузках к процессам усталостного трещинообразования в горизонтальных, совмещенных в одну линию сварных швах. Эксплуатация сооружений, усиленных таким образом, требует соблюдения ряда технологических мероприятий [15].

В тех случаях, когда несущая способность стенок металлических резервуаров ограничивается усталостными дефектами вертикальных сварных швов элементов рулонной сборки, в качестве методов повышения надежности сооружений обычно используется ограничение количества циклов заполнения сооружений [16-18], устройство внешних горизонтальных усиливающих ребер [19], а также уход от совмещенного стыка стенки путем его вырубки и вварки по всей высоте сооружения специальных «гребенчатых» вставок [9, 10, 20]. При этом устройство усиливающих ребер имеет довольно ограниченную эффективность, а выполнение «гребенчатые» вставок требует сложных технологически операций, обеспечивающих сварку по «жесткому контуру» и компенсирующих поперечную усадку сварных швов, а также придающих кромкам выреза по всей высоте стенки необходимое проектное

положение (чему препятствует наличие изгибающих моментов, выгибающих листы конструкции во внутрь резервуара) [21].

Усиление стенок резервуаров направленно-ориентированными фибропластиковыми материалами. Современной альтернативой описанным выше конструктивным решениям является комплексное усиление стенок металлических цилиндрических резервуаров внешним армированием высокопрочными фибропластиковыми материалами непрерывной длины, размещаемым по высоте наиболее нагруженных поясов перпендикулярно оси сооружения и направленно воспринимающими действующие усилия [1]. Подобное усиление позволяет осуществлять эффективное восполнение материала, утраченного в процессе коррозии, а также консервацию дефектов, обусловленных процессами усталостного разрушения соединений листовых элементов, тем самым существенно продлевая срок службы данных конструкций. Немаловажной также является сопутствующая «не силовая» реабилитация, обеспечивающая герметизацию и необходимую антикоррозионную защиту внешних поверхностей стенок резервуаров.

Установка фибропластиковых элементов внешнего усиления, прочность армирующих волокон которого на порядок превосходит прочность строительных сталей [22-33], может осуществляться как с использованием предварительного напряжения, так и при его отсутствии, что достигается применением фибропластиков на основе высокомодульных углеродоволоконных материалов, демонстрирующих кратное превышение модуля упругости над соответствующей характеристикой стали. При необходимости использования методов предварительного напряжения начальные усилия могут создаваться механизмами, подобными тем, что применяются в отношении обматываемых конструкций железобетонных резервуаров [34, 35] или поперечно армируемых фибропластиками железобетонных колонн большого диаметра [22, 36, 37].

Предварительное напряжение фибропластиковых элементов или использование высокомодульных армирующих волокон, позволяет осуществлять производство работ по усилению при неполном сливе хранимого продукта. Такие решения, в отличие от методов, предусматривающих поэлементную замену дефектных участков стенок, также не требует предварительной дегазации, внутренней зачистки и пропарки резервуаров, что существенно упрощает технологию и уменьшает продолжительность производства работ.

Определение параметров напряженного состояния стенок металлических резервуаров, усиленных направленно-ориентирован-

ными фибропластиковыми материалами. Расчету цилиндрических оболочек, воспринимающих внутреннее давление и составленных из совместно работающих слоев разномодульных и разнопрочностных материалов, допускающих гетерогенно-анизотропную природу своих механических свойств, посвящен ряд трудов, из которых классически принято считать работы Беленя Е.И., Астряба С.М. и Ромазанова Э.Б. [34, 35, 38-43], дающие четкие и относительно опробованные решения. Однако, применительно к внедрению внешнего фибропластикового усиления металлических цилиндрических конструкций, возникает ряд проблем, в составе которых одной из основных является значительное отличие в термическом деформировании строительных сталей и фиброармированных пластиков. Как известно коэффициент линейного температурного деформирования сталей составляет величину $10,4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, в тоже время для высокопрочных фибропластиков данная величина колеблется от положительной величины $5,4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, соответствующей материалам на основе Е-стекловолокна, до отрицательной величины $-2,0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, соответствующей материалам на основе арамидных волокон, наиболее же прочные и высокомодульные углеродоволоконные пластики демонстрируют отрицательное температурное деформирование с соответствующими коэффициентом, находящимися в диапазоне $(-0,6 \dots -1,45) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [1, 22, 30-33]. Так же немаловажным фактором, учет которого необходим при рассмотрении работы усиливаемых стенок эксплуатируемых резервуаров, является возможность наличия начального внутреннего давления, создаваемого частичным заполнением сооружения.

Рассмотрение работы стальной стенки цилиндрического резервуара, имеющей радиус r и толщину t_s , находящейся под действием начального внутреннего давления P' , усиливаемой непрерывно располагаемыми по ее высоте поперечными предварительно напрягаемыми напряжением σ_{f0} фибропластиковыми элементами толщиной t_f и испытывающей последующее повышение давления на величину ΔP (рис. 1) позволило получить величины максимальных кольцевых напряжений, соответственно, в элементах фибропластикового усиления и стальной стенки резервуара [2]:

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

$$\sigma_s = \frac{P' r}{t_s} - \sigma_{f0} \frac{t_f}{t_s} + \frac{N_{s-x,z} + t_f E_f (\alpha_f \Delta T_{f1} - \alpha_s \Delta T_{s1})}{t_s + t_f m}, \quad (2)$$

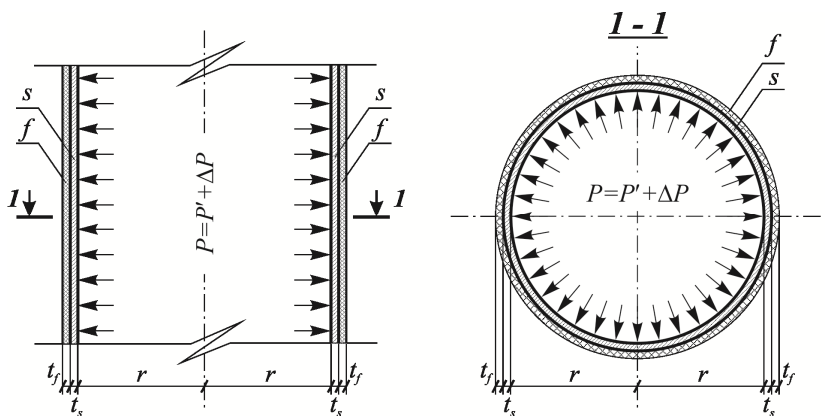


Рис. 1. Расчетная схема стальной цилиндрической оболочки резервуара, усиленной внешним поперечным фибропластиковым армированием: s — стальная оболочка резервуара, f — слой внешнего поперечного фибропластикового усиления

где: $N_{f-x,z} = (\Delta P)r(1 - \mu/2)$, $N_{s-x,z} = (\Delta P)r \left[1 + m \frac{t_f \mu}{t_s} \right]$ — 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; $m = E_f/E_s$ — отношение модулей упругости составляющих слоев стенки; μ — коэффициент Пуассона стальной составляющей стенки резервуара; σ_{f0} — напряжения предварительного 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.

Влияние термических деформаций на напряженное состояние элементов конструкции. Как показывает анализ работы металлических цилиндрических оболочек резервуаров, усиленных внешним слоем материала, воспринимающим только кольцевые усилия, учет продольных напряжений конструкции приводит к незначительному увеличению толщины их стальных частей и уменьшению толщин усиливающих слоев, уточняя расчет не более чем на 4...5% [35]. Таким образом, для оценки влияния температурных деформаций на работу комплексной конструкции может быть принято $N_{f-x,z} \approx N_{s-x,z} \approx (\Delta P)r$.

Наиболее характерным случаем, определяющим температурные режимы эксплуатации большинства металлических резервуаров, является плавное изменение температур с одинаковыми их величинами ΔT во всех слоях стенок конструкции.

Совместное рассмотрение выражений, определяющих напряжения в стальной стенке резервуара и усиливающих фибропластиковых элементах (формулы (1) и (2)), абстрагированное от продольных напряжений оболочки и учитывающее равномерное изменение температур материалов всех слоев ΔT , позволяет получить соотношение между рассматриваемыми напряжениями, составляющее

$$\sigma_s = \frac{\sigma_f - \sigma_{f0}}{m} + \frac{P'r}{t_s} - \sigma_{f0} \frac{t_f}{t_s} - \Delta\alpha \Delta T E_s, \quad (3)$$

где: $\Delta\alpha = \alpha_s - \alpha_f$ — разность коэффициентов линейного температурного деформирования стали и слоя усиливающего фибропластика.

Показательным частным случаем вышеприведенного выражения, позволяющим четко оценить степень изменения внутренних усилий при температурных деформациях элементов конструкции, является загрузка оболочки резервуара, усиленного при отсутствующем начальном давлении (т.е. $P'=0$) без предварительного напряжения ($\sigma_{f0} = 0$):

$$\sigma_s = \frac{\sigma_f}{m} - \Delta\sigma_T. \quad (4)$$

где: $\Delta\sigma_T = \Delta\alpha \Delta T E_s$ — величина, определяющая изменения напряжений под воздействием температурных деформаций.

Изменения теоретических величин напряжений $\Delta\sigma_T$, обусловленных температурными деформациями элементов двухслойной оболочки, представлены на рисунке 2.

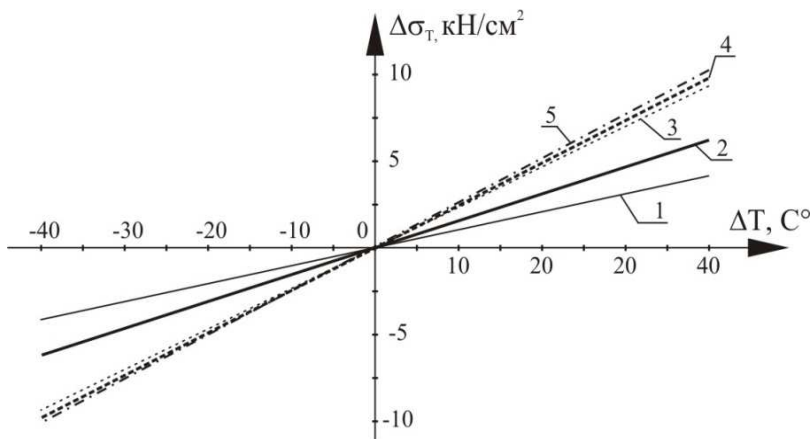


Рис. 2. Изменения теоретических величин напряжений, определяемых температурными деформациями, при использовании для армирования фибропластиков: 1 — Е-стекловолокна ($\Delta\sigma_T = \pm 4,1 \text{ кН/см}^2$ при $\alpha_f = 5,4 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ и $\Delta T = \pm 40 \text{ }^\circ\text{C}$), 2 — S-стекловолокна ($\Delta\sigma_T = \pm 6,2 \text{ кН/см}^2$ при $\alpha_f = 2,9 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ и $\Delta T = \pm 40 \text{ }^\circ\text{C}$), 3 — высокопрочного (нормально модульного) углеродного волокна ($\Delta\sigma_T = \pm 9,3 \text{ кН/см}^2$ при $\alpha_f = -0,9 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ и $\Delta T = \pm 40 \text{ }^\circ\text{C}$), 4 — высокомодульного углеродного волокна ($\Delta\sigma_T = \pm 9,8 \text{ кН/см}^2$ при $\alpha_f = -1,45 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ и $\Delta T = \pm 40 \text{ }^\circ\text{C}$), 5 — арамидного волокна ($\Delta\sigma_T = \pm 10,2 \text{ кН/см}^2$ при $\alpha_f = -2,0 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ и $\Delta T = \pm 40 \text{ }^\circ\text{C}$)

Таким образом, увеличение эксплуатационных температур способствует снижению напряжений в металлической составляющей комплексной конструкции стенки резервуара и догрузению элементов ее фибропластикового усиления. Снижение же температур вызывает обратный эффект. При этом, как видно из графиков, температурный прирост напряжений в зависимости от типа армирующих фибропластик волокон, при вполне реальных перепадах температур $\Delta T = \pm 40 \text{ }^\circ\text{C}$, может достигать до $\pm 10,2 \text{ кН/см}^2$ (для арамидных волокон). Подобные термические изменения параметров напряженного состояния, ограничено отражаясь на работоспособности фибропластиков (учитывая абсолютные значения их прочностных показателей), фактически оказываются одним из решающих факторов, определяющих работоспособность металлических частей усиливаемых стенок цилиндрических резервуаров.

Вывод. Реализация перспективных конструктивных решений усиления стенок металлических цилиндрических резервуаров внешним поперечным армированием высокопрочными направленно-ориентированными фибропластиковыми материалами требует учета влияния температурных деформаций таких систем на величины параметров напряженного состояния, обоснованного соответствующими экспериментальными исследованиями.

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. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

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. Билецкий С.М., Голинько В.М., Барвинко Ю.П. Пути повышения эксплуатационной надежности сварных цилиндрических резервуаров, изготавливаемых из рулонизируемых заготовок // Автоматическая сварка, 1990, №3. – С. 50-52.

12. Правила технической эксплуатации резервуаров и инструкции по их ремонту. – М.: «Недра», 1988. – 182 с.

13. Рекомендации по усилению и ремонту строительных конструкций инженерных сооружений. – М.: ЦНИИПромзданий, 1990.

14. Рекомендации по восстановлению несущей способности цилиндрических резервуаров способом усиления стенки стальными кольцевыми бандажами. – Астрахань: ЦНИЛ, 1984.

15. Рекомендации по эксплуатации резервуаров, усиленных методом постановки кольцевых бандажей. – Астрахань: ЦНИЛ, 1984.

16. О допусках на угловые деформации вертикальных сварных стыков в резервуарах вместимостью 10...50 тыс. м³ для хранения нефти и нефтепродуктов / Ю.П. Барвинко, С.М. Билецкий, В.М. Голинько, В.В. Якубовский // Автоматическая сварка, 1991, №4. – С. 20-23.

17. О допусках на угловые деформации вертикальных стыков стенок нефтерезервуаров / Б.В. Поповский, Г.А. Ритчик, Ю.П. Барвинко, С.М. Билецкий, В.М. Голинько // Монтажные и специальные работы в строительстве, 1991, №5. – С. 11-12.

18. ВСН 311-89. Монтаж вертикальных цилиндрических резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов вместимостью от 100 до 50000 м³. – М.: Минмонтажспецстрой СССР, 1990. – 60 с.

19. РД 39-30-1331-85. Инструкция по усилению вертикальных монтажных стыков стенок резервуаров РВС-20000. — Введ. с 01.01.86 по 01.01.91. — М., 1985. — 6 с.

20. 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.

21. 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.

22. 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.

23. Композиционные материалы: справочник. Под ред. В.В. Васильева, Ю.М.Тарнопольского. — М.: Машиностроение, 1990. — 512 с.

24. Handbook of Composites. Edited by Peters, S.T. Second edition. — London: Chapman & Hall, 1998. — 1118 p.

25. Bryan Harris. Engineering Composite Materials. — London: The Institute of Materials, 1999. — 194 p.

26. FRP Design Guide, S&P Clever Reinforcement Company, Brunnen, Switzerland, June 2000. — 70 p.

27. Cripps, A., Harris, B. and Ibell, T. Fibre-reinforced polymer composites in construction, C564. — London: CIRIA, 2002.

28. Shcnoi, R.A., Moy, S.S.J., Hollaway, L.C. Advanced polymer composites for structural application. — Thomas Telford, 2002.

29. Mortensen A. Concise Encyclopedia of Composite Materials. — Pergamon, 2007. — 958 p.

30. High-Performance Construction Material. Edited by Caijun Shi and Y.L. Mo. —World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2008. — 431 p.

31. Fibrous and composite materials for civil engineering applications. Edited by R. Figueiro. — Woodhead Publishing Limited, 2011. — 401 p.

32. Advanced fibre-reinforced polymer (FRP) composites for structural applications. Edited by Jiping Bai. — Woodhead Publishing Limited, 2013. — 906 p.

33. 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.

34. Беленя Е.И., Астряб С.М., Рамазанов Э.Б. Предварительно напряженные металлические листовые конструкции. – М.: Сиройиздат, 1979. – 192 с.

35. 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.

36. Review of strengthening techniques using externally bonded fiber reinforced polymer composites. Report 2002-005-C-01. Project Leader Dr. Sujeeva Setunge. – CRC Construction innovation, 2002. – 67 p.

37. Kohzo Kimura, Hideo Katsumata. Applications of retrofit and repair using carbon fibers // Repairing Structures using Composite Wraps / – London: Kogan Page Limited, 2003. – P. 61-71.

38. 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.

39. Астряб С.М., Гусев Б.М. Экспериментально-теоретическое исследование прочности предварительно-напряженной цилиндрической оболочки // Труды НИИХИММаш, №56. –М.: 1972.

40. Беленя Е.И. Предварительно-напряженные несущие металлические конструкции. –М.: 1975.

41. 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.

42. Беленя Е.И., Сафарян М.К., Рамазанов Э.Б. Экспериментальные исследования предварительно-напряженного стального резервуара // Экспрессинформация Мингазпрома, №23. –М.: 1968.

43. 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.