

УДК 69.056.55

**С. О. ТИТКОВ, А. В. ИХНО, А. А. ТОЧЕНАЯ**

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

## **ИССЛЕДОВАНИЕ НДС КОЛОННЫ АММИАЧНО-ИЗВЕСТКОВОЙ С УЧЕТОМ КОРРОЗИОННОГО ИЗНОСА**

**Аннотация.** Статья посвящена анализу напряжённо-деформированного состояния (НДС) в ПК ЛИРА-САПР аммиачно-известковой колонны с учетом коррозионного износа. Проведен глубокий анализ конструктивного решения аммиачно-известковой колонны, изучен технологический процесс, происходящий в данном объекте. Построена расчетная схема аммиачно-известковой колонны непрерывного действия. Составлено расчётное сочетание усилий (РСН) для технологического процесса по уточненным данным. На основе обследования технического состояния данного агрегата был выявлен процент коррозионного износа. Проведен анализ данных, полученных при расчете идеализированной схемы и с введением в данную схему коррозионного износа по статистическим данным, полученным при анализе технического состояния аммиачно-известковой колонны. Данная работа поможет в дальнейшем при оценке и паспортизации технического состояния объектов данного типа.

**Ключевые слова:** напряжённо-деформированное состояние, аммиачно-известковая колонна, расчетная схема, техническое состояние, коррозионный износ, программный комплекс solidworks.

### **ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Анализ численных значений НДС колонны аммиачно-известковой с учетом коррозионного износа.

### **ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

- создать объемную уточнённую расчетную схему колонны аммиачно-известковой;
- составить расчетное сочетание нагрузок с учетом особенностей работы агрегата;
- на основе данных обследования создать объемную уточнённую расчетную схему колонны аммиачно-известковой с учетом коррозионного износа;
- выполнить построение схемы и расчёт в программном комплексе solidworks;
- проанализировать трудоемкость и результаты построения модели в программном комплексе solidworks;
- провести анализ численных данных НДС конструктивных элементов аммиачно-известковой колонны как идеализированной, так и с учетом коррозионного износа.

### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Работа посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния аммиачно-известковой колонны с учетом технологического процесса протекающего внутри агрегата.

Предпосылкой для выбора данной тематики послужило возникновение необходимости оценки технического состояния объекта и исследования его остаточной несущей способности. Объектом исследования выступила аммиачно-известковая колонна со смесителем и отстойником Ø2,2 м высотой 11,2 м, являющаяся основным аппаратом, в котором происходит дистилляция (отгонка) аммиака из слабой аммиачной воды.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

*Описание конструктива*

Для проведения численного анализа объекта построена объемная расчетная схема колонны (рис. 1), строго соответствующая чертежам, предоставленным компанией одним из заводов коксохимического производства. Данная расчетная схема была построена для анализа работы несущей способности в процессе эксплуатации.

На рисунке 1 изображена объемная уточненная расчетная схема, построенная с помощью КЭ 41,42,44. Построение такой расчетной схемы необходимо для уточнения всех факторов, влияющих на действительную работу аммиачно-известковой колонны, а также для оценки действительной работы аммиачно-известковой колонны в соответствии с технологической схемой работы агрегата.

Общие характеристики расчётной схемы: количество КЭ – 7 266, количество узлов – 7 045, общее количество неизвестных – 38 636.

*Особенность расчёта*

Моделирование уточненного ветрового воздействия с помощью программы ЭСПРИ 2016 и приложение введения ее с помощью ТХТ файла.

*Нагрузки*

Для реализации этих особенностей к сформированной расчетной схеме прикладывались такие нагрузки, как:

1. Собственный вес конструкций (рис. 2).
2. Температурное воздействие (рис. 3).
3. Ветровое воздействие (рис. 4, 5).
4. Собственный вес оборудования внутри агрегата (рис. 6).
5. Давление паров внутри агрегата (рис. 7).
6. Следящая нагрузка от собственного веса агрегата (рис. 8).
7. Гидростатическое давление от надсмольной воды (рис. 9).

Для полного отображения влияния технологического цикла на металлоконструкции были созданы сочетания нагрузок, которые появляются в результате эксплуатации агрегата.

РСН построены в соответствии с технологическим циклом работы объекта исследования.

*Исходные данные*

Среда в аппарате – аммиачная вода, аммиачные пары. Температура среды – 115 °С.

Рабочее давление в аппарате: по расчёту –  $P = 0,7 \text{ кг/см}^2$ . Площадь сечения аппарата в свету –  $A = 3,8 \text{ м}^2$ . Периметр барботажа – 23,2 м. Испытание на плотность и прочность на заводе-изготовителе гидравлическим давлением

–  $2 \text{ кг/см}^2$ . Испытание на герметичность смонтированного аппарата давлением пара –  $1 \text{ кг/см}^2$ .

Аппарат снаружи изолируется. Количество тарелок: исчерпывающих 14 шт., укрепляющих – 4 шт. При испытании тарелок на барботажа на системе «воздух-вода» количество подаваемого воздуха  $Q_a = 6\,000 \text{ м}^3/\text{час}$ . Расчётное сопротивление 1 тарелки при этом равно  $P = 45 \text{ мм}$  водяного столба.

Расчётная осевая нагрузка на фундамент  $P_{\phi} = 60\,000 \text{ кг} \approx P_{\phi} = 60 \text{ т} \approx P_{\phi} = 600 \text{ кН}$ .

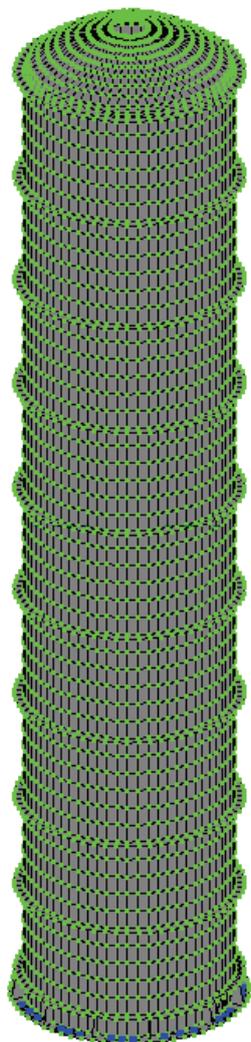
Общий вес аппарата –  $P_a = 37\,410 \text{ кг} \approx P_a = 37,5 \text{ т} \approx P_a = 368 \text{ кН}$ .

Колонна аммиака – технологический агрегат, предназначенный для получения аммиака. Для создания оболочки в вычислительном комплексе использовался конечный элемент пластина КЭ – 4-х узловая оболочка. Крепление агрегата к фундаменту принято жёстким. Жёсткость стенки и фланцев для стыковки царг приведена.

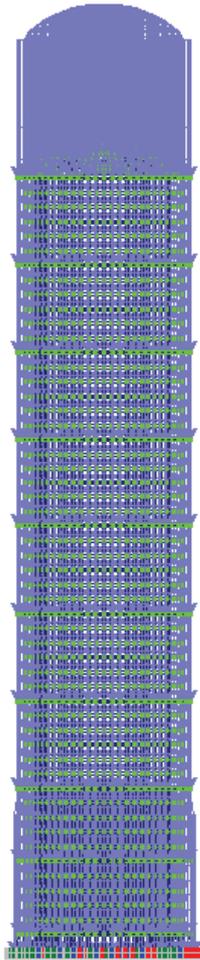
*Подсчёт ветровой нагрузки*

Подсчёт ветровой нагрузки выполнен согласно нормам проектирования [3–4] (табл. 1).

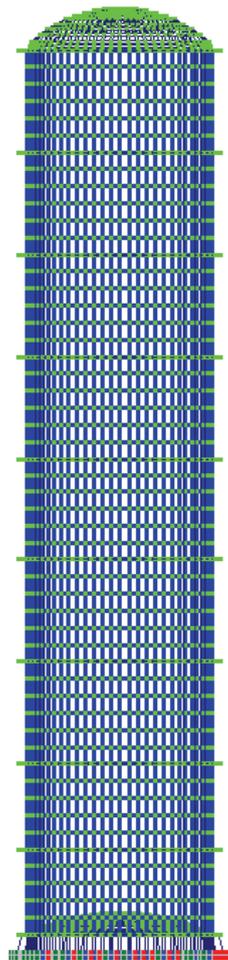
Схемы приложения ветровой нагрузки на колонный агрегат согласно требованиям [4] (табл. 2).



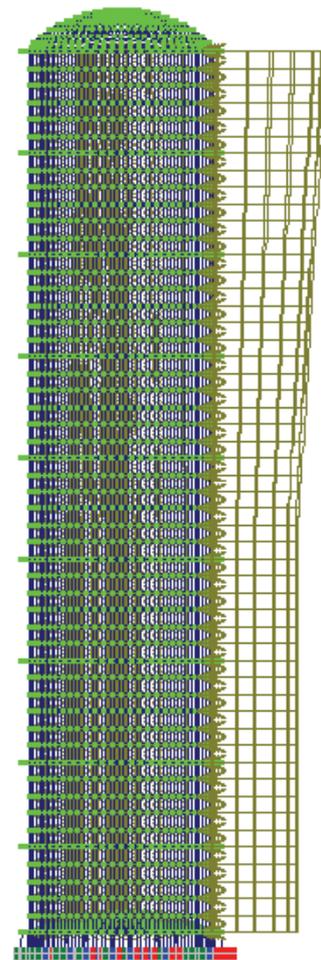
**Рисунок 1** – Объёмная уточненная модель аммиачно-известковой колонны (ПК ЛИРА-САПР 2017).



**Рисунок 2** – Отображение собственного веса на расчётной схеме.

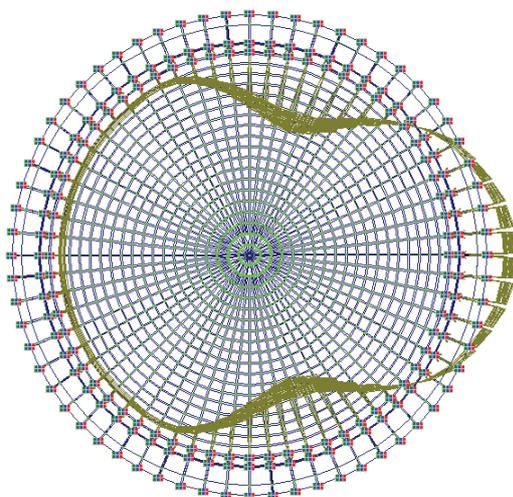


**Рисунок 3** – Отображение температурного воздействия.



**Рисунок 4** – Ветровое воздействие и вид UZ.

**Результаты расчёта по требованиям [4]:**



**Рисунок 5** – Ветровое воздействие и вид в сечении.

Нормативное значение ветрового воздействия –  $0,024 \text{ Т/м} = 0,24 \text{ кН/м}$ .

Расчётное значение ветрового воздействия –  $0,039 \text{ Т/м} = 0,39 \text{ кН/м}$ .

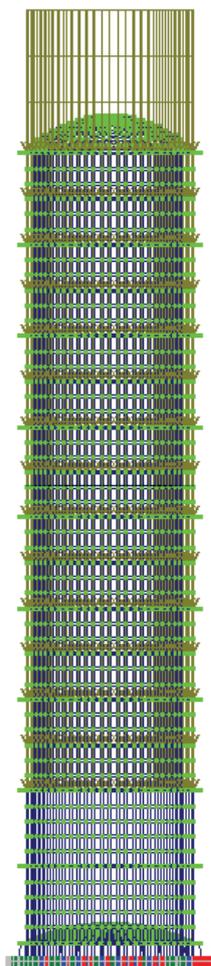
Подсчёт производился при помощи программы ЭСПРИ 2016.

*Подсчёт постоянных нагрузок на колонну*

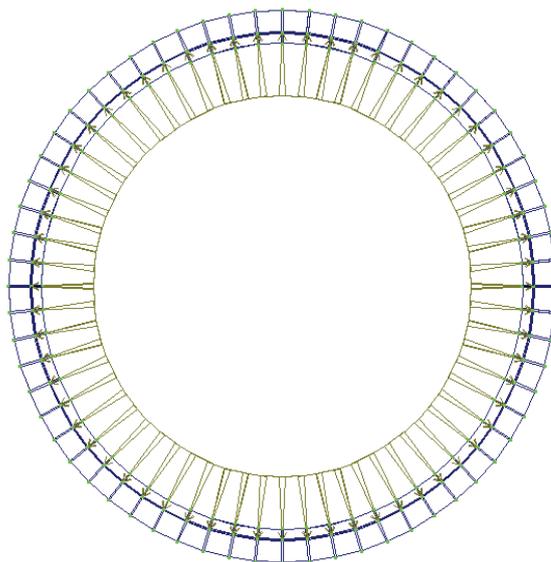
Из исходных данных известно, что общая масса аппарата составляет  $P_a = 37\,410 \text{ кг} \approx P_a = 37,5 \text{ т} \approx P_a = 368 \text{ кН}$ . Нагрузка, действующая на фундамент агрегата от его массы, составляет  $P_\phi = 60\,000 \text{ кг} \approx P_\phi = 60 \text{ т} \approx P_\phi = 600 \text{ кН}$ .

В расчётной схеме массу агрегата с учётом конструкции бартотажа представим в виде равномерно распределённой вертикальной «следящей» нагрузки.

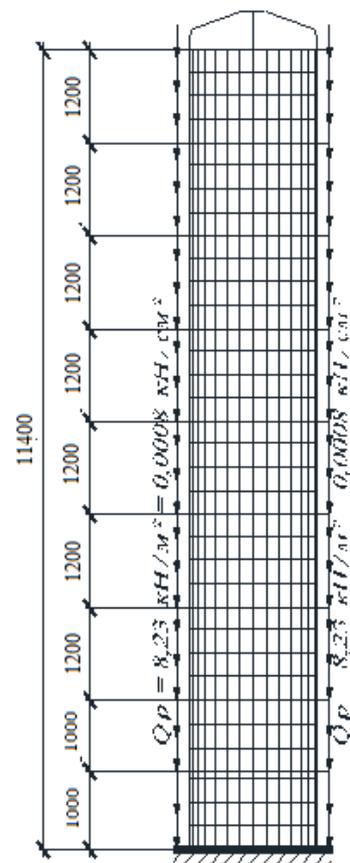
Площадь распределения «следящей» нагрузки по поверхности определим исходя из геометрических параметров агрегата:  $A_{\text{сн}} = \pi \cdot D \cdot H = 3,14 \cdot 2,20 \cdot 10,57 =$



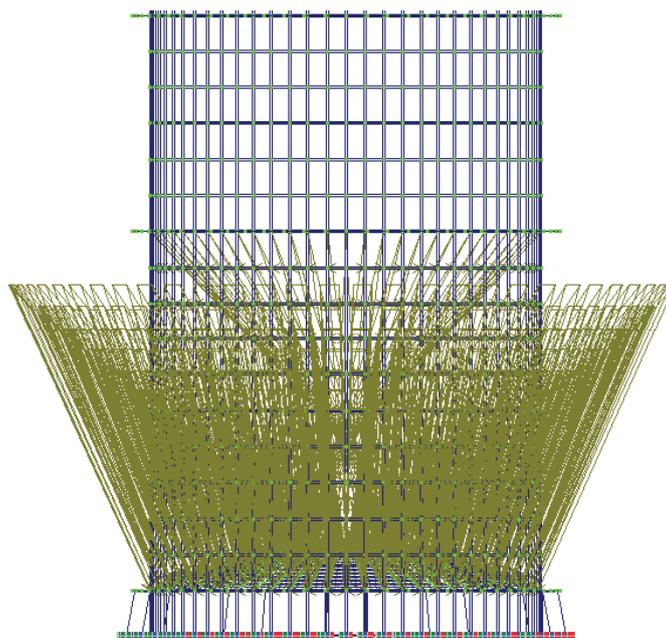
**Рисунок 6** – Собственный вес оборудования внутри агрегата.



**Рисунок 7** – Давление паров внутри агрегата.



**Рисунок 8** – Схема приложения следящей нагрузки от собственного веса агрегата.



**Рисунок 9** – Гидростатическое давление от надсмольной воды.

**Таблица 1** – Данные для подсчета ветровой нагрузки

Ветровой район	V
Нормативное значение ветрового давления	0,06 Т/м <sup>2</sup>
Тип местности	В – городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые с препятствиями высотой более 10 м
Тип сооружения	Цилиндрические резервуары

**Таблица 2** – Параметры объекта – аппарата колонного типа для производства аммиака

Поверхность	стальная конструкция	
Шаг сканирования	0,2 м	
Коэффициент надёжности по нагрузке	1,4	
<b>Геометрические параметры агрегата по производству аммиака</b>		
H (высота агрегата)	11,06	м
d (диаметр агрегата)	2,2	м
T (толщина стенки)	8,0	мм

73,02 м<sup>2</sup>, где  $A_{сн}$  – площадь распределения «следящей» нагрузки;  $\pi$  – математическая постоянная; D, H – диаметр и высота агрегата соответственно.

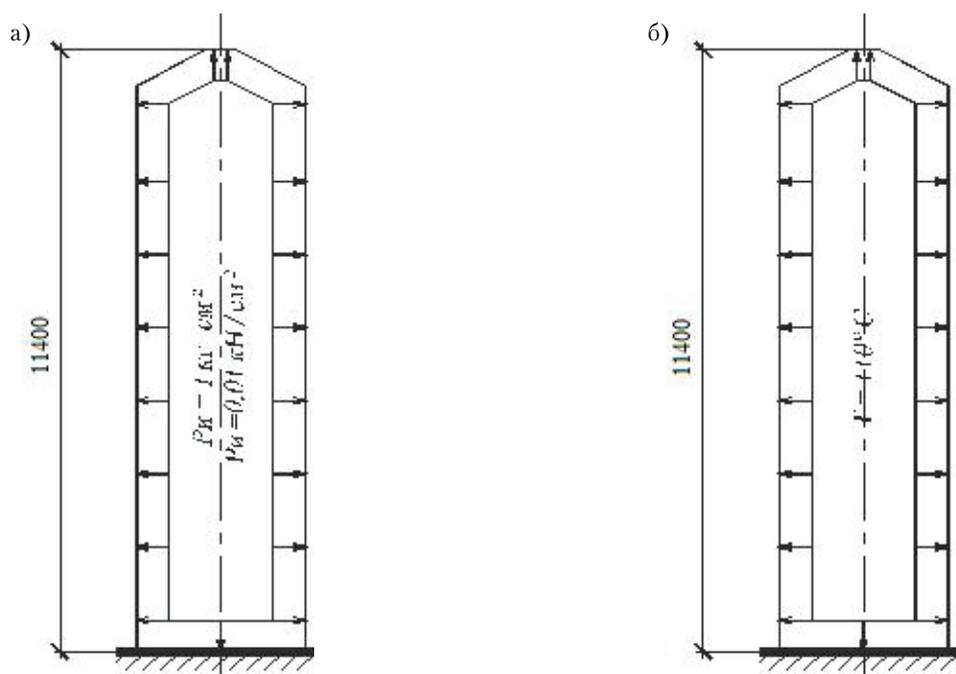
Величину распределённой «следящей» нагрузки определим исходя из его массы  $P_a$  и площади распределения «следящей» нагрузки  $A_{сн}$ :  $Q_p = P_a/A_{сн} = 600/70,02 = 0,0008$  кН/см<sup>2</sup>.

Схема приложения «следящей» нагрузки представлена на рис. 8.

*Технологические нагрузки на колонну*

Подсчёт технологических нагрузок – от давления газов, температуры производить не обязательно, т. к. при ремонте агрегат эксплуатироваться не будет. Однако после проведения ремонтных работ необходимо произвести испытание агрегата на герметичность смонтированного аппарата давлением пара – 1 кг/см<sup>2</sup>. Температура среды – 115 °С. Схема приложения нагрузки от давления пара и температурного воздействия представлены на рис. 10а и рис. 10б соответственно.

*Результаты расчёта колонны*



**Рисунок 10** – Схема приложения нагрузки на агрегат от: а) давления пара; б) температурного воздействия.

Для наглядного представления результаты расчёта агрегата по производству аммиака колонного типа сформированы в виде ведомости максимальных напряжений по осевым направлениям оболочки и представлены в таблице 3. В качестве расчётного сочетания для агрегата, расчётная схема которого представлена в виде оболочки, принято совместное влияние нагрузки собственного веса агрегата, ветровой и температурной нагрузки.

Таблица 3 – Максимальные величины напряжений по направлениям оболочки в  $\text{кН}/\text{см}^2$

NX	NY	TXU	MX	MY	MXU	QX	QY	NS01	NE01
-4,69	-4,29	-7,21	2,26	2,1	4,42	-2,12	-1,16	-5,16	6,09

Дополнительно для проверки результатов расчёта агрегата колонного типа принято решение выполнить его расчёт по упрощённой расчётной схеме – в виде жёстко защемлённого консольного стержня [1–3]. Расчётная схема с приложениями отдельных загрузок представлена на рис. 11. Результаты расчёта агрегата колонного типа представлены в таблице 4, в которой даны максимальные усилия, возникающие в консольном стержне. В качестве расчётного сочетания принято совместное влияние нагрузки собственного веса агрегата, ветровой и температурной нагрузки.

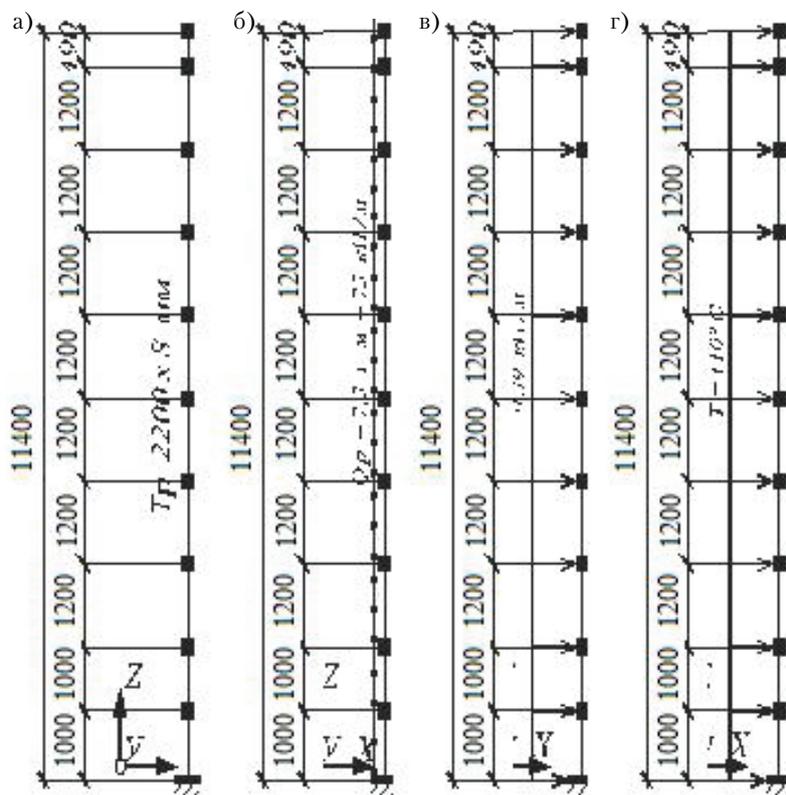


Рисунок 11 – Расчётная схема с приложениями отдельных загрузок.

Таблица 4 – Максимальные величины усилий в консольном стержне в  $\text{кН}$  ( $\text{т}$ )

N	M	Q
600 (60)	13 (1,3)	0,1

#### Конструктивный расчёт оболочки агрегата

В качестве расчётного параметра для расчёта прочности [5–7] сечения корпуса агрегата, который смоделирован конечными элементами оболочки, принято суммарное эквивалентное напряжение  $NE01 = 6,09 \text{ кН}/\text{см}^2$ .

Согласно спецификации Ш.0010.10 царги агрегата изготовлены из серого чугуна СЧ 15-32 по [7]. В соответствии с приложением 1 [7] временное сопротивление при растяжении для СЧ 15-32 с толщиной стенки отливки 8 мм составляет 180 МПа. Следовательно,  $R_y = 180 \text{ МПа} \times \gamma_c = 180 \cdot 0,9 = 162 \text{ МПа} = 16,2 \text{ кН/см}^2$ ,  $R_y$  – расчётное сопротивление стали, согласно [6];  $\gamma_c$  – коэффициент надёжности по материалу, согласно [6].

Определим площадь поперечного сечения колонного агрегата по формуле 1 ( $A_{ка}$ ):

$$A_{ка} = \pi D_n - \pi D_b = 3,14 \cdot 220 - 3,14 \cdot 204 = 50,24 \text{ см}^2, \quad (1)$$

Определим несущую способность сечения колонного агрегата по формуле 2:

$$N = R_y \cdot A_{ка} = 16,2 \cdot 50,24 \approx 814 \text{ кН}, \quad (2)$$

81 т – несущая способность стенки (царги) агрегата.

В соответствии с Примечанием к пункту 2.1 [7]: *Допускается превышение минимального значения временного сопротивления при растяжении не более чем на 100 МПа, если в нормативно-технической документации на отливку нет других ограничений.*

Следовательно, максимально возможная прочность чугуна СЧ 15-32 –  $R_y = 280 \text{ МПа} \cdot \gamma_c = 280 \cdot 0,9 = 252 \text{ МПа} = 25,2 \text{ кН/см}^2$ .

Несущая способность сечения колонного агрегата по формуле 3:

$$N = R_y \cdot A_{ка} = 25,2 \cdot 50,24 \approx 1266 \text{ кН}, \quad (3)$$

где  $\approx 126 \text{ т}$  – несущая способность стенки (царги) агрегата, если минимальное значение временного сопротивления агрегата будет на 100 МПа больше, чем минимальное. Учитывая, что максимальное эквивалентное напряжение в агрегате от действующих нагрузок с учётом температурного воздействия составляет  $NE01 = 6,63 \text{ кН/см}^2$ , а усилие, возникающее в агрегате от проектных нагрузок –  $N = NE01 \cdot A_{ка} = 6,63 \cdot 50,24 = 333,09 \text{ кН} \approx 34 \text{ т}$ . В качестве расчётного параметра для определения прочности сечения корпуса агрегата, расчётная схема которого представлена в виде консольного стержня, принято усилие  $N = 600 \text{ кН} = 60 \text{ т}$ .

Напряжение, возникающее в сечении колонного агрегата, который смоделирован консольным стержнем:  $\sigma = 600/A_{ка} = 600/50,24 = 11,9 \text{ кН/см}^2$ . Из расчёта прочности корпуса агрегата, который смоделирован в виде консольного стержня, можно сделать вывод: данная расчётная схема не позволяет адекватно учесть напряжения, возникающие в агрегате от температурного воздействия в кольцевом направлении – поперёк сечения агрегата.

**На основе полученных статистических, численных и экспериментальных данных сформулированы общие выводы:**

1. Составлена уточненная объемная расчетная схема аммиачно-известковой колонны с расчетным сочетанием нагрузок, описывающих технологический процесс работы данного агрегата, позволяющий учесть не только радиальные напряжения, но и кольцевые.

2. Проведен анализ идеализированного агрегата без учета коррозии, найден запас прочности, который составил 400 %.

3. Проведен анализ влияния коррозионного износа, полученного в ходе нормальной эксплуатации агрегата на протяжении 57 лет, показал, что запас прочности агрегата снизился на 25,48 %.

4. Выполнено построение и анализ расчетной схемы в программном комплексе Solidworks который показал, что по количеству затраченного времени и ресурса персонального компьютера рациональнее использовать расчетный комплекс ЛИРА САПР.

5. При сравнении результатов двух программных комплексов были выявлены существенные расхождения, которые обусловлены методом приложения ветрового воздействия на модели.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 25215.82 Сосуды и аппараты высокого давления. Обечайки и днища. Нормы и методы расчёта на прочность [Текст]. – Введ. 1983-07-01. – Москва : Государственный комитет СССР по стандартам, 1983. – 8 с.
2. ГОСТ Р 51273-99 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчёта на прочность. Определение расчётных усилий для аппаратов колонного типа от ветровых нагрузок и сейсмических воздействий [Текст]. – Введ. 1999-05-06. – Москва : Госстандарт России, 1999. – 11 с.

3. Атрощенко, В. И. Методы расчётов по технологии связанного азота [Текст] / В. И. Атрощенко, И. И. Гальперин, А. П. Засорин и др. – 2 изд. – Х. : Изд-во Харьковского Ордена Трудового Красного Знамени Государственного Университета, 1978. – 312 с.
4. ДБН В.1.2-2:2006 Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования [Текст]. – Введ. 2006-07-01. – Киев : Минстрой Украины, 2006. – 78 с.
5. Сосуды и трубопроводы высокого давления [Текст] : справочник / Е. Р. Хисматулин, Е. М. Королев, В. И. Лившиц и др. – Москва : Машиностроение, 1990. – 384 с. : ил.
6. СТО 00220227-005-2009 Сосуды и аппараты, стальные сварные высокого давления. Общие технические характеристики [Текст]. – Взамен ОСТ 24.201.03 – 90 ; введ. 2011-07-11. – Иркутск : Иркутск НИИ Химмаш, 2011. – 210 с.
7. ГОСТ 1412-85 Чугун с пластинчатым графитом для отливок [Текст]. – Взамен ГОСТ 1412-79 в части марок чугуна ; введ. 1987-01-01. – Москва : ИПК Издательство Стандарт, 2004. – 3 с.

Получено 01.20.2018

С. О. ТИТКОВ, Г. В. ІХНО, А. А. ТОЧЕНА  
ДОСЛІДЖЕННЯ НДС КОЛОНИ АМІАЧНО-ВАПНЯНОЇ З УРАХУВАННЯМ  
КОРОЗІЙНОГО ЗНОСУ  
ДОНБАСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

**Анотація.** Стаття присвячена аналізу напружено-деформованого стану (НДС) в ПК ЛІРА-САПР аміачно-вапняної колони з урахуванням корозійного зносу. Проведено глибокий аналіз конструктивного рішення аміачно-вапняної колони, вивчений технологічний процес, що відбувається в даному об'єкті. Побудована розрахункова схема аміачно-вапняної колони безперервної дії. Складено розрахункове поєднання зусиль (РСН) для технологічного процесу за уточненими даними. На основі обстеження технічного стану даного агрегату було виявлено відсоток корозійного зносу. Проведено аналіз даних, отриманих при розрахунку ідеалізованої схеми і з введенням в дану схему корозійного зносу за статистичними даними, отриманими при аналізі технічного стану аміачно-вапняної колони. Дана робота допоможе в подальшому при оцінці та паспортизації технічного стану об'єктів даного типу.

**Ключові слова:** напружено-деформований стан, аміачно-вапняна колона, розрахункова схема, технічний стан, корозійний знос, програмний комплекс solidworks.

SERGEY TITKOV, ANNA IHNO, ANASTASIA TOCHUONAYA  
INVESTIGATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE AMMONIA-LIME  
COLUMN TAKING INTO ACCOUNT THE CORROSIVE WEAR  
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** The article is devoted to the analysis of the stress-strain state (SSS) in the PC LIRA-SAPR of the ammonia-lime column taking into account the corrosive wear. A deep analysis of the constructive solution of the ammonia-lime column has been carried out, the technological process taking place in this facility has been studied. The design scheme of an ammonia-lime column of continuous action is constructed. A calculated combination of efforts for the technological process is made according to the specified data. Based on a survey of the technical condition of this unit, the percentage of corrosive wear was identified. The analysis of the data obtained during the calculation of the idealized scheme and the introduction of corrosion deterioration into the scheme according to statistical data obtained during the analysis of the technical state of the ammonia-lime column were analyzed. This work will help in the future when assessing and certification of the technical condition of objects of this type.

**Key words:** stress-strain state, ammonia-lime column, calculation scheme, technical condition, corrosive wear, software complex solid works.

**Титков Сергей Олегович** – аспирант кафедры технологии и организации строительства ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: возведение и реконструкция промышленных сооружений.

**Ихно Анна Владимировна** – ассистент кафедры технологии и организации строительства ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: проектирование, монтаж, эксплуатация, техническая диагностика, оценка технического состояния, реконструкция и усиление строительных металлических конструкций, технология и организация работ при строительстве и реконструкции зданий и сооружений.

**Точеная Анастасия Артуровна** – студентка ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: охрана окружающей среды и промышленная санитария.

**Титков Сергій Олегович** – аспірант кафедри технології і організації будівництва ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: зведення і реконструкція промислових споруд.

**Іхно Ганна Володимирівна** – асистент кафедри технології і організації будівництва ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: проектування, монтаж, експлуатація, технічна діагностика, оцінка технічного стану, реконструкція та підсилення будівельних металевих конструкцій, технологія та організація робіт при будівництві та реконструкції будівель та споруд.

**Точена Анастасія Артурівна** – студентка ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: охорона навколишнього середовища та промислова санітарія.

**Titkov Sergey** – Post-graduate student, Technology and Management in Construction Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: erection and reconstruction of industrial facilities.

**Ihno Anna** – assistant, Technology and Management in Construction Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: designing, installation, operation, technical diagnostics, an estimation of a technical condition, reconstruction and strengthening of building metal designs, technology and the organization of works at construction and reconstruction of buildings and constructions.

**Tochuonaya Anastasia** – student, Donbas National Academy of Construction and Architecture. Scientific interests: environmental protection and industrial sanitation.