

сделать вывод о том, что наиболее прочными оказались образцы F1 и F5. Эти данные опровергли ожидаемые результаты, ведь предполагалось, что наличие наночастиц в агломератах повысит прочность последних. Следовательно, в некоторых случаях при агломерировании материалов добавление наночастиц является не только не эффективным, но отрицательно воздействующим фактором. Несмотря на значительное увеличение количества полимера в образце F5 по сравнению с образцом F1, это не повлияло на прочность агломератов, в образце F1 была достигнута максимальная эффективная концентрация полимера в растворе – 3,9 %. После сушки образцов при 1000 °С прочностные различия между ними не обнаруживаются.

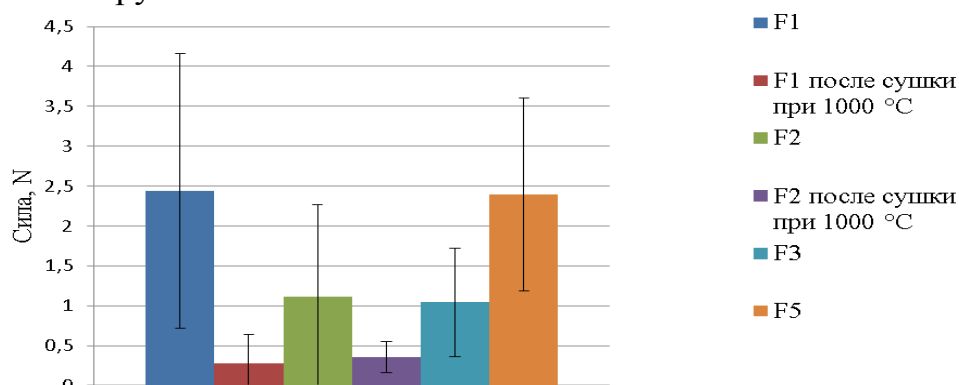


Рисунок 8 – Средняя величина разрушающей силы для полученных образцов

#### Список литературы:

1. S. Heinrich, Lecture Particle Technology.
2. U. Diebold, Surface Science Reports 48 (2003) 59-62, 66,67.

УДК 628.4.043-036.5

## АНАЛИЗ УСЛОВИЙ РАБОТЫ ПЕРВИЧНОГО ГАЗОВОГО ХОЛОДИЛЬНИКА

**Топоров А.А., Алексеенко Е.А., Костерова В.Ю.**  
Донецкий национальный технический университет

Для охлаждения прямого коксового газа после газосборников и для облегчения последующих технологических процессов применяют первичные газовые холодильники (ПГХ). Они бывают различных конструкций: непосредственного действия, трубчатые с вертикальным и горизонтальным расположением труб [1].

В ПГХ непосредственного действия [2] при небольшой массе, простоте конструкции и легкости обслуживания осуществляется хорошее охлаждение газа. Но из-за смешения теплоносителей охлаждающая вода не может быть направлена на градирню для охлаждения, т.к. она насыщается аммиаком, растворяет сероводород, цианистый водород и загрязняется смолой и нафталином. При охлаждении такой воды на градирне в атмосферу выделяются растворенные в ней газообразные примеси, что не допустимо. Таким образом, преимущества, достигнутые при применении холодильника непосредственного действия, теряются из-за необходимости установки громоздкого оборудования для осветления и охлаждения воды.

При работе ПГХ с вертикальным расположением труб на наружной поверхности труб осаждается нафталин, смола, а на внутренней – соли жесткости (накипь). Эти отложения ухудшают охлаждение газа, увеличивают гидравлическое сопротивление и должны своевременно удаляться. Для очистки наружной поверхности труб межтрубное пространство периодически пропаривают. Накипь на внутренней поверхности труб удаляется чисткой механическими шарошками или промывкой слабым раствором соляной кислоты. Эти холодильники занимают большую площадь, так как увеличение высоты ограничивается длиной труб, допускающей их чистку, и трудоемки в промывке межтрубного пространства во время работы холодильника, в связи с чем требуется их частая пропарка. Также у данных холодильников большое гидравлическое сопротивление.

Недостатками ПГХ с горизонтальным расположением труб являются: необходимость подготовки технической воды для удаления механических примесей и солей временной жесткости в связи с уменьшением диаметра труб; сложность обнаружения коррозии на трубах и замены их при ремонте. Тем не менее, по сравнению с ПГХ с вертикальным расположением труб, эти холодильники занимают небольшие производственные площади; у них малое гидравлическое сопротивление; меньше отложений нафталина на наружной поверхности труб; удобна промывка горячей надсмольной водой и смолой, что обеспечивает более высокий коэффициент теплопередачи и увеличивает время между пропарками. Также в этих холодильниках есть возможность утилизации тепла коксового газа, например, как на Авдеевском КХЗ, путем нагревания поглотительного раствора цеха сероочистки, подаваемого в трубы двух верхних секций холодильника.

Объектом исследования в данной работе являлся первичный газовый холодильник с горизонтальным расположением труб, представленный на ОАО «Авдеевском КХЗ», т.к. из перечисленных конструкций он имеет больше преимуществ. Он представляет собой аппарат с габаритами 24,7×3,6×3 м, имеет производительность 20000 м<sup>3</sup>/ч [3].

Корпус 1 холодильника (рис. 1) имеет прямоугольное сечение [2], к двум вертикальным стенкам которого развальцовкой закреплены трубы 3. Стенки корпуса укреплены ребрами жесткости 2. Трубы разбиты на отдельные пучки, которые соединяются между собой съемными крышками 4. В нижней части холодильника располагается плоское днище 5, наклоненное под углом  $3 - 4^\circ$  для облегчения удаления конденсата. Корпус установлен на железобетонный фундамент опорой 6. Для удобства транспортирования, холодильник по высоте разбит на четыре секции, которые при монтаже свариваются между собой. Пучки труб секций соединены переходными коленами 7.

Коксовый газ входит в штуцер Г холодильника с температурой  $82^\circ\text{C}$  под давлением 0,095 МПа, движется сверху вниз в межтрубном пространстве и выходит через штуцер Л с температурой  $35^\circ\text{C}$ . Вода насосом подается снизу в штуцер В, проходит последовательно все пучки труб, выходит в штуцер З и самотеком направляется на градирню. Так как трубы наклонены под углом  $1^\circ$  к горизонту, конденсат, образующийся при охлаждении коксового газа, стекает вдоль каждой трубы, а в целом сверху вниз, и смывает отложения нафталина. Из холодильника конденсат выводится через штуцер А. Дополнительно для промывки труб предусмотрена подача в штуцер Е надсмольной горячей воды, разбрызгиваемой форсункой 8, и в штуцер И горячей смолы, которая является хорошим растворителем для нафталина. При пропарке пар подается в штуцер Б. Для обслуживания и ремонта холодильника предназначены люки Ж, К и Л. При пропарке и продувке холодильника газом используется воздушник Д.

На ОАО «Авдеевском КХЗ» модернизировали эту конструкцию, убрав переходное колено между второй и третьей секциями холодильника (рис. 1, I) и установили там штуцера Н и О. В результате чего вода входит через штуцер В и выходит через штуцер Н. А содовый раствор цеха сероочистки подается в штуцер О и выходит через штуцер З.

Прямой коксовый, охлаждающийся в ПГХ, является горючим газом [4], в смеси с воздухом взрывоопасен (КПВ от 6 до 30%), пожароопасен (температура воспламенения составляет  $600 - 650^\circ\text{C}$ ), токсичен. ПДК его отдельных компонентов не должна превышать (в  $\text{мг}/\text{м}^3$ ):

300  $\text{CH}_4$ , 50  $\text{C}_m\text{H}_n$ , 5  $\text{C}_6\text{H}_6$ , 20  $\text{CO}$ , 10  $\text{H}_2\text{S}$ , 0,3  $\text{HCN}$ , 0,3  $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$ , 5  $\text{C}_5\text{H}_5\text{N}$ .

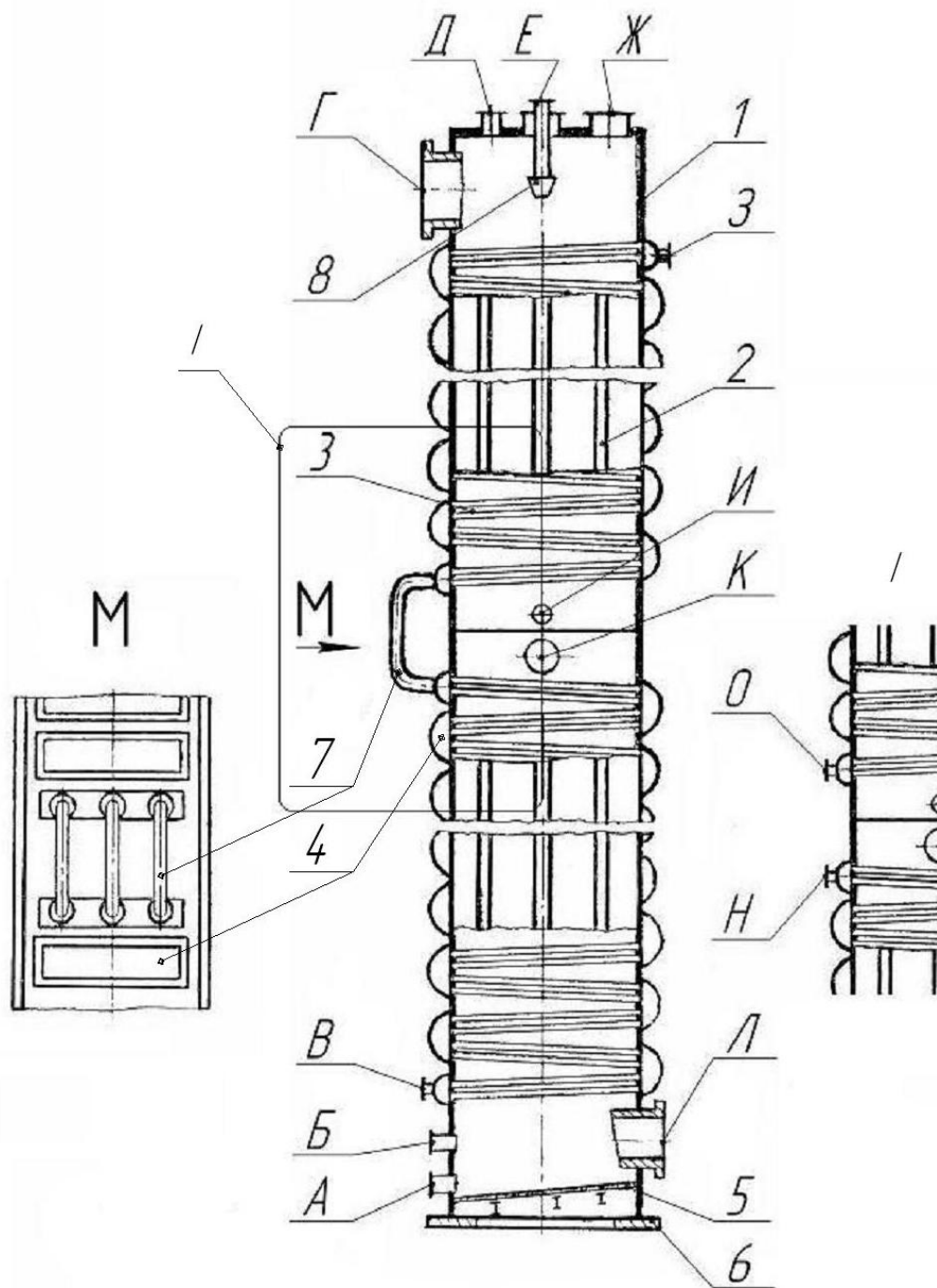


Рисунок 1 – Схема первичного газового холодильника

В ПГХ протекает целый ряд технологических процессов [2]. В первую очередь, это теплообменные, а именно теплопередача от коксового газа к воде через разделяющую стенку, которая сопровождается рядом других процессов: конденсацией водяных паров из коксового газа, конденсацией и выделением остатков паров смолы, массопередачей. Теплопередача осуществляется в трубках, при этом понижается температура коксового газа, вследствие чего из него выделяется жидкая фаза – смола, которая,

поглотив нафталин, образует сложное коррозионно-активное вещество. При конденсации воды на поверхности труб происходит абсорбция аммиака, углекислоты, сероводорода, синильной кислоты и других компонентов, находящихся в коксовом газе, образуется соединение различных кислот, которое также способствует разрушению элементов ПГХ.

Наряду с технологическими неизбежно протекают деградиционные процессы. Такие как коррозия корпуса, наружной и внутренней поверхности труб, образование накипи, старение материала.

Наиболее подвержен коррозии корпус аппарата. С внешней стороны – химической (ржавление металлоконструкций под действием агрессивной среды) и электрохимической (под действием дождевой воды и конденсата с растворенными в них ионами солей и кислот) коррозии, с внутренней – разрушению под действием агрессивных веществ, находящихся в коксовом газе. При охлаждении газа выделяется смола, которая поглощает нафталин и образует концентрированную щелочь, эта щелочь взаимодействует с элементами конструкции ПГХ и приводит к их интенсивной коррозии. Присутствие цианистого водорода также ускоряет процесс деградации корпуса и труб (рис. 2, а). HCN частично растворяется в надсмольной воде с образованием токсичных аммонийных солей цианистой и роданистоводородной кислот.

Также трубы подвергаются коррозии с внутренней стороны под действием примесей, которые находятся в технической воде и содовом растворе. Все это приводит к разрушению металла корпуса, свищам в трубах (рис. 2, б). Через образующиеся свищи поглотительный раствор поступит в газовый конденсат, что отрицательно повлияет на работу механизированных осветлителей, биохимическую очистку сточных вод, затруднит переработку смолы. Интенсивная коррозия труб способствует накоплению в содовом растворе балластных солей и снижению его поглотительной способности.

Еще одним видом деградации элементов ПГХ является образование твердых отложений на внутренних стенках труб или накипи (рис. 2, в). Образование слоя накипи уменьшает проходное сечение труб, при этом увеличивается их шероховатость и изменяется гидравлический режим течения жидкости. Теплопроводность накипи в десятки, а зачастую в сотни, раз меньше теплопроводности стали, из которой изготавливают теплообменники. Это приводит к ухудшению условий теплопередачи – нарушению основного технологического процесса. Также явление накипи приводит к повышению турбулентности и значительным затратам на очистку труб.

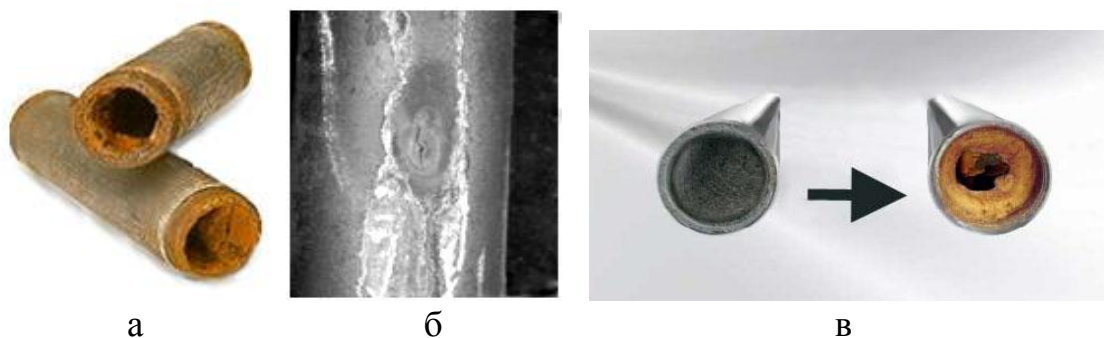


Рисунок 2 – Виды деградации труб в первичном газовом холодильнике: а – химическая коррозия; б – свищ; в – накипь

Под воздействием высоких температуры, давления, агрессивных сред, а также с учетом длительной эксплуатации оборудования в металле активно протекают процессы старения (деградация структуры и изменение механических свойств), которые отрицательно влияют на прочность элементов оборудования и могут стать причиной его аварийного разрушения.

В первичном газовом холодильнике основной процесс – охлаждение коксового газа до заданной температуры, здесь наблюдается процесс теплопроводности.

Уравнение теплопроводности для установившегося теплового потока через цилиндрическую однослойную стенку выглядит так:

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t_r - t_x) \cdot F_{cp} = \frac{2\pi\lambda \cdot (t_r - t_x) \cdot L}{\ln \frac{d_2}{d_1}},$$

где  $Q$  - тепловой поток (расход теплоты), Вт;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $\delta$  – толщина стенки, м;  $t_r$  – температура горячей поверхности стенки, К или °С;  $t_x$  – температура холодной поверхности стенки, К или °С;  $F_{cp}$  - средняя площадь поверхности стенки, м<sup>2</sup>;  $L$  – длина цилиндра, м;  $d_1$  – внутренний диаметр, м;  $d_2$  – наружный диаметр, м.

Но в условиях эксплуатации (при отложениях накипи и росте коррозии на поверхностях труб) уравнение теплопередачи приобретает другой вид - уравнения теплопроводности для установившегося теплового потока через многослойную цилиндрическую стенку - вследствие деградационных процессов:

$$Q = \frac{2\pi L \cdot (t_r - t_x)}{\sum \frac{1}{\lambda} \ln \frac{d_n}{d_b}} = \frac{2\pi L \cdot (t_r - t_x)}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{d_4}{d_3}}$$

где  $d_b$  – внутренний диаметр каждого цилиндрического слоя;  $d_n$  – наружный диаметр каждого цилиндрического слоя (в дальнейшей разработке предусматривается 3х-слойная цилиндрическая стенка) [1].

Деградация первичного газового холодильника заключается в совокупном действии 2 факторов: коррозии и накипи труб, что приводит к изменению теплопроводности и нагрузок на трубы первичного газового холодильника.

Образующийся слой веществ называется накипью, когда его толщина достигает размеров, вызывающих опасный перегрев металлических стенок или когда присутствие этих веществ снижает экономичность работы агрегата. Этот слой образуется из растворенных или взвешенных в надсмольной воде соединений. Накипь образуется в результате взаимодействия воды или присутствующих в ней реагентов с теплопередающей поверхностью металла, а также в результате выделения различных растворенных в воде веществ при нагревании. Такими являются щелочноземельные металлы, т.е. состоящие из соединений Ca и Mg. При этом в зависимости от анионной составляющей кальциевой накипи подразделяются на сульфатные ( $\text{CaSO}_4$ ), силикатные ( $\text{CaSiO}_3$ ), карбонатные ( $\text{CaCO}_3$ ) и фосфатные [ $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ]; магниевые накипи подразделяются на гидроксильные [ $\text{Mg}$ ;  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ] и фосфатные.

Для охлаждения коксового газа в первичном газовом холодильнике используют надсмольную воду со следующими характеристиками: pH 6,5-8,7; общая жесткость: 6,4-9,0 мг/кг; кальциевая жесткость: 3,6-6,2 мг/кг; магниевая жесткость: 2,4-4,0 мг/кг; щелочность: 4,2-6,0 мг/кг; содержание Cl: 64-92 мг/кг; содержание  $\text{SO}_4^{2-}$ : 164-394 мг/кг. В подавляющем большинстве воды содержание кальция обычно превышает содержание магния. Для магния основой накипеобразования является гидроокись магния, обладающая малой растворимостью, в то время как гидроокись кальция имеет большую растворимость и накипеобразователем не является.

Скорость образования кальциевой и магниевой накипей значительна и зависит от концентрации накипеобразователя и величины местной тепловой нагрузки поверхности нагрева. Для охлаждающей воды в первичном газовом холодильнике существуют следующие требования:

1. Охлаждающая вода не должна выделять механических, карбонатных и других солевых отложений. Ориентировочно допускается скорость отложений не более  $0,25 \text{ г/м}^2 \cdot \text{ч}$ ;

2. Вода не должна вызывать точечной и язвенной коррозии, а также равномерной коррозии металла со скоростью, превышающей  $0,09 \text{ г/м}^2 \cdot \text{ч}$  [2].

Анализ имеющихся данных показывает, что коррозионная и накипная активность оборотных вод Авдеевского коксохимического заводов намного выше требуемого уровня. Скорость отложений накипи  $0,67 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$ ; коррозионная активность  $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$ .

Также было предположено, что вместо однослойной металлической стенки трубы образуется 3х-слойная стенка, состоящая из:

1. Слой накипи
2. Слой металла
3. Слой коррозии снаружи трубы.

Для рассмотрения изменения процесса теплопроводности за срок эксплуатации первичного газового холодильника было предложено рассчитать изменение толщин стенок с учетом накипной и коррозионной активности за месяц. Тогда толщина слоя накипи будет равна:

$$\delta = \frac{t \cdot v_{\text{отл}}}{\rho_{\text{сол}}} = \frac{744 \cdot 0,67 \cdot 10^{-3}}{2200} = 227 \cdot 10^{-3} \text{ м,}$$

где  $t$  – задаваемое время проведения наблюдения за отложениями, ч за месяц;  $\delta$  – толщина слоя отложений, м;  $v_{\text{отл}}$  – скорость отложения соли,  $\text{кг/м}^2 \cdot \text{ч}$ ;  $\rho_{\text{вод}}$  – плотность солей жесткости,  $\text{кг/м}^3$ .

Аналогично рассмотрим рост коррозионного слоя:

$$\delta = \frac{t \cdot v_{\text{кор}}}{\rho} = \frac{744 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}}{7800} = 47,7 \cdot 10^{-3} \text{ м,}$$

где  $v_{\text{кор}}$  – скорость коррозии,  $\text{кг/м}^2 \cdot \text{ч}$ ;  $\rho$  – плотность стали,  $\text{кг/м}^3$ .

Также при расчете введены такие данные:  $\lambda = 47 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$  – коэффициент теплопроводности для стали,  $\lambda = 6,9 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$  – коэффициент теплопроводности для соли. Так как изменение коэффициента теплопроводности составляет в среднем 0,3 % за каждый год эксплуатации из-за старения материала, то этот фактор учитывается для внесения поправки при расчете коэффициента теплопроводности для прокорродированного слоя металла.

На основе этих данных в программе LabVIEW было смоделирован процесс работы верхней секции первичного газового холодильника (так как активность накипи и коррозии в ней наиболее высока) на протяжении 180 месяцев (15 лет) с помощью циклов For Loop и Formula Node с условием, что через 1-2 месяца производится очистка труб от накипи, но 10% от предыдущей очистки не поддаются удалению.



Исходные данные

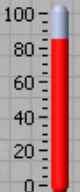
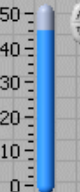










Температура газа  85	Температура воды  45		
Длина трубы, м  3	Толщина трубы, мм  3,5	Внутренний диаметр трубы, мм  50	Внешний диаметр трубы, мм  57
Коэффициент теплопроводности стали, Вт/м•К  47	Коэффициент теплопроводности соли, Вт/м•К  6,9	Коррозионная активность, кг/м <sup>2</sup> ·ч  0,5	
Плотность стали, кг/м <sup>3</sup>  7800	Плотность соли, кг/м <sup>3</sup>  2200	Накипная активность, кг/м <sup>2</sup> ·ч  0,67	

Рисунок 1 – Исходные данные

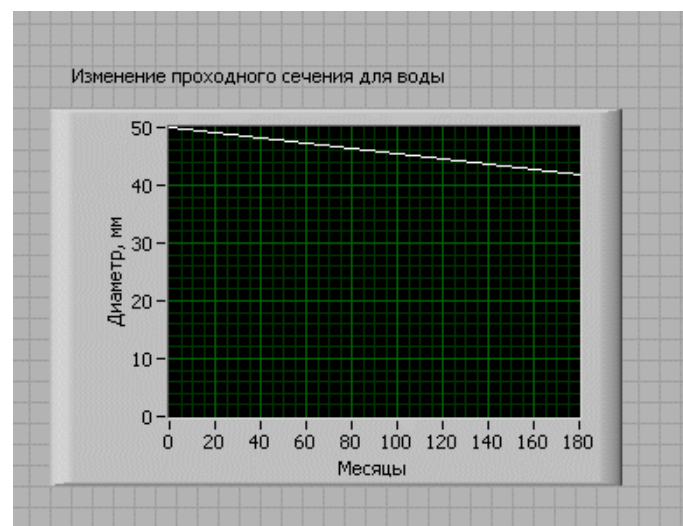


Рисунок 2 – График изменение проходного сечения для воды в трубах первичного газового холодильника

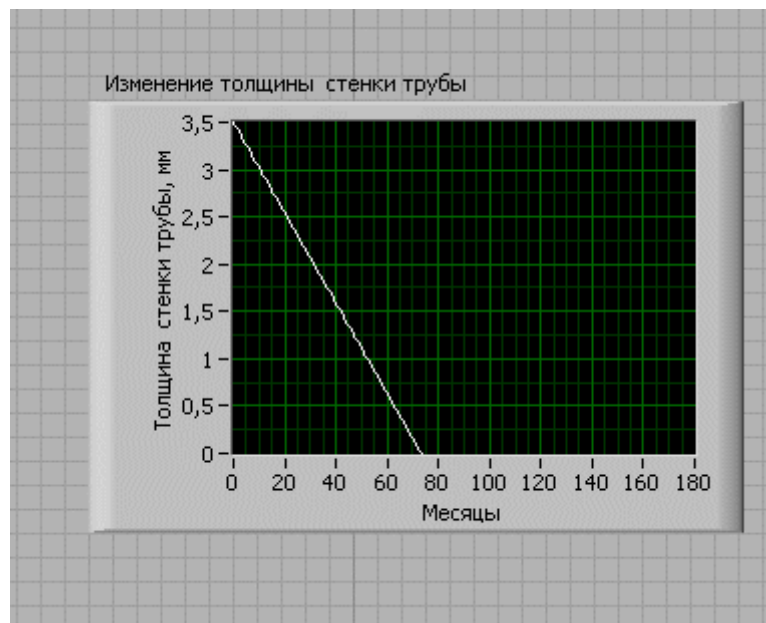


Рисунок 3 – График изменения толщины стенки труб

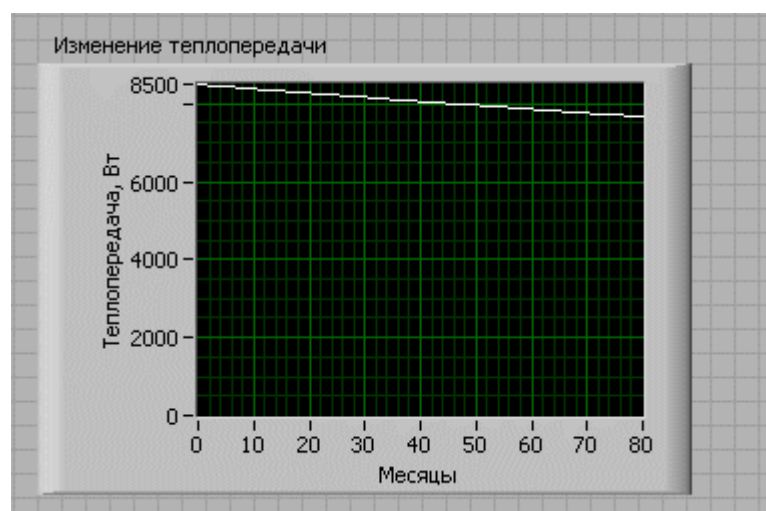


Рисунок 4 - График изменения теплопередачи в трубах с учетом коррозионной и накипной активности сред

Полученные результаты показывают, что за срок эксплуатации первичного газового холодильника коэффициент теплопроводности для прокорродированного слоя стали уменьшился на 4%, проходное сечение труб для воды уменьшится почти на 10%, теплопроводность снизится почти на 12%, а анализ действия коррозии показывает, что агрессивное воздействие коксового газа полностью уничтожит толщину металла трубы за треть срока службы.

В дальнейших разработках планируется рассмотреть все 4 секции холодильника и их совместное влияние на процесс охлаждения газа,

применение в расчетной модели различных изменений состава охлаждающей воды, рассмотрение трубчатки первичного газового холодильника с учетом деградационных характеристик в напряженно-деформируемом состоянии.

#### **Список литературы:**

1. Коробчанский И.Е., Кузнецов М.Д. Расчет аппаратуры для улавливания химических продуктов коксования. – М.: Металлургия, 1972. – 296с.
2. Нестеренко С.В., Стасенко С.П. Комплексонатная обработка оборотной воды для предотвращения процессов коррозии и накипеобразования - Харьков, 2003 – 376с.
3. Оборудование коксохимических заводов: Учеб. пособие для техникумов / Ткачев В.С., Остапенко М. А. М.: Металлургия, 1983, 360 с.
4. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии – Л, Химия, 1987. – 576с.
5. Производственная инструкция машиниста газодувных машин цеха улавливания №2 ОАО «Авдеевский КХЗ», 2007 г. – 19 с.
6. <http://webcache.googleusercontent.com/>

## **ЗАЩИТА ВОЗДУШНОГО БАССЕЙНА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ СИЛИКАТНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**Веретельник С.П., Коробко Ю.В.**

Донецкий национальный технический университет

Одной из проблем современных мегаполисов являются выбросы предприятиями полидисперсной пыли, вредных газов и других загрязнителей атмосферы. Это связано с тем, что на территории этих предприятий происходят сложные технологические процессы, связанные с изменением агрегатного состояния и физико-механических свойств сырья, а также с использованием технологического оборудования и вспомогательных механизмов различной степени сложности.

Пыль производственной техносферы – причина разнообразных заболеваний персонала, износа технологического оборудования и вспомогательных механизмов, снижения качества продукции и рентабельности производства.

Повышенное выделение пыли наблюдается при производстве цемента, бетонных смесей, извести, доломита и инертных материалов, которое сопровождается особо обильным пылевыведением, превышающим ПДК в несколько десятков и даже сотен раз.

В технологическом процессе производства силикатного кирпича повышенное выделение пыли наблюдается на рабочих местах, в