

УДК 624.953:624.046.03

## УЧЕТ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ КАРКАСА И НАСТИЛА В КРОВЛЯХ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

ЕГОРОВ Е. А.<sup>1\*</sup>, д.т.н., проф.  
МАРЧЕНКО В. А.<sup>2</sup>, к.т.н., доц.  
КРИВОРОТ Ю.А.<sup>3</sup>, главный инж.

<sup>1\*</sup> Кафедра металлических, деревянных и пластмассовых конструкций Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 46-93-05, e-mail: evg\_egorov@list.ru, ORCID ID : 0000-0003-2993-0570.

<sup>2</sup> Кафедра металлических, деревянных и пластмассовых конструкций Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 46-93-05, e-mail: dp000233@yandex.ru.

<sup>3</sup> ООО «АКИМ».

**Аннотация.** *Целью статьи* является обоснование возможности существенного улучшения технико-экономических показателей стационарных кровель стальных резервуаров, используемых для хранения нефти и нефтепродуктов, за счет учета совместной работы конструкций несущего каркаса кровли с листовым настилом. **Актуальность исследования.** В условиях постоянного роста стоимости стали любые мероприятия, снижающие металлоемкость строительных конструкций без каких-либо дополнительных затрат энергетических и трудовых ресурсов, представляются весьма актуальными. **Методы исследования:** анализ напряженно-деформированного состояния каркасных и бескаркасных конструкций кровель стальных резервуаров, сопоставление основных показателей каркасных кровель, рассчитанных с учетом и без учета совместной работы настила и несущих конструкций каркаса, все расчеты выполнялись с использованием ПК "ANSYS". **Результаты:** получены количественные оценки несущей способности стационарных кровель стальных нефтерезервуаров, уточненные за счет учета совместной работы несущих конструкций каркаса кровли и листового настила, показано, что учет работы настила в восприятии внешней нагрузки позволяет существенно снизить металлоемкость указанного конструктивного элемента, получены расчетные данные, показывающие принципиальную возможность и эффективность применения бескаркасных кровель для резервуаров диаметром до 10-12 м. **Практическая значимость** заключается в том, что полученные результаты и апробирование их в ряде реальных проектов, показывают возможность значительного (до 15-20%) снижения металлоемкости стационарных кровель стальных резервуаров, используемых для хранения нефти и нефтепродуктов, а также существенного расширения области эффективного применения бескаркасных кровель при нормативных ограничениях толщины настила.

**Ключевые слова:** стальные резервуары, каркасные и бескаркасные кровли, несущие конструкции, настил, напряжения, деформации, металлоемкость.

## ВРАХУВАННЯ СПІЛЬНОЇ РОБОТИ КАРКАСА І НАСТИЛУ В ПОКРІВЛЯХ СТАЛЕВИХ РЕЗЕРВУАРІВ

ЕГОРОВ Е. А.<sup>1\*</sup>, д.т.н., проф.  
МАРЧЕНКО В. А.<sup>2</sup>, к.т.н., доц.  
КРИВОРОТ Ю.О.<sup>3</sup>, головний інж.

<sup>1\*</sup> Кафедра металевих, дерев'яних та пластмасових конструкцій, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 46-93-05, e-mail : evg\_egorov@list.ru, ORCID ID : 0000-0003-2993-0570.

<sup>2</sup> Кафедра металевих, дерев'яних та пластмасових конструкцій, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 46-93-05, e-mail : dp000233@yandex.ru.

<sup>3</sup> ООО «АКИМ».

**Анотація.** *Метою статті* є обґрунтування можливості істотного поліпшення техніко-економічних показників стаціонарних покрівель сталевих резервуарів, які використовуються для зберігання нафти і нафтопродуктів, за рахунок врахування спільної роботи конструкцій каркаса покрівлі з листовим настилом. **Актуальність дослідження.** В умовах постійного зростання вартості сталі будь-які заходи, що знижують металоємність будівельних конструкцій без будь-яких додаткових витрат енергетичних і трудових ресурсів є дуже актуальними. **Методи дослідження:** аналіз напружено-деформованого стану каркасних і бескаркасних конструкцій покрівель сталевих резервуарів, порівняння основних показників каркасних покрівель, розрахованих з урахуванням і без урахування спільної роботи настила і несучих конструкцій каркаса, всі розрахунки виконувалися з використанням ПК "ANSYS". **Результати:** отримані кількісні оцінки

несучої здатності стаціонарних покрівель сталевих нафторезервуарів, що були уточнені врахуванням спільної роботи несучих конструкцій каркаса покрівлі і листового настилу, показано, що врахування роботи настилу на дію зовнішніх навантажень, дозволяє суттєво зменшити витрати металу на цей конструктивний елемент, отримані розрахункові дані, що показують принципову можливість і ефективність застосування безкаркасних покрівель для резервуарів діаметром до 10-12 м. **Практична значимість** полягає в тому, що отримані результати і апробування їх в ряді реальних проектів, показують можливість суттєвого (до 15-20%) зниження металоємності стаціонарних покрівель сталевих резервуарів, які використовуються для зберігання нафти і нафтопродуктів, а також істотного розширення області ефективного застосування безкаркасних покрівель при нормативних обмеженнях товщини настилу.

*Ключові слова:* сталеві резервуари, каркасні і безкаркасні покрівлі, несучі конструкції, настил, напруги, деформації, металоємність.

## TAKING INTO ACCOUNT OF JOINT WORK FRAME AND FLOORING IN THE ROOFING STEEL TANKS

EGOROV E.A.<sup>1\*</sup>, doc., prof.

MARCHENKO V.A.<sup>2</sup> Cand. Sc. (Tech.).

KRIVOROT Y.A.<sup>3</sup> Chief Engineer.

<sup>1\*</sup> Department of Steel, Wooden and Plastic Structures, "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernyshevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-93-05, e-mail : [evg\\_egorov@list.ru](mailto:evg_egorov@list.ru), ORCID ID : 0000-0003-2993-0570.

<sup>2</sup> Department of Steel, Wooden and Plastic Structures, "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernyshevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, tel. +38 (0562) 46-93-05, e-mail : [dp000233@yandex.ru](mailto:dp000233@yandex.ru).

<sup>3</sup> «AKIM» Ltd.

**Annotation.** *The aim of the article* is to study the possibility of a significant improvement in technical and economic indicators of fixed roofs steel tanks used for storage of oil and oil products, by taking into account collaborative structures bearing the roof frame with sheet flooring. *The relevance of research.* With the continuous increase in the cost of steel, any measures that reduce the metal content of constructions without any additional costs of energy and labor resources, seem to be very relevant. *Methods:* analysis of the stress-strain state of frame and frameless construction of roofs steel tanks, a comparison of the main indicators of frame roofs, calculated with and without working together and supporting the deck frame construction, all calculations are performed using a PC "ANSYS". *Results:* Quantitative evaluation of the bearing capacity of fixed steel roofs, refined by taking into account the joint work of bearing structures of the roof frame and sheet flooring, produced estimates showing principal possibility and efficacy of frameless roofing for tanks with diameter up to 10-12 m. *The practical significance* lies in the fact that the results and testing them in a number of real projects, the ability to show a significant (15-20%) reduction of metal roofing stationary steel tanks used for storage of oil and oil products, as well as a significant expansion of the effective use of frameless roofing when regulatory restrictions flooring thickness.

*Keywords:* steel tanks, frame and frameless roof load-bearing structures, flooring, stress, deformation of metal.

### Введение

Действующие нормы проектирования стальных вертикальных цилиндрических резервуаров [1], используемых для хранения нефти и нефтепродуктов, требуют, чтобы толщина настилу их стационарной кровли была не менее 4 мм. Безусловно, введенное ограничение является искусственным и мало понятным, поскольку более, чем 50-60 летний опыт эксплуатации таких резервуаров с толщиной кровли 2,5 мм дает основание утверждать, что при хранении нефтепродуктов (бензины, дизельное и печное топлива, керосин) безотказность (эксплуатация до первого ремонта) кровель с указанной толщиной в среднем составляет 25-27 лет, а средняя долговечность (полное исчерпание технического ресурса) достигает 40-45 лет [2-4] и это при нормативной долговечности резервуара в целом 20

лет (задекларировано в том же документе [1]). К этому можно добавить, что конструкции стационарной кровли никак не связаны и не влияют ни на прочность, ни на устойчивость стальных вертикальных цилиндрических резервуаров, а первые отказы рассматриваемого конструктивного элемента (кровли) имеют вид локальных сквозных коррозионных повреждений в виде пор, которые легко устраняются при плановых ремонтах. Поэтому сам факт введения требования по увеличению минимально допустимой толщины кровель стальных резервуаров до 4 мм для условий Украины, где на нефтебазах, как правило, хранятся готовые к употреблению нефтепродукты, имеющие низкую коррозионную активность, выглядит не совсем обоснованным. С другой стороны, данная мера позволяет увеличить спрос на отечественный металл, увеличилась стоимость монтажных и ремонтных работ, зависящая от тоннажа монтируемых и

ремонтируемых конструкций, все это должно было оживить рынок для производителей металлоконструкций. Но в проигрыше остались эксплуатационники, поскольку начальная стоимость резервуаров возросла. В настоящее время ситуация на рынке изменилась таким образом, что эффект от увеличения предельно допустимой толщины настила стационарных кровель является скорее отрицательным, чем положительным. В данной статье авторы рассматривают одну из возможностей некоторого снижения отрицательных последствий, вызванных увеличением толщины кровельного настила стационарных кровель резервуаров. Речь идет об учете совместной работы настила стационарной кровли с ее несущим каркасом, а также о проектировании бескаркасных кровель.

### Результаты

Эффект, достигаемый за счет учета работы настила в кровлях с несущим каркасом, определялся на основании численных методов исследования, которые проводились авторами с использованием компьютерной техники.

В качестве примера рассматривается конструкция кровли стального вертикального цилиндрического резервуара диаметром  $D=10430$  мм. Геометрия кровли с каркасным конструктивным решением была задана в виде, приведенном на рис.1.

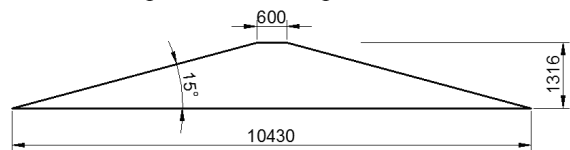


Рис. 1 Геометрия кровли / The geometry of the roof

В качестве нагрузок принимался собственный вес конструкций кровли  $G=34.53$  кН и снеговая нагрузка  $S_0=1400$  Па. Причем последняя рассматривалась в двух вариантах: равномерно распределенная по всей площади и распределенная на половине поверхности кровли. Расчет выполнялся с использованием ПК "ANSYS". Для создания конечноэлементной модели оболочки использовался элемент SHELL 281 из стандартной библиотеки конечных элементов ПК ANSYS, предназначенный для расчета линейных и нелинейных задач деформирования оболочек малой и средней толщины с большими перемещениями и углами поворотов. Этот КЭ имеет восемь узловых точек, у каждой из которых шесть степеней свободы: три перемещения в направлениях осей X, Y, Z узловой системы координат и три поворота относительно этих осей.

На рис.2 приведена расчетная схема кровли, а на рис. 3, 4 распределение напряжений в конструктивных элементах, в том числе и в листах настила кровли.

Количественно влияние учета настила в работе кровли может быть оценено с помощью графиков, показывающих зависимость величины максимальных напряжений, возникающих на наиболее нагруженных

участках радиальных ребер кровли – основных несущих элементов стального каркаса, от суммарной нагрузки, действующей на кровлю. Для рассмотренного примера такие графики приведены на рис. 5.

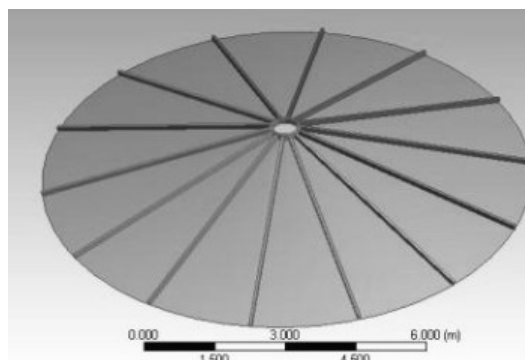


Рис. 2 Расчетная схема кровли / Roof scheme

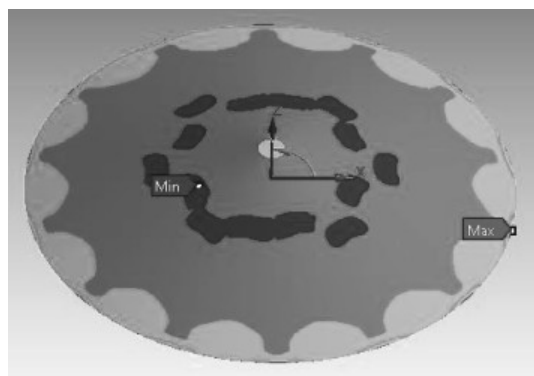


Рис. 3 Нормальные кольцевые напряжения настила / The normal ring voltage flooring

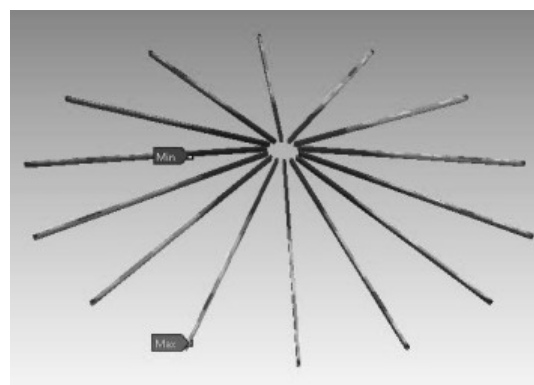


Рис. 4 Нормальные напряжения в ребрах кровли / The normal stresses in the edges of the roof

Графики построены для 4-х различных вариантов (варьируются толщина настила кровли и количество несущих радиальных ребер), которые рассматривались с учетом совместной работы несущего каркаса и настила кровли. Там же, на рис.5, приведен график, показывающий максимальные напряжения, возникающие в радиальных ребрах при

расчете без учета настила. Из графиков видно, что при нагрузках в диапазоне от 1000 до 2000 Па (диапазон, характерный для кровель стальных нефтерезервуаров) во всех рассмотренных вариантах учет совместной работы каркаса и настила кровли приводит к снижению напряжений на 30-35 % и более. Данный эффект позволяет в итоге снизить металлоемкость конструкций кровли на 15-20 % (снижение достигается за счет уменьшения требуемого сечения несущих радиальных ребер при учете совместной их работы с настилом кровли).

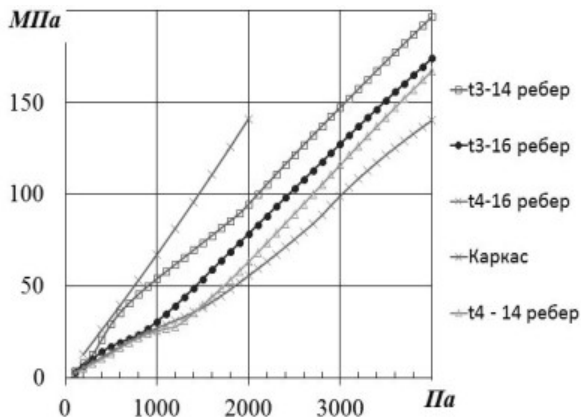


Рис. 5 Зависимость напряжений от нагрузок в ребрах кровли / The dependence of the stress from the stress in the edges of the roof

Такая же кровля (с таким же диаметром и нагрузками) рассматривалась в бескаркасном исполнении. Геометрическая схема ее приведена на рис. 6. Отличие состояло в некотором увеличении подъема кровли.

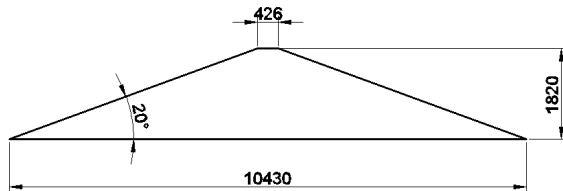


Рис. 6. Геометрическая схема кровли / Geometric roof scheme

Отсутствие каркаса повлекло за собой увеличение деформативности кровли, а значит и увеличение напряжений на наиболее нагруженных участках самонесущего настила-оболочки, см. рис.7. Это можно заметить, сравнивая графики на рис. 6 и 7. Так, при суммарной нагрузке 1500 Па в кровле с толщиной настила 4 мм при наличии несущего каркаса (см. рис.6) максимальные напряжения составляли 40 МПа, то в при такой же толщине, но уже самонесущего настила-оболочки, величина максимальных напряжений составляет почти 160 МПа.

Однако главной проблемой для бескаркасных кровель является опасность потери устойчивости. На рис.8 показаны графики изменения коэффициента устойчивости (отношение критической нагрузки к заданной) для различных значений суммарной

нагрузки на бескаркасную кровлю с разной толщиной настила-оболочки.

Из приведенных графиков и сравнения их с графиками на рис.7 следует, что для бескаркасных кровель условие устойчивости настила-оболочки (кровли) является определяющим и конструкции такого типа достигают критических напряжений на стадии упругой работы материала. Тем не менее видно, что бескаркасные кровли диаметром  $D=10.43$  м с толщиной стенки (настила-оболочки) 4мм имеют достаточные запасы по устойчивости для нагрузок в пределах 1000-1250 Па, а с толщиной 6 мм в пределах 1500-2000 Па и более, что охватывает все наиболее распространенные для стальных резервуаров диапазоны нагрузок.

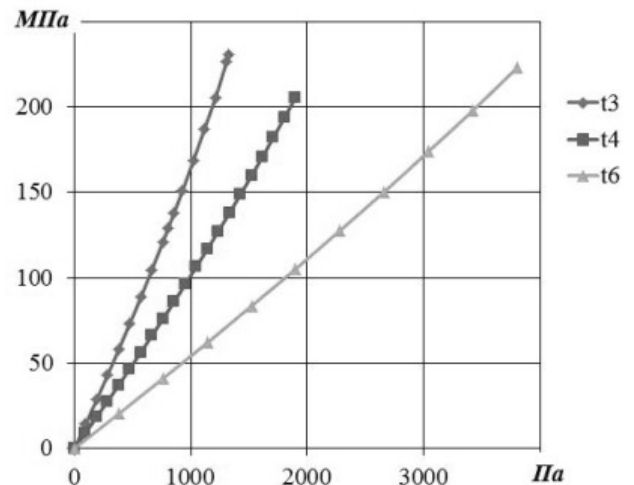


Рис. 7. Зависимость напряжений от нагрузок в настиле-оболочке / The dependence of voltage on the load in the floor shell

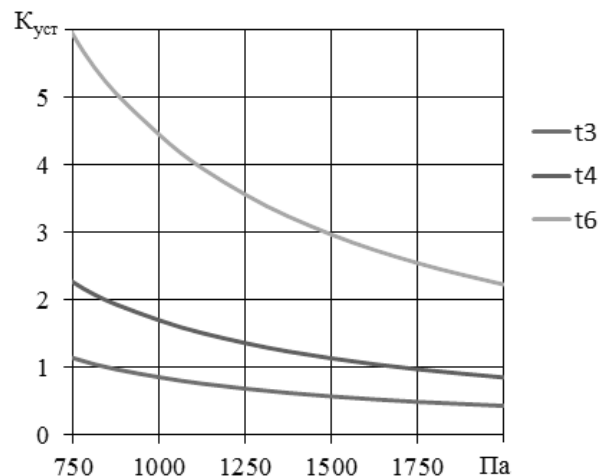


Рис. 8. Зависимость коэффициента устойчивости от внешней нагрузки / The dependence of the stability factor of the external load

В заключении следует отметить, что конструкции стационарных кровель, запроектированные по рассмотренным в статье алгоритмам, внедрены в производство и успешно эксплуатируются на различных нефтебазах Украины.

### Выводы

1. Проведенные авторами исследования позволяют заключить, что учет совместной работы несущих конструкций каркаса и листового настила в стационарных конструкциях кровель стальных резервуаров позволяет существенно (до 15-20 %) снизить металлоемкость этих конструктивных элементов. Эффективность учета совместной работы несущего каркаса и листового настила возрастает при

увеличении внешних нагрузок, но снижается с увеличением диаметра резервуара.

2. Нормативное увеличение предельно допустимой толщины настила стационарных кровель резервуаров значительно расширяет и диапазон эффективного применения бескаркасных конструкций кровель, которые в целом ряде случаев могут оказаться более эффективными как по затратам металла, так и по трудоемкости и стоимости изготовления и монтажа.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ДБН В 2.2-58.2-94. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктiм з тиском насичених парiв не вище 93.3 кПа / Державний Комiтет України по нафти і газу. – Київ, 1994.-С.95.
2. Чикинева Т. И. Анализ показателей эксплуатационной надежности стальных резервуаров/ Т.И.Чикинева // Межвузовский сб. «Легкие строительные конструкции».-Ростов-на-Дону: Ростовский ИСИ, 1977.-Вып. 4.-С. 156-160.
3. Галямов А. К вопросу прогнозирования индивидуального ресурса стальных вертикальных цилиндрических резервуаров / А.К.Галямов, В.А.Буренин, Г.Ф.Исламгулова // Трубопроводный транспорт.-1986 .-№7. - С.68-73.
4. Егоров Е.А. Исследования резервуарных конструкций: основные результаты и перспективы /Е.А.Егоров // Вісник академії.-Дніпропетровськ: ПДАБА, 2000.-№12.-С.30-33.
5. Егоров Е.А. Расчетные модели «старения» и экономика эксплуатации ограждающих конструктивных элементов листовых конструкций (на примере стальных резервуаров) / Е.А.Егоров // Современное промышленное и гражданское строительство.-№1.-Т.2.-2006.-С.43-49.

### REFERENCES

1. DBN V 2.2-58.2-94. Vertical steel tanks for oil and petroleum products with vapor pressure of not more than 93.3 kPa / State Committee of Ukraine on oil and gas. - Kyiv, 1994.-p.95.
2. Chikineva TI Analysis of operational reliability of steel tanks / T.I.Chikineva // Interuniversity coll. "Light building construction" .- Rostov-on-Don: Rostov ICI, 1977, vol. 4.-P. 156-160.
3. Galyamov A. On the question of individual resource forecasting steel vertical cylindrical tanks /A.K.Galyamov, V.A.Burenin, G.F.Islamgulova // Pipeline transport.-1986.-№7. - P.68-73.
4. Egorov EA Studies tank designs: main results and prospects /E.A.Egorov // News akademii.-Dnipropetrovs'k: Pdaba, 2000.-№12.-S.30-33..
5. Egorov EA Computational models of "aging" and the economy of operation of enclosing structural elements of sheet structures (for example, steel tanks) / E.A.Egorov // Modern industrial and civil stroitelstvo.-№1.-Т.2.-2006-S.43- 49.

Статья поступила в редколлегию 22.08.2016