

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.791

С. В. Богданов

### ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БЫСТРОВЗВОДИМЫХ СВАРНЫХ СТЕН ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

В статье рассмотрен анализ целесообразности по экономическим и прочностным показателям использования композитных несущих элементов (КНЭСК) для замены сварных оболочечных конструкций стенок наземных, заглубленных, подводных и подземных резервуаров для хранения жидкостей или газов. Анализ проводился на примере вертикального цилиндрического резервуара для хранения нефти и ее продуктов РВС-30000. Было рассмотрено три исполнения стенок резервуаров: типовое цельнометаллическое, монолитное и быстровозводимое из КНЭСК.

#### *Введение*

Сварные оболочечные конструкции обладают низкой устойчивостью к потере несущей способности. Композитный несущий элемент (КНЭСК) лишен этого недостатка.

Одним из перспективных по прочностным и экономическим параметрам направлений применения и развития композитных несущих элементов является замена ими сварных оболочечных конструкций. Такими оболочками являются сварные стенки вертикальных цилиндрических наземных, подземных, заглубленных и подводных резервуаров для хранения легковоспламеняющихся и химически активных жидкостей и газов [1].

КНЭСК представляет собой композитную структуру, состоящую из пространственно-развитой неразъемной сварной оболочечной арматуры и бетонного заполнителя.

Сварная оболочечная арматура призвана обеспечить равномерность распределения силовых, деформационных полей, повышенное сцепление с бетонным компонентом, выполняет роль несъемной самонесущей опалубки и подмостей, готовых воспринимать нагрузки в процессе возведения без бетонного компонента (рис. 1) [2].

Композитный материал, разработанный сотрудниками ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет» и Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), эффективно применяется в области мостостроения в качестве несущей основы пролетов мостов, путепроводов и автодорожных развязок [3].

#### *КНЭСК для стенок резервуаров*

Эффективное применение КНЭСК в сварных стенках вертикальных цилиндрических резервуаров обусловлено конструктивными особенностями сварной оболочечной арматуры, обеспечивающей действенное восприятие и распределение эксплуатационных нагрузок от веса хранимой жидкости и вышерасположенных элементов резервуара, повышенную устойчивость к потере несущей способности. Отличительной конструктивной особенностью, позволяющей применять КНЭСК как основу для проектирования и возведения сварных стенок резервуаров, является формирующий лист, обеспечивающий герметичность хранения жидкостей и газов вплоть до вакуумной изоляции. Он не является основным элементом, определяющим несущую способность

конструкции, и может выполняться из тонколистовых конструкционных, кислотостойких сталей, толщина которых в большей степени ограничена технологической прочностью при изготовлении сварной оболочечной арматуры КНЭСК и допуском на коррозионное разруше-

ние в течение срока безремонтной эксплуатации. Основные несущие функции при использовании КНЭСК для стенок резервуаров выполняет сварная оболочечная арматура из листовых ребристых и стержневых элементов, взаимодействующая с бетонным компонентом.

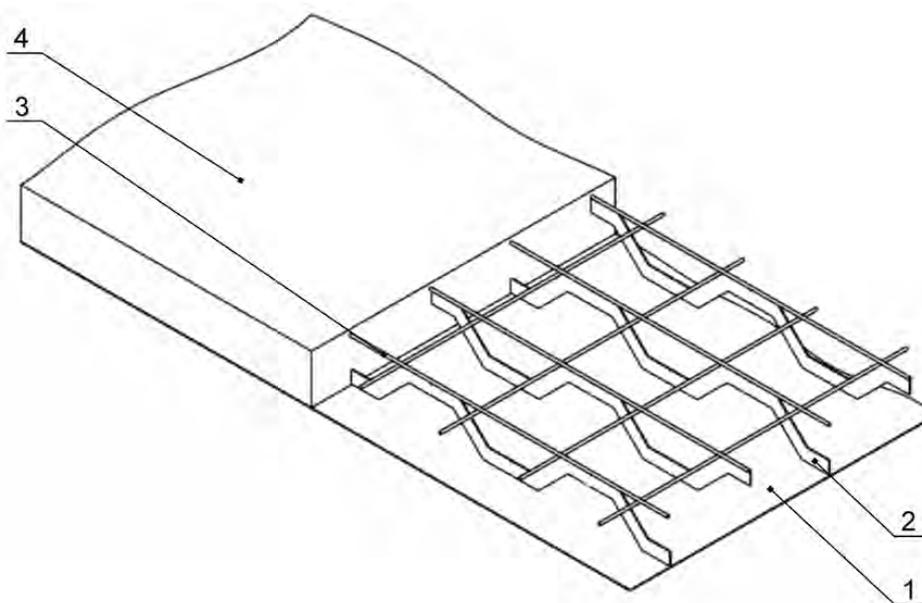


Рис. 1. Простейшее конструктивное исполнение КНЭСК: 1 – формообразующий лист; 2 – листовая арматура; 3 – стержневая арматура; 4 – бетонный наполнитель

Возможны два различных способа возведения стенок резервуара с использованием КНЭСК, для которых разработаны два типа конструкций стенок на основе КНЭСК.

Первый тип конструкции – монолитный, его способ возведения заключается в монтаже самонесущей сварной оболочечной арматуры КНЭСК и ее последующее заполнение бетоном с применением скользящей опалубки с наружной стороны. С внутренней стороны функции несъемной самонесущей опалубки выполняет формообразующий лист.

Сущность способа возведения второго типа конструкции – быстровозводимого, заключается в посегментном возведении сваркой без применения «мокрых» технологий бетонирования на монтаже. Сегменты заполняются бето-

ном на этапе изготовления до монтажа. Для второго способа возведения разработаны специальные монтажные стыки, обеспечивающие соединение сегментов из КНЭСК сваркой.

При монтаже монолитных стенок резервуара сроки монтажа ограничены скоростью твердения бетона до технологической прочности. Срок монтажа быстровозводимого исполнения с применением монтажных стыков, выполняемых сваркой, незначительно превышает срок монтажа стенок стальных резервуаров при полистовой сборке сваркой. Срок монтажа быстровозводимого типа конструкции определен временными затратами на установку в 6 раз более тяжелых сегментов и выполнением сварных соединений монтажного стыка с большей суммарной длиной сварных швов, но мень-

шим объемом наплавляемого металла, нежели при полистовой сборке сваркой стенок резервуара.

Сравнение по прочностным и экономическим показателям изготовления, монтажа и эксплуатации стенок резервуаров различного исполнения: типового стального цельнометаллического, монолитного и быстровозводимого проведено на примере вертикального цилиндрического резервуара со стационарной сферической крышей для хранения нефти номинальным объемом 30 тыс. м<sup>3</sup> (РВС-30000). Изготовление таких резервуаров осуществляется методом полистовой сборки. Для стенок этих резервуаров применяют листовой прокат из стали 09Г2С по ГОСТ 19903. В соответствии с ПБ 03-605-03 и РД 16.01-60.30.00-КТН-026-1-04 геометрические параметры листового проката, применяемого для полистовой сборки, имеют ограничения толщины, ширины и длины (табл. 1) [4, 5].

РВС-30000 имеют ряд конструктивных параметров, определенных нормативной документацией и рассчитанных субъектами, осуществляющими монтаж и реализацию данных резервуаров в соответствии с нормами проектирования РД 16.01-60.30.00-КТН-026-1-04, стандартом API-650 [7] и типовыми проектами серии 704-1 (табл. 2).

Монтажные стыки стенок вертикальных цилиндрических резервуаров разделены на вертикальные 1 и горизонтальные 2 (рис. 2).

Опираясь на вышеизложенные конструктивные параметры, ограничения и требования к материалам и сварным соединениям резервуаров в соответствии с ГОСТ 52910-2008 [7], были разработаны конструкции вертикальных и горизонтальных монтажных стыков со стыковыми сварными соединениями для быстровозводимых стен РВС-30000 из КНЭСК.

Табл. 1. Ограничения геометрических параметров листов для полистовой сборки вертикальных цилиндрических резервуаров

В миллиметрах		
Толщина	Ширина	Длина
4...50	2000...2500	До 8000

Табл. 2. Конструктивные параметры РВС-30000

Наименование параметра	Величина
Резервуар:	
номинальный объем, м <sup>3</sup>	30000
внутренний диаметр стенки, мм	45600
высота стенки $H$ , мм	18000
плотность продукта $\rho_{ж}$ , т/м <sup>3</sup>	0,9
расчетная высота налива, мм	17200
Стенка (полистовая сборка):	
количество поясов $n_p$ , шт.	8
толщина верхнего пояса, мм	10
толщина нижнего пояса, мм	18
Масса конструкций:	
стенка, т	285,632
днище, т	88,721
крыша, т	145,467
лестница $m_l$ , т	1,68
площадки на крыше, т	7,839
комплектующие конструкции $m_k$ , т	4,222

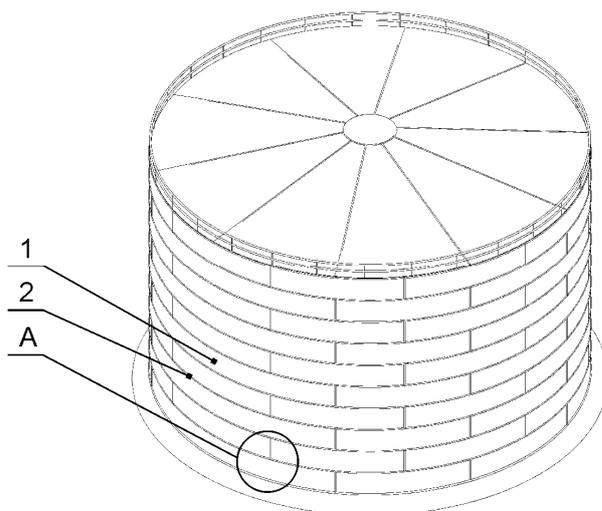


Рис. 2. Изометрический вид типового вертикального цилиндрического резервуара

Снижение действующих напряжений на сварных соединениях монтажных стыков обеспечивается за счет уменьшения касательных составляющих действующих на них нагрузок, благодаря измененной геометрии поверхностей контактирования бетонных компонентов, обеспечивающей дополнительное зацепление одного сегмента за другой, и стержневыми закладными армирующими элементами.

Для сравнения по прочностным показателям разработанных исполнений вертикальных и горизонтальных монтажных стыков для быстровозводимых стен резервуаров из КНЭСК (мат. модель 3) с типовым стальным (мат. модель 1) и монолитным (мат. модель 2) исполнениями были разработаны и реализованы методом конечных элементов математические модели. Нелинейность зависимости между деформациями и напряжениями, а также ортотропность механических свойств компонентов композита учитывались диаграммами деформирования для двух случаев нагружения (сжатие, растяжение). Поскольку металл имеет схожие диаграммы деформирования при сжатии и растяжении, то для задания зависимости используется упрощенная двухлинейная

диаграмма деформирования идеального упругопластического тела Прандтля. Бетон, в отличие от металла, является ортотропным материалом и по-разному деформируется при сжатии и растяжении, поэтому для описания поведения бетона в данной методике использована полная параболическая идеализированная диаграмма деформирования [8].

В математических моделях рассматривалась часть стенки резервуара, выделенная областью А на рис. 2, – нижний пояс резервуара с вертикальным и горизонтальными монтажными стыками. Ширина рассматриваемой части  $l$  определена исходя из линейных размеров поясов РВС-30000 и вышеперечисленных ограничений геометрических параметров листов для полистовой сборки:

$$l = H / n_{\text{п}} = 2250 \text{ м.} \quad (1)$$

Учитывая толщину листов нижнего пояса 18 мм, ближайшая кратная величина  $l = 2300$  мм согласно ГОСТ 19903-74. Линейный размер длины анализируемых объектов с учетом ограничений геометрических параметров листов для полистовой сборки вертикальных цилиндрических резервуаров (см. табл. 1) и номенклатурой листов, доступной на рынке металла, примем равным 4000 мм. Для

исполнений из КНЭСК толщины формообразующих листов и ребристых армирующих элементов были приняты равными минимально применимой в резервуаростроении – 4 мм. Остальные геометрические параметры сварной объемной арматуры КНЭСК и ее ребристых армирующих элементов приведе-

ны на рис. 4 и были определены по условиям обеспечения равномерности распределения ребристых армирующих элементов по его ширине и длине. Параметрические модели рассмотренных в математических моделях объектов приведены на рис. 3...5.



Рис. 3. Параметрическая модель типового исполнения (мат. модель 1)

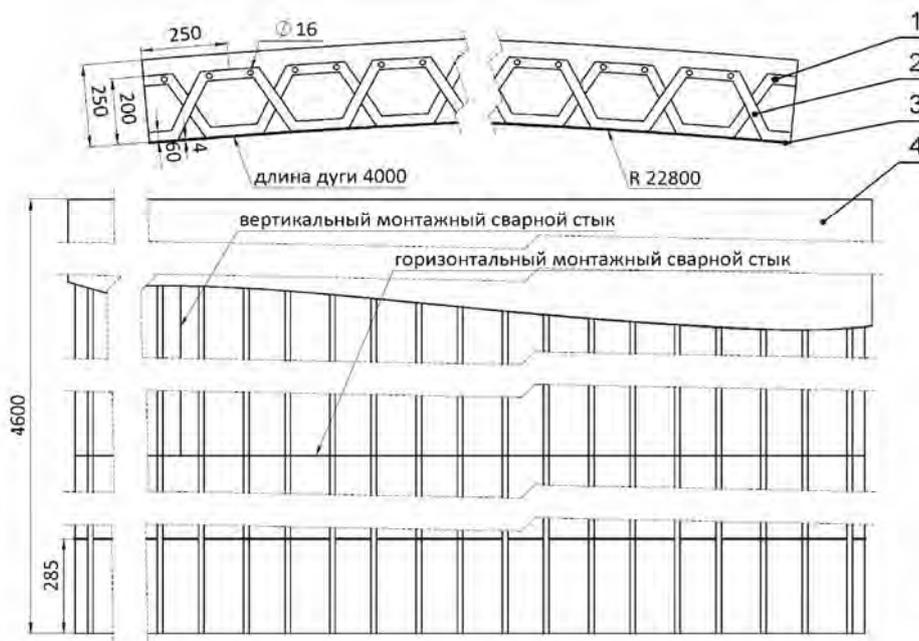


Рис. 4. Параметрическая модель монолитного исполнения (мат. модель 2)

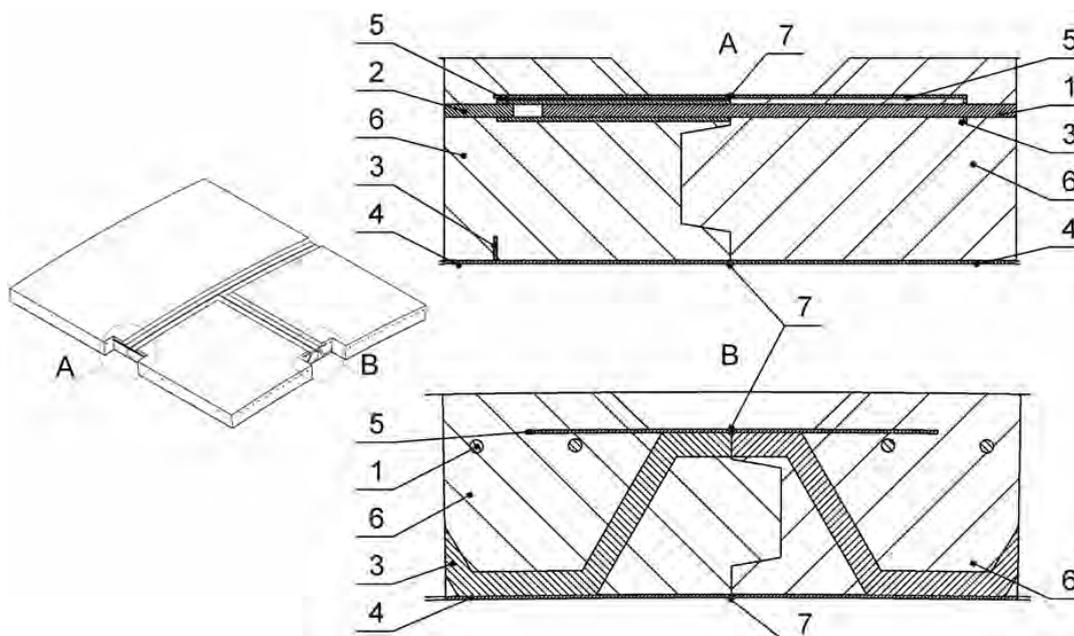


Рис. 5. Параметрическая модель быстровозводимого исполнения (мат. модель 3): 1, 2 – закладные стержневые армирующие элементы с и без трубок приемников; 3 – ребристые армирующие элементы; 4, 5 – нижний, верхний формообразующие листы; 6 – бетонный компонент; 7 – сварной монтажный шов

Расчетные схемы рассматриваемых исполнений основываются на реальных условиях их эксплуатации. В соответствии с перечнем возможных эксплуатационных постоянных и временных нагрузок [9] конструкции и их монтажные стыки воспринимают нагрузки, вызванные давлением жидкости, избыточным давлением воздушно-паровой смеси, ветром, снегом и весом вышерасположенных крыши, стенок, лестниц, площадок для обслуживания и комплектующего оборудования резервуара. В математических моделях учитывались эксплуатационные нагрузки от хранимой жидкости (нефти, как наиболее тяжелой из нефтепродуктов), избыточного давления воздушно-паровой смеси и веса вышестоящих элементов конструкции.

Величина давления на  $1 \text{ м}^2$  стенки резервуара, оказываемая хранимой товарной жидкостью и избыточным давлением воздушно-паровой смеси в зависимости от высоты, с учетом коэффициентов надежности, может быть определена по формуле [10]

$$p/1_{\text{H}} = \rho_{\text{ж}} \cdot H \cdot \gamma_{\text{ж}} + p_{\text{и}} \cdot \gamma_{\text{р}}, \quad (2)$$

где  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность хранимой жидкости (наиболее тяжелой хранимой жидкостью является нефть с максимальной плотностью 9),  $\text{кН/м}^3$ . Для исключения дополнительных коэффициентов в формуле (2) плотность в килоньютонах на метр кубический подставляется вместо общепринятых килограмм на метр кубический;  $H$  – высота, для которой рассчитывается величина давления; для нижней точки рассматриваемых объектов равна расчетной высоте разлива товарной жидкости – 17,2 м, для верхней точки – 12,6 м;  $\gamma_{\text{ж}}$  – коэффициент надежности для гидростатического давления жидкости,  $\gamma_{\text{ж}} = 1,1$ ;  $p_{\text{и}}$  – давление воздушно-паровой смеси товарной жидкости 2,  $\text{кН/м}^3$ ;  $\gamma_{\text{р}}$  – коэффициент надежности для давления воздушно-паровой смеси,  $\gamma_{\text{р}} = 1,2$ .

$$p/1_{17,2} = 172,68 \text{ кН/м}^2;$$

$$p/1_{12,6} = 127,14 \text{ кН/м}^2.$$

Нагрузка от веса вышерасположенных стенок резервуара, кровли, ле-

стниц, площадок обслуживания и комплекующего оборудования, приходящаяся на рассматриваемые объекты, определена коэффициентом, равным соотношению длин дуг данных объектов и всего резервуара:

$$l_C / l_P = 1 / 35,814, \quad (3)$$

где  $l_C$  – длина дуги рассматриваемых объектов, которая равна линейному размеру;  $l_P$  – длина дуги всего резервуара,  $l_P = D \cdot \pi$ .

Величина распределенной нагрузки от веса вышерасположенных конструкций, приходящаяся на 1 м поверхности для исполнений  $q_n$ , кН/м<sup>2</sup>, определена из соотношения:

$$q_n = \frac{\left( \frac{m_{стn} + m_{кр} + m_{л} + m_{пл} + m_{к}}{35,814} - m_n \right) \cdot g}{S_n},$$

где  $n$  – номер математической модели;  $g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;  $S_n$  – площадь поверхности, на которую действует нагрузка,  $S_1 = 0,072$  м<sup>2</sup>;  $S_2 = 1,057$  м<sup>2</sup>;  $S_3 = 1,028$  м<sup>2</sup>;  $m_{стn}$  – масса

стенок резервуара,  $m_{ст1} = 285,632$  т;  $m_{ст2} = 1766,16$  т;  $m_{ст3} = 1712,16$  т;  $m_n$  – масса рассматриваемого исполнения,  $m_1 = 2,605$  т;  $m_2 = 12,265$  т;  $m_3 = 11,89$  т.

Массы стенок рассматриваемых исполнений определены на основе параметрических моделей при плотности стали 7900 кг/м<sup>3</sup>, бетона 2400 кг/м<sup>3</sup>.

$$q_1 = 1335,9 \text{ кН/м}^2; q_2 = 384,719 \text{ кН/м}^2;$$

$$q_3 = 384,773 \text{ кН/м}^2.$$

Расчетная схема рассматриваемых объектов для сравнения по прочностным показателям представляет собой сегмент с вертикальным и горизонтальным монтажными стыками, жестким закреплением от всех перемещений на нижнем торце, распределенными нагрузками, от товарной жидкости и воздушно-паровой смеси  $p/1_H$  и веса вышерасположенных конструкций  $q_n$ . Реальные закрепления на боковых торцах учитывались осециклической симметрией. Принципиальная расчетная схема представлена на рис. 6.

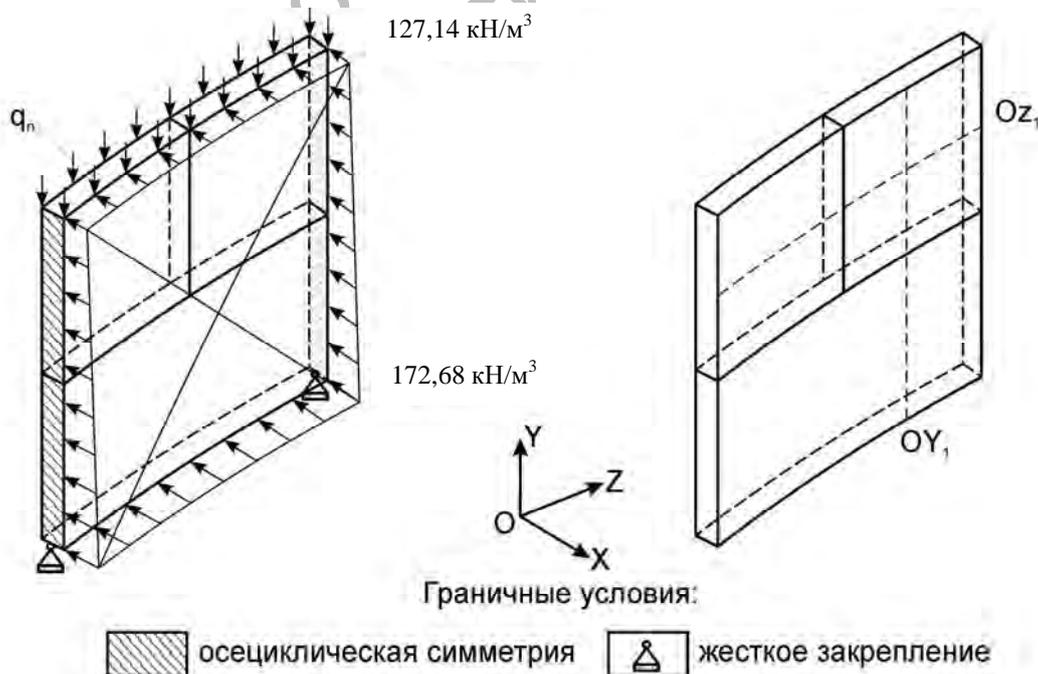


Рис. 6. Принципиальная расчетная схема и расположение контрольных сечений

По результатам исследований были построены распределения суммарных эквивалентных напряжений по Мизесу ( $S_s$ ), перемещений по оси  $Ox$  ( $U_x$ ) вдоль контрольного сечения  $OY_1$ , для разработанных исполнений (рис. 7 и 8). В месте пересечения вертикального монтажного стыка и контрольного сечения  $OZ_1$  сняты максимальные сум-

марные эквивалентные напряжения на сварных соединениях, их величина составила 125; 78; 93 МПа для мат. моделей 1...3. Максимальные напряжения на бетонном компоненте 2 и 3 исполнений составляют 12 МПа, что удовлетворяет условиям его прочности для данного типа конструкций согласно СНиП 2.03.01-84.

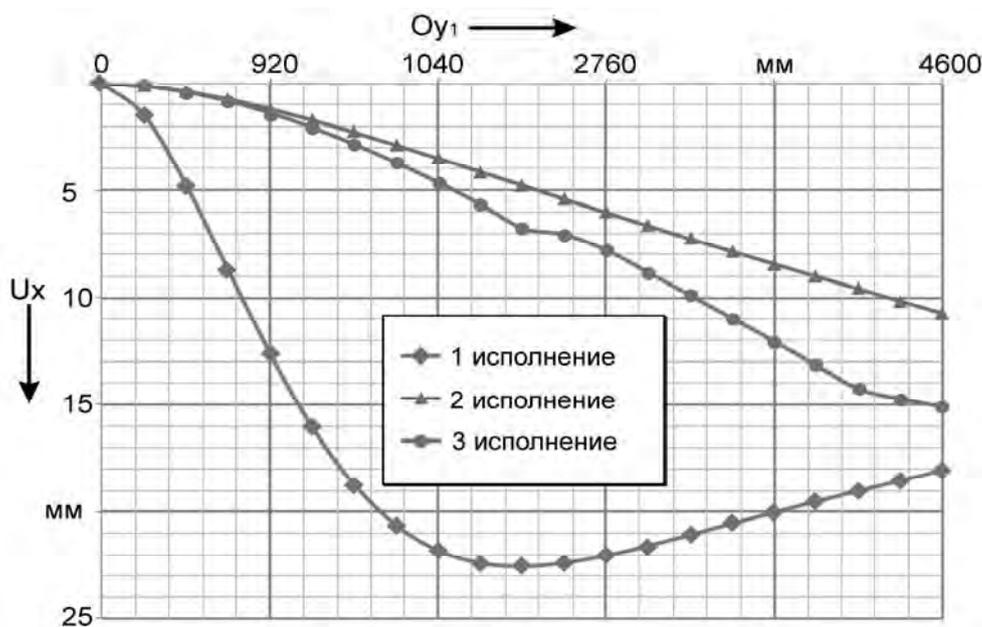


Рис. 7. Распределение перемещений по оси  $Ox$

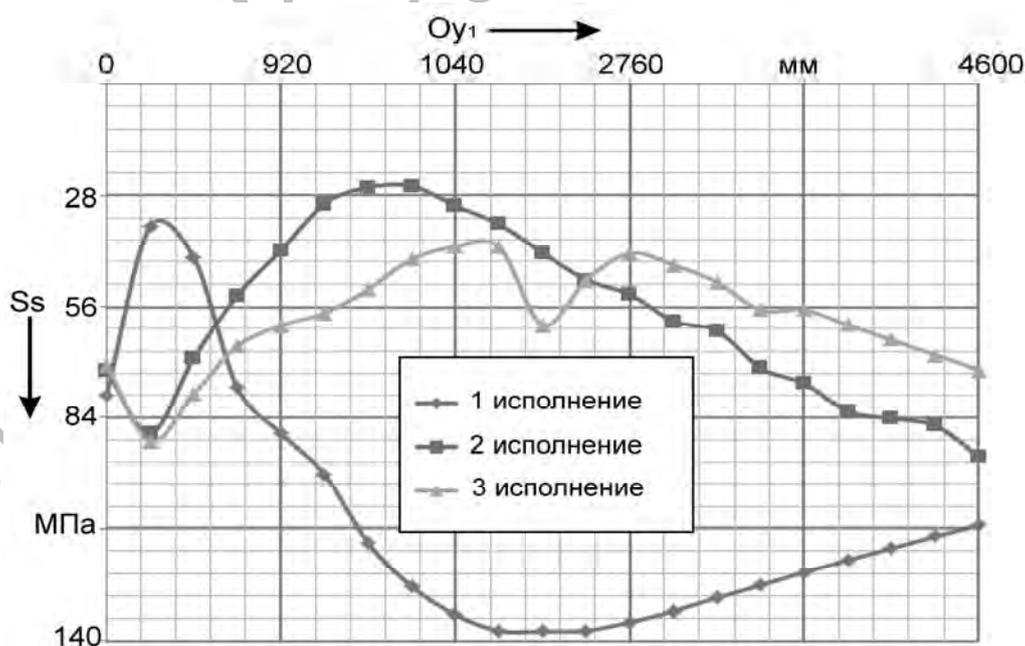


Рис. 8. Распределение суммарных эквивалентных напряжений

При использовании КНЭСК обеспечивается снижение металлоемкости конструкций стенок резервуара. Сохраняется достаточная для эффективной и безопасной эксплуатации несущая способность. За счет снижения деформируемости стенки повышается ее устойчивость к потере несущей способности. Величина максимальных напряжений на сварной оболочечной арматуре, закладных элементах и сварных монтажных швах быстровозводимого исполнения не превышает 70 МПа, что обеспечивает семикратный запас прочности. При этом величина напряжений на сварных соединениях и закладных элементах монтажных стыков быстровозводимого исполнения превышает максимальные напряжения монолитного исполнения в этой области всего на 18,2 МПа.

На основании проведенных исследований распределений полей перемещений и напряжений было установлено,

что монолитные и быстромонтируемые исполнения из КНЭСК для стен вертикальных цилиндрических резервуаров и их монтажные сварные стыки обладают достаточной несущей способностью и устойчивостью к потере несущей способности для эффективной эксплуатации конструкций на их основе.

Для рассмотренных исполнений проведен анализ экономической эффективности по сравнению с цельнометаллическим резервуаром. Определение экономического эффекта от внедрения монолитного и быстровозводимого исполнения из КНЭСК при возведении стен резервуаров выполнено на основе анализа и сравнения основных параметров, определяющих их цену (табл. 3). При анализе цены на материалы компонентов КНЭСК были приняты средними за 2010 г., стоимость выполнения технологических операций также была принята среднерыночной [11].

Табл. 3. Расчет экономического эффекта внедрения КНЭСК при возведении стен РВС-30000

Наименование показателя	Стоимость единицы, тыс. р.	Исполнение					
		типовое		монолитное		быстромонтируемое	
		количество	стоимость	количество	стоимость	количество	стоимость
Объем листового металла, м <sup>3</sup>	21754,41	36,16	786551,19	11,28	245346,49	12,34	268462,57
Объем стержневого металла, м <sup>3</sup>	17326,89	–	–	4,70	81425,73	5,04	87348,03
Объем бетона, м <sup>3</sup>	296,50	–	–	683,93	202784,38	644,70	191151,97
Длина реза, м	1,94	–	–	13582,08	26349,24	16940,16	32863,91
Длина сварных швов (цех), м	0,744...2,943	–	–	2939,54	4579,38	4331,06	7456,89
Длина сварных швов (монтажных), м	1,854...14,34	1814,40	19704,06	3655,30	7791,91	3640,32	6747,84
Масса стенок (доставляемая), т	0,155	285,63	22136,48	1767,66	136994,03	1684,60	130556,55
Площадь наружной поверхности под покраску, м <sup>2</sup>	7,20	5932,44	42713,57	–	–	–	–
Итого весь резервуар			871105,30		705271,15		724587,76
Экономия, %					19,04		16,82

Проведенный анализ показывает экономически обоснованную целесообразность использования КНЭСК для возведения стен резервуаров как в монолитном, так и быстровозводимом исполнении.

### Заключение

1. КНСЭК может эффективно применяться для замены сварных оболочечных конструкций стенок наземных, заглубленных, подводных и подземных резервуаров для хранения жидкостей или газов. При этом достигается снижение металлоемкости, а следовательно, и стоимости, требуемая несущая способность и соблюдение всех нормативных требований к стенкам резервуаров и их сварным соединениям.

2. Срок монтажа быстровозводимого типа конструкций стенок резервуаров из КНЭСК с применением специальных монтажных стыков, выполняемых сваркой, незначительно превышает сроки монтажа типового стального исполнения при листовой сборке сваркой. Сроки возведения ограничены дополнительными временными затратами на подъем и установку более тяжелых сегментов и выполнение сварных соединений монтажного стыка с большей суммарной длиной швов, но меньшим объемом наплавляемого металла, нежели у типового исполнения. Сварные соединения и закладные армирующие элементы предложенных конструкции монтажных стыков обладают требуемой несущей способностью.

3. В результате изменения металлоемкости конструкции стенок резервуара при использовании КНЭСК и быстровозводимых монтажных стыков достигается снижение конечной стоимости стенок резервуара относительно типового исполнения примерно на 17...19 % для рассматриваемых исполнений. Дополнительная экономия дос-

тигается за счет коррозионной защиты от атмосферных воздействий сварной оболочечной арматуры, обеспечиваемой бетонным компонентом. Это исключает необходимость окраски наружной поверхности стенок и позволяет возводить заглубленные, подземные и подводные резервуары с большим сроком безотказной эксплуатации, нежели у типового цельнометаллического исполнения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузменко, И. М. Применение сварных несущих элементов в новых композитных строительных конструкциях / И. М. Кузменко, С. К. Павлюк, В. М. Фридкин // Сварочное производство. – 2003. – № 9. – С. 16–19.
2. Пат. 4082 РБ, МПК7 Е 04 С 2/28. Композитный несущий элемент строительных конструкций / В. М. Фридкин [и др.]; заявитель и патентообладатель Могилев. машиностр. ин-т. – № 970421; заявл. 29.07.97; опубл. 19.04.01, Бюл. № 3. – 3 с.: ил.
3. Инновационные конструктивные решения пролетных строений проезжей части мостов / И. М. Кузменко [и др.] // Автомобильные дороги и мосты. – 2008. – № 1. – С. 37–40.
4. ПБ 03-605-03. Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов / Гостехнадзор России. – М.: ПИО ОБТ, 2003. – 23 с.
5. РД 16.01-60.30.00-КТН-026-1-04. Нормы проектирования вертикальных резервуаров для хранения нефти объемом 1000–50000 м<sup>3</sup> / Акционерная компания по транспорту нефти «Транснефть».
6. ЗАО Самарский завод КВОИТ [Электронный ресурс]. – М., 2011. – Режим доступа: <http://www.kvoit.samara.ru>.
7. ГОСТ 52910-2008. Резервуары вертикальные цилиндрические для нефти и нефтепродуктов / Национальный стандарт Российской Федерации. – М.: Стандартинформ, 2007. – 112 с.
8. Пецольд, Т. М. Железобетонные конструкции. Основы теории, расчета и проектирования / Т. М. Пецольд, В. В. Тур. – Брест: БГТУ, 2003. – 379 с.: ил.
9. СНиП 2.01.07-85. Строительные нормы и правила нагрузки и воздействия. – М.: ЦНИИСК, 1985. – 111 с.

10. Металлические конструкции. Общий курс : учебник для вузов / Г. С. Ведеников [и др.] ; под ред. Г. С. Веденикова. – 7-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1998. – 760 с. : ил.

11. Национальная ассоциация сметного ценообразования и стоимостного инжиниринга РФ [Электронный ресурс]. – М., 2011. – Режим доступа : <http://www.ascsi.ru>.

Белорусско-Российский университет  
Материал поступил 17.05.2011

**S. V. Bogdanov**  
**Designing features of fast erected welded walls of vertical cylindrical tanks from composite bearing elements**

The paper deals with the analysis of economic and strength expediency of the usage of composite bearing elements (КВЕВС) for the replacement of welded shell constructions for walls of surface, subsurface, undersurface and underwater tanks for storing fluids and gases. The analysis was made based on the TVC-30000 vertical cylindrical petroleum tank. Three types of wall constructions were considered, namely: standard all-metal, monolithic and fast erected from КВЕВС.