

**Секция 4. Безопасность и надежность  
химических и нефтехимических  
производств**

## **ИНЖЕНЕРНЫЕ СРЕДСТВА И МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ ЗАЩИТНЫХ ТЕПЛОВЫХ ВОЗДУШНЫХ ЗАВЕС**

Насибуллин Р.Р., Галеев А.Д.

*Казанский национальный исследовательский технологический университет*

*E-mail: rail90ongp@yandex.ru*

В последнее время наблюдается высокая заинтересованность инженерными системами, ограничивающими распространение в приземном слое атмосферы токсичных и опасных облаков. Облака опасных веществ возникают в результате аварий на химических производствах, использующих подобные вещества, или при их транспортировке и хранении. В результате в окружающую среду высвобождается значительное количество опасной примеси, как правило, с плотностью, большей чем у окружающего воздуха, что вызывает приземное распространение вещества. Двигаясь по направлению ветра, облако примеси может сформировать зону заражения глубиной до десятков километров, создавая угрозу жизни и здоровью людей.

Инженерных средств, способов и методов, противодействующих распространению опасных веществ, разработано немало [1]. В данной работе будет уделено внимание анализу воздушных завес, потому что исследований их в качестве средств активной коллективной защиты органов дыхания людей от ядовитых или отравляющих веществ, крайне мало.

Воздушные завесы в отечественной и зарубежной инженерной практике известны с давних времен. Но функции этих завес лежали строго в области поддержания требуемого микроклимата воздуха рабочей зоны различных производств, вентиляции, кондиционирования и т.д. В работе [2], впервые воздушная завеса рассматривается как средство, уменьшающее концентрации ядовитых или отравляющих веществ в приземном слое атмосферы в селитебной зоне до значений, не опасных для жизни людей, путем рассеивания ядовитых или отравляющих веществ в атмосфере с помощью защитной, приземной, плоской, направленной вертикально вверх струйной воздушной завесы. Завеса имеет в плане форму дуги с центром дуги в источнике заражения. Местом установки завесы является пространство между источником заражения опасными веществами и селитебной зоной. Защитная, приземная, плоская, направленная вертикально вверх струйная воздушная завеса вызывает, за счет сил вязкостного трения, подъем прилегающих с обеих сторон к завесе слоев воздуха от поверхности вверх на высоту, равную высоте завесы. Двигающееся по ветру от источника заражения облако ядовитых или отравляющих веществ, при приближении к защитной воздушной завесе, изменяет свою траекторию так, что приземная часть облака поднимается на высоту воздушной завесы. Более высокие части облака поднимаются на еще большую высоту. Поскольку подъем воздуха воздушной завесой осуществляется и с ее подветренной стороны, то после завесы облако ядовитых или отравляющих веществ не опускается к поверхности, а рассеивается в атмосфере. При этом концентрация ядовитых или отравляющих веществ в приземном слое по пути движения облака будет значительно ниже, чем без его подъема воздушной завесой. Эффективность защитной воздушной завесы по снижению концентрации ядовитых или отравляющих веществ в приземном слое, в основном, зависит от высоты завесы, ее расстояния от источника заражения, метеоусловий и не зависит от вида ядовитых или отравляющих веществ.

Таким образом, применение защитной приземной плоской направленной вертикально вверх струйной воздушной завесы является принципиально новым средством активной коллективной защиты населения от ядовитых или отравляющих веществ, позволяющим предотвратить заражение приземного слоя атмосферы селитебной зоны этими веществами в концентрациях, опасных для жизни людей [2].

В работе [3] авторы отмечают, что основным и единственным известным методом формирования воздушной завесы является вдув плоской, приземной, направленной вверх воздушной струи с помощью установки, содержащей воздухоподводящую машину и соединенный с ней наземный воздухоподводящий короб с расположенным в верхней части воздухоподводящим щелевидным насадком с конфузурным входным участком [4]. Воздуходувная машина нагнетает атмосферный воздух в подключенный к ней воздухоподводящий короб. Нагнетаемый воздух, при истечении через направленный вверх воздухоподводящий щелевидный насадок, образует защитную воздушную завесу. Ограниченный диапазон технических характеристик установки не позволяет создать воздушную завесу необходимых длины и высоты, поэтому для большинства случаев практического применения подобные устройства непригодны.

Авторы работы [3] предлагают способ формирования защитной воздушной завесы, который бы позволил избежать все вышеперечисленные эксплуатационные барьеры. Новый способ предполагает выполнение рассеивания за счет отбора прилегающей к подстилающей поверхности части содержащего химически опасные вещества набегающего потока воздуха и последующих изменений направления его движения, ускорения и выброса вертикально вверх в виде плоской поперечной струи.

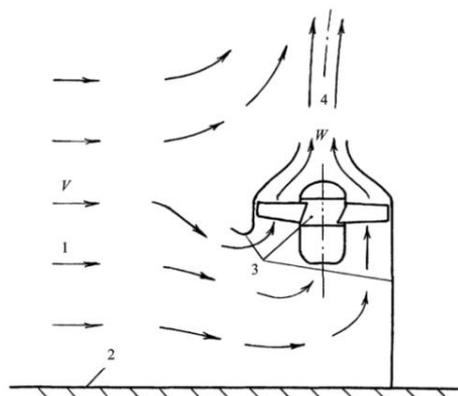


Рис. 1. Схема формирования воздушной завесы

На рис. 1 схематично изображен процесс рассеивания в атмосфере движущегося по ветру вдоль подстилающей поверхности облака примеси. Содержащий примесь поток воздуха 1 движется со скоростью  $V$  вдоль подстилающей поверхности 2. В прилегающей к подстилающей поверхности 2 части потока воздуха концентрация опасного вещества максимальна. С помощью устройства 3 прилегающую к подстилающей поверхности 2 часть содержащего примесь набегающего потока воздуха отбирают, изменяют направление его движения, ускоряют и выбрасывают вертикально вверх в виде плоской поперечной воздушной струи 4 со скоростью истечения  $W$ . Остальная верхняя часть содержащего примесь потока воздуха натекает на плоскую струю 4 и под действием вязкостного трения поднимается вместе с ней вверх, изгибая при этом струю за счет динамического воздействия. Применительно к данному способу [3] те же авторы предлагают конструктивное исполнение мобильной установки, формирующей защитную воздушную завесу [5].

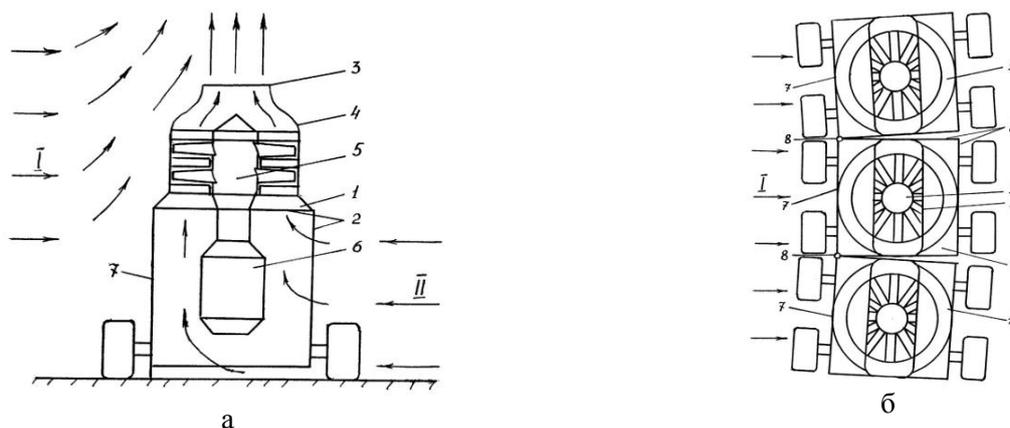


Рис. 2. а) Схематическое изображение отдельно выделенной воздуходувной машины; б) Вид сверху последовательно соединённых в одну линию воздуходувных машин

Работа установки поясняется рисунками 3, 4. Вращаемый электродвигателем 6 осевой вентилятор 5 засасывает через нижний и боковой открытые проемы поток чистого атмосферного воздуха II с подветренной стороны установки и через конфузрный входной участок 4 и воздуховыпускающий щелевидный насадок 3 направляет его в виде плоской струи вертикально вверх. Плоские струи от отдельных направляющих аппаратов сливаются и формируют защитную воздушную завесу длиной, равной сумме длин всех струйных направляющих аппаратов. Поток воздуха I, содержащий ядовитые или отравляющие вещества, набегаёт на сплошную вертикальную стенку, образованную соединёнными посредством шарниров 8 вертикальными сплошными касающимися поверхностями почвы стен-

ками 7 струйных аппаратов 1, обтекая ее, поднимается вверх до верхнего края щелевидного насадка 3 и далее за счет сил вязкостного трения с вытекающей из щелевидного насадка воздушной струей поднимается вверх на высоту формируемой установкой защитной воздушной завесы.

Таким образом, благодаря тому, что воздуходувная машина установлена внутри каждого струйного направляющего аппарата 1 и выполнена в виде осевого вентилятора 5, размещенного перед конфузурным входным участком 4 щелевидного выпускающего насадка 3, удается обеспечить кратчайший путь подвода чистого атмосферного воздуха к щелевидному воздуховыпускающему насадку через открытые нижний и боковой проемы корпуса струйного направляющего аппарата. Достигаемое при этом уменьшение потерь давления и делает возможным использование осевого вентилятора в качестве воздуходувной машины. Кроме того, этим обеспечивается разделение единой системы (воздуходувная машина и нагнетаемый ею поток воздуха) чрезмерных мощности и габаритов на большое число параллельно включенных таких же систем, но реальных мощности и габаритов. Все эти факторы и позволяют обеспечить практическую реализацию установки для формирования защитной воздушной завесы требуемых длины и высоты.

### **Литература**

- [1] Насибуллин Р.Р. Методы и средства ограничения опасных веществ при аварийных выбросах и проливах. / Насибуллин Р.Р., Галеев А.Д., Поникаров С.И. // Вестн. Казан. технол. ун - та. – 2013. – №.4. - С.221 - 213.
- [2] Пат. 2179046 Российская Федерация, МПК А62В29/00. Способ активной коллективной защиты населения от ядовитых или отравляющих веществ/ Обухов И.А., Майоров В.А.; заявитель и патентообладатель Пензенская государственная архитектурно-строительная академия. заявл. 08.11.00; опубл. 10.02.02.
- [3] Пат. 2255779 Российская Федерация, МПК А62В29/00, F24F9/00. Способ активной коллективной защиты населения от аварийно химически опасных веществ/ Обухов И.А., Майоров В.А., Добкина О.Н.; заявитель и патентообладатель Пензенская государственная архитектурно-строительная академия. заявл. 15.01.04; опубл. 10.07.05.
- [4] Эльтерман В.М. Воздушные завесы. - М.: Машиностроение. - 1966. - С.83-90.
- [5] Пат. 2232039 Российская Федерация, МПК А62В29/00, F24F9/00. Мобильная установка для формирования воздушной завесы для защиты населения от ядовитых или отравляющих веществ/ Обухов И.А., Майоров В.А.; заявитель и патентообладатель Пензенская государственная архитектурно-строительная академия. заявл. 10.12.02; опубл. 10.07.04.

## **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАЩИТЫ ОГНЕВОЙ ЗАВЕСЫ ПРИ АВАРИЙНОМ ВЫБРОСЕ 10 ТОНН ЖИДКОГО ХЛОРА**

Насибуллин Р.Р., Галеев А.Д.

*Казанский Национальный Исследовательский Технологический университет.,  
E-mail: rail90ongp@yandex.ru*

Одним из средств, снижающих негативные последствия выброса и испарения сжиженных токсичных и пожаровзрывоопасных газов в атмосферу, является установка на пути их распространения специальных устройств, создающих завесы различных типов. В настоящее время, работ, связанных с исследованием влияния огневых завес на распространение токсичных облаков, крайне мало. Поэтому в данной статье была проведена оценка эффективности влияния огневой завесы на распространяющееся в атмосфере облако хлора, возникшего в результате его аварийного пролива в жидком состоянии. Пламя, термически и механически воздействуя на облако примеси, снижает его плотность, создает благоприятные условия для смешения хлора с окружающим воздухом. Так как хлор является сильным окислителем, контакт с пламенем завесы не создаст опасности его возгорания. Указанные выше механизмы воздействия завесы на облако примеси могут служить причиной снижения размеров зон токсического поражения хлором, тем самым сокращая расходы, связанные со страхованием ответственности предприятия, использующего в своей деятельности сжиженный хлор, перед третьими лицами.

При разгерметизации емкости с перегретой жидкостью, в результате резкого снижения давления и нарушения термодинамического баланса, происходит мгновенное вскипание определенной части жидкой фазы за счет высвобождения внутренней энергии. При этом устанавливается новое со-

стояние равновесия, а температура оставшейся жидкой фазы понижается до температуры кипения при атмосферном давлении. При мгновенном испарении жидкости формируется первичное облако пара.

Первичное облако в настоящей работе представлялось в виде цилиндра с радиусом, равным высоте.

Массовая доля мгновенно испарившейся жидкости  $\delta$  определяется по формуле [1]:

$$\delta = 1 - \exp\left(-\frac{C_p \cdot (T_a - T_b)}{L_g}\right), \quad (2)$$

где  $C_p$  - удельная теплоемкость хлора, Дж/(кг·К);  $T_a$  - температура окружающего воздуха, К;  $T_b$  - температура кипения хлора при атмосферном давлении, К;  $L_g$  - удельная теплота парообразования хлора, Дж/кг.

Предполагалось, что пролив сжиженного хлора, оставшегося после мгновенного вскипания, имеет форму круга, поэтому значение радиуса поверхности пролива жидкости рассчитывалась по формуле:

$$r = \sqrt{\frac{m_l \cdot \rho_l}{\pi \cdot h}}, \quad (3)$$

где  $m_l$  и  $\rho_l$  - масса и плотность жидкого хлора,  $h$  - высота слоя жидкости пролива, принимаемая в данном расчёте 0,05 м.

Интенсивность парообразования при кипении пролива определялась по формуле [1]:

$$W = \frac{(\lambda_s \cdot C_s \cdot \rho_s)^{0.5} \cdot (T_o - T_b)}{L_g \cdot (\pi \cdot t)^{0.5}}, \quad (4)$$

где  $\lambda_s$  - коэффициент теплопроводности материала, на поверхность которого разливается жидкость,  $\frac{Вт}{(м \cdot К)}$ ;  $C_s$  - удельная теплоемкость материала,  $\frac{Дж}{(кг \cdot К)}$ ;  $\rho_s$  - плотность материала,  $\frac{кг}{м^3}$ ;  $T_o$  - начальная температура материала, К;  $t$  - текущее время с момента начала испарения, с (но не менее 10 с);  $T_g$  - температура кипения сжиженного хлора при атмосферном давлении, К;  $L_g$  - удельная теплота парообразования хлора,  $\frac{Дж}{кг}$ .

Модель распространения примесей в атмосфере включала численное решение полной системы трехмерных нестационарных уравнений Рейнольдса, переноса массы и энергии, замыкаемых Realizable k-ε моделью турбулентности [2].

Пламя завесы в рассматриваемой задаче представляет собой реакцию окисления метана, уравнение которой имеет вид:



Данная реакция в модели описывается уравнением сохранения химической компоненты [2]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{\mathcal{G}} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i \quad (6)$$

где  $Y_i$  - массовая концентрация химического компонента;  $\vec{\mathcal{G}}$  - поле скоростей потока;  $\vec{J}_i$  - диффузионный поток;  $R_i$  - скорость образования (убывания) компонента в единице объема в результате реакции;

Скорость образования компонента в единице объема рассчитывается в данной задаче на основе модели вихревого рассеивания ("Eddy-dissipation"). Вихревая турбулентная модель рассчитывает степень реакции в предположении, что кинетика реакции значительно выше, чем скорость смешения реагентов [2]. Скорость образования вещества  $i$  в результате реакции  $\gamma$  находится как меньшее значение, получаемое по нижеследующим уравнениям [2]:

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{\omega,i} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left( \frac{Y_R}{v'_{R,r} M_{\omega,R}} \right) \quad (7)$$

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{\omega,i} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_p Y_p}{\sum_j^N v''_{j,r} M_{\omega,j}} \quad (8)$$

где  $v'_{i,r}$ ,  $v''_{j,r}$  - стехиометрические коэффициенты соответственно реактанта и продукта реакции;  $\varepsilon$ ,  $k$  - коэффициенты турбулентности; А и В – эмпирические коэффициенты, равные соответственно 4 и 0,5;  $Y_R$  и  $Y_p$  - массовая доля реактанта и продукта соответственно;  $M_{\omega,i}$  - молекулярная масса компонента  $i$ .

Основой для расчета распределения температуры было уравнение энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \nabla \cdot (\rho \bar{\vartheta} H) = \nabla \cdot \left( \frac{k_t}{c_p} \nabla H \right) + S_h \quad (9)$$

где  $H$  – полная энтальпия системы, является сложной зависимостью от температуры;  $S_h$  - источник тепла, формирующееся в результате реакции:

$$S_h = - \sum_j \frac{h_j^0}{M_j} R_j \quad (10)$$

где  $h_j^0$  - энтальпия образования вещества  $j$ ;  $R_j$  - скорость образования вещества  $j$  в результате горения, определяется из уравнений (7), (8).

### Результаты расчетов

В целях оценки применимости изложенной модели рассматривалась аварийная ситуация, связанная с полным разрушением емкости, содержащей сжиженный хлор. Масса жидкости в емкости принималась равной 1000 кг. Температура хлора в емкости принималась равной 303 К.

Расчетные характеристики источников первичного и вторичного облаков в начальный момент времени представлены в табл. 1.

**Табл. 1.** Характеристики источников выбросов

Параметр выброса	Значение	Параметр выброса	Значение
Масса хлора в первичном облаке, кг			200
Площадь пролива, м <sup>2</sup>			12,5
Радиус и высота первичного облака, м			4

Температура окружающей среды принималась равной 30 °С, скорость ветра на высоте 10 м – 1 м/с. Состояние атмосферы – изотермия. Материал подстилающей поверхности – бетон. Время экспозиции принималось равным 1800 с. Предполагалось, что в течение этого времени будет осуществлен вывод технического персонала из опасной зоны, либо будут осуществлены мероприятия, направленные на снижение интенсивности источника паров. В исследовании давление в трубопроводе метана, формирующего пламя завесы, был равен 3 кгс/см<sup>2</sup>. Источник выброса хлора расположен на расстоянии 550 м от начала расчетной области. Завеса, длиной в 12 м, находится на расстоянии 20 м от подветренной стороны пролива.

Для оценки размеров зон токсического поражения пользовались показателем токсодозы, учитывающим изменение концентрации в точке пространства в зависимости от времени и определяемой как [3]:

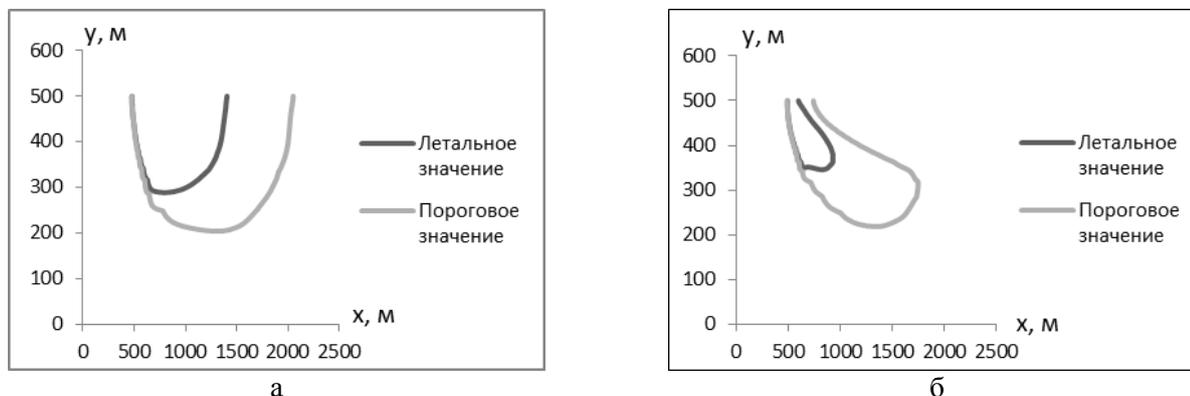
$$D(x, y, z) = \int_0^{t_{\text{экс}}} C(x, y, z, t) dt = \sum_{i=1}^n C_i(x, y, z, t) \cdot \Delta t \quad (11)$$

где  $D$  - токсодоза;  $t_{\text{экс}}$  - время экспозиции;  $\Delta t$  - шаг по времени;  $C$  - концентрация примеси. Для хлора значения летальной и пороговой токсодоз равны соответственно  $SLCt = 6$  и  $SPCt = 0,6$  мг·мин/л

[3]. Функция вычисления токсодозы была реализована на языке программирования Си и интегрирована в пакет FLUENT.

Результаты расчета полей токсодоз на земной поверхности в виде изолиний, соответствующих пороговому и летальному значениям в зависимости от расхода метана в завесе, приведены на рисунке 1.

Анализ вышеуказанных рисунков ясно указывает на то, что огневая завеса снижает размеры зон токсического поражения хлором. Количественно это подтверждается оценкой площадей зон токсического поражения SL<sub>Ct</sub> и SP<sub>Ct</sub>, соответствующие летальной и пороговой токсодозам. Результаты представлены в табл. 2.



**Рисунок.** Профили летального и порогового значений токсодоз паров хлора (симметричная половина): а) В отсутствии огневой завесы; б) При работающей завесе

**Табл. 2.** Площади зон поражения хлором (время экспозиции 1800с)

Параметр	Расход сжигаемого газа в завесе, $\frac{кг}{м^3 \cdot с}$			
	Без завесы	1	2,15	4,3
SL <sub>Ct</sub> , м <sup>2</sup>	147627	36775	27058	13321
SP <sub>Ct</sub> , м <sup>2</sup>	368243	186135	115032	43727

## Литература

- [1] Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах (утв. приказом МЧС РФ от 10 июля 2009 г. № 404).
- [2] Fluent Inc. Fluent 6.1. User's Guide, Lebanon, 2003.
- [3] РД-03-26-2007. Методические указания по оценке последствий аварийных выбросов опасных веществ (утв. Приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 14 декабря 2007 г. №859).

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ И ВОДЫ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

Бобрышов А.М., Сухорослов А.В.

Белгородский государственный технологический университет имени В.Г. Шухова,  
E-mail: sasha-syx@mail.ru

В процессе эксплуатации трансформатора его части изнашиваются. Для предотвращения выхода его из строя трансформатора и всеми вытекающими отсюда последствиями, необходимо своевременно производить осмотр всех частей оборудования, выявлять неисправности и применять меры по их устранению.

На промышленной площадке Колпинского ЛПУ МГ имеется 2 силовых масляных трансформатора серии ТМ 400/10/0,4 кВ которые нуждаются в периодических проверках и осмотрах.

Вот некоторые возможные последствия повреждений или выхода из строя трансформатора [1-3]:

- Остановка нормальной работы промышленной площадки Колпинское ЛПУМГ;
- Финансовые потери компании ООО «Газпромтрансгаз Санкт-Петербург»;
- Возможность возникновения чрезвычайных ситуаций на площадке.

Периодичность минимального осмотра 6 месяцев. Так как на промышленной площадке Колпинского ЛПУ МГ находится 2 трансформатора серии ТМ 400/10/0,4, то содержать штат ремонтников для проведения технического обслуживания трансформаторов, который раз в 6 месяцев, а так же других видов ремонта, не является целесообразным. Гораздо выгоднее воспользоваться услугами компаний, по обслуживанию и ремонту силовых трансформаторов.

При долгой эксплуатации силовых масляных трансформаторов, без надлежащего ухода, это приводит к их разрушению и выхода из строя. Таким является ухудшение электрофизических свойств трансформаторного масла. Трансформаторное масло предназначено для изоляции, т.е. оно обеспечивает около 81% электрической прочности в трансформаторе и для охлаждения, т.е. масло отводит тепло от обмотки (активных частей и т.п.) в систему охлаждения силового трансформатора [3].

Долговечность и надежность маслonaполненных трансформаторов во многом зависит от качества масла. Качество масла определяет качество работы масляных трансформаторов. 87% поломок трансформаторов серии ТМ (маслonaполненные) происходит из-за повреждения изоляции. Поэтому целесообразно своевременно менять и регенерировать трансформаторное масло.

Основные факторы, оказывающие влияние на эксплуатационные свойства трансформаторного масла являются [1-3]:

1. Механические примеси (волокна, пыль, продукты растворения в масле компонентов, и т.п.);
2. Вода (связанная, растворённая и эмульсионная).

Механические примеси являются нерастворенными веществами, содержатся в масле в виде осадков или во взвешенном состоянии. Волокна, пыль, продукты растворения в масле компонентов, применяемых в устройстве трансформатора (лаков, красок и т.п.). Остальные примеси появляются в масле после внутренних повреждений трансформатора (электрической дуги, мест перегревов) в виде обуглившихся частиц. При долгой эксплуатации трансформаторного масла без замены в нем накапливается шлам, который, осаждаваясь на изоляции силового трансформатора, ухудшает её диэлектрические свойства. Изначально в трансформаторном масле имеются мелкие частицы, которые образуются из примесей в сырой нефти или же при её обработке. При сборке и изготовлении трансформатора в масло могут попасть: волокна целлюлозы, частицы смол и металлов, пыль. При долгой работе трансформатора концентрация таких частиц, как волокна целлюлозы, крупинцы металла и смолы, нарастает по мере износа материалов. Они распространяются по всему объёму при принудительной циркуляции масла. Из-за перегревов и частичных разрядов увеличивается концентрация углеродородных частиц. При долгой эксплуатации трансформаторного масла происходит укрупнение коллоидных частиц, которые наблюдаются у заводского масла. Старение масла приводит к тому, образуются парамагнитные центры, вокруг которых сосредотачиваются молекулы с меньшими энергетическими взаимодействиями, образуется формирование коллоидных микрогетерогенных систем. Исследования показали, что механические примеси, имеющие размер менее 6 мкм, являются опасными для нормального функционирования трансформатора, так как они составляют примерно 97% от общего числа загрязнителей в масле являющимися продуктами окисления масла. При старении трансформаторного масла в нем появляется содержание воды и механических примесей (целлюлозные волокна, коллоидные частицы, особенно частицы меди, железа и других металлов), совместное влияние этих свойств на эксплуатационные показатели трансформаторного масла намного сильнее, чем влияние одного из этих свойств в отдельности.

В трансформаторном масле образуется вода, появляющаяся в процессе старения масла и изоляции, а также вода, попадающая в масло из внешней среды. В зависимости от содержания воды в трансформаторном масле она может быть в трёх состояниях: эмульсионном, растворённом и связанном. В следствии износа масла и твердости изоляции в нем появляется вода, имеющая вид осадка, которая появляется до насыщения. В результате насыщения вода растворяется. В растворённом состоянии вода практически не оказывает никакого влияния на электрическую прочность, проявляется повышение окисляемости трансформаторного масла и снижается его нормальный режим работы. При резком понижении температуры внутри силового трансформатора влага в масле перенасыщается, в результате образуется эмульгированная вода, которая состоит из мелких капель жидкости. Капельки такой воды могут образовывать осадок или под действием электрического поля выстраиваться в цепочки и появляются проводящие мостики, в результате, такая вода может оказать влияние на пробивное напряжение трансформаторного масла. Пробивное напряжение трансформаторного масла следствии показателя, характеризующего способность жидкого диэлектрика выдерживать поданное напряжение без пробоя. Как видно на рис. 1. пробивное напряжение уменьшается вследствие увеличения содержания воды в составе трансформаторного масла.

Вследствие анализа, часть воды находится в масле во взаимосвязанном состоянии (слева), а часть в эмульсионном (справа). Устранить взаимосвязанную воду невозможно, она всегда содержится в свежем масле. Взаимосвязанная вода не приносит практически никакого вреда на электрофизические показатели трансформаторного масла.

В результате эмульсионной воды, проявляется влияние на эксплуатационные свойства трансформаторного масла, значительное влияние приходит на величину пробивного напряжения масла.

Краткие результаты испытания трансформаторного масла представлены ниже.

Пробивное напряжение на трансформаторе №1:

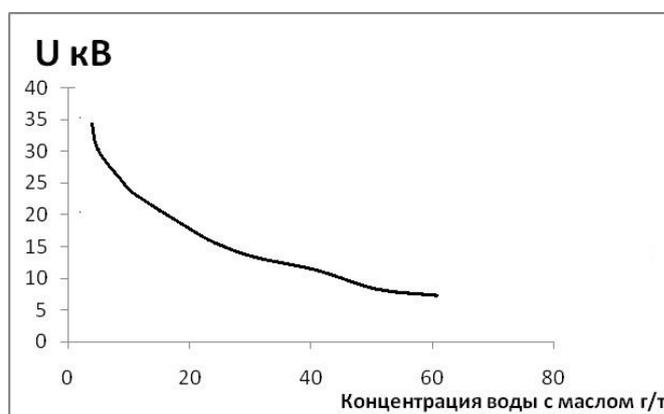
- Максимальное 17 кВ;
- Минимальное 15 кВ;
- Среднее пробивное напряжение: 16кВ

Заключение: требуется замена масла

Пробивное напряжение на трансформаторе №2

- Максимальное 19 кВ;
- Минимальное 17 кВ;
- Среднее пробивное напряжение: 18кВ

Заключение: требуется замена масла.



**Рисунок.** Влияние воды на пробивное напряжение трансформаторного масла

### Литература

- [1] Вилков С. А. Обзор современных способов диагностирования силовых трансформаторов и авто-трансформаторов [Электронный ресурс] Современные научные исследования и инновации. – 2012. – № 9. Режим доступа : <http://web.snauka.ru/issues/2012/09/16794>
- [2] Голоднов Ю.М. Контроль за состоянием трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 88 с.
- [3] Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: учебное пособие для ву- зов. М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.

## МОДЕРНИЗАЦИЯ САЛЬНИКОВЫХ И ЛАБИРИНТНЫХ УПЛОТНЕНИЙ

Кутепов Д.М., Романенко М.Д., Голованчиков А.Б.

*Волгоградский государственный технический университет.*

*E-mail: romanenko.mihail2009@yandex.ru*

Разработаны новые конструкции сальниковых и лабиринтных уплотнений, позволяющие во - первых, регулировать силу прижатия сальника к вращающемуся валу или вибрирующему в продольном направлении штоку, а во-вторых, уменьшить утечки газа или жидкости в лабиринтах.

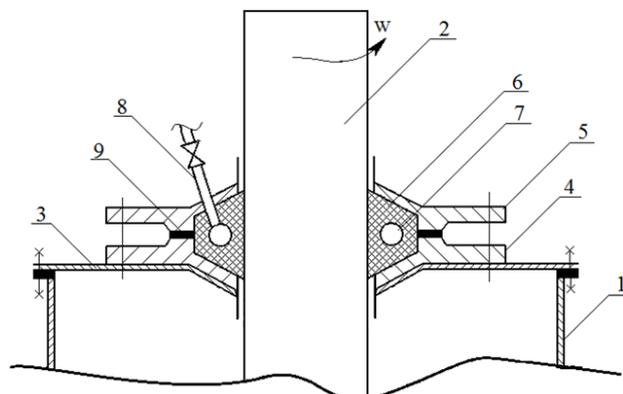
Целью является ресурсо- и энергосбережение за счет снижения потерь перерабатываемых жидкостей и газов в машинах и аппаратах.

Задачей предлагаемой конструкции сальниковых устройств, является увеличение срока службы с использованием эффекта самоуплотнения при повышенных температурах.

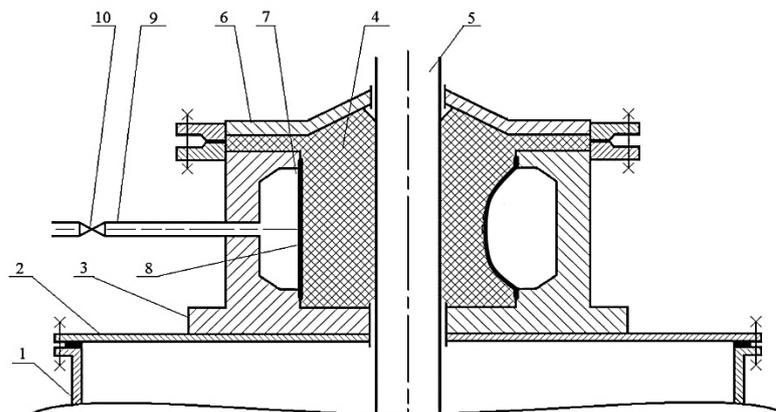
Задача решается таким образом, что внутри в основной части обычного сальникового уплотнения закладывается герметичная резиновая трубка с воздухом аналогично велосипедной камере [1].

При постепенном износе сальникового материала, его деструкции, старении и выкрашивании, то есть при потере рабочих свойств через ниппель можно подкачать дополнительно в трубку воздух и

увеличивающая в объеме трубка заставит поверхности трения сальника вновь прижиматься к уплотнительным поверхностям узлов трущихся сопряженных деталей. На рис. 2 показана другая конструкция сальникового уплотнения [2].



**Рис. 1.** Схема сальника, установленного на вращающемся валу аппарата: 1 – корпус аппарата; 2 – вал; 3 – крышка аппарата; 4 – неподвижный фланец на крышке аппарата; 5 – прижимной фланец; 6 – сальниковое уплотнение; 7 – трубка из эластичного материала (резины, полимера); 8 – ниппель; 9 – прокладка.



**Рис. 2.** Схема сальникового уплотнения: 1 – корпус; 2 – крышка; 3 – сальниковая камера; 4 – мягкая или сыпучая набивка; 5 – подвижной элемент; 6 – нажимной элемент; 7 – кольцевая полость; 8 – эластичная мембрана; 9 – патрубок; 10 – вентиль (слева – без рабочего давления, справа – под давлением).

Находящееся внутри резиновая мембрана, за счет расширения воздуха в кольцевой полости, деформируется и прижимается к набивке сальниковой камеры.

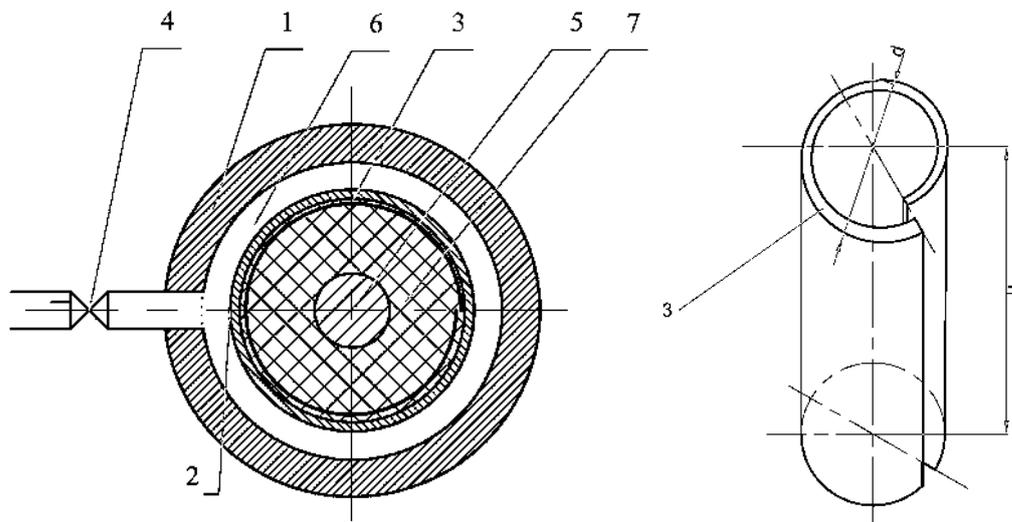
На рис. 3 показана еще одна конструкция уплотнения, которое можно использовать при высоких температурах [3].

Данная конструкция позволяет передавать усилие от давления в мембране по всей высоте сальниковой камеры.

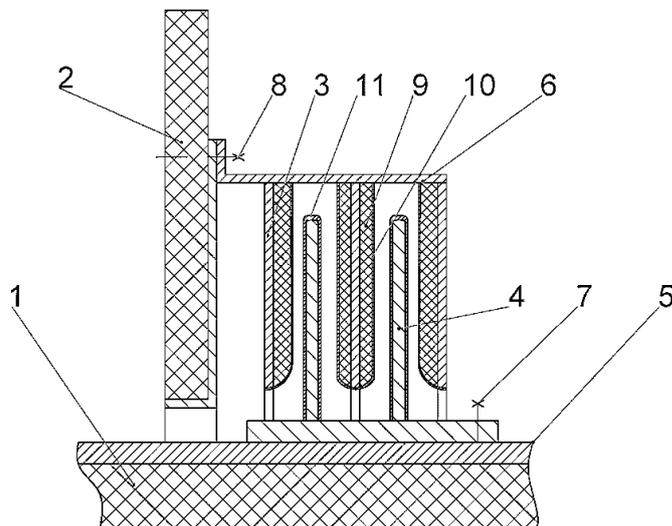
На рис. 4 представлена модернизированная конструкция лабиринтного уплотнения [4].

Увеличение производительности по высушиваемому материалу за счет снижения подсоса воздуха в кольцевых каналах между подвижными и неподвижными кольцами достигается тем, что в лабиринтном радиальном уплотнении барабанной сушилки, включающем барабан, камеру, кольца неподвижные и кольца подвижные, причём на боковой стороне каждого неподвижного кольца, смежной с боковой стороной подвижного кольца, закреплены кольца из эластичного материала, покрытые снаружи пленкой из антифрикционного полимерного материала, при этом подвижные кольца покрыты пленкой из антифрикционного материала.

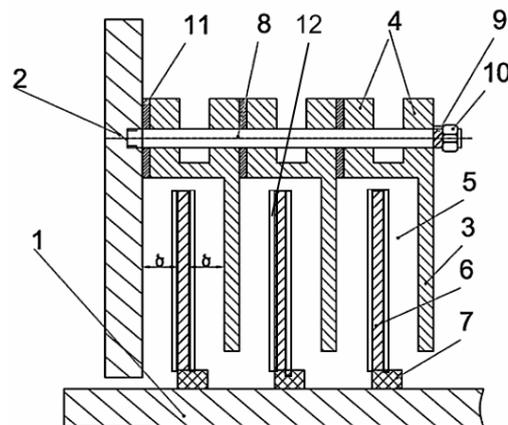
Экспериментально было доказано, что при одинаковом избыточном давлении в аппарате потери давления через модернизированную конструкцию (утечки) уменьшаются на 12,5 %, при одинаковых потерях мощности на создание избыточного давления расход утечек уменьшается на 10,5 %.



**Рис. 3.** Сальниковое уплотнение с разрезной гильзой [3]: 1- сальниковая камера; 2 - мембрана; 3 - разрезная гильза; 4 - вентиль; 5 - шток или вал; 6 - кольцевая полость; 7 – набивка.



**Рис. 4.** Лабиринтное уплотнение барабанной сушилки [1]: 1 – барабан; 2 – камера; 3 – неподвижные кольца; 4 – подвижные кольца; 5, 6 – кольцевая опора; 7,8 –разъемный узел; 9 – кольца из эластичного материала; 10, 11 – пленка из антифрикционного материала (фторопласт).



**Рис. 5.** Разборное лабиринтное радиальное уплотнение барабанной сушилки [5]: 1 – барабан; 2 – камера; 3 – диск; 4 – фланцы; 5 – кольцевая полость; 6 – подвижные кольца; 7 – манжеты; 8 – шпилька; 9 – шайба; 10 – гайка; 11 – прокладка

На рис. 5 показана схема конструкции разборного радиального лабиринтного уплотнения [5].

За счет снабжения каждого подвижного кольца манжетой, выполненной из эластичного материала и обеспечивающей возможность скольжения по наружной поверхности барабана с натягом, позволяет за счет эластичности манжеты устанавливать её на внешней поверхности барабана без больших затрат времени и усилий, что снижает затраты этого времени на монтаж и демонтаж подвижных колец, а значит увеличивает время основной работы барабанной сушилки и тем самым приводит к росту производительности.

### **Заключение**

1. На основе литературного и патентного обзора выявлены основные недостатки сальниковых и лабиринтных уплотнений, связанные с малым сроком службы и значительными утечками рабочих жидкостей и газов при длительной эксплуатации.
2. Разработаны 3 новых конструкции сальниковых уплотнений, защищённые патенты на полезную модель РФ, обеспечивающие увеличение срок службы, возможность регулирования давления в сальниковой камере при длительной эксплуатации.
3. Разработано 2 новых конструкции лабиринтных уплотнений, обеспечивающие снижение утечки рабочих жидкостей и газов и уменьшающих энергозатраты по тепловой мощности на 10 % за счет увеличения сопротивления на утечки рабочих жидкостей и газов на 12 %.
4. Обработка экспериментальных данных методом корреляционного анализа подтвердила высокую воспроизводимость, значимость, адекватность зависимостей полученного уравнения зависимости перепада давления от расхода.

### **Литература**

- [1] П. м. 176709 Российская Федерация, МПК F26B25/08, F16J15/453, Лабиринтное уплотнение барабанной сушилки / А.Б. Голованчиков, Н.А. Прохоренко, Е.А. Мишта, Д.М. Кутепов, Н.С. Гончаров, Е.С. Хмелевская; ВолгГТУ. - 2018.
- [2] Машины и аппараты химических производств: учебник для вузов / А.С. Тимонин, Б.Г. Балдин, В.Я. Борщев, Калуга: Издательство «Ноосфера», с. 643.
- [3] П. м. 175456 Российская Федерация, МПК F16J15/18 Сальниковое уплотнение / А.Б. Голованчиков, Н.А. Прохоренко, Д.М. Кутепов, С.В. Сумбулян, Ю.Ю. Матасова, Е.М. Чебаткова; ВолгГТУ. - 2017.
- [4] Макаров Г. В. Уплотнительные устройства. Л.: Машиностроение, 1973. 232 с.
- [5] Уплотнения и уплотнительная техника: Справочник / Л.А. Кондаков, А.И. Голубев, В.Б. Овандер [и др.]; Под общ. ред. А.И. Голубева, Л.А. Кондакова. - М.: Машиностроение, 1986. - 464 с.

## **ПЕРЕРАБОТКА МЕДЬСОДЕРЖАЩИХ РАСТВОРОВ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ**

Осипова Ю.А., Макаров В.М.  
*Ярославский государственный технический университет.*  
*E-mail osipovaNeko@yandex.ru*

Гальваническое осаждение меди получило широкое распространение, и для этого разработано большое количество электролитов, которые принято подразделять на две группы: простые (кислые) и комплексные (преимущественно щелочные).

К простым электролитам меднения относятся сернокислые, борфтористоводородные, кремнефтористоводородные, сульфаминовые, нитратные и хлоридные.

В комплексных щелочных электролитах медь находится в составе комплексных ионов. Разработано большое число комплексных щелочных электролитов: цианистые, пирофосфатные, триполифосфатные, аммиачные, этилендиаминовые, моноэтаноламиновые, триэтанолламиновые, полиэтиленполиалилиновые, щавелевокислые, лимоннокислые, виннокислые [1].

В зависимости от количества покрываемых медью деталей, уменьшающаяся концентрация действующего вещества подвергается корректировке для дальнейшего использования электролита, но, в конечном счете, электролитическая ванна различного объема выводится из технологического процесса, поскольку требуемое качество покрытия уже невозможно обеспечить. Высокие концентрации драгоценной меди в этих отработанных электролитах требуют организацию их переработки с получением востребованного продукта. Но до сих пор она не налажена, и предприятия, где имеется элект-

трохимическое меднение, химическое меднение и электролитическое осаждение сплавов на основе меди, вынуждены их хранить в антикоррозионных емкостях на своей территории, что может при отсутствии полигонов в отдельный период привести к выходу этих агрессивных жидкостей и загрязнению почвы, а также поверхностных и подземных вод ионами меди. Известно [2], что медь, относящаяся к тяжелым металлам, в живом организме ингибируют активность ферментов, образуя с ними комплексные соединения, способные проникнуть через клеточные мембраны и даже привести к их разрыву. У человека при хронической интоксикации медью и ее солями возможны функциональные расстройства нервной системы, нарушение функции печени и почек, изъязвление и перфорация носовой перегородки. Отмечается повышение содержания меди в волосах, поражение зубов и слизистых оболочек, язвенная болезнь желудка. У отравившихся соединениями меди кожа лица окрашивается в зелено-желтоватый цвет, на деснах появляется пурпурно-красная кайма. При этом соединения меди раздражают кожу, вызывая экземы и дерматиты, аллергию. В крови и выделениях обнаруживается медь.

Настоящим исследованием предлагается использование отработанных кислых электролитов меднения для получения закиси меди – антисептического, антикоррозионного пигмента для окраски подводной части судов, против обрастания микроорганизмами, которое приводит к снижению скорости судов и увеличению расхода топлива, а также времени простоя в ремонтном доке. В результате выщелачивания ионов меди вблизи поверхности лакокрасочного покрытия достигается токсичная концентрация, достаточная для гибели микроорганизмов. Кроме использования в лакокрасочных композициях закись меди применяется как электропроводящий наполнитель в полимерных материалах, а также в электронной технике в качестве полупроводника.

Первой операцией технологического процесса получения закиси меди является защелачивание отработанного кислого электролита добавлением гидроксида натрия в количестве соответствующем стехиометрии.

Вывавший в осадок при  $\text{pH} = 5,5-8,0$  гидроксид меди отделяется от раствора фильтрованием до состояния пасты и передается в обогреваемый смеситель, куда при температуре  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  добавляется олеиновая кислота в количестве 30% сухого вещества на сухое вещество полученного гидроксида меди. Олеиновая кислота является активным гидрофобизатором. Взаимодействуя с частицами образовавшегося гидроксида, способствует более эффективному обезвоживанию, а при высокотемпературной тепловой обработке выступает в роли восстановителя.

Паста подвергается нагреву при  $85-90\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 1,5 часов, при этом гидроксид меди превращается в оксид.

Оксид меди – вещество черного цвета, является хорошим окислителем, применяется в производстве стекла и эмалей, а также при изготовлении некоторых видов искусственного шелка и получения других соединений меди. В воде нерастворим, разлагается при температуре  $1026\text{ }^{\circ}\text{C}$  и имеет плотность  $6400-6450\text{ кг/м}^3$ .

Полученную пасту  $\text{CuO}$ , содержащую олеиновую кислоту, высушивали до постоянной массы и прокаливали при температуре  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  в муфельной печи в течение 2-х часов, где происходит восстановление оксида меди до закиси меди ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ). Закись меди кристаллизуется в кубической системе, имеет красный цвет, практически нерастворима в воде, но растворима в аммиаке, на воздухе разлагается только при температуре  $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Кроме того, что она входит в состав красок для подводной части корабля, широко применяется для изготовления выпрямителей и термоэлементов, в качестве активной массы положительного электрода в производстве гальванических элементов.

Фунгицидные свойства закиси меди используются для протравливания семян путем опыления непосредственно перед высевом, причем отмечается хорошая прилипаемость к их гладкой поверхности.

В наших опытах это не наблюдалось, но известно [3], что цвет закиси меди может меняться от красного через желтый и оранжевый до зеленого в зависимости от величины частиц. Красный цвет имеют частицы наибольшего размера.

## Литература

- [1] Гальванические покрытия в магнитостроении. Справочник в 2-х томах/Под ред. М.А. Шлугера. - М.: Издательство Машиностроение, 1985. – Т.1;1985.-240с.
- [2] Макаров, В.М. Токсичные тяжелые металлы и их утилизация: учебно-методическое пособие/В.М. Макаров, С.З. Калаева, Н.Л. Маркелова. - Ярославль: Издательский дом ЯГТУ, 2017. – 115 с.
- [3] Закись-медь. Большая Энциклопедия нефти и газа [Электронный ресурс]: <http://www.ngpedia.ru/id27277p3.html>

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РАСТВОРИМОСТИ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ФЛЮИДНЫХ СРЕДАХ**

Ахметов Р.Ф., Ахметзянов Т.Р., Хайрутдинов В.Ф., Габитов Ф.Р., Гумеров Ф.М.  
*Казанский национальный исследовательский технологический университет.  
ООО ИВЦ «ИНЖЕХИМ», Казань, Россия. E-mail radik565@gmail.com*

Одним из существенных источников загрязнения окружающей среды являются не нашедшие применения нефтесодержащие отходы (нефтяные шламы), образующиеся при добыче и подготовке нефти [1,2]. Нефтешламы – представляют собой многокомпонентные физико-химические системы, состоящие, главным образом из нефтепродуктов, воды и минеральных добавок (песок, глина, оксиды металлов и т.д.). Формируются они в последствии аварий в местах отбора продукции скважин, в процессе подготовки нефти и сточной воды, при нарушении и неполадках режимных графиков, промывке промышленного оборудования и др. Эти загрязненные углеводороды, сбрасываемые, как правило, в открытые амбары, отнесены к отходам производства.

Среди существующих методов переработки шламов можно выделить методы центрифугирования, жидкостной экстракции, гравитационного уплотнения, вакуумфильтрации, фильтропрессования, замораживания и др.

Более того, среди применяемых технологий нет безотходных и экономически рентабельных. Применение любой из выше перечисленных технологий приводит к выделению в атмосферу вредных веществ. Каждая из перечисленных технологий имеет собственные отходы, требующие захоронения на полигонах. И не случайно одной из составляющих политики развития нефтегазохимического комплекса России в настоящем является модернизация существующих и внедрение новых экологически чистых технологий переработки и утилизации нефтяных шламов.

Для моделирования, оптимизации и масштабирования процессов глубокой переработки углеводородного сырья с использованием СКФ сред, требуются надежные данные фазового поведения интересующих смесей под высоким давлением, в частности растворимости низколетучих жидких и твердых компонентов в плотной СКФ среде. В то же время требуется высокая степень точности данных для оптимизации процессов, в которых, среди прочего, часто приходится найти разумный компромисс между глубиной переработки и энергоэффективностью. Фазовое поведение данных систем очень трудно предсказать, поскольку реальные системы часто очень сложные в том смысле, из-за многокомпонентности углеводородного сырья, которые значительно различаются по размеру, форме, структуре и полярности молекул, что приводит к возникновению большого разнообразия фазового поведения в сочетании с критическими явлениями.

Эти факты указывают на потребность надежных данных по фазовому равновесию систем «скф среда-компоненты углеводородного сырья».

В данном докладе в качестве компонента нефти выбрали углеводород нафталин. Нафталин относится к ароматическим углеводородам. Содержание ароматических углеводородов в нефти изменяется от 10-15 до 30 % (масс.). Эти углеводороды составляют основу тяжелых нефтяных остатков. При глубокой переработки именно эти углеводороды представляют большой интерес. С этим связан выбор нафталина в качестве объекта исследований в данной работе. Метод исследования и методика проведения измерений являются ключевым этапом при определении растворимости веществ и могут существенно повлиять на достоверность получаемых результатов. Растворимость веществ в сжатых газах определяется с установлением равновесия между газовой и конденсированными фазами при температуре и давлении опыта, и обеспечении условий равновесия в системе.

Целью данной работы является исследование растворимости компонента углеводородного сырья, а именно нафталина в СКФ пропан-бутановой смеси.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

- Обзор современной литературы по предложенной теме;
- Создание экспериментальной установки;
- Проведение пробных опытов;
- Исследование растворимости нафталина в СКФ пропан-бутановой смеси при различных давлениях и температурах;
- Определить характер влияния термодинамических параметров на растворимость нафталина в СКФ пропан-бутановой смеси.
- Разработать рекомендации по использованию результатов исследования для процессов глубокой переработки нефтяных отходов СКФ пропан-бутановой смесью.

Таким образом, исследование растворимости нафталина в СКФ пропан-бутановой смеси, представляет собой важную и актуальную задачу для решения проблем глубокой переработки углеводородного сырья.

Во многих работах в качестве экстрагента используется диоксид углерода и его смеси. Однако, не смотря на несомненные достоинства диоксида углерода как растворителя, он не является подходящим для всех процессов в качестве растворителя. В настоящее время в промышленности достаточно широко используются в качестве растворителей и другие экстрагенты: этилен, пропан, бутан и вода в сверхкритическом состоянии. Сверхкритическая вода растворяет практически все органические соединения, которые не разлагаются при высоких температурах, но у воды параметры сверхкритического состояния очень высокие:  $t_{кр} = 374^\circ \text{C}$ ,  $P_{кр} = 22 \text{ МПа}$ . Современные технологии позволяют создавать установки, отвечающие таким требованиям, но работать в этом диапазоне температур и давлений технически сложно. Наиболее предпочтительными растворителями для нефтяной промышленности, в частности для деасфальтизации тяжелого нефтяного остатка, являются пропан, бутан и их смеси. Пропан и бутан являются «родственными» углеводородами с нефтью. Сырьем для их получения являются в основном нефтяные попутные газы, получаемые в процессе переработки нефти. Еще одним немаловажным преимуществом этих веществ является относительно низкие величины критических параметров, в первую очередь это касается давления. Критические параметры пропана и бутана характеризуются следующими значениями: пропан:  $T_{кр} = 369,82 \text{ К}$  ( $96,67^\circ \text{C}$ ),  $P_{кр} = 4,247 \text{ МПа}$ ; бутан  $T_{кр} = 425 \text{ К}$  ( $151,85^\circ \text{C}$ ),  $P_{кр} = 3,797 \text{ МПа}$ . Для коммунально-бытового потребления промышленно выпускают их смесь, содержащая 75 % масс. пропана и 25 % масс. бутана.

Для исследования растворимости нафталина в СКФ средах создана экспериментальная установка реализующий динамический метод. Для апробации установки проведены пробные эксперименты по исследованию растворимости нафталина в СКФ  $\text{CO}_2$  [3,4]. Была получена хорошая сходимость данных полученных в данной работе с литературными данными.

Проведены исследования растворимости нафталина в СКФ пропан - бутановой смеси, содержащей 75 % пропана и 25 % бутана [5], в диапазоне давлений 5 ÷ 20 МПа и в интервале температур 373 ÷ 423 К. Проведен анализ влияния на растворимость термодинамических параметров процесса.

### Благодарности

Работа выполняется в ФГБОУ ВО КНИТУ при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проекта №18-19-00478.

### Литература

- [1] Калимуллин А.А. Полигоны утилизации нефтешламов – решение экологических проблем нефтяников /Калимуллин А.А., Волочков Н.С., Фердман В.М.// Экологическая и промышленная безопасность 2003. №6. с. 100.
- [2] Шорникова Е.А. Некоторые возможные способы утилизации отходов бурения и нефтедобычи //Биологические ресурсы и природопользование. Вып. 5 Сургут 2002: Дефис, с. 99-109.
- [3] Амирханов Д.Г. Растворимость веществ в сверхкритических флюидных средах. /Амирханов Д.Г., Гумеров Ф.М., Сагдеев А.А., Галимова А.Т.// Изд. Отечество. Казань 2014. с. 264.
- [4] Mark McHugh and Michael E. Paulaiti. Solid Solubilities of Naphthalene and Biphenyl in Supercritical Carbon Dioxide. J. Chem. Eng. Data 1980, 25, 326-329.
- [5] Увеличение функциональности карбонатного щебня посредством сверхкритической флюидной импрегнации битуминозными соединениями / Ф.М. Гумеров, М.И. Фарахов, В.Ф. Хайрутдинов, Р.Ф. Габитов, З.И. Зарипов, И.Ш. Хабриев, Т.Р. Ахметзянов // Сверхкритические флюиды: теория и практика. -2015. -Т.10. -№2. -С. 4-16.

## ПРОБЛЕМЫ И МЕТОДЫ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА

Вишнякова В.О., Макарьин В.В.

*Ярославский государственный технологический университет.*

*E-mail: andrey.shamshief2010@yandex.ru*

Полиэтилентерефталат (ПЭТФ) впервые получен в 1940-е годы в Великобритании и первоначально предназначался для производства волокон. Отсюда его многочисленные названия: "полиэстер", "лавсан", "дакрон" и др. Но уже в 1960-е годы начал использоваться для производства пленки, а в 1977 году компания Pepsi начала выпуск своих напитков в бутылках из ПЭТФ.

Комплекс ценных свойств полиэтилентерефталата обусловил его широкое применение во многих областях промышленности. В России полиэтилентерефталат используют главным образом для изготовления пластиковых ёмкостей и бутылок. В меньшей степени применяется для изготовления плёнки в также литевых изделиях. В мире ситуация обратная: большая часть ПЭТФ идет на производство нитей и волокон. С другой стороны, уже сейчас объемы его отходов только в России составляют сотни тысяч тонн в год. Отходы полиэтилентерефталата образуются без исключения во всех процессах переработки сырья в изделия. Большую часть отходов из полиэтилентерефталата составляют изделия, выбывшие из употребления. К ним относятся товары ширпотреба, упаковка, емкости для жидкостей, композиционные материалы и т.п. Полиэтилентерефталат в природных условиях достаточно инертный материал. Изделия из ПЭТФ не содержат вредных компонентов, которые могли бы заражать подземные воды, однако их разложение происходит крайне медленно, поэтому целесообразно организовать рециклинг ПЭТФ.

Одна из проблем переработки вторичного ПЭТФ заключается в организации сбора и подготовки отходов к переработке.

Производственные отходы в компактных источниках практически не содержат поверхностные загрязнения и являются однородными по составу продуктом. В тоже время, основная масса бытовых отходов требует очистки от загрязнений. Заготовка отходов полиэтилентерефталата в компактных источниках образования не представляет особых трудностей и осуществляется в объеме до 86 % от их образования.

Сбор выбывших из употребления изделий и упаковки может производиться через приемные пункты вторичного сырья, а также и путем отдельного сбора в местах образования. Выделение отходов ПЭТФ из бытового мусора сложно и экономически неэффективно при существующих системах санитарной очистки городов и населенных пунктов.

Заготовка вторичного полиэтилентерефталата (в основном бутылок из-под напитков) через сети приемных пунктов экономически малоэффективна, а также низкая заготовительная стоимость бутылок, не стимулирующая население к сдаче вторичного сырья [1].

Наиболее эффективен отдельный сбор выбывших из употребления изделий полиэтилентерефталата. Этот метод получил широкое распространение за рубежом и начинает развиваться в России. В некоторых городах есть удачный опыт отдельного сбора бытовых отходов, где сортировкой ПЭТ бутылок занимаются дворники по договору с заготовителями. Такой способ заготовки, видимо, наиболее перспективен в российских условиях, т.к. обеспечивает достаточную чистоту собранного материала (с бутылок снимаются крышки, кольца и этикетка).

Во многих странах ПЭТФ компостируется, как и другие полимерные отходы, но, учитывая, что на разложение пластика требуется более 80 лет, площади земельных угодий, отчуждаемых для их складирования, стремительно растут. Сжигание отходов не требует таких площадей, однако выбросы в атмосферу и захоронение золы не менее опасны с экологической точки зрения.

В России сортировку ПЭТ бутылок проводят в приемных пунктах и на мусоросортировочных заводах, а также на свалках, привлекая для этой работы труд бомжей. Как показывает опыт работы мусоросортировочных заводов, оператор из общего потока поступающего мусора может только отсортировать ПЭТ бутылки. Снимать крышки, кольца и этикетки оператор на сортировочном конвейере не в состоянии.

Бутылки с крышками создают дополнительные проблемы, т.к. плохо сжимаются. Крышки приходится снимать или протыкать бутылки острым прутом, что снижает производительность и требует дополнительные рабочие места.

Для обеспечения сминаемости бутылок предлагается оснащать автоматические пакетировочные прессы специальными перфораторами. Такие перфораторы автоматически прокалывают поступающие ПЭТ бутылки перед их пакетированием [2].

Рассматривая подробнее варианты утилизации и рециклинга ПЭТФ, можно выделить следующие методы:

*Захоронение.* Самый бесперспективный вариант, поскольку ценное полимерное сырье закапывается, а огромные территории становятся непригодными для сельскохозяйственных нужд.

*Грануляция.* Для переработки ПЭТ-отходов используют дробилки, мельницы, грануляторы. Под механическим и тепловым воздействием отходы переходят в смолopodobное состояние. Вторичный полиэтилентерефталат может быть использован в качестве добавки для улучшения физико-механических или электромеханических характеристик другого полимера.

*Агломерация.* Равномерность загрузки пленочных отходов в перерабатывающее оборудование после промывки обеспечивается агломерацией. При агломерации из пленки получают окатыши (компактные зерна) произвольной формы с достаточно высокой насыпной плотностью и хорошей сыпучестью.

*Сжигание.* Теплотворная способность 2 т. пластиковых отходов упаковки эквивалентна теплотворной способности 1 т. нефти (теплотворная способность ПЭТ - 22700 кДж/кг). В некоторых странах работают небольшие ТЭЦ по сжиганию бытовых отходов, в состав которых входит до 50 % отходов полимерной упаковки. Недостатки: использование значительное количество кислорода и сложность очистки.

*Пиролиз* – термическое разложение органических веществ в отсутствие кислорода с целью получения полезных продуктов.

*Химическая рециркуляция* среды способ переработки отходов ПЭТ - деполимеризации отходов ПЭТ нейтральным гидролизом до терефталевой кислоты и этиленгликоля, снова идущих на синтез ПЭТ'. Также распространен способ переработки отходов ПЭТ – получение сравнительно недорогой ненасыщенной полиэфирной смолы. Для этого отходы ПЭТ подвергаются гликолизу и поликонденсации с добавлением ненасыщенных многоосновных кислот или их ангидридов с целью получения ненасыщенной полиэфирной смолы.

С нашей точки зрения одним из перспективных методов переработки вторичного ПТЭФ является переэтерификация последнего многоатомными спиртами (в частности глицерином) с получением полимеров с различной вязкостью в зависимости от условий проведения реакции [3].

### Литература

- [1] Бобович Б.Б., Девяткин В.В. Переработка отходов производства и потребления: Справочн. пособ. / Под ред. д.т.н., проф. Б.Б. Бобовича. - М.: «СП Интернет Инжиниринг», 2000. - 496 с.
- [2] Беданок А. Ю., Бештоев Б. З., Микитаев М.А., Микитаев А.К., Сазонов В. В. Полиэтилентерефталат: новые направления рециклинга // Пластические массы. 2009, № 6. С. 18–21.
- [3] Пархачева К.С., Макарьин В.В., Доброхотов В.Б. Переэтерификация полиэтилентерефталата глицерином. // Тезисы докладов 68 Всероссийской научно-технической конференция студентов, магистрантов и аспирантов высших учебных заведений с международным участием. 22 апреля 2015 г. Ярославль Ч.1. ЯГТУ, 2015 410 С.

## МОДЕРНИЗАЦИЯ УСТАНОВКИ ДИНАМИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ В ВАКУУМЕ

Волошанюк А.С., Бурцев С.А.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: [vacuum@kstu.ru](mailto:vacuum@kstu.ru)

Балансировка вращающихся тел – процесс уравнивания вращающихся частей машины – роторов электродвигателей и турбин, коленчатых валов, шкивов, колёс автомобиля и др.

Различают три основных вида балансировки:

-Статическая

-Моментная

-Динамическая

Статическая балансировка детали производится уравниванием (при перекачивании детали), обеспечивающим совпадение центра тяжести с осью вращения.

При моментной балансировке определяется и уменьшается главный момент дисбалансов, характеризующий моментную неуравновешенность.

Динамическая балансировка – балансировка, при которой определяются и уменьшаются дисбалансы ротора, характеризующие его динамическую неуравновешенность. При динамической балансировке уменьшаются как моментная, так и статическая неуравновешенность ротора одновременно.

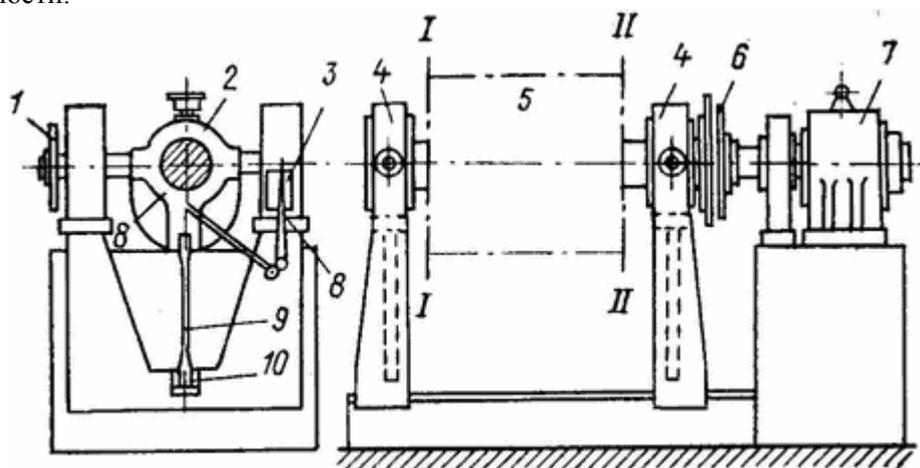
Наибольшее распространение в компрессоростроении получила динамическая балансировка [1].

Динамическую балансировку производят на специальных балансировочных станках (рис. 1). Ротор 5 турбины устанавливают на подшипники 2 раздвижных стоек 4 станка. Каждый подшипник соединен со станиной станка пружиной 9, расклиненной клиньями 10. Толщину пружин выбирают в зависимости от массы ротора. Каждый из подшипников может быть либо застопорен устройством 1,

либо освобожден, и тогда он совершает колебательное движение. Ротор вращается электродвигателем 7 через быстродействующую магнитную муфту 6.

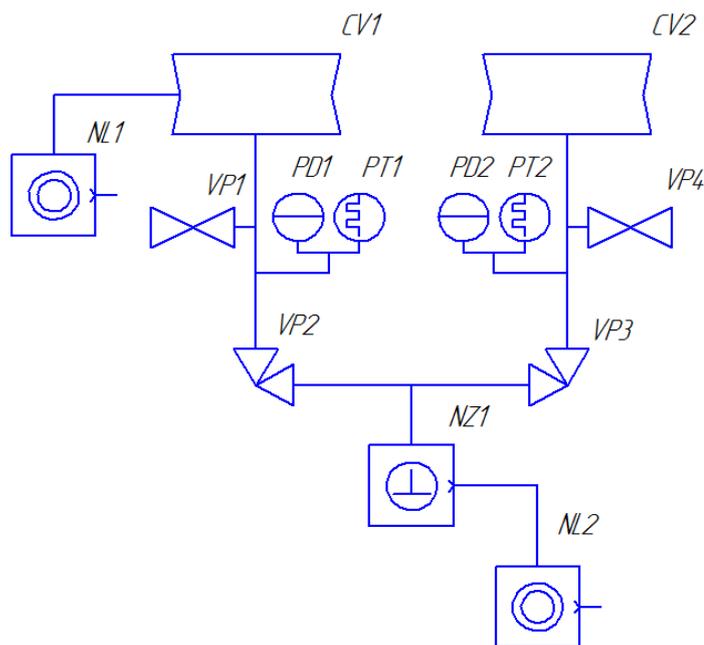
Колебание подшипников записывается самопишущим прибором 8 на барабане 3 или определяется индикатором.

Одним из способов балансировки роторов центробежных компрессоров является балансировка роторов в среде вакуума. Он позволяет балансировать как жесткие роторы, так и гибкие (закритические). Если ротор гибкий, и при его вращении на рабочей частоте возникает динамический прогиб линии вала (например, ротор центробежной компрессорной машины с консольным расположением рабочего колеса, или ротор турбины), обычно его называют модальный дисбаланс, то в этом случае недостаточно динамической балансировки на стандартном тихоходном станке. В этом случае необходимо проводить балансировку ротора на рабочих частотах вращения на вакуумном станке (стенде) для специальной динамической балансировки. В процессе разгона ротор может проходить свою собственную частоту, при этом система ротор - податливые опоры остается до резонанса. Все это позволяет производить балансировку роторов на рабочих оборотах в до резонансной зоне. Размещение испытуемых роторов в вакууме позволяет разгонять изделия до 26000 об/мин приводом относительно небольшой мощности.



**Рис. 1.** Станок для динамической балансировки роторов

Вакуумная схема установки для балансировки роторов центробежных компрессоров в вакууме представлена на рис. 2.



**Рис. 2.** Вакуумная схема установки для балансировки роторов центробежных компрессоров в вакууме

Подвергнув модернизации вакуумную систему установки, предполагается сократить время рабочего цикла установки и тем самым повысить ее производительность. Проведенные расчеты показали, что изменение откачной магистрали, а так же замена вакуумной запорной арматуры с одновременным усовершенствованием средств откачки позволит сократить время откачки камеры.

### Литература

[1] Сегаль А.В. Технология производства центробежных и винтовых компрессоров и холодильных машин. Казань: ФЭН, 2004. - 212 с.

## ОБРАЗОВАНИЕ КИСЛЫХ СТОКОВ В КИСЛОГУДРОННЫХ ПРУДАХ, НЕЙТРАЛИЗАЦИИ КИСЛЫХ СТОКОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Галикова Э.В. Филиппова О.П.

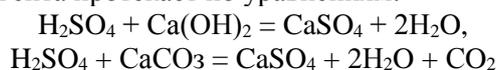
Ярославский государственный технический университет.

E-mail: info@ystu.ru

Основными методами химической очистки производственных сточных вод являются нейтрализация, окисление, восстановление и осаждение примесей. К электрохимическим методам очистки сточных вод относятся электрохимическое окисление и восстановление, электрокоагуляция, электрофлотация и электродиализ.

Химическая очистка может применяться как самостоятельный метод перед подачей производственных сточных вод в систему оборотного водоснабжения, а также перед спуском их в водоем или в городскую канализационную сеть. Применение химической очистки в ряде случаев целесообразно (в качестве предварительной) перед биологической или, физико-химической очисткой. Химическая обработка находит применение также и как метод доочистки производственных сточных вод с целью их дезинфекции, обесцвечивания или извлечения из них различных компонентов. [1] При локальной очистке производственных стоков в большинстве случаев предпочтение отдается химическим методам. Производственные сточные воды от технологических процессов многих отраслей промышленности содержат щелочи и кислоты. В большинстве кислых стоков содержатся соли тяжелых металлов, которые необходимо выделять из сточных вод. С целью предупреждения коррозии материалов канализационных очистных сооружений, нарушения биохимических процессов в биологических окислителях и в водоемах, а также осаждения из сточных вод солей тяжелых металлов кислые и щелочные стоки подвергаются нейтрализации. Реакция нейтрализации - это химическая реакция между веществом, имеющим свойства кислоты, и основания, которая приводит к потере характерных свойств обоих соединений. Наиболее типична реакция нейтрализации в водных растворах происходит между гидратированными ионами водорода и ионами гидроксила, содержащимися соответственно в сильных кислотах и основаниях. Из условий сброса производственных стоков в водоем или городскую канализацию следует, что большую опасность представляют кислые стоки, которые встречаются к тому же значительно чаще, чем щелочные (количество производственных сточных вод с pH более 8,5 невелико). Наиболее часто сточные воды загрязнены минеральными кислотами: серной H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, азотной HNO<sub>3</sub>, соляной HCl, а также их смесями. Значительно реже в сточных водах встречаются азотистая HNO<sub>2</sub>, фосфорная H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, сернистая H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>, сероводородная H<sub>2</sub>S, плавиковая HF, хромовая H<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub> кислоты, а также органические кислоты: уксусная, пикриновая, салициловая и др. Концентрация кислот в сточных водах обычно не превышает 3 %, но иногда достигает большей величины; например, в отдельных производствах органического синтеза содержание серной кислоты в сточных водах составляет 40 % и более [2].

При нейтрализации производственных сточных вод, содержащих серную кислоту, реакция, в зависимости от применяемого реагента протекает по уравнениям:



Образующийся в результате нейтрализации сульфат кальция (гипс) кристаллизуется из разбавленных растворов в виде CaSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O. Растворимость этой соли при температурах 0-40 °С колеблется от 1,76 до 2,11 г/дм<sup>3</sup>. При более высокой концентрации сульфат кальция выпадает в осадок, поэтому при нейтрализации сильных кислот, кальциевые соли которых труднорастворимы в воде, необходимо устраивать отстойники-шламонакопители. Существенным недостатком метода нейтрализации серной кислоты известью является также образование пересыщенного раствора гипса (коэффициент пере-

сыщения может достигать 4-6), выделение которого из воды может продолжаться несколько суток, что приводит к зарастанию трубопроводов и аппаратуры. Присутствие в сточных водах многих химических производств высокомолекулярных органических соединений усиливает устойчивость пересыщенных растворов гипса, поскольку эти соединения сорбируются на гранях кристаллов сульфата кальция и препятствуют их дальнейшему росту.

Так как сточные воды многих промышленных предприятий содержат избыточное количество кислот или щелочей. Высокая концентрация ионов водорода в сточных водах обусловлена наличием в них свободных минеральных (серная, соляная, азотная, фосфорная, плавиковая) кислот и в значительно меньшей степени органических кислот. Избыточная концентрация гидроксидных ионов возникает при наличии в растворах щелочей (гидроксидов калия, натрия, аммония и щелочноземельных металлов). Согласно действующим нормативам сброс сточных вод в городские канализационные сети и в открытые водоемы [3].

допустим только при величинах pH 6,5-8,5. Если pH стоков выходит за эти пределы, то сточные воды подвергают нейтрализации, под которой понимают снижение концентрации в них свободных водородных или гидроксидных ионов. Используют нейтрализацию смешением кислых и щелочных сточных вод, Реагентную нейтрализацию, фильтрование через нейтрализующие материалы (известь, известняк, доломит и др.). Для нейтрализации кислых сточных вод применяют такие реагенты, как щелочь, аммиачная вода, карбонат натрия [4].

Нейтрализация (самостоятельно или в сочетании с другими методами) применяется при решении различных технических задач, в частности простого обезвреживания сточных вод, получения осветленной воды и выделения ионов металлов в виде осадка, например, гидроксидов металлов, обессоленной воды, утилизации компонентов сточных вод, создания оборотного водоснабжения.

Как известно, кислугудронные пруды образовались в Ярославской области не просто так. На НПЗ имени Д.И. Менделеева еще в XIX веке впервые в России применили технологию получения смазочных масел и аналогичных веществ из нефти путем обработки остатков от ее перегонки серной кислотой. Тогда именно масла считались самой ценной составляющей черного золота рис. 1, 2.

В середине XIX века керосина и бензина, полученных путем прямой перегонки, хватало с лихвой, поэтому оставшиеся тяжелые фракции нефти – гудроны – выливались, попросту говоря, в землю. А чтобы они не растекались далеко, и были созданы пруды-отстойники. Село Константиново Борисоглебского уезда для этих целей выбрали в первую очередь потому, что к нему имелся прямой водный путь для доставки исходного сырья – каспийской нефти.



**Рис. 1.** Кислугудронный пруд

Как утверждают специалисты, кислые гудроны находятся на дне прудов и перелиться через край не могут в принципе, то есть сами по себе они опасности не представляют. Опасна вода, находящаяся над ними. В ней растворились химические соединения, которые образовались из-за контакта серной кислоты и нефтепродуктов. Их практически невозможно отфильтровать стандартными, применяемыми сегодня методами очистки стоков. После очистки вода продолжает оставаться экологически опасной. К тому же мощности имеющейся сегодня установки хватает ровно настолько, чтобы не допустить перелива прудов. Более того, в случае притока большого количества паводковых или дождевых вод такая угроза сохраняется.



Рис. 2. Кислогудронный пруд

Предлагаемая технология отличается от ранее заявленных простотой исполнения и гарантией нейтрализации кислых стоков. Предложенные ранее технологии не учитывали тот факт, что кислая вода является электропроводной средой. Благодаря электропроводящим свойствам загрязнённой воды нами была разработана принципиально новая технология его переработки. Согласно проведённым исследованиям загрязнённую воду помещали в реактор, непосредственно в воду вводили электроды, на которые подавали переменное напряжение и проводили электрохимическое окисление. Было замечено интенсивное выделение водорода, на катоде, который играет роль флотирующего газа. Таким образом, за счёт диффузии водорода происходит перемешивание «кислой» воды. Также за счёт защелачивания прикатодной зоны осуществляется нейтрализация кислых компонентов. По нашему мнению, при электрохимическом окислении протекают три процесса:

1. Выделение атомарного кислорода;
2. Защелачивание;
3. активное сульфирование.

Итак, предложенная технология электрохимического окисления кислой воды позволяет предположить, что протекающие электрохимические процессы способствуют защелачиванию реакционной массы, сульфированию остаточных углеводов, в связи с чем снижается общая кислотность среды.

### Литература

- [1] Лурье, Ю.Ю. Аналитическая химия производственных сточных вод / Ю.Ю. Лурье; М.: Химия, 1984. 448 с.
- [2] Фролов, Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы: учебник для вузов / Ю.Г. Фролов; М.: Химия, 1982. 400с.
- [3] Родионов, А.И. Техника защиты окружающей среды / А.И. Родионов, В.Н. Клушин, Н.С. Торочешников; М.: Химия, 1989. 512 с.
- [4] Об утверждении критериев отнесения опасных отходов к классу опасности для окружающей природной среды, Приказ Министерства природных ресурсов РФ от 15 июня 2001 г. № 511.

## ОБЗОР МОДЕЛЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЯЖЕЛОГО ГАЗА В УСЛОВИЯХ ЗАСТРОЙКИ

Мухамадиева Л.Н., Старовойтова Е.В.

Казанский национальный исследовательский технологический университет

E-mail: lmykhamadieva19@yandex.ru

Тяжелые газы, с точки зрения промышленной безопасности, представляют наибольшую опасность для человека и окружающей среды, поскольку распространяются вдоль поверхности земли и имеют свою специфику рассеяния. Они имеют большую плотность, чем воздух и под действием силы тяжести быстро оседают на землю, впоследствии чего образуются протяжные облака, которые могут достигать сотни метров в ширину. Они наносят непоправимый вред человеческому здоровью и окру-

жающей среде. В связи с этим, необходимо использовать научно обоснованные подходы и заранее предсказывать возможный ход аварии для обеспечения безопасности людей и минимизации последствий аварий. При оценке последствий аварий важное значение имеют надежные прогнозы распределения опасных веществ в атмосфере.

Существует три основных подхода к количественному описанию процесса рассеяния газообразных веществ в атмосфере: гауссовские; интегральные; подход CFD.

Гауссовские модели также называются дисперсионными моделями. Эти модели получили свое название из хорошо известного распределения Гаусса, лежащего в основе математического описания пространственно-временного изменения концентрации газа. Для решения уравнений гауссовских моделей используются эмпирические коэффициенты, описывающие атмосферную турбулентность [1]. Гауссовские модели учитывают только два процесса, происходящие с выбросом в атмосфере: перемещение в поле ветра и рассеяние за счет атмосферной турбулентности. Естественно, что и приемлемую точность они дают в тех зонах, где доминируют указанные процессы: либо на большом удалении от места выброса, либо во всем диапазоне расстояний, но при слабом выбросе.

Гауссовские модели малопригодны для описания дисперсии тяжелых газов в условиях сложной местности, условий строительства, так как эти модели не учитывают влияние на процесс рассеяния сил плавучести, возникающих за счет разности плотностей газозвоздушного облака и окружающего воздуха.

Модели рассеяния, базирующиеся на интегральных законах сохранения либо в облаке в целом (залповый выброс), либо в поперечном сечении облака (длительный выброс), реализованы в таких программных продуктах, как PHAST и TOXI + RISK [2]. У этих моделей есть недостатки: они не позволяют адекватно учитывать ландшафт и наличие зданий.

Подходы CFD представляют собой модели, построенные на численном решении системы уравнений сохранения в их оригинальном виде, именуемые часто моделями или методами прямого численного моделирования. В основе модели CFD для рассеивания пара положены усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса (RANS). В основе этого подхода лежит сложный комплекс программ, предназначенных для дискретизации физической области задачи на малые подобласти (конечные объемы или конечные элементы), для последующего сопряженного численного решения дифференциальных уравнений сохранения массы, импульса и энергии с учетом химической кинетики, массообмена и т.д. Позволяет проводить как в стационарном, так и нестационарном режиме физико-математическое моделирование процессов распространения и рассеивания газов под действием ветра, молекулярной и турбулентной диффузии, в условиях топографических особенностей местности и наличия застройки, при учете шероховатости подстилающей поверхности, плотности и состава газов, тепло- и массообмена, конденсации, химических реакций, а также различных вариантов устойчивости атмосферы [3].

На основе испытательной серии «Falcon», которые проводились в 1987 году в штате Невада, в национальной лаборатории Лоуренса Ливермора, состоящие из пяти крупномасштабных испытаний по разливу СПГ [4], был проведен анализ различных видов кода CFD для моделирования распространения тяжелого газа в условиях застройки, такие как FEM3 [3], ANSYS-CFX [5-7], ANSYS FLUENT [8, 9], FLACS [10]. Целью испытаний «Falcon» было оценить эффективность использования ограждений для уменьшения последствий выброса опасного вещества в атмосферу. Для этого был построен бассейн, снабженный циркуляционной системой (для максимального испарения пролива СПГ), который, в свою очередь, был оснащен преградой для защиты резервуара от атмосферного ветра и барьером (располагавшимся против ветра) для моделирования влияния резервуара на распространение паровоздушного облака.

В работе [3] проведено сравнение экспериментальных данных по «Falcon» с результатами, полученными по модели FEM3. В настоящее время, модели, сформированные на основе систем двумерных или трехмерных нестационарных уравнений газовой динамики и тепломассообмена, дают наиболее полное и точное физическое описание распространения опасных газов и паров. К таким моделям относится FEM3. Она была разработана в 1979 году для создания компьютерной модели в качестве моделирования гравитационного распространения и дисперсии паров (СПГ), которые возникают в результате выброса в атмосферу [11].

В этой модели используется метод конечных элементов, способный решать зависящие от времени уравнения сохранения массы, энергии, импульса вместе с законом идеального газа для плотности газозвоздушной смеси. Особенность модели заключается в том, что коэффициент турбулентной диффузии определяется с помощью эмпирических и полуаналитических соотношений [12]. Эта мо-

дель также включает в себя подмодели, которые обеспечивают математическое описание дисперсии тяжелых газов, включая гравитационные силы, влияние плотности при турбулентном перемешивании и нагреве газового облака. FEM3 может рассчитывать сложные потоки и процесс распространения газа при наличии препятствия. FEM3 CFD учитывает турбулентность с помощью локальной равновесной модели k-теории, в котором модель турбулентности адаптирована для холодного, тяжелого облака в областях с высокой концентрацией [11].

На сегодняшний день наиболее востребованы FLUENT и CFX-модели. В работах [5-7] в качестве моделирования распространения пара использовали ANSYS-CFX и сравнивали результаты расчетов с экспериментальными данными по «Falcon». Модель показала хорошее совпадение с экспериментальными данными. Однако, она не учитывала препятствие. Данный подход основан на методе конечного объема для преобразования дифференциального уравнения с частными производными и вспомогательными условиями в дискретную систему уравнений [10].

В работе [8] описывается использование коммерческого CFD-кода FLUENT, для моделирования распространения СПГ серии экспериментов «Falcon». FLUENT – это код CFD общего назначения, который используется с 1983 года и применяется к широкому кругу дисциплин (например, аэрокосмической, химической, экологической и т.д.).

FLUENT особенно адаптирован для описания сложных физических процессов при разливах СПГ в различных условиях. FLUENT хорошо зарекомендовал себя при распределении газа в атмосфере, в которой используется модель турбулентности напряжений Рейнольдса для независимого расчета турбулентной вязкости в вертикальной и горизонтальной направлениях.

Авторами [8] исследуется влияние размеров барьера в результате пролива СПГ на поверхность. Приведено сравнение размеров облака с препятствиями и без наличия ограждений. Показано, что наличие барьера сокращает размер воспламеняющегося облака пара и, следовательно, область опасности.

В работе [9] опубликованы результаты численного моделирования в условиях застройки с использованием пакета FLUENT. На основе численных результатов моделирования распространения газа, в работе [9] приведено сравнение полученных данных с экспериментальными данными «Falcon» в условиях ограждения пролива, что показало хорошее согласование использование пакета FLUENT с экспериментальными данными.

В работе [10] исследование «Falcon» моделируется с помощью подхода НЕМ, внедренного во FLACS. FLACS - это специализированный инструмент CFD, разработанный для решения процессов распространения легковоспламеняющихся или токсичных газов, а также распространение взрывных и ударных волн. НЕМ-версия FLACS позволяет отслеживать потоки пара и аэрозоля из струи выброса, учитывая тепло- и массоперенос, взаимодействие с препятствиями, а также осаждения капель.

При моделировании в программе FLACS учитывалось, что скорость ветра оставалась относительно невысокой и направление ветра было подобрано, согласно проведенным испытаниям «Falcon». Моделирование также выявило очень сильное влияние аэрозоля на поведение плотного газового облака; анализ исследования чувствительности, проведенного на паро-аэрозольном составе источника СПГ, показал, что этот параметр может сыграть решающую роль в последствиях вспышки выброса струи, особенно в частично ограниченных или сильно перегруженных районах [10].

Таким образом, представлен обзор существующих моделей по распространению тяжелого газа в условиях застройки, такие как FEM3, ANSYS-CFX, ANSYS FLUENT, FLACS. Модель FEM3 имеет допущения, что пролитый СПГ испаряется мгновенно, распределяется равномерно по всей поверхности воды и времени. В модели FLUENT источник смоделирован как испаряющийся пролив с поверхности воды. В программе FLACS источник моделируется двумя различными подходами, как испаряющийся пролив и двухфазная струя.

Из проведенного анализа можно сделать вывод, что на сегодняшний день не существует модели, которая описывала процесс распространения опасного вещества в условиях застройки в полном объеме. Поэтому, дальнейшей нашей задачей будет создание математической модели на основе численного моделирования, учитывающей все процессы, происходящие при рассеивании паров СПГ в условиях застройки.

## Литература

- [1] Методика оценки последствий химических аварий (Методика "Токси". Редакция 2.2 // Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах: Сб. док. / ГУП "НТЦ Промышленная безопасность. Сер. 27, Декларирование промышленной безопасности и оценка риска. - 2001. - Вып. 2. - С. 121-204.

- [2] Руководство по безопасности «Методика моделирования распространения выбросов опасных веществ»: [утверждено приказом Ростехнадзора N 158 от 20.04.2015]. – М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2015. -21 с.
- [3] Chan S.T. Numerical simulations of LNG vapor dispersion fenced storage area. University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, P-0. Box 808, L - 262.
- [4] Ermak D.L. Falcon Series Data Report 1987 LNG Vapor Barrier Verification Field Trials / D.L Ermak, T.C. Brown, R.T. Cederwall, S.T. Chan, R.P. Koopman, K.C. Lamson, J.W. McClure, L.K. Morris. - Lawrence Livermore National Laboratory, Report GRI – 89/0138, 1990. - 665.
- [5] Sklavounos, S., & Rigas, F. (2004). Validation of turbulence models in heavy gas dispersion over obstacles. *Journal of Hazardous Materials*, 108 (1-2), 9-20.
- [6] Sklavounos, S., & Rigas, F. (2005). Fuel gas dispersion under cryogenic release conditions. *Energy & Fuels*, 2005 (19), 2535-2544.
- [7] Sklavounos, S., & Rigas, F. (2006). Simulation of Coyote series trials - Part I: CFD estimation of non-isothermal LNG releases and comparison with box-model predictions. *Chemical Engineering Science*, 61 (5), 1434-1443.
- [8] Gavelli, F., Bullister, E., & Kytomaa, H. (2008). Application of CFD (Fluent) to LNG spills into geometrically complex environments. *Journal of Hazardous Materials*, 1016/j.jhazmat.2008.02.037.
- [9] Gavelli, F., Bullister, E., & Kytomaa, H. (2006). Validation of Fluent predictions for LNG spills into an impoundment. *Mary Kay O'Connor Process Safety Center 2006 International Symposium*, College Station, TX.
- [10] Ichard, M. & Gavelli, F. CFD Simulation of the Falcon Tests Using the Homogeneous Equilibrium Model in FLACS. 2012 AIChE Spring National Meeting, 1-4 April 2012, Houston, Texas, L - 13.
- [11] Benjamin R. Cormier. Computational fluid dynamics for lng vapor dispersion modeling: a key parameters study. Texas A&M University, August 2008. - 176.
- [12] Blackmore D.R., Herman M.N., Woodward J.L. Heavy gas dispersion models // *Journal of Hazardous Materials*. – 1982 – v.6 – pp. 107-128.

## **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ СЖИЖЕННОГО ПРОПАНА НА ОТКРЫТОЙ ПЛОЩАДКЕ**

Прусова И.А., Вилохин С.А., Поникаров С.И.

*Казанский национальный исследовательский технологический университет*

*E-mail: ira93p@mail.ru*

Промышленная безопасность уходит корнями к издавна существующему производству взрывчатых веществ и всегда являлась определённой проблемой, но в последние годы этот вопрос особенно обострился в связи с появлением масштабных химических производств в первой половине XX века. Костяком химической промышленности стали производства непрерывного цикла, продуктивность работы которых не имеет в целом естественных ограничений. Стабильный рост производительности объясняется серьёзными экономическими преимуществами крупных установок, но параллельно возрастает и содержание опасных веществ в технологических аппаратах. Это неизменно сопровождается угрозой катастрофических пожаров, взрывов, токсических выбросов и других разрушительных явлений. Под ударом могут оказаться люди и окружающая среда.

Пожар – неконтролируемый процесс горения, причиняющий материальный ущерб, опасность жизни и здоровью людей. Это делает прогнозирование последствий пожара важным для обеспечения безопасности и минимизации вреда.

### **Моделирование горения пропана на открытой площадке.**

Пожар пролива может произойти при различных обстоятельствах. Одна из локальных форм его проявления – пожар в резервуаре хранения, например, если в результате внутреннего либо внешнего воздействия резервуар остается без крыши. Аналогичная ситуация – это пожар разлития, в обоих случаях подразумеваются твёрдо определенные границы и форма.

В других ситуациях пожары пролива происходят после того, как жидкость выбрасывается на поверхность; форма и глубина пролива определяются особенностями места разлития.

Мы рассмотрим последний вид пролива сжиженного пропана с размерами 20x20x0,2 м, скоростью ветра 1 м/с и температурой окружающей среды 300 К.

Методика моделирования состоит из следующих этапов:

- 1) Построение трехмерной расчетной области со сгущением узлов неравномерной структурированной сетки в области предполагаемого пролива.
- 2) Задание граничных условий:
  - На обеих боковых и верхней границах расчетной сетки принимается условие “Symmetry”, т.е. равенство нулю нормальной к границе компоненты скорости и нормальных производных остальных переменных величин.
  - На нижней границе задаются условие прилипания и параметры шероховатости поверхности (рис. 1).

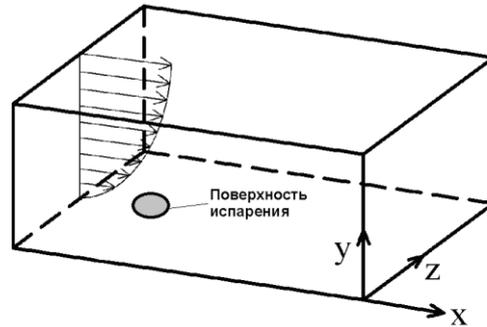


Рис. 1. Геометрия сетки

- 3) Определение профилей скорости и турбулентных характеристик воздушного потока на входе в расчетную область. В качестве граничных условий на входе задаются температура воздуха, скорость ветра и значения интенсивности и масштаба турбулентности (0,1 % и 0,1 м).
- 4) Задание начальных условий. Пристеночным ячейкам в области источника примеси присваиваются значения температуры, среднее значение фракции и интенсивность испарения, определяемая по формуле (1):

$$W = \frac{(\lambda_s \cdot C_s \cdot \rho_s)^{0,5} \cdot (T_0 - T_b)}{L_g \cdot (\pi \cdot t)^{0,5}} + \frac{0,035 \cdot u^{0,8} \cdot \lambda_a \cdot (T_0 - T_b)}{(\vartheta_a^{0,8} \cdot d^{0,2} \cdot L_g)} \quad (1)$$

где  $\lambda_s$  – коэффициент теплопроводности материала, на поверхность которого разливается жидкость, Вт/(м·К);  $C_s$  – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К);  $\rho_s$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $T_0$  – начальная температура материала, К;  $t$  – текущее время с момента начала испарения, с;  $\lambda_a$  – коэффициент теплопроводности воздуха при температуре  $T_0$ ;  $u$  – скорость воздушного потока над поверхностью испарения, м/с;  $d$  – характерный диаметр пролива, м;  $\vartheta_a$  – кинематическая вязкость воздуха при  $T_0$ , м<sup>2</sup>/с.

- 5) Решение нестационарной задачи

Сейчас существует ряд моделей турбулентного горения, отличающихся друг от друга математической сложностью. Математической основой для моделей служат уравнения Навье-Стокса (2) [1]. Последовательное решение и упрощение их с введением дополнительных условий и ограничений, приводит к образованию системы моделирования.

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{du}{dt} &= X - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( 2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \omega \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right], \\ \rho \frac{dv}{dt} &= Y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( 2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \omega \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right], \\ \rho \frac{d\omega}{dt} &= Z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( 2 \frac{\partial \omega}{\partial z} - \frac{2}{3} \operatorname{div} \omega \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial \omega}{\partial z} + \frac{\partial \omega}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right], \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial z} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Система уравнений Навье-Стокса, приведенная к двум нелинейным диффузионным уравнениям, учитывающим флуктуации средней скорости турбулентных потоков, представляет собой семейство моделей  $k-\varepsilon$  (3), где  $k$  – массовая плотность турбулентной энергии,  $\varepsilon$  – скорость ее диссипации. Спецификой данной системы является каскадность ее решения, что наиболее удобно для применения в программных пакетах для моделирования. Кроме того, важным достоинством является высокая скорость расчета моделей посредством  $k-\varepsilon$  с достаточно высокой точностью.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(u_j k)}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} + \rho P_t - \rho \varepsilon \\ \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(u_j \varepsilon)}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_t - C_{\varepsilon 2} \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $\mu_t = \rho C_\mu f_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ .

Левые части уравнений представляют собой конвективный перенос величин  $k$  и  $\varepsilon$ , а три члена в правой части описывают их диффузию, выделение и диссипацию.

В данном примере рассматривалась RNG модель. Аналитический вывод приводит к модели  $k - \varepsilon$  с набором констант, отличающихся от констант стандартной модели. Модель содержит дополнительный член в уравнении для скорости диссипации турбулентной энергии, который уточняет прогнозирование течений с быстрыми деформациями. Дифференциальные уравнения этой модели имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(u_j k)}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} + \rho P_t - \rho \varepsilon \\ \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(u_j \varepsilon)}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} + C_1 \frac{\varepsilon}{k} P_t - C_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k} - \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \frac{\eta}{\eta_0})}{1 + \beta \eta^3} \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $\eta = S^* \frac{k}{\varepsilon}$ .

Величина  $S^*$  определяется выражением:

$$S^* = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (5)$$

где  $S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ .

Скорость генерации турбулентной энергии за счет энергии осредненного поля  $P_t$  выражается следующим образом:

$$P_t = \mu_t \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \omega}{\partial z} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial \omega}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right\} \quad (6)$$

Согласно предположению о равных коэффициентах диффузии, вид уравнения для определения фракции смеси  $f$  может быть приведен к одному уравнению. Хотя предположение о равных коэффициентах диффузии неприемлемо для ламинарных течений, оно обычно приемлемо для турбулентных течений, т.к. турбулентная конвекция подавляет молекулярную диффузию. Среднее уравнение фракции (средняя плотность) представляет собой:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{f}) + \nabla(\rho \bar{v} \bar{f}) = \nabla \left( \frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \bar{f} \right) + S_m + S_{user} \quad (7)$$

Исходная величина  $S_m$  определяется только переносом массы из капель жидкого топлива или реагирующих частиц в газовую фазу.  $S_{user}$  – пользовательская исходная величина.

Кроме решения уравнения средней фракции смеси Favg решается уравнение изменения фракции смеси:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \overline{f'^2}) + \nabla(\rho \bar{v} \overline{f'^2}) = \nabla \left( \frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \overline{f'^2} \right) + C_g \mu_t (\nabla \bar{f})^2 - C_d \rho \frac{\varepsilon}{k} \overline{f'^2} + S_{user} \quad (7)$$

где  $f' = f - \bar{f}$ . Значения констант по умолчанию  $\sigma_t, C_g, C_d$  0.85, 0.86, 2.0 соответственно.

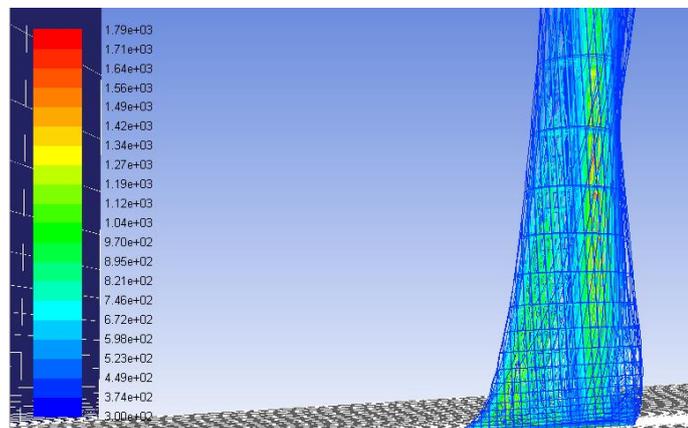


Рис. 2. Температурный профиль модели

Опыт применения RNG модели показал более качественные результаты, нежели стандартная версия  $k - \varepsilon$  модели.

На данный момент производится проверка полученных результатов с экспериментальными.

### Выводы

В процессе обработки полученных результатов проводится оценка профиля температур. По рис.2 можно понять, что максимальная температура достигается в зоне пролива пропана. Уменьшение же температуры происходит с возрастанием высоты пламени. Наименьшая температура – в зоне задымления.

### Литература

- [1] Южаков И. В. Современные методы численного моделирования процессов горения / И. В. Южаков, Е. И. Левин // Труды второй научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института. — Екатеринбург: УрФУ, 2017. — С. 20-23.
- [2] Ansys Fluent Theory Guide, July 2015.
- [3] Приказ от 10 июля 2009 г. N 404 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах».
- [4] Маршал В. Основные опасности химических производств / В.Маршал. — Москва: Изд-во Мир, 1982. — 672 с.
- [5] Старовойтова Е.В., Галеев А.Д., Поникаров С.И., Моделирование парообразования с поверхности аварийного пролива сжиженного газа / Вестник Казанского технологического университета. 2012, т.15, в.4, с.110-113 (ВАК).

## СТЕКЛА, ЭКРАНИРУЮЩИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ СВЧ-ДИАПАЗОНА

Галючок В.А., Петуховская А.Г., Дяденко М.В.  
*Белорусский государственный технологический университет.*  
*E-mail: dyadenko-mihail@mail.ru*

Значительная часть промышленных производств сопровождается различного рода излучениями. Их природа обусловлена процессами, происходящими в веществе: движущимися электрическими зарядами (электромагнитные волны), изменением во времени дипольного электрического момента электрической системы (электрическое дипольное излучение), переходом тепловой энергии вещества в энергию излучения, изменением возбужденного состояния ядер вещества (жесткое электромагнитное гамма-излучение) и т.д.

Негативное воздействие некоторых излучений на организм человека требует использования защитных мероприятий. Основными мерами защиты от излучений являются: защита «расстоянием», защита «временем» и экранирование. При достаточном удалении от источника излучения его интенсивность ослабевает вследствие взаимодействия излучения с атмосферным воздухом до величины, безопасной для человека. Ограничение времени пребывания в зоне облучения, а также использование защитных экранов позволяет обеспечить безопасность человека. В зависимости от характера излучения осуществляется расчет безопасного расстояния, времени пребывания в зоне облучения и защитного экранирования [1].

Широко применяемые на практике в настоящее время инженерно-технические методы и средства защиты от СВЧ-излучений, основанные на реализации принципа отражения электромагнитных волн с использованием металлических экранов, сетки, фольги, не позволяют решить весь комплекс проблем защиты от СВЧ-излучений [2].

В связи с этим приобретает актуальность проблема разработки качественно новых эффективных методов и средств защиты от СВЧ-излучений.

Данная работа посвящена разработке составов радиозащитных стекол, ослабляющих воздействие электромагнитного излучения СВЧ-диапазона.

В качестве основы для изучения определена система  $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{B}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ , выбор которой обусловлен необходимостью разработки составов стекол с высокой устойчивостью к кристаллизации, минимальной величиной температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) и показателем ослабления электромагнитного излучения СВЧ-диапазона не менее 6 дБ.

Синтез опытных стекол осуществлялся в газовой пламенной печи периодического действия при максимальной температуре ( $1470 \pm 20$ ) °С, с выдержкой при ней 2 ч. По результатам варки установлено, что стекла, включающие 10 мол. %  $\text{V}_2\text{O}_3$ , характеризуются неоднородностью, отсутствием требуемой степени осветления и наличием непровара.

Определение кристаллизационной способности опытных стекол осуществлялось методом градиентной термообработки, по результатам которого установлено, что высокой устойчивостью стеклообразного состояния обладают стекла составов, включающих 40–55 мол. %  $\text{SiO}_2$  и 10 мол. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; а также стекла с содержанием  $\text{SiO}_2$ , равным 50 мол. %. Следует отметить, что для стекол с постоянным содержанием  $\text{V}_2\text{O}_3$ , равным 10 мол. %, отмечено снижение их кристаллизационной способности с ростом содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Плотность стекла характеризует количественное содержание массы вещества в единице объема. Определение плотности опытных стекол позволяет, с одной стороны, оценить вес готового изделия, а с другой, данный показатель оказывает влияние на степень отражения электромагнитного излучения стеклом.

Определение плотности опытных стекол осуществлялось методом гидростатического взвешивания, по результатам которого установлено, что данный показатель изменяется от 2337 до 2694 кг/м<sup>3</sup>.

Экспериментально определено, что при увеличении содержания  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , вводимого взамен  $\text{SiO}_2$  в количестве от 10 до 20 мол. %, плотность опытных стекол увеличивается, а последующий рост содержания данного оксида в составе опытных стекол системы  $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{V}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  способствует снижению плотности. Вероятно, это происходит за счет увеличения доли групп  $[\text{AlO}_6]$ , которые в противоположность тетраэдрическим группировкам  $[\text{AlO}_4]$  занимают больший мольный объем. Как известно [3], мольный объем обратно пропорционален плотности.

Минимальные показатели плотности характерны для стекол, включающих 40–45 мол. %  $\text{SiO}_2$  и 10–20 мол. %  $\text{V}_2\text{O}_3$ .

Энергия радиоволны при ее распространении в веществе преобразуется в другие виды энергии, в частности в электрическую и тепловую. В связи с этим разрабатываемый радиозащитный материал должен быть полупроводником и иметь высокую термостойкость.

Термостойкость характеризует способность опытных стекол выдерживать резкие перепады температур без разрушения и зависит в первую очередь от ТКЛР, определение которого проводили дилатометрическим методом. По результатам исследований установлено, что ТКЛР опытных стекол изменяется в пределах от  $62,4 \cdot 10^{-7}$  до  $89,0 \cdot 10^{-7}$  К<sup>-1</sup>.

Выявлено, что с ростом содержания оксида бора, вводимого взамен  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в количестве от 10 до 30 мол. %, ТКЛР опытных стекол уменьшается. Это связано с переходом четырехкоординированного бора в трехкоординированное состояние. Увеличение доли групп  $[\text{BO}_3]$  над группировками  $[\text{BO}_4]$  способствует образованию структурных пустот, наличие которых обуславливает способность структурной сетки «поглощать» расширение за счет изгиба связей [4].

Термостойкость опытных стекол системы  $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{V}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$  изменяется в пределах от 140 до 180 °С. Максимальные показатели термостойкости характерны для стекол, включающих 20–30 мол. %  $\text{V}_2\text{O}_3$ .

При распространении электромагнитной волны СВЧ-диапазона в материальной среде происходит изменение ее фазовой скорости и поглощение ее энергии. Это объясняется возбуждением колебаний электронов и ионов в атомах и молекулах среды под действием электрического поля волны и излучением ими вторичных волн. Если напряженность поля волны мала по сравнению с напряженностью поля, действующего на электрон в атоме, то колебания электрона под действием поля волны происходят по гармоническому закону с частотой пришедшей волны. Поэтому электроны излучают радиоволны той же частоты, но с разными амплитудами и фазами. Сдвиг фаз между первичной и переизлученной волнами приводит к изменению фазовой скорости. Потери энергии при взаимодействии волны с атомами являются причиной поглощения радиоволн. Степень поглощения электромагнитных волн и изменение фазовой скорости в среде характеризуются показателями ослабления и преломления, которые, в свою очередь, определяются диэлектрической проницаемостью и проводимостью среды, а также длиной волны [5–7].

В частности, характер взаимодействия электромагнитных волн СВЧ-диапазона со стеклом определяется его электрическими свойствами. При помещении образца стекла в электромагнитное поле возникает ток сквозной проводимости, вызванный движением свободных зарядов, и поляриза-

ция, механизм которой связан со смещением центров электрических зарядов частиц, поворотом осей дипольных молекул или миграцией носителей зарядов [6, 7].

Ослабление СВЧ-излучения опытными стеклами оценивалось волноводным методом в диапазонах 8-11,3 ГГц и 26-35 ГГц. Выбор частотных диапазонов для исследований обусловлен особенностями распространения ЭМИ, используемого измерительной техникой и перспективой использования разрабатываемых материалов в системах дистанционного зондирования, радиовидения и др.

Величина показателя ослабления зависит от уровня диэлектрических потерь (потерь проводимости, релаксационных и деформационных), которые определяются главным образом химическим составом и структурой опытных стекол. Влияние химического состава стекла на величину диэлектрических потерь подобно его влиянию на электропроводность: компоненты, увеличивающие электропроводность, повышают и диэлектрические потери в стекле. Поэтому стекла, содержащие щелочные и щелочноземельные оксиды, характеризуются повышенными диэлектрическими потерями.

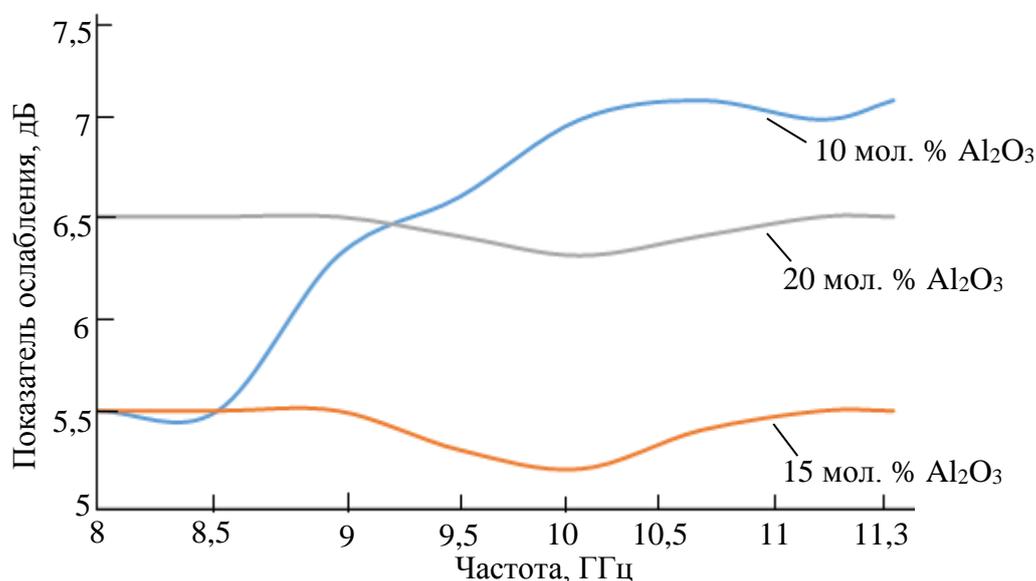
Одним из источников релаксационных потерь в неорганических диэлектриках являются слабо связанные ионы щелочных либо щелочноземельных металлов. Приложение электрического поля вызывает асимметрию в распределении зарядов, в результате чего в диэлектрике возникает электрический момент.

Деформационные потери обусловлены образованием слабых участков в структуре стекла за счет роста доли иона-модификатора  $R_2O$ , характеризующегося слабой связью с кислородом.

Зависимость показателя ослабления опытных стекол от частоты в диапазоне 8-11,3 ГГц при разном содержании  $Al_2O_3$  приведена на рис. 1.

Как видно из рис. 1, с ростом содержания оксида алюминия, вводимого взамен  $SiO_2$  в количестве от 10 до 15 мол. %, показатель ослабления уменьшается, что вызвано преобладанием групп  $[AlO_4]$  над  $[AlO_6]$  и их способностью повышать степень связности алюмоборокремнекислородного каркаса. Дальнейший рост  $Al_2O_3$  вызывает рост показателя ослабления. Это обусловлено тем, что при отношении  $Al_2O_3/(Na_2O+K_2O) > 1$  в структуре стекла преобладают группы  $[AlO_6]$ , вызывающие деполимеризацию структурного каркаса и повышение интенсивности деформационных потерь.

В диапазоне 26-35 ГГц показатель ослабления характеризуется зависимостью от содержания  $Al_2O_3$ , аналогичной для диапазона частот 8-11,3 ГГц.



**Рисунок.** Зависимость показателя ослабления опытных стекол от частоты в диапазоне 8-11,3 ГГц при различном содержании  $Al_2O_3$

Оптимальной с точки зрения ослабления электромагнитного излучения СВЧ-диапазона стеклами является область составов, включающая 10-20 мол. %  $B_2O_3$  и 40-45 мол. %  $SiO_2$ .

Электрофизические свойства материалов зависят в основном от их электронного строения. Радиозащитные стекла должны принадлежать преимущественно к классу полупроводников, у которых между заполненной электронами валентной зоной и свободной зоной проводимости имеется недостаточно широкая (менее 3 эВ) запрещенная зона. Способность материала проводить ток в электрическом поле характеризуется удельной объемной проводимостью, величина которой пропорциональна концентрации носителей тока, их подвижности и заряду.

Электропроводность опытных стекол изменяется от  $2,85 \cdot 10^{-10}$  до  $1,09 \cdot 10^{-8}$  Ом<sup>-1</sup>·м<sup>-1</sup>.

Максимальная величина электропроводности характерна для стекол, включающих 15-25 мол. % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и 10-15 мол. % В<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Это обусловлено, вероятно, таким соотношением групп [AlO<sub>4</sub>], [AlO<sub>6</sub>], [BO<sub>4</sub>], [BO<sub>3</sub>], при котором достигается мольный объем стекла способствует эффективному перемещению однозарядных катионов.

Таким образом, на основании проведенных исследований определена область составов стекол, которые устойчивы к кристаллизации в интервале температур 600-1100 °С в процессе их термообработки в течение 1 ч и характеризуются показателем ослабления 6-10 дБ в диапазонах 8-11,3 и 26-35 ГГц, что позволит изготовить на их основе изделия, ослабляющие воздействие электромагнитного излучения. Достоинством работы является проведение опытных исследований на базе НИУ БГУ «Институт ядерных проблем» (г. Минск), что подтверждает практическую значимость работы и возможность изготовления на основе разработанных составов стекол изделий, радиозащитного назначения.

### Литература

- [1] Резчиков Е.А., Ткаченко Ю.Л. Безопасность жизнедеятельности. М.: Изд-во МГИУ, 2011. – 415 с.
- [2] Рябоконт И.Ю. Разработка элементов системы защиты от СВЧ излучений персонала радиотехнического комплекса с использованием радиопоглощающих материалов: дисс. канд. техн. наук: 05.26.01 – Охрана труда и пожарная безопасность. Севастополь: СПИ, 1990. – 24 с.
- [3] Аппен А. А. Химия стекла. М.: Химия, 1974. – 360 с.
- [4] Шелби Дж. Структура, свойства и технология стекла. М.: Мир, 2006. – 288 с.
- [5] Лисовский В. В. Теория и практика сверхвысокочастотного контроля влажности сельскохозяйственных материалов. Минск: БГАТУ, 2005. – 292 с.
- [6] Фейнберг Е. Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. М.: Наука, 1961. – 548 с.
- [7] Долуханов М. П. Распространение радиоволн. М.: Связь, 1972. – 336 с.

## ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛИЭТИЛЕНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАТАЛИЗАТОРОВ ЦИГЛЕРА-НАТТА

Шарафиев Д.Х., Сабитов М.Х.

*Казанский национальный исследовательский технологический университет.*

*E-mail: ds3195@mail.ru*

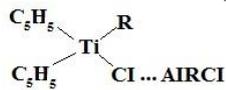
В настоящее время в мире промышленное распространение получили три основных метода производства полиэтилена: при высоком, низком и среднем давлениях. В статье описывается получение полиэтилена низкой плотности с использованием катализаторов Циглера-Натта. Описан химизм процесса полимеризации этилена с использованием катализаторов Циглера-Натта.

Полиолефины представляют собой самый распространенный тип полимеров, получаемых реакциями полимеризации и сополимеризации этилена и других олефинов (пропилена, бутилена, 4-метилпентена). Наиболее распространёнными среди полиолефинов являются полиэтилен (ПЭ) и полипропилен (ПП). В представляемой статье рассматриваются схемы получения полиэтилена с использованием катализаторов Циглера-Натта.

**Катализаторы Циглера-Натта** – каталитические комплексы, образующиеся при взаимодействии соединенных переходных металлов [TiCl<sub>4</sub>, TiCl<sub>3</sub>, VOCl<sub>3</sub>, (C<sub>5</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>TiCl<sub>2</sub> и т. п.] с алкильными производными и другими соединениями металлов I-III групп (AlR<sub>3</sub>, AlR<sub>2</sub>Cl, LiR, MgRCl, ZnR<sub>2</sub> и др.), являются одним из видов катализаторов полимеризации.

В состав активного центра катализаторов Циглера-Натта входят алкили-рованные формы переходных металлов, находящиеся в поляризованных ком-плексах или ионах, направленных для ком-

плекса (C<sub>5</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>TiCl<sub>2</sub> с AlR<sub>2</sub>Cl активный центр имеет вид:



При взаимодействии олефинов с катализаторами Циглера-Натта происходит координация мономера с алкильным производным переходного металла М и последующее его внедрение по связи М—С, М—М. Внедрение обычно протекает многократно; время одного акта внедрения составляет 10<sup>-4</sup>-10<sup>-5</sup> с, энергия активации элементарного акта 21-65 кДж/моль, константа скорости роста цепи 10<sup>4</sup>-10<sup>6</sup> л/(моль\*с). Причина легкости внедрения связана с тем, что мономер, входящий в координационную сферу комплекса, за счет своих донорных свойств уменьшает энергию диссоциации связи

М — С. Обрыв цепи обычно осуществляется по реакции внутри- и межмолекулярного диспропорционирования без образования свободных радикалов.

Катализаторы Циглера-Натта могут быть гетерогенного и гомогенного типа. Среди гетерогенных катализаторов наибольшее значение имеют Ti-Mg-, V-Mg- и металлоорганические хромоценовые катализаторы. Первые два широко применяют в производстве полиэтилена и полипропилена в суспензионном и газо-фазном режимах. Катализаторы представляют собой галогениды Ti и V, закрепленные на подложках, содержащих MgO, MgCl<sub>2</sub> или полиэтилен с привитыми фрагментами MgR и MgCl. Для эффективности таких катализаторов Циглера-Натта существенное значение имеют дисперсный состав, величина площади поверхности и объема пор, механические свойства. В катализатор обычно дополнительно вводят электроннодонорные соединения, в качестве которых используют ряд сложных эфиров, например, фенолбензоаты. Хромоценовые каталитические системы применяют в производстве полиэтилена в газовой фазе в псевдооживленном слое.

Для синтеза полиизопрена используют катализатор типа TiCl<sub>4</sub>\*Al(изо-C<sub>4</sub>H<sub>9</sub>)<sub>3</sub>. В полимеризации диенов с образованием стереорегулярных каучуков активны катализаторы Циглера-Натта, содержащие соединения переходных металлов лантаноидной группы.

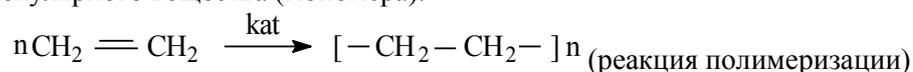
Распространенный тип гетерогенных катализаторов - иммобилизованные катализаторы Циглера-Натта, в которых активные центры закреплены на носителях - органических или неорганических веществах (оксид алюминия, силикагель, различные полимеры). К гомогенным катализаторам Циглера-Натта относятся комплексы (C<sub>5</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>TiCl<sub>2</sub>, (C<sub>5</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>VCl<sub>2</sub> или TiOR<sub>4</sub> с алюминий-органические соединениями, широко применяемые для димеризации и полимеризации этилена. Гомогенные цирконоценовые катализаторы позволяют получать полиэтилен и другие полиолефины.

**Технология получения полиэтилена с использованием катализаторов Циглера-Натта.**  
Сущность процесса полимеризации полиэтилена

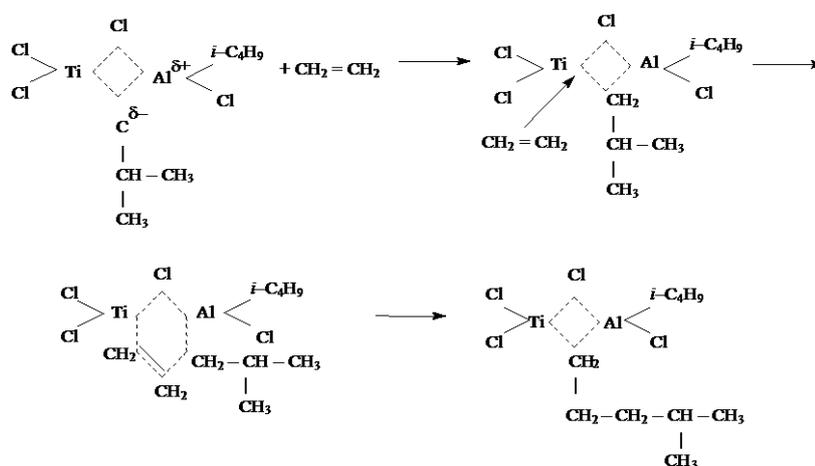
Согласно отечественной классификации различают следующие виды полиэтилена: полиэтилен высокого давления или низкой плотности (ПЭВД или ПЭНП), полиэтилен низкого давления или высокой плотности (ПЭНД или ПЭВП), полиэтилен высокой плотности при среднем давлении (ПЭСД), а также линейные ПЭ низкой плотности (ЛПЭНП).

Производство ПЭ низкой плотности в настоящее время основывается на самом новом варианте технологии процесса «Сферилен», которая является автономной. Процесс состоит из двух газофазных реакций, которые могут протекать при разных составах веществ и различных независимых друг от друга рабочих условиях. Процесс «Сферилен» является единственной каскадной газофазной технологией, позволяющий получать в газовой фазе линейный полиэтилен низкой плотности и полиэтилен высокой плотности с широким диапазоном свойств при использовании одного семейства катализаторной системы Циглера-Натта на титановой основе, позволяющей получить основные семейства полиэтиленовых полимеров в переходном режиме.

Химизм процесса полимеризации этилена. В основе промышленного получения полиэтилена лежит реакция полимеризации. Полимеризация – метод получения высокомолекулярных соединений (полимеров) путем последовательного присоединения друг к другу большого числа молекул исходного низкомолекулярного вещества (мономера).



В процессе полимеризации этилена образуются длинные цепи, которые формируют упорядоченную структуру полимера. При сополимеризации этилена с бутеном-1 или гексеном-1 получаются статистические сополимеры, у которых мономерные звенья распределены вдоль полимерной цепи беспорядочно:





сят от химической и физической природы катализатора, полимеризационной среды и физических условий, а также степени чистоты отдельных компонентов системы и их концентрации.

**Регулирование молекулярно-массовых характеристик полимера.** При полимеризации этилена на каталитических системах, включающих  $TiCl_4$ , молекулярная масса полимера определяется рядом факторов: мольными отношениями компонентов каталитического комплекса, временем и температурой комплексообразования, температурой реакции полимеризации, строением алкилалюминиевого компонента каталитического комплекса. Эти же факторы влияют и на структуру образующихся активных центров. Так, от строения АОС зависит степень восстановления титана и, следовательно, относительное содержание АЦ с титаном различной валентности.

**Таблица.** Влияние строения АОС на степень восстановления титана

АОС	Степень восстановления титана, %	Молекулярная масса
$Al(C_4H_9)_3$	83–85	350 000 – 430 000
$Al(C_2H_5)_3$	76–78	250 000 – 300 000
$Al(C_2H_5)_2H$	96–98	440 000 – 500 000
$Al(C_2H_5)_2Cl$	48–50	140 000 – 180 000

Изменение Молекулярной массы (ММР) полимера может быть достигнуто не только варьированием условий синтеза и природы используемого АОС, но также и добавками в зону полимеризации различных регуляторов.

### Выводы

По своей активности и специфичности катализаторы Циглера-Натта близки к ферментным катализаторам, что дает возможность проводить каталитические процессы полимеризации с высоким выходом и селективностью по основному продукту. Анализ производства полиэтилена с помощью катализаторов Циглера-Натта позволяет выделить следующие особенности.

Производство полиэтилена с добавлением катализаторов Циглера-Натта имеет существенно более низкие капитальные вложения и металлоемкость элементов установки из-за отсутствия необходимости использования аппаратов высокого давления. Процесс в реакторах получения полиэтилена близок к процессам в реакторах идеального смешения. Использование катализаторов Циглера-Натта обеспечивает более высокий выход продукта.

### Литература

- [1] Химическая энциклопедия том 5, главный редактор Н.С. Зефирова, Научное издательство Большая Российская энциклопедия, М.: 1998. – 783 с.
- [2] Энциклопедия полимеров, т.3, М., 1977, с. 874
- [3] Долгопоск Б. А., Тинякова Е.И., Металлоор-ганический катализ в процессах полимеризации, 2 изд., М.:, 1985.
- [4] Полиэтилен высокого давления. Научно-технические основы промышленного синтеза / А.В. Поляков, Ф.И. Дунтов, А.Э. Софиев и др. – Л.: Химия, 1988. – 200 с.: ил.
- [5] Кренцель Б.А., Нехаева Л. А., Успехи химии, 1990, т. 59, № 12, с. 2034-57.
- [6] Дьячковский Ф. С, Высокомолекулярные соединения, 1990, т. 32А, № 10, с. 2019-28.

## ОКИСЛЕНИЕ УКСУСНОЙ КИСЛОТЫ МЕТОДОМ СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО ВОДНОГО ОКИСЛЕНИЯ В РАМКАХ ЗАДАЧИ УТИЛИЗАЦИИ ОРГАНИЧЕСКИХ ВОДНЫХ СТОКОВ

Тарасова А.В.

*Казанский национальный исследовательский технологический университет.*

*E-mail: nastya15154@mail.ru*

В современном мире постоянно развивается промышленность, строятся большое количество новых заводов и фабрик, в том числе и нефтехимических. Так как эти заводы имеют токсичные выбросы и стоки инженеры находятся в постоянном поиске путей решения проблем, связанных с этими выбросами. Разрабатывается новое оборудование и все различные приспособления, которые совершенствуются постоянно. Так как решить проблему выбросов в атмосферу полностью почти невозможно, нами было решено рассмотреть проблему жидких сточных отходов. Она более серьезная и

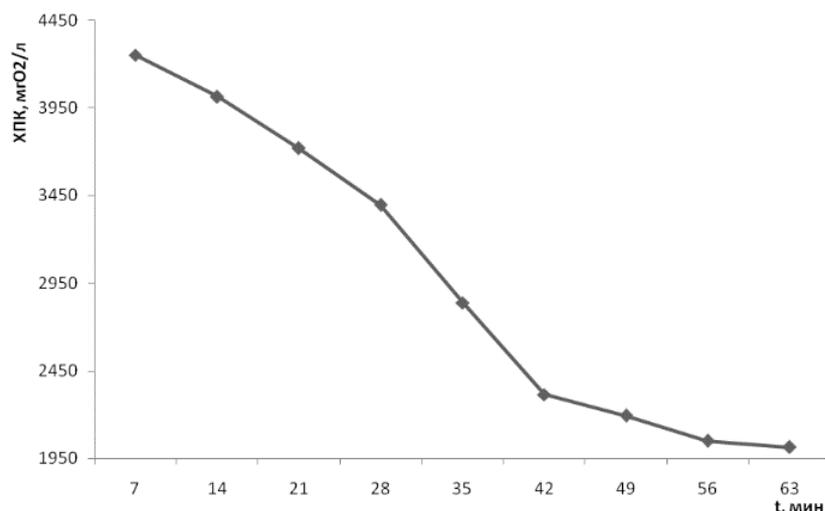
очень распространена на заводах и предприятиях республики Татарстан, развитой в нефтехимической отрасли, поэтому актуальность решения этой проблемы очень высока.

Промышленный сток – это сточные воды, которые образуются в результате технологического процесса, например, охлаждения, промывки и т.д. В основном они очень токсичны и ядовиты, поэтому одна из самых главных задач – это очистка этих стоков до состояния, когда можно будет извлечь и затем повторно использовать катализаторы, которые выпадают в осадок в этих стоках.

На сегодняшний день существующие методы очистки органических отходов (механическая, биологическая, физико-химическая и др.) не дают полной очистки окружающей среды от промышленных стоков и имеются трудности, связанные с отделением катализатора от продуктов реакции, что приводит к потерям дорогого катализатора и большому количеству токсичных сточных вод при обмывке продуктов реакции от катализатора. Для преодоления этих трудностей был разработан относительно новый способ очистки сточных вод - окисление в сверхкритической водной среде (СКВО). Окисление отхода в среде сверхкритической воды имеет значительное преимущество перед термическим обезвреживанием за счет уменьшения количества выбросов в атмосферу, улучшения качества обезвреживания, возможностью рецикла обезвреженной воды. При соответствующем составе отхода возможно использование тепла экзотермической реакции для внутренних нужд производства. Так, продукты окисления неорганических соединений, в основном остатки катализаторов нефтехимических производств и др., в сверхкритической воде меняют свою растворимость и выпадают в осадок, как правило, из целевых растворов СКВО при атмосферном давлении. То есть, процессы СКВО удобны для выделения ценных металлов и неорганических соединений и демонстрирует высокий эффект очистки.

Несмотря на все плюсы метод относительно дорогостоящий, поэтому сначала весь процесс проводят на модельных жидкостях, чтобы выявить все недочеты, это облегчает работу непосредственно с самим стоком в исходном процессе. Для исследований эффективности процесса СКВО в качестве модельной жидкости была рассмотрена уксусная кислота и проведено окисление в присутствии пероксида водорода. Благодаря модельным жидкостям можно повысить КПД установки в несколько раз, так как мы можем регулировать режимы, ход процесса, длительность всего процесса и его отдельных частей, подобрать параметры, при которых эффективность будет максимально возможной.

Окисление уксусной кислоты предварительно проведено на установке периодического действия при  $T = 673$  К,  $P = 25$  МПа, при длительности реакции 10-30 минут. Важно было выяснить, насколько эффективней является непрерывный процесс в сравнении с периодическим. В этой связи непрерывный процесс был исследован на примере тестовой 10 % уксусной кислоты на проточной установке при  $T = 673, 698, 748$  К и  $P = 25$  МПа [1].



**Рисунок.** График зависимости показаний ХПК от времени процесса СКВО при  $T=723$  К и  $P=25$  МПа

Анализ результатов продукта реакции сверхкритического водного окисления (СКВО) и определения его показателя химического потребления кислорода (ХПК) осуществлялся с помощью Анали-

затора ХПК "Эксперт-003-ХПК" фотометрический с терморектором на 26 проб в соответствии с ГОСТ Р 52708-2007.

Ниже приведены результаты процесса СКВО 10% водного раствора уксусной кислоты, в присутствии 30 % пероксида водорода, выступающего в качестве окислителя в виде зависимости значения ХПК от длительности реакции рис. 1.

Из выше приведенного графика можно сделать вывод, что с ростом времени процесса СКВО, значение ХПК уменьшается и стремится к более низкому. При  $T=723\text{ K}$  и  $P=25\text{ МПа}$  значение ХПК первого образца равняется  $4252\text{ мгО}_2/\text{л}$ , а последнего образца равняется  $2015\text{ мгО}_2/\text{л}$ . Проведенный эксперимент показал возможность реализации процесса СКВО в непрерывном режиме с использованием в качестве окислителя пероксида водорода, в том числе и для утилизации промышленных стоков, с целью выделения ценных неорганических соединений и получения воды, пригодной для вторичного использования [2].

### Литература

- [1] Аетов А.У., Курдюков А.И., Гумеров Ф.М., Усманов Р.А., Габитов И.Р., Мазанов С.В., Зарипов З.И. // Бутлеровские сообщения. 2017. Т. 50, с. 67 - 76.
- [2] Усманов Р.А., Габитов Р.Р., Л.Х. Мифтахова Л.Х., Гумеров Ф.М. // Вестник Казан. технолог. ун-та. 2013. 17, 1, С. 224 - 247.

## ПРОБЛЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ БЕЗОПАСНЫХ РАССТОЯНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ

Стребков О.А., Сильвестров А.С., Булкин В.А.

*Казанский национальный исследовательский технологический университет. ООО«Астрапроект»*

*E-mail: aastra@mail.ru*

Обеспечение безопасности является одной из ключевых проблем эксплуатации магистральных нефтегазопроводов. Важной частью безопасного состояния трубопроводов является их местоположение как в природно-климатических, геологических условиях, так и расположение относительно жилых, общественно-деловых и рекреационных зон, промышленных и сельхозпредприятий, автомобильных и железных дорог, коммуникаций и иных объектов. Однако, применяемые при проектировании объектов нефтегазопроводов минимально допустимые расстояния согласно СП 36.13330.2012 не всегда обеспечивают требуемую степень безопасности. В работе проведен обзор часто встречающихся ситуаций, когда, кроме обеспечения минимальных расстояний по СП 36.13330.2012, необходимо рассчитывать безопасные расстояния и разрабатывать мероприятия, обеспечивающие состояние безопасности трубопроводов.

Целью настоящей статьи является анализ типовых проблем при строительстве магистральных нефтегазопроводов, а также возможные способы обеспечения безопасной эксплуатации.

В соответствии с Федеральным законом №116-ФЗ: «Промышленная безопасность опасных производственных объектов» - состояние защищенности жизненно важных интересов личности и общества от аварий на опасных производственных объектах и последствий указанных аварий» [1].

Пункты 7.15-7.18, 7.20 СП 36.13330.2012 [4] входят в Перечень обязательных к применению национальных стандартов и сводов правил согласно Постановлению Правительства №1521 [3] и определяют минимально допустимые расстояния по расположению проектируемых трубопроводов относительно населенных пунктов, промышленных и сельскохозяйственных предприятий, автомобильных, железных дорог, соседних коммуникаций, линейных объектов и др.

В соответствии с Федеральным законом №384-ФЗ при выполнении требований по расположению трубопроводов на минимально допустимых расстояниях, определенных в СП 36.13330.2012, а также других требований стандартов и сводов правил, определенных в Перечне [3] обеспечивается безопасная эксплуатация ОПО.

Важно отметить, что минимально-допустимые расстояния, определенные в СП 36.13330.2012, не всегда будут автоматически определять безопасные расстояния. Дело в том, что приведенные в СП 36.13330.2012 минимально-допустимые расстояния не учитывают многие факторы, при которых производится эксплуатация магистральных трубопроводов. Среди них можно выделить следующие: объем утечки, особенности технологических процессов, рельефа местности, имеющиеся системы за-

щит и противоаварийных систем, время локализации аварии, скорости реагирования и ликвидации аварийных разливов и т.п.

Рассмотрим типовые проблемы при строительстве магистральных нефтегазопроводов.

1) Прокладка вблизи садовых (дачных) участков

Рассмотрим пример реконструкции трубопровода в техническом коридоре коммуникаций вблизи садовых участков более подробно (см. рисунок).

На рисунке показаны допустимые границы прокладки магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов от DN500 мм до DN1000 мм (см. участок между пунктирными линиями).

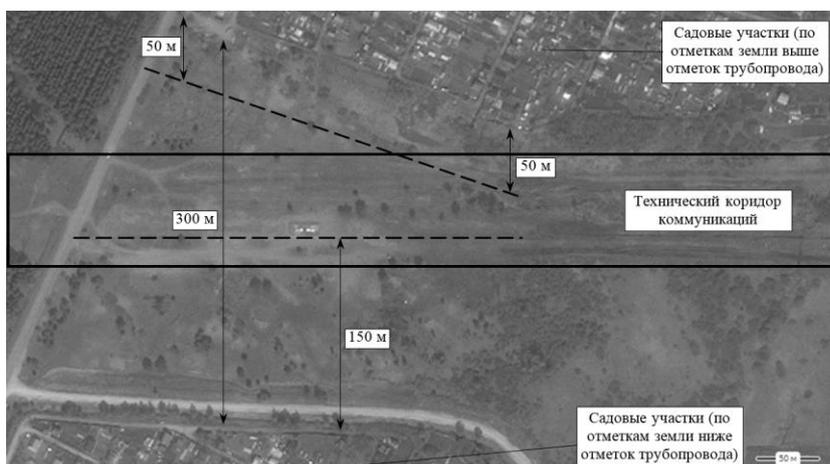
При оценочных расчетах пролива опасного вещества (например, нефть, бензин, дизельное топливо и др.) в объемах 2000-3000 м<sup>3</sup> (с учетом расстояния до ближайшей секущей задвижки) и наличии уклона земли, разлив нефти приведет к затоплению садовых участков. Также возможно образование облака ТВС (бензины, нефти с давлением насыщенных паров более 10 кПа) с образованием ударной волны (взрыв облака ТВС – давление на фронте ударной волны до 12 кПа на расстоянии 150 м) либо пожаром вспышкой при последующем воспламенении (зона действия высокотемпературными продуктами сгорания – до 90 м). При этом, при реализации сценария со взрывом ТВС гибель людей маловероятна, тогда как пожар-вспышка может привести к гибели людей.

В соответствии с п.7.22 СП 36.13330.2012 защитные сооружения требуется предусматривать при прокладке нефтепроводов и нефтепродуктопроводов вблизи населенных пунктов, и промышленных предприятий, расположенных на отметках ниже этих трубопроводов. Однако, данный пункт не устанавливает требований к садовым обществам.

Таким образом, приведенный пример показывает, что при выполнении требований СП 36.13330.2012 по расположению магистральных трубопроводов на минимально-допустимых расстояниях, необходимо проводить анализ безопасных расстояний и необходимости проектирования дополнительных компенсирующих мероприятий.

В приведенном выше примере в качестве компенсирующих мероприятий можно рассмотреть устройство земляных валов с низовой стороны трубопровода для исключения стока продукта к садовым участкам и локализации аварийного разлива на расстоянии не менее 100-150 м от них. Дополнительно, для уменьшения объема пролива можно предусмотреть устройство дополнительных узлов запорной арматуры вблизи рассматриваемого участка трубопровода.

2) Прокладка по существующей территории населенного пункта к перекачивающей станции (нефтебазе)



**Рисунок.** Пример прокладки магистрального трубопровода вблизи садовых участков

Прохождение линейной части ОПО МТ в границах населенного пункта является отступлением от требований Табл.4 п.7.15 СП 36.13330.2012 [4]. Для проектирования в этих случаях необходимо разработать специальные технические условия (СТУ), которые согласовываются в Министерстве строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России).

В соответствии с Прим.1 к Табл.4 СП 36.13330.2012 [4]: «Расстояния, указанные в таблице, следует принимать: для городов и других населенных пунктов - от границ населенных пунктов с учетом земель межселенных территорий, включенных в границы населенных пунктов, на основе утвержденных документов территориального планирования субъектов РФ и муниципальных образова-

ний...». Таким образом, рассмотрение возможности прокладки магистральных трубопроводов и выбор компенсирующих мероприятий при разработке СТУ необходимо производить с учетом генерального плана развития населенного пункта.

На основании анализа застройки, закладываются компенсирующие мероприятия, направленные на повышение надежности эксплуатации трубопроводов, а также мероприятия по исключению случайного повреждения трубопровода строительной и иной техникой.

В случае прохождения газо-нефтепроводов на ненормативном сближении или по территории населенного пункта ФЗ-116 предусмотрена разработка обоснования безопасности, которое включает в себя анализ риска.

При этом разрабатывается комплекс компенсирующих мероприятий, включающий:

- повышение надежности эксплуатации трубопроводов;
- создание системы обнаружения утечек
- комплекс технических средств охраны
- создание локальной системы обнаружения утечек;
- прокладка трубопроводов наклонно-направленным бурением (с увеличенной глубиной заложения);
- локализация разлива в межтрубном пространстве трубопровода и защитного герметичного кожуха с контролем загазованности межтрубного пространства и выдачей сигнала в автоматизированном режиме в территориальный, районный и местный диспетчерские пункты;
- проектирование систем оповещения населения и третьих лиц;
- сокращение времени прибытия аварийно-восстановительных бригад;
- проведение регулярных учений по локализации аварийных разливов;
- оповещение населения и третьих лиц о возможных авариях и действиях в случае срабатывания систем оповещения и т.п.

3) Прокладка вдоль существующих автомобильных и железных дорог

При анализе данного случая необходимо в первую очередь рассмотреть возможность притока опасного вещества к полотну автомобильной или железной дороги в случае разгерметизации трубопровода. Анализ данного обстоятельства важен в первую очередь по причине повышенного риска воспламенения опасного вещества от курения, искр контактных проводов, глушителей, статики и т.п.

На основании вышесказанного в качестве компенсирующих мероприятий необходимо повышать надежность эксплуатации трубопровода, увеличивать глубину заложения, организовывать локализацию разлива, устанавливать и обслуживать опознавательные-предупредительные знаки, а также предусматривать наземное и авиа-патрулирование трассы трубопровода.

## Выводы

Строительные нормы и правила устанавливают требования по минимальным расстояниям от зданий и сооружений.

Приведенные примеры показывают, что для обеспечения безопасной эксплуатации нефтегазопроводов при их проектировании, наряду с обеспечением минимальных расстояний требуется проводить расчеты безопасных расстояний.

По результатам расчетов, в случае необходимости, выполняется корректировка проектных решений и компенсирующих мероприятий.

## Литература

- [1] Федеральный закон от 21.07.1997 N 116-ФЗ "О промышленной безопасности опасных производственных объектов" // СПС Консультант Плюс.
- [2] Федеральный закон от 30.12.2009 N 384-ФЗ "Технический регламент о безопасности зданий и сооружений" // СПС Консультант Плюс.
- [3] Постановление от 26 декабря 2014 г. N 1521 «Об утверждении перечня национальных стандартов и сводов правил (частей таких стандартов и сводов правил), в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона "Технический регламент о безопасности зданий и сооружений"» // СПС Консультант Плюс.
- [4] "СП 36.13330.2012. Свод правил. Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85" (утв. Приказом Госстроя от 25.12.2012 N 108/ГС) (ред. от 18.08.2016). М.: Госстрой, ФАУ "ФЦС", 2012.

## **МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ВОДЫ НА ПАО «КАЗАНЬОРГСИНТЕЗ»**

Губайдуллина Э.К., Хасанова В.К.

*Казанский национальный исследовательский технологический университет*

*E-mail: valerya29.11@mail.ru*

Наша страна обладает богатейшими источниками пресной воды. Но природная вода, как правило, не соответствует гигиеническим требованиям, предъявляемым к питьевой воде, поэтому перед подачей населению практически всегда необходима ее очистка и обеззараживание. Потребляемая человеком для питья, как и используемая на различных производствах, природная вода должна быть безопасной в санитарно-эпидемиологическом отношении, безвредной по своему химическому составу и иметь благоприятные органолептические свойства.

Известно, что ни один из современных методов обработки воды не обеспечивает ее 100 %-ной очистки от микроорганизмов. Но даже если бы система водоподготовки и могла способствовать абсолютному удалению из воды всех микроорганизмов, то всегда остается большая вероятность вторичного загрязнения очищенной воды при ее транспортировке по трубам, хранении в емкостях, контакте с атмосферным воздухом и т. д.

Санитарные правила и нормы не ставят цель доведения воды по микробиологическим показателям до идеального, а следовательно, стерильного качества, при котором в ней будут отсутствовать все микроорганизмы. Задача состоит в том, чтобы удалить наиболее опасные из них для здоровья человека.

Технологии производства основного органического синтеза, неорганических продуктов, полимеров и изделий из них, реализуемые ПАО «Казаньоргсинтез», в силу специфики технологических процессов связаны с образованием, выбросом и сбросом вредных веществ в окружающую среду. В связи с этим, руководство компании уделяет много внимания вопросам охраны окружающей среды. Выбранный курс работы предприятия направлен на минимизацию негативного воздействия на окружающую среду.

Деятельность акционерного общества осуществляется в соответствии с природоохранным законодательством Российской Федерации и Республики Татарстан. Ежегодно разрабатываются и выполняются планы природоохранных мероприятий, направленных на уменьшение вредного воздействия объектов эксплуатации на окружающую среду, по рациональному использованию водных ресурсов и охране водных объектов.

С 2005 года на предприятии действует система экологического менеджмента, сертифицированная на соответствие требованиям международного стандарта ИСО 14001. Система менеджмента позволяет повысить эффективность процессов и действий, направленных на достижение последовательного улучшения в области охраны окружающей среды.

Следование тенденциям рынка, отслеживание потребительского спроса ведут к неизбежному расширению и усложнению производственных процессов, в связи с чем возникает необходимость постоянного совершенствования и наращивания фондов природоохранного оборудования. В их число входят:

- пылегазоулавливающие установки;
- установка сбора и утилизации, углеводородных сдувок с частичным возвратом их в технологический процесс;
- система оборотного водоснабжения;
- локальные установки очистки химзагрязненных сточных вод;
- система биологических очистных сооружений;
- станция термического обезвреживания жидких отходов производства;

Действующая система мониторинга окружающей среды позволяет четко и объективно отслеживать экологическую ситуацию в зоне воздействия предприятия, анализировать тенденцию состояния атмосферного воздуха и водных объектов, определять эффективность проводимых природоохранных мероприятий, оперативно выявлять и устранять возникающие нештатные экологические ситуации на производственных объектах.

Водоснабжение ПАО «Казаньоргсинтез» осуществляется с собственного водозабора. С целью сокращения забора воды из реки Волга «Казаньоргсинтез» постоянно наращивает мощность водооборотных систем ( процент водооборота составляет 97,5 %).

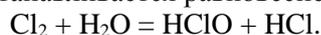
Перед предприятием стоит задача разумного и рационального использования природных ресурсов, позволяющая обеспечить жизненные потребности людей в сочетании с охраной и воспроиз-

водством природной среды. Поэтому для поиска наиболее рационального способа очистки воды применяются различные методы.

Метод обеззараживания воды хлором.

До 2017 года на ПАО «Казаньоргсинтез» для дезинфекции воды использовался хлор, так как он является самым распространенным веществом, используемым для обеззараживания питьевой воды. Это объясняется его высокой эффективностью, простотой используемого технологического оборудования, дешевизной применяемого реагента – жидкого или газообразного хлора – и относительной простотой обслуживания.

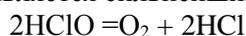
Хлор легко растворяется в воде, после смешения газообразного хлора с водой в водном растворе устанавливается равновесие:



Далее происходит диссоциация образовавшейся хлорноватистой кислоты:



Наличие хлорноватистой кислоты в водных растворах хлора и получающиеся в результате ее диссоциации анионы  $\text{OCl}^-$  обладают сильными бактерицидными свойствами. Хлорноватистая кислота почти в 300 раз более активна, чем гипохлорит-ионы  $\text{ClO}^-$ . Объясняется это уникальной способностью  $\text{HClO}$  проникать в бактерии через их мембраны. Хлорноватистая кислота подвержена разложению на свету с образованием хлористоводородной кислоты и атомарного кислорода в качестве промежуточного вещества, который также является сильнейшим окислителем:



Обработку воды хлором осуществляют с помощью, так называемых, хлораторов, в которых газообразный (испаренный) хлор абсорбируют водой. Полученная хлорированная вода из хлоратора сразу подается к месту ее потребления. Несмотря на то, что этот метод обработки воды и является наиболее распространенным, у него тоже есть ряд недостатков. Прежде всего, сложная транспортировка и хранение больших объемов жидкого высокотоксичного хлора. При такой организации процесса неизбежно присутствуют потенциально опасные стадии – прежде всего разгрузка емкостей с жидким хлором и его испарение для перевода в рабочую форму.

Создание рабочих запасов хлора на складах представляет опасность не только для рабочего персонала станции, но и для жителей расположенных рядом домов. Как альтернативный вариант хлорирования в последние годы все шире используют обработку воды раствором гипохлорита натрия ( $\text{NaClO}$ ).

Метод обеззараживания воды гипохлоритом натрия.

Осенью 2017 года на территории цеха очистных сооружений и внешних коммуникаций (ОСиВК) ПАО «Казаньоргсинтез» запустили в работу оборудование по производству низкоконцентрированного гипохлорита натрия электролизным способом из пищевой соли. Строительство объекта входило в план комплексной модернизации цеха ОСиВК, рассчитанной до 2020 года. Осуществление плана началось 5 лет тому назад. За это время был построен новый административный лабораторный корпус. Котельную, которая работала на дизельном топливе, заменили на блочную модульную, использующую газ.

Генеральный подрядчик, ООО «ТАИФ-СТ» для реализации проекта на территории цеха ОСиВК, выполнил работы по прокладыванию для объекта наружных коммуникаций, монтаж фундамента под каркасное здание. Монтаж каркасного здания, в том числе строительно-монтажные и пусконаладочные работы в подразделении ОСиВК выполнила организация ООО «Капитал-Строй».

В качестве поставщика оборудования производства низкоконцентрированного гипохлорита натрия в ходе тендера была определена компания Newtec Umwelttechnik GmbH (Германия).

Для производства гипохлорита натрия нужна специально подготовленная вода. На первом этапе питьевая вода проходит систему обезжелезивания, на втором — через сорбционный угольный фильтр удаляется хлор и на последнем этапе в воде снижается содержание кальция и магния. Это необходимо для того, чтобы исключить накипь, появляющуюся на электродах, в процессе электролиза.

Подготовленная вода направляется в емкость для умягчения, после чего поступает в сатуратор. В нем происходит растаривание мешков пищевой соли и приготовление насыщенного 24–28-процентного солевого раствора. Для приготовления используется обычная пищевая соль экстра-класса. Далее солевой раствор направляется на электролизер, предварительно смешиваясь с умягченной водой, таким образом, достигая концентрации в 3 %, необходимой для процесса электролиза.

На выходе после электролизеров получается готовый продукт гипохлорита натрия 0,6–0,8 процента. Он поступает на узел хранения. Всего 10 емкостей по 15 кубов, таких запасов достаточно для точной потребности в веществе.

Гипохлорит натрия «Казаньоргсинтез» будет производить только для своих нужд, поставлять вещество на рынок не планируется. Создание своего производства дешевле, чем покупка готового гипохлорита натрия. Концентрация вещества, которое производит предприятие, наиболее стойкая, удобная в дозировании. При производстве практически исключен человеческий фактор, оборудование работает полностью на автомате.

Открытие производства гипохлорита натрия на «Казаньоргсинтезе» становится необходимым этапом в модернизации цеха очистных сооружений и внешних коммуникаций.

Обеззараживание воды с использованием гипохлорита отличается от классических методов повышенной экологической, промышленной и технологической безопасностью, а также улучшением показателей состава фильтрованной воды.

Хлор – это вещество второго класса опасности. Как сильнодействующее ядовитое вещество оно превращает водоочистные станции в опасные промышленные объекты. Гипохлорит натрия – вещество четвертого класса, оно не токсично и не опасно, применяется для дезинфекции питьевой воды.

Использование новой технологии позволит избежать любых ситуаций, связанных с угрозой выброса хлора, при транспортировке, хранении и использовании реагента.

### **Литература**

- [1] Хохрякова Е.А. Современные методы обеззараживания воды. –М.: Литагент «Аква-Терм», 2014.- 110 с.
- [2] Гумарова Е.А. Гипохлорит натрия против хлора: как на «Казаньоргсинтезе» озаботились экологической безопасностью// Реальное время.-15.09.2017
- [3] <https://www.kazanorgsintez.ru/>

## **ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА КАТАЛИТИЧЕСКОГО КРЕКИНГА, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЕГО ОПАСНОСТЬ**

Юсупова А.Ю., Хасанова В.К.

*Казанский национальный исследовательский технологический университет.*

*E-mail: valerya29.11@mail.ru*

Каталитический крекинг представляет собой термокatalитическую переработку нефтяных фракций с целью получения компонента высокооктанового бензина, легкого газойля и непредельных жирных газов.

Каталитический крекинг – это один из важнейших процессов, обеспечивающих глубокую переработку нефти. Внедрению каталитического крекинга в промышленность способствовало создание эффективного с большим сроком службы катализатора на основе алюмосиликатов. Основное достоинство процесса — большая эксплуатационная гибкость:

- возможность перерабатывать различные нефтяные фракции с получением высокооктанового бензина и газа, богатого пропиленом, изобутаном и бутенами;
- сравнительная легкость совмещения с другими процессами, например, с алкилированием, гидрокрекингом, гидроочисткой, адсорбционной очисткой, деасфальтизацией и т.д.

Такой универсальностью объясняется весьма значительная доля каталитического крекинга в общем объеме переработки нефти.

В настоящее время сырьем каталитического крекинга служит вакуумный газойль — прямогонная фракция с пределами выкипания 350-500 °С. Конец кипения определяется, в основном, содержанием металлов и коксуемостью сырья, которая не должна превышать 0,3%. Фракция подвергается предварительной гидроочистке для удаления сернистых соединений и снижения коксуемости. Также у ряда компаний имеется ряд разработанных процессов каталитического крекинга тяжелых фракций — например, мазута (с коксуемостью до 6-8 %). Так же в качестве сырья используют остаток гидрокрекинга, а в качестве компонентов сырья возможно использование деасфальтизаторов, петролатумов и т.п.

На установках каталитического крекинга расщепление и изменение структуры молекул тяжелых углеводородов осуществляется под действием катализаторов. Наибольшее распространение для этих целей получили алюмосиликатные катализаторы, имеющие развитую внутреннюю поверхность и сохраняющие активность при высоких температурах. В состав этих катализаторов входит 70-80% SiO<sub>2</sub>, 10-20% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и окислы других металлов. Пары нефтепродуктов поступают в реактор колонного типа и адсорбируются на поверхности катализатора. За счет этого увеличивается время пребывания

тяжелых углеводородов в зоне высоких температур (450-500 °С) и происходит их более глубокое расщепление.

Поскольку крекинг сопровождается увеличением объема реагирующих веществ, для обеспечения высокой степени превращения сырья в продукты реакции процесс осуществляют при давлении, близком к атмосферному (0,15-0,2 МПа). При этом низкое давление в значительной степени способствует смещению равновесия в сторону образования продуктов реакции. Понижение давления достигается путем введения в объем реактора водяного пара, обеспечивающего снижение парциального давления исходных продуктов. Водяной пар, применяемый в качестве разбавителя, является также и теплоносителем.

В процессе каталитического крекинга наряду с протеканием реакций распада, полимеризации и изомеризации, происходит передача водорода от молекул, адсорбированных катализатором, молекулам непредельных углеводородов. Адсорбированные на поверхности катализатора молекулы, отдавая водород, приобретают все более непредельный характер. Некоторые молекулы совсем теряют водород и превращаются в коксообразное отложение, обволакивающее всю поверхность катализатора. Наряду с этим поверхность катализатора загрязняется смолообразными веществами. Все это приводит к дезактивации катализатора и резкому снижению скорости крекинга. Для восстановления активности катализатора на практике производят медленное выжигание кокса в потоке горячего воздуха при температуре 550-700 °С. Регенерация катализатора осуществляется в специальных аппаратах — регенераторах которые, как правило, монтируются рядом с реактором.

При каталитическом крекинге протекает мало побочных реакций, нефтепродукты почти не содержат непредельных углеводородов, и содержание в них ароматических углеводородов значительно выше. В связи с этим выход бензина на установках каталитического крекинга достигает 30-35%.

Современные промышленные установки каталитического крекинга бывают двух основных типов:

- с движущимся слоем шарикового (крупногранулированного) катализатора;
- с "кипящим" (псевдооживленным) слоем пылевидного катализатора.

Блоки подогрева сырья в теплообменниках и трубчатых печах до реактора и блоки ректификации продуктов крекинга после реактора почти одинаковы для всех установок каталитического крекинга и сходны с аналогичными блоками на установках первичной переработки нефти. Основу установок каталитического крекинга составляют реакторные блоки, в которых происходит циркуляция катализатора между реактором и регенератором при помощи системы пневмотранспорта. В установках каталитического крекинга с "кипящим" слоем катализатора применяется мелкозернистый катализатор с диаметром частиц менее 0,5 мм.

Пожарная опасность установок каталитического крекинга характеризуется следующими факторами:

- наличием в аппаратах и трубопроводах большого количества нефтепродуктов, нагретых до температур, значительно превышающих температуры их самовоспламенения;
- возможностью образования горючей среды и взрыва смеси паров нефтепродуктов с воздухом внутри реакторов и регенераторов;
- возможностью повреждения стенок аппаратов и трубопроводов вследствие образования повышенного давления, температурных воздействий, а также значительного коррозионного и эрозионного износа;
- возможностью самовоспламенения веществ при выходе из аппаратов;
- наличием разветвленной системы технологических коммуникаций, по которым возможно быстрое распространение пожара в пределах самой установки, а также на аппараты соседних установок.

Причинами нарушения динамического равновесия в системе "реактор— регенератор" могут стать:

- увеличенная подача исходного сырья;
- нарушение нормального отвода продуктов крекинга из реактора. Это может произойти из-за засорения технологической линии, нарушения процесса ректификации, остановки компрессора, отводящего крекинг-газ из газосепаратора после ректификационной колонны, и т.п.;
- уменьшение или полное прекращение подачи водяного пара в отпарную зону реактора;
- уменьшение количества обращаемого в системе катализатора и понижение вследствие этого его уровня в аппаратах. Это может произойти в результате большого выноса катализатора вместе с дымовыми газами, а также при нарушении нормальной работы электрофильтров и циклонных сепараторов;

— образование пробок в линиях, по которым транспортируется катализатор. В зависимости от того, в какой линии образовалась пробка, возможно попадание воздуха в реактор или горючих паров и газов в регенератор.

На установках с шариковым катализатором возможен прорыв продуктов крекинга из зоны реакции в бункер и циклонный сепаратор. При этом появляется опасность выхода крекинг-газа наружу через сепаратор с последующим его самовоспламенением на воздухе.

Горючая среда в регенераторах может образоваться из-за неполного сгорания кокса на поверхности катализатора и выделении вследствие этого значительного количества окиси углерода CO. Причинами неполного сгорания кокса могут стать недостаточная подача горячего воздуха в регенератор или сильное загрязнение поверхности катализатора горючими отложениями. Избыток кокса на катализаторе, поступающем в регенератор, может быть вызван:

- недостаточной подачей или полным прекращением подачи пара на отпаривание катализатора от углеводородов;
- увеличением температуры в реакционной зоне реактора; уменьшением скорости движения катализатора;
- низкой температурой в зоне регенерации катализатора.

Повышенное давление внутри регенератора может возникнуть из-за попадания в его объем охлажденной воды через поврежденные змеевики встроенных холодильников. При этом резкое увеличение давления будет обусловлено мгновенным вскипанием воды при попадании в зону высоких температур (550-700 °С). Повышение давления в регенераторе может привести к его повреждению, а также может стать причиной перехода воздуха в реактор.

Повреждения в системе "реактор — регенератор" могут произойти в результате температурных воздействий на аппараты установок. Высокие рабочие температуры в аппаратах (в реакторе 450-500 °С, в регенераторе 550-700 °С), а также возможность резкого подъема температуры при нарушении технологического регламента способствуют образованию высоких внутренних напряжений в конструктивных элементах, деформации аппаратов и транспортных линий. Наибольшее влияние температурные деформации оказывают на состояние внутренней облицовки аппаратов, а также на находящееся внутри их оборудование (решетки, циклоны, распределительные устройства и т.д.).

Нарушение нормальной работы системы "реактор — регенератор" может быть вызвано коррозионными эрозионным износом материала стенок аппаратов и транспортных линий.

Предупреждение пожаров и взрывов на установках каталитического крекинга должно обеспечиваться следующими проектными решениями:

- устройством систем автоматического контроля и регулирования количества сырья и водяного пара, подаваемых в реакционную зону реактора;
- установкой приборов контроля за величиной давления в реакторе и регенераторе, а также систем световой и звуковой сигнализации, оповещающих обслуживающий персонал об отклонениях;
- установкой приборов контроля за температурой в аппаратах, а также систем автоматического регулирования температурного режима;
- устройством систем автоматического регулирования уровня катализатора в реакторе и регенераторе, обеспечивающих подпитку системы свежим катализатором в случае понижения его уровня в аппаратах;
- устройством систем автоматической защиты, обеспечивающих введение азота или водяного пара в бункерную часть реактора при прорыве паров нефтепродуктов;
- устройством систем автоматического регулирования количества воздуха, подаваемого в регенератор для выжигания кокса;
- установкой приборов контроля за содержанием окиси углерода в дымовых газах (при обнаружении опасных концентраций CO в регенератор должен автоматически подаваться азот).

## **Литература**

- [1] Панов, В. П. Теоретические основы защиты окружающей среды. Учебное пособие.- М.: Академия, 2008. – 313 с.
- [2] Журнал «Нефтегазовые технологии»

## ЗАЩИТА АТМОСФЕРЫ ОТ ХИМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ НЕФТИ

Юсупова А.Ю., Хасанова В.К.

*Казанский национальный исследовательский технологический университет.*

*E-mail: valerya29.11@mail.ru*

Проблема загрязнения атмосферного воздуха различными химическими выбросами от предприятий, транспорта, жизнедеятельности человека, военных действий, природных катастроф и т.п. является одной из самых острых на современном этапе развития человеческого общества. Поэтому успешным решением этой проблемы озабочены все страны мира.

Особое место по масштабам загрязнения окружающей среды в целом и по уровню загрязнения атмосферного воздуха в частности занимают производственные объекты по переработке нефти.

Общая структура мероприятий по предотвращению выбросов в окружающую среду на опасных производственных объектах представлена на рис.1. Благодаря такому сочетанию представленных на схеме мер достигается снижение отрицательного воздействия вредных веществ на окружающую среду.

Эффективность технологических мероприятий по снижению выбросов в окружающую среду определяется экологической чистотой процессов. Экологически чистым процессом является такое производство или совокупность производств, в результате практической деятельности которых негативное воздействие на окружающую среду не происходит или сводится к минимуму. Такие малоотходные технологические системы обеспечивают максимальное и комплексное использование сырья и энергии.

Для предприятий нефтепереработки и нефтехимии, в общем случае, это означает: модернизацию технологического оборудования; контроль герметизации оборудования; четкое соблюдение технологического режима производства; разработка аппаратуры, предотвращающей выбросы в атмосферу либо ограничивающей их до допустимых уровней; улучшение качества моторного и котельного топлива; очистку отходящих газов; совершенствование и сокращение системы «сжигания на факелах» и т.п.



**Рис. 1.** Схема мероприятий по снижению выбросов вредных веществ в атмосферу

К мероприятиям по снижению выбросов вредных веществ относят:

- совершенствование технологических процессов и внедрение малоотходных и безотходных технологий;
- изменение состава и улучшение качества используемых ресурсов;
- комплексное использование сырья и снижение потребления ресурсов, производство которых связано с загрязнением окружающей среды;
- изменение состава и улучшение качества выпускаемой продукции (неэтилированные бензины, малосернистые топлива и т.д.);
- очистка сбрасываемых промышленных газов.

К мероприятиям по снижению степени распространения вредных веществ, относят:

- нейтрализацию;

- консервацию;
- захоронение и утилизацию выбросов.

Следует отметить, что строительство высоких и сверхвысоких труб не уменьшает выброс вредных веществ в атмосферу и степень их распространения, а обеспечивает снижение приземной концентрации вредных примесей.

Основными методами защиты воздушного бассейна от выбросов диоксида серы с дымовыми газами являются:

- усреднение состава перерабатываемых нефтей и, соответственно, остаточных фракций, используемых в качестве нефтяного топлива;
- использование малосернистых остаточных топлив;
- увеличение доли газа в топливе;
- очистка топливных газов.
- Известные методы сероочистки составляют две основные группы:
- мокрые способы (с использованием абсорбентов, суспензий);
- сухие способы (хемосорбция, адсорбция, катализ).

Наиболее распространенным способом мокрой очистки промышленных газов от диоксида серы является использование растворов и суспензий соединений щелочных, щелочноземельных металлов, алюминия, органических веществ (сульфит-бисульфитные методы).

При использовании 9,5-10% раствора гидроксида натрия для повышения поглотительной способности добавляют 0,05-0,08% перманганата калия. В случае очистки газов с помощью растворов соды происходит накопление тиосульфата натрия. Чтобы этого избежать, в раствор добавляют 1-3% органических соединений (спиртов, альдегидов). В таком растворе скорость образования тиосульфата в 8-9 раз ниже.

Опробован промышленный абсорбционный метод очистки газов от диоксида серы с использованием сульфита натрия.

Очистка отходящих газов от кислых примесей возможна также с использованием аммиачного метода. В газовую смесь впрыскивают аммиак, который, взаимодействуя с кислыми веществами, образует соединения аммония. Собранная на электрофилт্রে твердая фаза направляется на регенерацию аммиака, благодаря чему расход аммиака в процессе невелик.

Сероводород улавливают абсорбентом, содержащим гидроксид железа (III) ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) с последующей регенерацией насыщенного абсорбента воздухом с образованием смеси элементной серы и  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  с последующим ее разделением. Для снижения расхода реагентов смесь элементной серы и  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  обрабатывают углеводородным конденсатом при 110-120 °С. Образующийся углеводородный раствор серы отделяют от  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ .  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  подают на первоначальную стадию очистки, а из углеводородного раствора охлаждением выделяют элементную серу, после чего углеводородный конденсат возвращают в цикл.

Общую очистку газов от сероводорода и диоксида серы проводят в псевдооживленном слое хемосорбента. Хемосорбент получают смешением 10-70 % цемента с известняком или доломитом (90-30 %) и водой с последующим затвердеванием смеси. Полученный продукт дробят. Для очистки используют фракцию 0,7-2 мм.

В связи с вовлечением в переработку тяжелых нефтей и в большей степени с ужесточением экологических требований по ограничению содержания серы в нефтепродуктах и серосодержащих газовых выбросах в атмосферу современные НПЗ становятся крупными производителями серы.

Производство серы и серной кислоты на базе утилизации ее из серосодержащих выбросов значительно увеличивают рентабельность товарной серы не только за счет ее реализации, но и за счет сокращения штрафных санкций со стороны природоохранных органов.

Сырьем для производства серы служит сероводород, образующийся в результате переработки нефти и очистки нефтепродуктов. Сероводород накапливается главным образом во фракции топливного газа.

Таким образом, комплексный подход к проблеме снижения выбросов сернистых соединений позволяет значительно снизить выбросы данного вида загрязнителей в атмосферу даже при увеличении мощностей предприятий и вводе в эксплуатацию новых производств.

Наряду с сернистыми соединениями в газовых выбросах присутствуют оксиды азота и углерода (II), углеводороды, твердые вещества.

Наиболее простым и экономичным методом снижения выбросов диоксида азота является совершенствование процесса сжигания топлива, с чем и связаны мероприятия, направленные на модернизацию этого процесса.

Снижение выбросов оксида углерода (II) достигается за счет процессов:

- утилизации больших количеств газа в котлах-утилизаторах;
- дожига отходящих газов в регенераторе на базе применения промотирующих добавок к основному катализатору процесса крекинга;
- каталитического дожига отходящих газов.

С увеличением глубины переработки тяжелого и остаточного сырья, а также с ужесточением экологических требований актуальность проблемы сокращения вредных выбросов в атмосферу на нефтехимических и нефтеперерабатывающих предприятиях возрастает.

Наиболее эффективным способом сокращения выбросов оксида углерода является предотвращение его образования. Для этих целей спроектированы форсунки, обеспечивающие хорошее смешение с воздухом, а, следовательно, более полный дожиг оксида углерода (II). Кроме того, на многих предприятиях внедрены системы контроля за полнотой сгорания топлива.

Основными способами снижения уровня загрязнения атмосферы углеводородами при хранении нефтей и нефтепродуктов являются:

- обеспечение поступлений на завод сырой нефти с давлением насыщенных паров и содержанием минеральных солей, отвечающих стандарту;
- обеспечение охлаждения светлых продуктов, направляемых в резервуары для хранения, до минимально возможной температуры, для чего необходимо сооружать дополнительные концевые холодильники. Исследования показали, что при снижении на 10-15 °С температуры охлаждения светлых продуктов перед поступлением их в резервуары для хранения потери от «дыханий» резервуаров уменьшаются в 1,5-2,5 раза;
- замена резервуаров с шатровой крышей на резервуары с плавающими крышами, понтонами или резервуары, работающие при избыточном давлении. В резервуаре с плавающей крышей нет газового пространства над продуктом, т.е. исключены потери от «дыханий». Резервуары подобных конструкций могут быть большой емкости, что дает значительную экономию капитальных затрат на их сооружение, а также дополнительно сокращаются потери продукта при малых «дыханиях»;
- обеспечение стабилизации вырабатываемых на заводах бензиновых компонентов и других легких фракций, направляемых для хранения в резервуары. Причинами неудовлетворительной работы системы стабилизации бензиновых компонентов могут быть: низкое давление в стабилизаторах и недостаточное число фракционирующих тарелок, малый диаметр аппарата, низкая температура нагрева продукта, нарушения технологического режима работы и т.п.;
- оборудование действующих резервуарных парков специальными системами улавливания испаряющихся из резервуаров паров нефтепродуктов: адсорбцией паров на активированных углях с циклической вакуумной регенерацией последних и поглощением десорбированных паров потоком бензина; абсорбцией паров бензином при пониженных температурах; сжиганием выделяющихся паров.

Значительный эффект дает модернизация старых установок завода и выведение из эксплуатации морально и физически изношенных установок. Названные мероприятия позволили значительно снизить общий выброс углеводородов.

Новые технологические установки с малыми удельными потерями, системой утилизации факельного газа, например, установки для выпуска высокооктанового бензина и очистки дизельных топлив от серы, а также ввод в действие нового производства полипропилена позволили сократить выбросы вредных веществ в атмосферу в 10 раз.

С химическими методами переработки углеводородного сырья, особенно каталитическими, помимо вышеуказанных загрязнителей атмосферы, связан выброс твердых пылеобразующих веществ.

Уровень выбросов вредных веществ в окружающую среду в значительной степени зависит от параметров технологических установок. Так, например, при переработке дистиллятного сырья на установке каталитического крекинга эффективность работы катализатора зависит от кратности его циркуляции – чем выше кратность циркуляции, тем эффективнее работа катализатора. Но увеличение кратности циркуляции ведет к более интенсивному выносу катализаторной пыли в атмосферу.

На современных установках каталитического крекинга обычно применяют двухступенчатые системы циклонов в регенераторе и одноступенчатые – в реакторе. Но в случаях превышения пре-

дельно допустимых выбросов катализаторной пыли в приземном слое устанавливают дополнительные системы пылеулавливания.

Существует множество схем подобных систем. Но все они должны обеспечивать санитарные требования по уровню предельно допустимых концентраций твердых веществ в приземном слое, а также обладать высоким уровнем надежности.

Наибольшее применение нашли выносные схемы, включающие одновременно групповые или батарейные циклоны, электрофильтр, сепараторы тонкой очистки для подготовки газов и рекуперации их энергии в турбинах.

### **Литература**

- [1] Родионов, А. И. Защита биосферы от промышленных выбросов. Основы проектирования технологических процессов. Учебное пособие. - М.: Колос, 2005. – 386 с.
- [2] Орлов, Д. С. Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении. Учебное пособие. – М.: Высш. шк., 2002. - 333 с.

## **ПРИМЕНЕНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ НА ОБЪЕКТАХ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА**

Петряев Р.Р, Сильвестров А.С., Булкин В.А.

*Казанский национальный исследовательский технологический университет.*

*ООО «Астрапроект», E-mail: aastra@mail.ru*

Проблема электроснабжения узлов запорной арматуры и станций катодной защиты (СКЗ) на трубопроводном транспорте нефти и газа в настоящее время не решена в полной мере. Ввиду значительной протяженности трубопроводов, прокладки в условиях труднодоступных и отдаленных, а также экономической целесообразности обеспечение трубопроводного транспорта вдольтрассовыми ЛЭП в настоящее время не реализовано повсеместно.

Особенно важно обеспечение электрохимической защиты и дистанционно управляемой запорной арматуры на магистральных и промысловых нефтепроводах, где утечки продукта могут привести к значительному социальному и экологическому ущербу.

В таких случаях для обеспечения электроснабжения возможно использовать альтернативные источники энергии.

В соответствии с п. 8.2.1 и 10.2.13 СП 36.13330.2012 на нефтепроводах и нефтепродуктопроводах при пересечении водных преград для исключения попадания нефти и нефтепродуктов в водоем требуется установка запорной арматуры на отметках не ниже отметок ГВВ 10%-ной обеспеченности и выше отметок ледохода.

Электропривод задвижки потребляет электроэнергию периодически при открытии и закрытии. Кроме электропривода имеются постоянные потребители энергии, которые участвуют в контроле, управлении и охране узлов запорной арматуры.

К основным функциям СКЗ относятся постоянный мониторинг параметров станций по интерфейсу RS-485; удаленное управление режимами их работы; измерение любых параметров коррозионной ситуации в месте установки (потенциалы, напряжения, токи и т.д.); прием и обработка данных от счетчиков электроэнергии, а также подача аварийного сигнала при выходе параметра за пределы уставок.

В последние годы качество изоляции труб значительно улучшилось, в связи с чем требуемая мощность действующих на многих участках новых трубопроводов СКЗ даже с учетом двукратного запаса не превышает 100 Вт. В свете тенденции к снижению стоимости проектов ЭХЗ применение на этих участках мощных СКЗ представляется нецелесообразным. Таким образом, очевидно, что сегодня наряду со стандартными мощными СКЗ необходимо использовать и специализированные мало-мощные поляризирующие элементы катодной защиты с широкими пределами регулировки выходного напряжения и тока, высоким КПД, с возможностью питания от любых источников постоянного и переменного тока, переменного напряжения, в том числе и от альтернативных источников энергии (ветрогенераторов, солнечных батарей, топливных ячеек и т.д.). При этом такие СКЗ должны обладать небольшими габаритами и низкой стоимостью. [1].

В таблице приведен пример основных потребителей электроэнергии в составе узла запорной арматуры.

Несмотря на существенное преимущество традиционных источников питания по сравнению с ветро-солнечными для энергообеспечения крупных потребителей, использование альтернативных источников энергии может стать наиболее рациональным и экономичным решением для объектов небольшой мощности (от 1 до 10 кВт), удаленных от основного источника питания на десятки и сотни километров [2].

Альтернативная энергетика является одним из наиболее интересных сегодня видов генерации. Однако, перспективные способы получения энергии распространены не так широко, как традиционные, имеют существенные ограничения и обладают рядом недостатков.

Классификация альтернативных источников энергии, которые могут быть использованы на магистральных трубопроводах:

- солнечные электростанции;
- ветряные электростанции;
- малые ГЭС;
- детандерные системы.

Получение электроэнергии от лучей Солнца не даёт вредных выбросов в атмосферу. Солнечные батареи имеют ряд преимуществ: они могут помещаться на крышах домов, вдоль шоссе дорог, легко трансформируются, используются в отдалённых районах. номинальная мощность одной панели достигает 500 Ватт. [3].

Недостатками солнечной энергетике являются зависимость интенсивности солнечного излучения от суточного и сезонного ритма, а также потребность в площадях для строительства солнечных электростанций. Также к недостаткам относится перегрев солнечных панелей который приводит в снижению КПД от 10 до 20% [4].

Ветряные электростанции производят электричество за счет энергии перемещающихся воздушных масс — ветра.

Ветровые электростанции строят в местах с высокой средней скоростью ветра – от 4,5 м/с и выше. Мощность современных ветрогенераторов диаметром 6,5 м достигает 20 кВт [5].

**Таблица.** Классификация основных энергопотребителей на узлах запорной арматуры и СКЗ

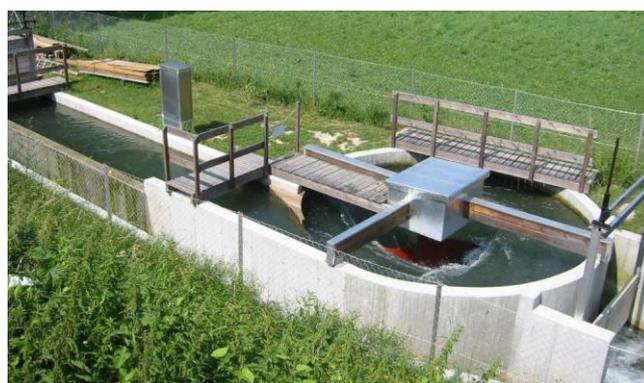
Наименование	Периодичность работы	Потребляемая мощность (ном, кВт)
Электропривод запорной арматуры	1 раз в 4 месяца	0,55-18,5
Питание задвижки	постоянно	0,22
Шкаф телемеханики	постоянно	0,5
Шкаф связи	постоянно	0,5
Шкаф телекоммуникационный	постоянно	0,25
Комплекс средств технической охраны	постоянно	2
Освещение периметра узла запорной арматуры и ПКУ	Периодически (1 раз в 4 мес)	1
Собственные нужды блок-контейнера (кондиционер - 0,8кВт, вентиляция - 0,3кВт, обогрев-4,5кВт, освещение рабочее - 0,08кВт, освещение ремонтное 0,25кВт)	постоянно	7,2
Станции катодной защиты	постоянно	0,1-6
Эл.обогрев шкафа приборного	В холодный период	0,5



**Рис. 1.** Солнечные батареи



**Рис. 2.** Ветрогенераторы



**Рис. 3.** ГЭС

К недостаткам ветрогенераторов относится непостоянство силы ветра и малая мощность единичного ветрогенератора.

Малые ГЭС для получения электроэнергии используют напор воды. Основным преимуществом данной станции является малая стоимость получаемой электроэнергии. В соответствии с определением Европейской ассоциации малой гидроэнергетики, Европейской комиссии и Международного союза производителей и поставщиков электричества (UNIPEDE) принято, что к малым ГЭС относятся станции мощностью до 10 МВт [6].

К недостаткам малых ГЭС относятся сезонность их работы. В зимний период, когда река покрыта льдом, малые ГЭС не функционируют.



Рис. 4.

Среди альтернативных источников электроэнергии наиболее популярными в мире являются ветро-солнечные (гибридные) электростанции, с точки зрения надежности они более стабильны, чем ветровые или солнечные электростанции в отдельности.

Сочетание использования энергии солнца и ветра в данных установках позволяет в течение календарного года обеспечивать потребителей электроэнергией практически при любых погодных условиях.

В случае отсутствия благоприятных условий (например, пасмурная безветренная погода, ночное время суток без ветра) питание потребителей осуществляется от аккумуляторных батарей, входящих в состав электростанции [2].

Турбодетандерная установка вырабатывает электричество за счет технологического снижения давления транспортируемого природного газа на газораспределительных станциях. Попадая на лопатки рабочего колеса, газ вращает его, отдавая энергию, при этом его давление снижается [7].

#### Выводы

Учитывая вышеизложенное можно сделать вывод, что для устранения недостатков альтернативных источников энергии наиболее перспективны источники с гибридным принципом работы, разработанные для конкретных климатических и природных условий.

#### Литература

- [1] Плавский Д.Н. Оборудование для противокоррозионной защиты стальных трубопроводов и конструкций. Инженерная практика №1 1/2015.
- [2] О.А. Туровин, Е.Н. Огнев, А.Е. Кочнев Научно-Технический Центр «Газпром нефти» (ООО «Газпромнефть НТЦ»).
- [3] <http://svetdv.ru/sun/index.shtml>.
- [4] Джумаев А.Я., АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА РАБОЧИЙ РЕЖИМ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СОЛНЕЧНОЙ СТАНЦИИ // Технические науки - от теории к практике: сб. ст. по матер. XLVI междунар. науч.-практ. конф. № 5(42). – Новосибирск: СибАК, 2015.
- [5] Renewable energy solutions Australia holdings LTD\_ <https://www.resau.com.au>.
- [6] Родионов В.Г., Энергетика проблемы настоящего и возможности будущего (стр. 99).
- [7] Международный научный журнал «ИННОВАЦИОННАЯ НАУКА» №3/2016 ISSN 2410-6070.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНО ВОЗМОЖНОГО КОЛИЧЕСТВА ОПАСНОГО ВЕЩЕСТВА, КОТОРОЕ МОЖЕТ УЧАСТВОВАТЬ ВО ВЗРЫВЕ ПРИ АВАРИИ

Габдрахманов А.Ф., Галеев А.Д., Поникаров С.И.

*Казанский национальный исследовательский технологический университет.*

*E-mail: ainur-14@mail.ru*

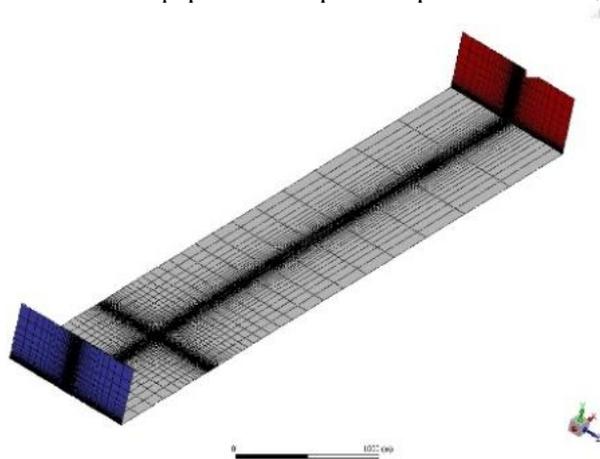
Химические заводы и объекты с использованием взрывоопасных химических веществ представляют большую угрозу для обслуживающего персонала и населения близлежащих населенных пунктов в случае с их аварийным выбросом в атмосферу. В большинстве случаев сырье и продукты химический предприятий имеют способность к горению, что представляет большую степень катастрофичности. Для возникновения процесса горения необходимы: горючее вещество, кислород, ис-

точник воспламенения (чаще всего взрыв возникает по причине искры, как правило в результате накопления статического электричества). Пары взрывоопасного вещества способны гореть лишь в определенном промежутке концентраций: между нижним концентрационным пределом распространения пламени (далее НКПР) и верхним концентрационным пределом распространения пламени (далее ВКПР). Невозможность воспламенения ниже НКПР обусловлено недостатком горючего, а выше ВКПР – его избытком.

Для решения важнейшей задачи пожарной и промышленной безопасности объектов химической промышленности – уменьшения материальных и людских потерь, необходимо заранее знать возможное развитие чрезвычайной ситуации. [3] Для этого необходимо разработать методику определения максимально возможного количества опасного вещества, которое может участвовать во взрыве при залповом выбросе взрывоопасного вещества из резервуара. Методом решения поставленной задачи явилось математическое моделирование с численной реализацией моделей на ЭВМ при помощи расчетного комплекса FLUENT.

В качестве взрывоопасного вещества принимался, широко используемый в нефтехимической и химической отрасли, пропан. Пропан представляет собой горючий газ, не имеет запаха и цвета. Его получают в процессе переработки нефти, а также с использованием некоторых других методик. Значения нижнего предела воспламенения и верхнего предела воспламенения принимались по пропану 2,1% и 9,5% соответственно.

Смоделирован пример разгерметизации резервуара РВС-30, привлекий к залповому выбросу сжиженного пропана. Состояние атмосферы – изотермия. Время экспозиции – 15 минут.

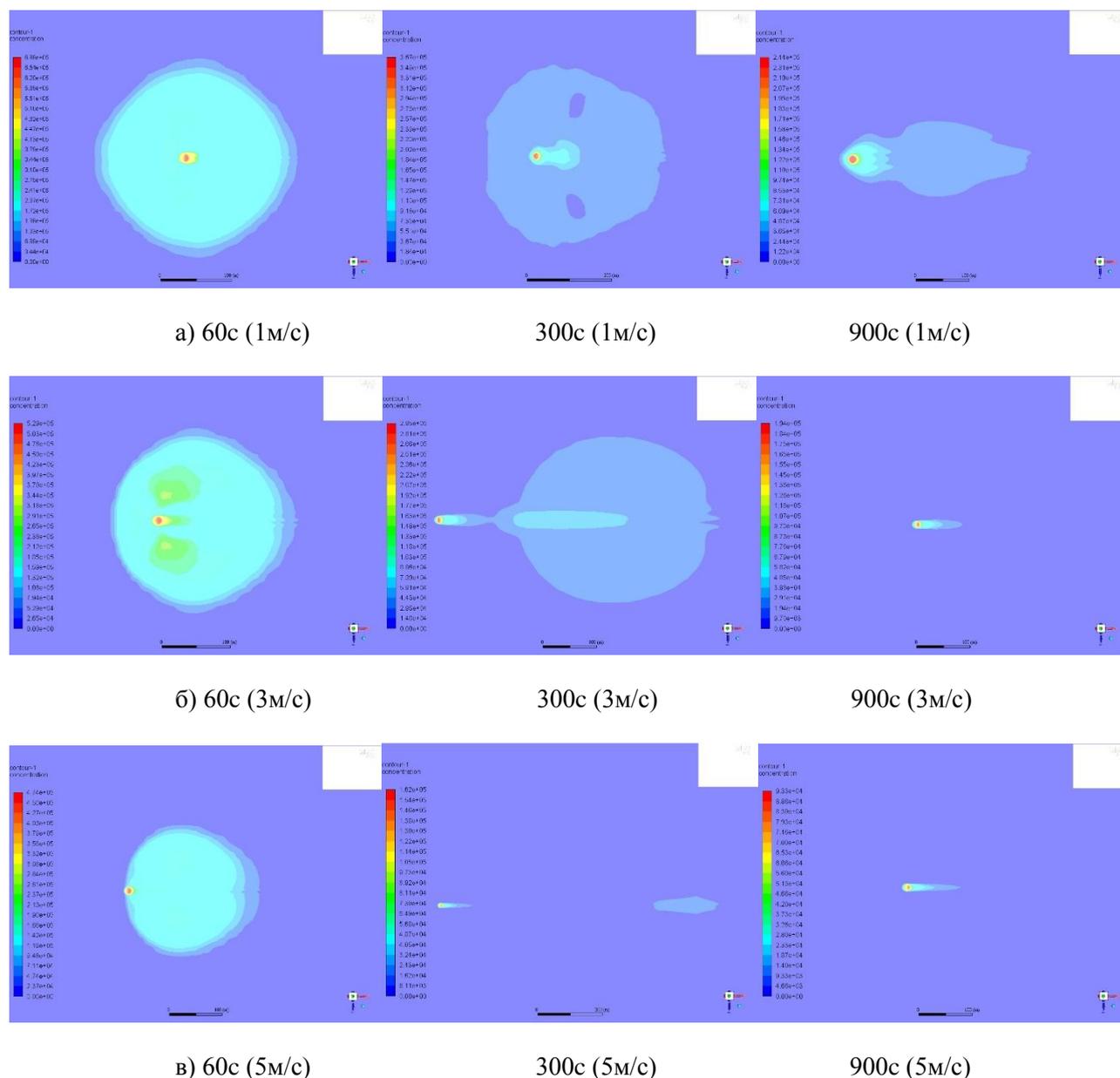


**Рис. 1.** Расчетная сетка

При разгерметизации оборудования происходит мгновенной вскипание определенного количества жидкости. В результате мгновенного вскипания этой жидкости происходит дробление жидкой фазы на части, потеря их устойчивости и образование мелких капель – аэрозолей. Количество вещества, перешедшего в первичное облако в виде аэрозолей, численно равняется количеству жидкости, мгновенно вскипевшей при разгерметизации резервуара. Время действия первичного облака задается равным 1 с [1].

При решении задачи, поставленной в данной работе, применялась структурированная сетка рис.1 из прямоугольных ячеек со сгущением их вблизи источника выброса, в местах предполагаемого возникновения больших градиентов концентрации примеси, скорости ветра и других переменных.

Источник первичного облака представлен в виде цилиндра с радиусом равным высоте. Источник газа из пролива представлен также в виде цилиндра с радиусом пролива и высотой 0,2(размер ячейки по вертикали, прилегающий к нижней границе расчетной области). Оставшаяся после мгновенного вскипания жидкость растекается на подстилающей поверхности с образованием слоя толщиной 0,05м. Расчет распространения опасного вещества в поле ветра проводится при значениях 1;3 и 5 м/с на высоте в 10 метров. После завершения расчетов были получены контурные графики распределения концентрации опасного вещества:



**Рис. 2.** Сравнение распределения концентрации облака пропана при скоростях ветра: а) 1м/с, б) 3м/с, в) 5м/с.

Исходя из рис. 1 можно определить следующее. В начальный момент облако опасного вещества распространяется во всех направлениях на расстояния многократно превышающий размеры источника выброса. При малых скоростях ветра наблюдается явление обратной плавучести, т.е. тяжелый газ распространяется против ветра. Максимум концентрации опасного вещества расположен в центре источника, равномерно понижающийся к его периферии. Рассеяние облаков происходит по разным эпизодам. Малая скорость ветра не позволяет быстро снизить концентрацию до безопасных значений. Рассеяние облака происходит вблизи аварийного участка. Первичное облако теряет свою устойчивость спустя продолжительное время в связи с малой турбулентностью, разделенные на малые фрагменты части облака рассеиваются ветром.

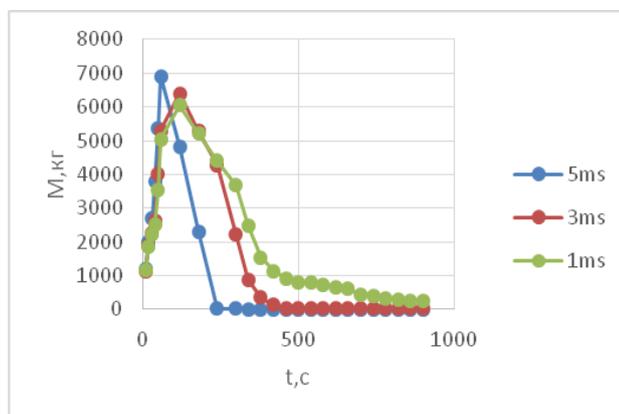
Ветер в 3 м/с приводит к минимизации опасной концентрации за тот же промежуток времени. В этом случае происходит отрыв основного облака от места выброса через 5 минут после разгерметизации емкости и его распространение в поле ветра с последующим рассеянием до безопасных значений.

Увеличение же скорости ветра в 5 м/с приводит к перемещению облака примерно через минуту после аварии. Отделение первичного облака происходит быстрее, его контур имеет удлиненное очертание, обусловленный влиянием высокой скорости ветра. Дальнейший выброс пропана в атмосферу обусловлен испарением газа из пролива. Данный эпизод считается наиболее безопасным, т.к. рассеяние доли газа, способного к воспламенению, происходит наиболее быстро.

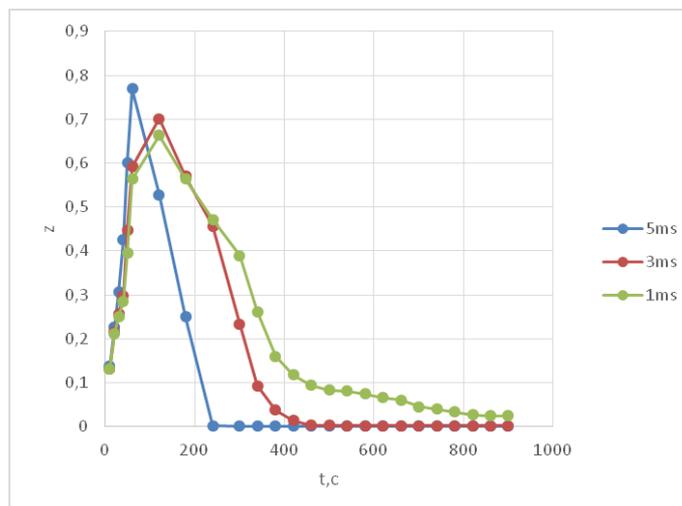
На рис.3 представлены временные зависимости доли горючего газа, способного к воспламенению, а на рис.4 временные зависимости коэффициента участия  $Z$ . Они имеют схожие графики.

Из графиков определим, что максимальная доля горючего газа, способного к воспламенению, находится в начальный момент времени в интервале от 60 до 120 секунд.

При изотермии величина  $Z$  со временем увеличивается в результате смешения горючего газа с воздухом до концентрации ниже ВКПР, достигая максимума, а затем снижается.



**Рис. 3.** График изменения количества взрывоопасного вещества с течением времени



**Рис. 4.** График изменения коэффициента участия горючего с течением времени

Во многих методиках предлагается принимать долю горючего газа, способного участвовать во взрыве,  $Z=0,1$ . Однако, данная величина со временем изменяется и на протяжении длительного промежутка времени может иметь значение, существенно превышающее рекомендуемое [4]. В то же время максимальная доля вещества соответствует  $Z=0,8$  рис.4, отметим при этом, что в это же примерно время в облаке достигается наибольшее количество взрывоопасной парогазовой смеси рис. 3. Таким образом, принимая при расчетах  $Z=0,1$ , мы заведомо можем занизить последствия аварий.

### Литература

- [1] Основы прогнозирования последствий промышленных аварий: учебное пособие / Галеев А.Д., Старовойтова Е.В., Салин А.А., Поникаров С.И.; Мин-во образования и науки России, Казан.нац.исслед.технол.ун-т.- Казань: Изд-во Академии наук РТ, 2017.-213с.
- [2] FLUENT Inc. Fluent 18.2.0
- [3] Прогнозирование распространения облаков легких и нейтральных газов при авариях на объектах химической промышленности/ Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н / Тюменев Т.Р.
- [4] Основы прогнозирования последствий аварийных залповых выбросов сжиженных газов: монография / Старовойтова Е.В., Галеев А.Д., Поникаров С.И.; М-во образ. и науки России, Казан.нац.исслед.технол.ун-т. – Казань : Изд-во КНИТУ, 2013.-155с.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРОВОЙ ЗАВЕСЫ ТРУБЧАТЫХ ПЕЧЕЙ

Аскарров И.В., Поникаров С.И., Галеев А.Д.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: asis.ru@mail.ru

Эффективными мероприятиями против взрыва являются установка паровых завес, создаваемых вокруг огневых печей. Паровые завесы печей, входящих в состав открытых технологических установок, позволяют исключить возможность контакта с огнем взрывоопасных паровоздушных смесей, образующихся при разливе горючих жидкостей и газов во время аварий технологических аппаратов [1].

Однако, как показывает практика, во многих установках технологических печей используется типовая паровая завеса, которая является неэффективной и не способна обеспечить необходимую степень защиты при авариях на этих производствах.

Из-за отсутствия рекомендательных документов по разработке эффективных паровых завес, вследствие недостаточной изученности сложного взаимодействия завесы и распространяющегося паровоздушного облака авторами было произведено CFD-моделирование паровой завесы.

Для достижения указанной цели решались следующие задачи:

1. Была разработана модель паровой завесы печи пиролиза цеха 58-68 завода «Этилен» ПАО «Казаньоргсинтез» на основе пакета гидродинамического анализа ANSYS Fluent.
2. На основе разработанной модели исследовали взаимодействие паровоздушного облака с паровой завесой.

Построение модели паровой завесы.

На первом этапе решения задачи осуществляется построение геометрии объекта и разбивка расчетной области на подобласти, построение сетки, постановка граничных условий.

Построение расчетной области и наложение на нее расчетной сетки производилось в препроцессоре Gambit. Расчетная область имеет форму параллелепипеда с размерами X-Y-Z= 1200x500x500 м.

Строилась неравномерная структурированная трехмерная сетка со сгущением узлов вблизи твердой поверхности, места выброса и паровых завес рис.1.

После создания сетки необходимо определить типы граничных условий.

Velocity inlet. Задается скорость потока, его направление и значения турбулентных характеристик. Для  $k-\varepsilon$  модели турбулентности необходимо определить компоненты скорости, кинетическую энергию турбулентности  $k$ , а также скорость ее диссипации  $\varepsilon$ . Данные профили задавались в программе ANSYS Fluent с помощью пользовательских функций.

Pressure outlet. Накладывается условие постоянного статического давления. Представляет собой выходное сечение расчетной области. Задавалось условие равенства нулю избыточного давления, а также значения температуры потока.

Wall. Использовалось для нижней границы. Здесь накладывается условие прилипания, при котором все компоненты скорости принимаются равными нулю.

Symmetry. На боковых и верхних границах задавались условия симметрии, т.е. равенства нулю нормальной к границе компоненты скорости и нормальных производных остальных переменных величин [2].

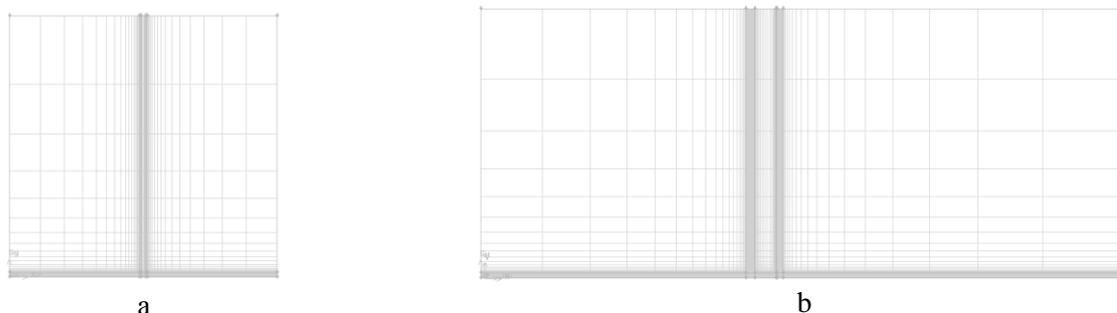


Рис. 1. Неравномерная структурированная сетка со сгущением ячеек:

а) входное сечение; б) боковая поверхность

Задание параметров источника выброса опасного вещества.

Моделировался сценарий с полным разрушением оборудования с выбросом всего опасного газообразного вещества в окружающую среду.

**Табл. 1.** Характеристика источника выброса

Опасное вещество	Этилен (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )
Температура в сосуде, °С	20
Давление в сосуде, МПа	3,8
Объем, м <sup>3</sup>	50
Плотность газа в оборудовании, кг/м <sup>3</sup>	60,5

Количество опасного вещества, поступившего в окружающее пространство в виде первичного облака,

$$G = \rho \cdot V = 60,5 \cdot 50 = 3024 \text{ кг}$$

Представляем источник первичного облака в виде цилиндра с радиусом равным высоте. Радиус цилиндра равен

$$R_f = H = \sqrt[3]{\frac{G}{\pi \cdot \rho_{\text{кип}}}} = \sqrt[3]{\frac{3024}{3,14 \cdot 1,1}} = 8 \text{ м}$$

В программе Fluent значение расхода источника задавалось в единицах кг/(м<sup>3</sup>·с), т.е. расход источника должен быть отнесен к объему источника первичного облака. Для того, чтобы определить источник, необходимо выделить область источника из основного объема расчетной области. Выделение реализуется с помощью команд Setting Up Domain → Mark/Adapt Cells → Region, где маркируются необходимые ячейки, и Setting Up Domain → Separate → Cells, где из основной области будет выделена новая область, определяющая источник первичного облака.

Далее задавались параметры источника выброса с помощью вызова команды Cell Zone Conditions → fluid:cloud, где в диалоговом окне подключалась вкладка Sours Terms. В полях Mass и c2h4 задавалось постоянное значение источника массы к объему источника. Источник выброса активен в течение 1 секунды.

Задание параметров паровой завесы.

Характеристики завесы приведены в табл. 2.

Параметры завесы задавались по тому же принципу, что и источник выброса опасного вещества: из расчетной зоны выделялись области, соответствующие положению паровых завес; далее с помощью команды Cell Zone Conditions → fluid:curtain во вкладке Sours Terms задавались следующие параметры завесы:

1. В поле Mass и h2o – постоянное значение источника массы к объему источника. Источник пара представлялся как истечение через отверстие под высоким давлением.
2. В поле Y momentum – значение импульса пара, выходящего из отверстия, к объему источника.
3. В поле Energy – энергия пара к объему источника.

**Табл. 2.** Характеристика паровой завесы

Тип завесы	П-образная
Расстояние от источника выброса до завесы, м	47
Количество ярусов (этажей) завесы	4
Расстояние от земли до первой завесы, м	2,4
Расстояние между завесами, м	2,2
Диаметр выпускного отверстия, мм	5
Давление пара в завесе, МПа	6
Температура пара, °С	220
Расход пара по периметру завесы, кг/с	3,28

Проведение расчета.

После просчитывался ветровой поток в стационарной постановке. Источники выброса опасного вещества и пара отключались. Также отключались лишние уравнения – уравнение энергии и переноса примеси.

Расчет распространения опасного вещества и ее контакт с паровой завесой проводился в нестационарной постановке, и подключались уравнения энергии и переноса примеси. Время наблюдения 250 секунд.

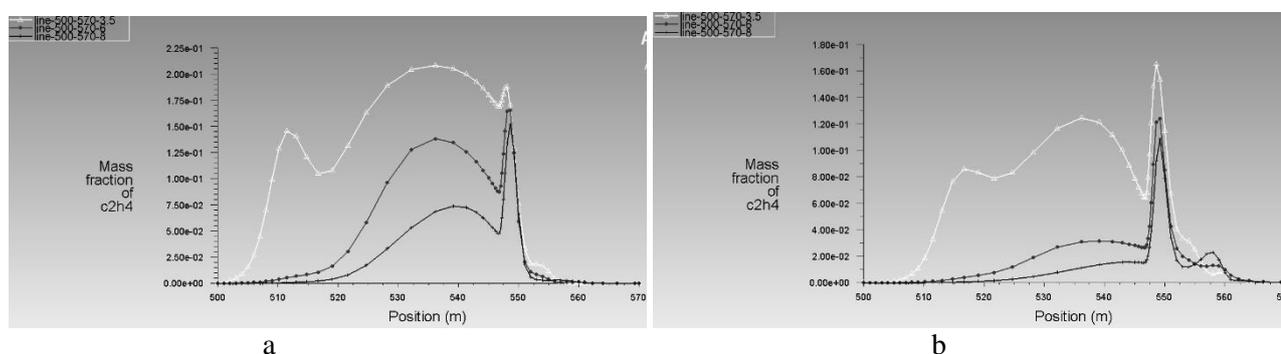
Анализ результатов моделирования.

Расстояние от источника выброса до завесы 47 метров. Согласно результатам расчета, при скорости ветра 1 м/с опасное облако достигает завесы за 30 секунд, т.е., чтобы включить в работу паровую завесу у оператора не более 30 секунд. Также важнейшим компонентом системы паротушения является группа сигнальных датчиков, с помощью которых осуществляется контроль уровня загазованности в районе печи и от их надежности и времени срабатывания зависит, какой сценарий приобретет авария.

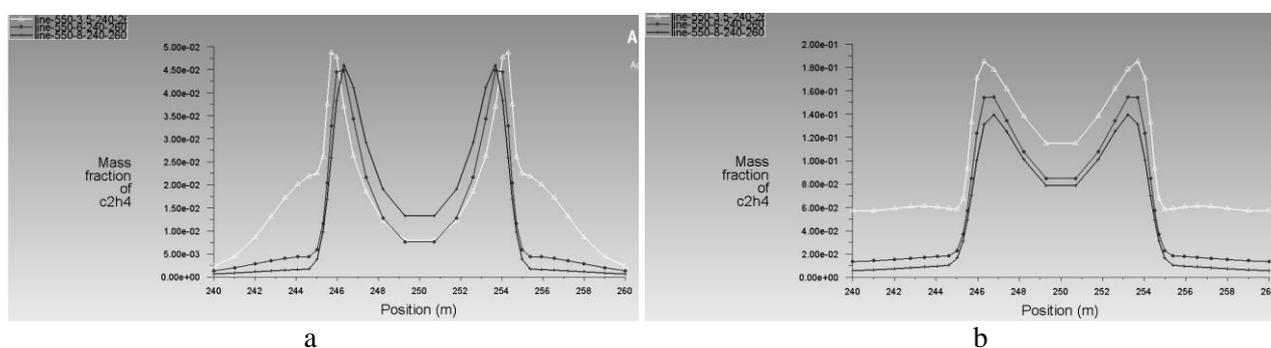


**Рис. 2.** Захватывание облака этилена паровой завесой:

1) источник выброса; 2) облако опасного вещества; 3) паровые завесы.



**Рис. 3.** Распределение концентрации этилена по направлению ветра: а) на 47 секунде после выброса; б) на 60 секунде после выброса



**Рис. 4.** Распределение концентрации этилена в поперечном сечении по направлению ветра на расстоянии 3 м после завесы: а) на 33 секунде после выброса; б) на 57 секунде после выброса

Еще одним интересным, но весьма ожидаемым является поведение опасного вещества – этилена. Этилен – нейтральной плавучести газ и при горизонтальной поверхности стелется по земле. Но как только облако достигает паровой завесы, из-за незащищенности участка от земли до первой завесы (2,4 м), начинается захватывание этилена восходящим потоком пара (рис.2). Таким образом, взрывоопасное облако проникает в защищаемую область и на 40-й секунде после выброса концентрация этилена достигает НКПР и дальше продолжает расти.

Анализируя графики, представленные на рис. 3, можно сказать, что на расстоянии 47 м от источника происходит падение концентрации этилена – облако достигает работающей завесы, где разбавляется водяным паром. Затем наблюдается резкий скачок, что объясняется подносом этилена из незащищенной приземной зоны самим же восходящим потоком пара. Далее же концентрация опасного вещества резко падает.

В ходе работы концентрация этилена контролировалась в районе горелок и горячих поверхностей печи (на высотах 3,5;6;8 метров от земли и 3 метра за завесой).

По графикам, предоставленным на рис.4, можно сделать аналогичные выводы: концентрация этилена резко возрастает за завесой и уменьшается по мере отдаления от завес.

Таким образом, по результатам моделирования можно сказать, что действующая паровая завеса не способна обеспечить необходимую степень защиты при авариях в районе технологической печи – требуется его оптимизация. В первую очередь необходимо защитить приземную область, откуда происходит проникновение взрывоопасного облака и его забор к горячим поверхностям печи.

### **Литература**

- [1] Абдрахимов Ю.Р., Закирова З.А. Производственная безопасность: учеб. пособие. Уфа, УГНТУ, 2006. 122 с.
- [2] Галеев А.Д. Основы прогнозирования последствий промышленных аварий: учебное пособие / Галеев А.Д., Старовойтова Е.В., Салин А.А., Поникаров С.И. //; М-во образ. и науки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. - Казань : Изд-во КНИТУ, 2013. - 155 с. - ISBN 978-5-7882-1512-9.

## **БЕЗОПАСНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ ХИМИЧЕСКИХ И НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ**

Измайлова А. Р., Хасанова В.К., Хайруллин Р.З.

*Казанский национальный исследовательский технологический университет.*

*E-mail: valerya29.11@mail.ru*

Повышение технического уровня производств нефтеперерабатывающей промышленности достигается как увеличением единичных мощностей первичной переработки нефти, так и дальнейшим расширением вторичных процессов. Однако это влечет за собой и повышение аварийной опасности, так как значительно возрастает количество хранимого и перерабатываемого пожаро-взрывоопасного или токсичного сырья на сравнительно небольшой производственной площади. Поэтому даже незначительные отклонения от приняты технологических параметров при обслуживании технологического процесса могут привести к созданию аварийной ситуации. Проблема предотвращения аварий на химических и нефтехимических производствах является чрезвычайно актуальной и требует незамедлительного решения не только в практическом плане, но также и в плане подготовки инженерных кадров в области безопасности технологических процессов и производств.

Традиционно такая подготовка заключается в изучении студентами технических вузов теоретических основ производственной безопасности, охраны труда и защиты в чрезвычайных ситуациях, а также в приобретении ими практических навыков в этой области. Кроме того, большое внимание при подготовке будущих инженеров нефтехимического комплекса уделяется изучению вопросов надежности оборудования и систем управления химико-технологическими процессами и производствами.

Современная химическая промышленность включает многочисленные и разнообразные, зачастую многостадийные, технологические процессы, в которых используется аппаратура и оборудование различных типов и конструкций.

Надежность технологического процесса – это свойство обеспечивать изготовление продукции в заданном объеме, сохраняя во времени установленные требования к ее качеству и постоянными (оптимальными) параметрами этого процесса.

Каждый химико-технологический процесс (ХТП) зависит от значительного количества факторов и причин, влияющих на ход данного процесса, оказывающих совместное, даже часто противоречивое действие. При исследовании и обеспечении надежности ХТП необходимо учитывать то, что они могут быть периодическими и непрерывными, при ведении одного (основного) процесса могут параллельно и одновременно протекать побочные (неосновные) процессы. Все это отражается на эффективности, устойчивости и надежности химико-технологического процесса. Необходимость, периодичность и продолжительность остановки оборудования определяются в зависимости от характера технологического процесса и возможности безопасного проведения работ с учетом данных статистики отказов оборудования. Все отказы в работе ХТП можно классифицировать по причинам их возникновения: А – отказы, происходящие вследствие организационных причин на производстве; Б – отказы, возникающие из-за отклонения параметров процесса и технических характеристик оборудования от оптимальных; В – отказы, возникающие вследствие протекания нежелательных побочных процессов.

Многие технологические процессы химических производств основаны на применении высоких давлений и температур, широком использовании взрыво- и пожароопасных и токсичных веществ в различных агрегатных состояниях, что выдвигает особо высокие требования к созданию и обеспечению безопасных условий труда и защите работающих от вредных воздействий химических веществ. Многообразии химических продуктов (перерабатываемого сырья, полупродуктов и готовой продукции) требует применения принципиально различных технических приемов и специфических способов защиты работающих. Все эти условия повышают требования к уровню подготовки персонала по вопросам промышленной безопасности, производственной санитарии и гигиены труда, техники безопасности.

В технологических процессах химических и нефтехимических производств используется большое количество различных агрессивных жидкостей. Для их перекачки используются насосы, самыми важными требованиями к которым являются надежность конструкции и коррозионная стойкость, герметичность, долговечность, простота и удобство обслуживания, минимальная трудоемкость ремонтных работ, эксплуатационная и пожарная безопасность.

В большинстве технологических процессов непосредственный контакт работающих с химическими веществами исключен, либо сокращен до минимума. Для этого процессы производства ведут в закрытой аппаратуре, а там, где это невозможно, капсулируют и отделяют рабочую зону от открытых химических продуктов. Безопасность технологических процессов и отдельных производственных операций можно существенно повысить, например, если заменить сухой размолом твердых веществ мокрым, транспортировать сыпучие продукты пневмотранспортом, подавать пылящие токсичные продукты не в сухом виде, а в виде пасты или раствора.

Безопасность технологического процесса зависит от многих факторов и определяется способом производства и его аппаратным оформлением, степенью непрерывности процесса и его стабильностью, оптимальными рабочими параметрами, количеством, составом, свойствами и агрегатным состоянием исходных, промежуточных и конечных продуктов, скоростью и глубиной протекания химических реакций, способами регулирования давления и температуры, режимом пуска и остановки производственного оборудования и т. д.

Важное значение для безопасности технологических процессов имеет их автоматизация и комплексная механизация, наличие специальных защитных устройств и ограждений, герметичность, механизация и коррозионная стойкость, а также прочность производственного оборудования. Поэтому все эти факторы должны быть неукоснительно соблюдены при проектировании технологического процесса во избежание возникновения аварийных ситуаций.

Оборудование химических и нефтеперерабатывающих предприятий, как правило, работает в системе определенного технологического процесса или производства, поэтому безопасность его нельзя рассматривать только обособленно, необходимо учитывать, что связанные с ним звенья технологической цепи могут инициировать такие опасности, которые не предусмотрены нормативно-техническими показателями отдельных видов аппаратуры. Поэтому важно, чтобы была обеспечена безопасность всего производственного процесса. Это возможно при строгом соблюдении параметров эксплуатации всего оборудования и коммуникаций в целом.

В промышленном производстве используются десятки различных экзотермических и эндотермических химических процессов, с помощью которых получают сотни разнообразных веществ и материалов. Кроме того, нефтехимические производства характеризуются огромным количеством разнообразных пожароопасных и взрывоопасных процессов, безопасное ведение которых зависит от технологии и оснащения эффективными средствами контроля, регулирования и противоаварийной защиты.

Другая характерная особенность нефтехимических производств заключается в том, что технологические процессы в них могут происходить при высоких (или низких) температурах и давлениях, обрабатываемые материалы могут быть токсичными, коррозионно-активными. Это предопределяет необходимость принятия ряда специфических конструктивных решений, обуславливающих безопасность эксплуатации оборудования в таких условиях, его экологическое совершенство, высокую эффективность и долговечность.

Нарушение технологического режима и требований безопасности при процессах выпаривания, разгонки, дистилляции горючих и легко воспламеняющихся жидкостей в современных химических, нефтеперерабатывающих и нефтехимических производствах с крупнотоннажными агрегатами могут привести к крупным авариям, взрывам, пожарам и несчастным случаям. Поэтому важнейшим условием нормального ведения технологического процесса является строгое соблюдение параметров,

предусмотренных технологическими регламентами, а также надежная система автоматизации и контроля технологических процессов.

Очень важно, что основы безопасности современного химического производства должны обеспечиваться еще на стадии исследовательских работ, при разработке технологического процесса, конструкции оборудования, контрольно-измерительных приборов и средств автоматизации, а также при разработке проекта.

Особое внимание следует обращать на оснащенность блокировкой и сигнализацией наиболее опасных участков. Не вызывает сомнений и тот факт, что безопасность работы персонала достигается правильной организацией и соблюдением техники безопасности, а также анализом причин возможных несчастных случаев и аварий. Запрещается ввод в эксплуатацию цехов и производств, не отвечающих требованиям охраны труда и техники безопасности.

При дальнейшем увеличении мощностей химических и нефтехимических производств следует разрабатывать технологические процессы с комплексной переработкой сырья, внедрять более эффективные методы очистки газовых выбросов, создавать долговечное герметичное оборудование. Все это позволит уменьшить вероятность возникновения аварий и создать безопасные и здоровые условия труда в химической и нефтехимической промышленности, а также повысить культуру производства.

### **Литература**

- [1] Производственная санитария и гигиена труда: учебное пособие / Б.М. Азизов, И.В. Чепегин; Федер. Агентство по образованию, Казан. Гос. Технол. ун-т. – Казань: КГТУ, 2015. – 587с.
- [2] ЭБС КнигаФонд <http://www.knigafund.ru> (Доступ из любой точки Интернета после регистрации с IP- адресов КНИТУ).
- [3] ЭБС Юрайт <http://www.biblio-online.ru> (Доступ из любой точки Интернета после регистрации с IP- адресов КНИТУ).

## **ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА НПЗ**

Кожемятов К.Ю., Булавка Ю.А.

*Полоцкий государственный университет. E-mail: ulia-1917@yandex.by*

Установки НПЗ являются опасными производственными объектами [1], в связи с этим к оборудованию, применяемому на них предъявляются жесткие требования по обеспечению промышленной безопасности. Основная часть технологических процессов на НПЗ связана с нагреванием, охлаждением, испарением, конденсацией и кристаллизацией участвующих в процессе сырья и продуктов. Что требуют всестороннего изучения тепловых свойств нефти и нефтепродуктов. Для более эффективно-го использования тепловой энергии технологических потоков и снижения себестоимости получаемых продуктов широко используется теплообменное оборудование, составляющее более 30% емкостного оборудования предприятия [2].

Для оценки текущего состояния оборудования на белорусских НПЗ при проведении остановочных ремонтов, а также при проведении технического диагностирования [3, 4] для определения пригодности к дальнейшей эксплуатации оборудования, отработавшего нормативный срок, на практике хорошо себя зарекомендовала следующая комбинация методов неразрушающего контроля:

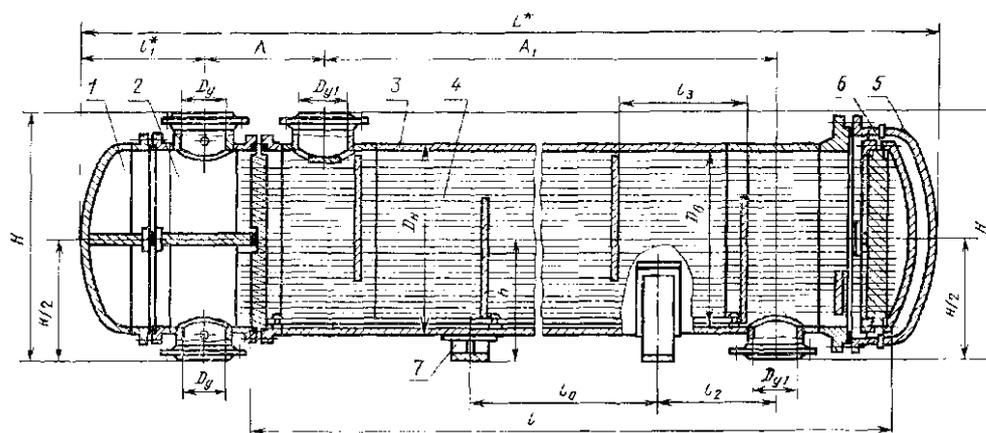
- визуальный контроль в доступных местах в соответствии с требованиями СТБ1133-98 «Методы контроля внешним осмотром и измерениями» [3];
- ультразвуковая толщинометрия элементов корпуса и патрубков штуцеров проводится в соответствии с СТБ EN 14127:2011 «Контроль неразрушающий. Ультразвуковое измерение толщины» [3];
- ультразвуковая диагностика сварных швов, а также контроль сплошности основного металла проводится в соответствии с ГОСТ 24507-80 «Контроль неразрушающий. Поковки из черных и цветных металлов. Методы ультразвуковой дефектоскопии» [3] и ГОСТ 14782-86 «Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Методы ультразвуковые» [3];
- цветная дефектоскопия проводится в соответствии с СТБ 1172-99 «Контроль неразрушающий. Контроль проникающими веществами (капиллярный). Общие положения» [3];

- гидравлическое испытание на прочность и плотность проводится в соответствии с требованиями «Правил по обеспечению промышленной безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением» [1].

Данный комплекс методов позволяет всесторонне оценить текущее состояние сосудов и сделать заключение о пригодности к дальнейшей эксплуатации данного сосуда.

На наиболее крупном по количеству перерабатываемого сырья белорусском НПЗ получили наибольшее распространение следующие виды теплообменного оборудования: кожухотрубчатые теплообменники с подвижной трубной системой; кожухотрубчатые теплообменники жесткотрубные; теплообменники типа «труба в трубе», в том числе скребковые кристаллизаторы.

Наиболее распространены кожухотрубчатые теплообменники с плавающей головкой и с U-образным трубным пучком, изготовленные в соответствии с ГОСТ 27601-88. Принципиальная конструкция представлена на рис. 1.



**Рис. 1.** Кожухотрубчатый теплообменник с плавающей головкой: 1- крышка распределительной камеры, 2- распределительная камера, 3- корпус, 4- трубный пучок, 5- крышка корпуса, 6- плавающая головка, 7- опора.

К несомненным достоинствам данных типов теплообменников можно отнести простоту обслуживания и чистки. Во время остановочных ремонтов производится демонтаж распределительной камеры и извлечение трубного пучка. При этом становятся доступными для визуального осмотра вся внутренняя поверхность корпуса, в том числе сварные швы корпуса и швы приварки патрубков штуцеров к корпусу и распределительной камере.

К наиболее распространенным дефектам, выявляемым в кожухотрубчатых теплообменниках, относятся:

- коррозионный износ патрубков штуцеров входа-выхода теплоносителей. Выявляется с помощью ультразвуковой толщинометрии стенок патрубков штуцеров. Замер производится не менее чем в 4 точках по сечению патрубка [3]. Штуцера с уловным проходом более Ду100 дополнительно контролируются визуальным осмотром в доступных местах.

- коррозионно-эрозионный износ основного металла и металла сварных швов корпуса и распределительной камеры. Контролируется визуально и с помощью ультразвуковой толщинометрии. В местах, вызывающих подозрение на наличие дефектов дополнительно может проводиться ультразвуковая диагностика и цветная дефектоскопия. К утонению металла корпуса, особенно в нижней части обечайки, может приводить частая выемка трубного пучка. При извлечении пучка перегородки трубного пучка, которые имеют диаметр близкий к внутреннему диаметру корпуса теплообменника для недопущения перетока теплоносителя через зазор между стенкой корпуса и перегородкой, трутся на сухую об нижнюю часть корпуса. От температурной деформации и достаточной длины возможна деформация пучка, что способствует дополнительному давлению на перегородки, и как следствие, усиленному износу нижней части корпуса.

- коррозионный износ труб трубного пучка. Контролируется гидравлическим испытанием по межтрубному пространству.

- коррозионный износ и утонение металла в местах вальцовки трубок в трубных досках. Контролируется гидравлическим испытанием по межтрубному пространству.

Уменьшение количества эксплуатационных дефектов и увеличение сроков безремонтной наработки оборудования возможно достичь:

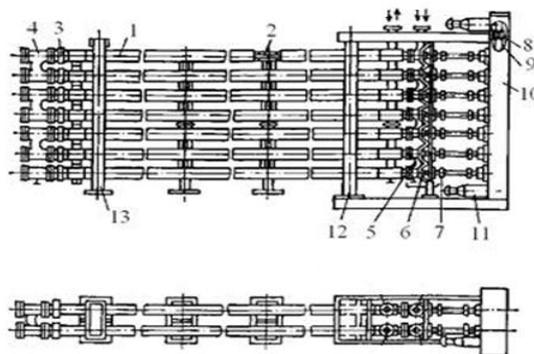
- увеличение толщины металла патрубков штуцеров. Несмотря на увеличение стоимости такого оборудования, таким образом можно добиться безремонтной эксплуатации оборудования даже после окончания назначенного срока службы. При этом качество ремонта по месту в силу ряда причин зачастую хуже по сравнению с качеством сварочных работ при изготовлении, особенно с сосудами, которые подвергаются послесварочной термической обработке. Отсюда следует, что отсутствие дополнительных термических вмешательств благоприятно сказывается на надежности оборудования.

- жесткий контроль за эксплуатацией теплообменного оборудования. Зачастую пропуски в местах вальцовки труб вызваны деформацией труб избыточным давлением в межтрубном пространстве при заполнении аппарата. Для уравнивания давления и снижения вероятности деформации труб заполнения аппаратов необходимо производить начиная с трубного пучка.

Схожими по конструкции являются жесткотрубные кожухотрубчатые теплообменники. Как следует из названия, трубки трубного пучка с двух сторон теплообменника жестко закреплены с помощью сварки либо вальцовки к трубным решеткам.

Выявляемые дефекты те же, что и в кожухотрубчатых теплообменниках. Но при этом отсутствует возможность визуального контроля внутренней поверхности корпуса. Для повышения уровня контроля и выявления дефектов на более ранних стадиях для теплообменников таких типов составляются карты замеров толщины стенок с увеличенным числом точек контроля по сравнению с теплообменниками с подвижной трубной системой.

Кроме того, жесткотрубные теплообменники для компенсации температурных расширений снабжаются сильфонными компенсаторами. Компенсаторы изготавливаются из тонкостенной нержавеющей стали. При этом, исходя из практического опыта эксплуатации устройств с линзовым компенсатором нередко наблюдалась ситуация, при которой толщина стенки корпуса имела достаточный запас до отбраковочной толщины, а линзовый компенсатор приходил в негодность в следствии коррозионно-эрозионного износа. Ремонт теплообменников данного типа нецелесообразен по причине неразборной конструкции: разборка, замена изношенных участков обечайки либо труб трубного пучка, замена компенсатора, последующая сборка сопоставимы по стоимости с новыми теплообменниками.



**Рис. 2.** Скребокый кристаллизатор: 1 - трубная секция, 2 - скребковое устройство, 3 - линзовый компенсатор, 4 - колач задний, 5 - колач передний, 6 - уплотнение вала, 7 - промежуточный валик с шарнирными устройствами, 8 - ведущая звездочка, 9 - роликовая цепь, 10 - корпус привода, 11 - двигатель с редуктором, 12 - передняя стойка, 13 - задняя стойка.

Наиболее сложными по оценке технического состояния являются теплообменники типа «труба в трубе», в частности скребковые кристаллизаторы, оснащенные дополнительно скребковым валом внутри внутренних труб теплообменников. Принципиальная конструкция таких устройств представлена на рис. 2. Помимо агрессивного коррозионного воздействия среды на износ внутренних труб влияет трение скребков. При осевом смещении вала при сборке, либо неравномерном износе подшипников происходит усиленный износ композитных прокладок скребков вала, а далее трение металла скребка об внутреннюю поверхность труб. При этом отсутствует возможность контроля состояния скребковых прокладок и внутренних труб кристаллизатора – трубы недоступны для полноценного визуального контроля, невозможно проведение ультразвуковой толщинометрии. Для оценки состояния данных технических устройств используется ультразвуковая толщинометрия наружных

труб, визуальный осмотр внутренних труб в доступных местах при помощи просвета фонарем вдоль оси трубы, а также гидравлическое испытание на герметичность и плотность внутренних труб. При подозрении на дефект либо выявлении следов механической выработки производится замена внутренней трубы. При этом в таких аппаратах целесообразно применение труб из твердых марок сталей для уменьшения механической выработки внутренней поверхности труб.

Таким образом, анализ практического опыта эксплуатации теплообменного оборудования на белорусском НПЗ позволил выявить проблемы с которыми сталкиваются эксперты в области промышленной безопасности в ходе проведения неразрушающего контроля на данном типе оборудования.

### Литература

- [1] Кожемятов, К.Ю. Анализ практической применимости «Правил по обеспечению промышленной безопасности оборудования, работающего под избыточным давлением» на белорусских нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях/ К.Ю. Кожемятов, Ю.А. Булавка // Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах: материалы XII Международ. науч.-практ. конф. / Под ред.: С. Г. Костюк. – Кемерово : КузГТУ, 2017.- С.116-122.
- [2] Кожемятов, К.Ю. Совершенствование подбора человеческих ресурсов для нефтегазовой отрасли / К.Ю. Кожемятов, Ю.А. Булавка, Д.С.Юхно // Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России: сборник тезисов XII Всероссийская научно-техническая конференция (12-14 февраля 2018 г., г. Москва).- РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина.- Москва, 2018.-С.493
- [3] Кожемятов, К.Ю. Анализ практического опыта эксплуатации теплообменного оборудования на нефтеперерабатывающем заводе/ К.Ю. Кожемятов, Ю.А. Булавка // Безопасность. Современные технологии в энергетике. Всероссийская специализированная научно-практической конференции молодых специалистов (с международным участием), 29–30 марта 2018 г.: сб. докл./ под общ. ред. С.В. Сафронова. – М.: ОАО «ВТИ», 2018 –С.299-304.
- [4] Кожемятов К.Ю. Повышение надежности эксплуатации теплообменного оборудования на нефтеперерабатывающем заводе/ К.Ю. Кожемятов, Ю.А. Булавка // Сборник докладов 72-й Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ – 2018» (23-26 апреля 2018 г. Москва). – Том 2.-М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2018. –С.189

## ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ОТБОР КАК МЕТОД ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ НА НПЗ

Юхно Д.С., Булавка Ю.А.

*Полоцкий государственный университет. E-mail: u.bylavka@psu.by*

Ежегодно в мире на нефтеперерабатывающих и нефтехимических предприятиях происходит до 1500 аварий, 4 % которых уносят от 150 до 200 человеческих жизней, материальный ущерб в среднем составляет свыше 100 млн. долларов в год [1,2]. Актуальной проблемой современности является обеспечение безопасности функционирования НПЗ, эксплуатация которых осуществляется с повышенным риском аварий [3,4], одним из элементов снижения вероятности аварийных ситуаций является снижение влияния «человеческого» фактора в обеспечении промышленной безопасности, что и определило цель настоящего исследования.

Профессия оператора технологических установок одна из самых массовых в нефтеперерабатывающей промышленности и самых ответственных, т.к. их ошибочные действия могут привести к возникновению чрезвычайных ситуаций. Внедрение на НПЗ современных автоматизированных систем управления технологическим процессом, систем противоаварийной автоматической защиты и дистанционного управления, увеличение числа технологических параметров, подлежащих управлению, снижение двигательной активности, существенно изменило характер трудовой деятельности операторов, что обуславливает повышение требований к скорости реакций работников, в т.ч. к действиям в чрезвычайных ситуациях; к точности измерений состояния системы управления технологическим процессом, увеличением объема и значимости производственной информации. Ошибочные действия нефтяников могут повлечь за собой огромные невосполнимые человеческие жертвы и финансовые затраты. Достоверно установлено, что около 80 % несчастных случаев на производстве на НПЗ и 30 % аварийных ситуаций происходят по причинам, связанным с «человеческим фактором» [1,2]. Для успешного решения производственных задач оператору технологических установок требуется напряжение памяти и внимания, оперативное мышление, быстрота и точность реакций, сохранение

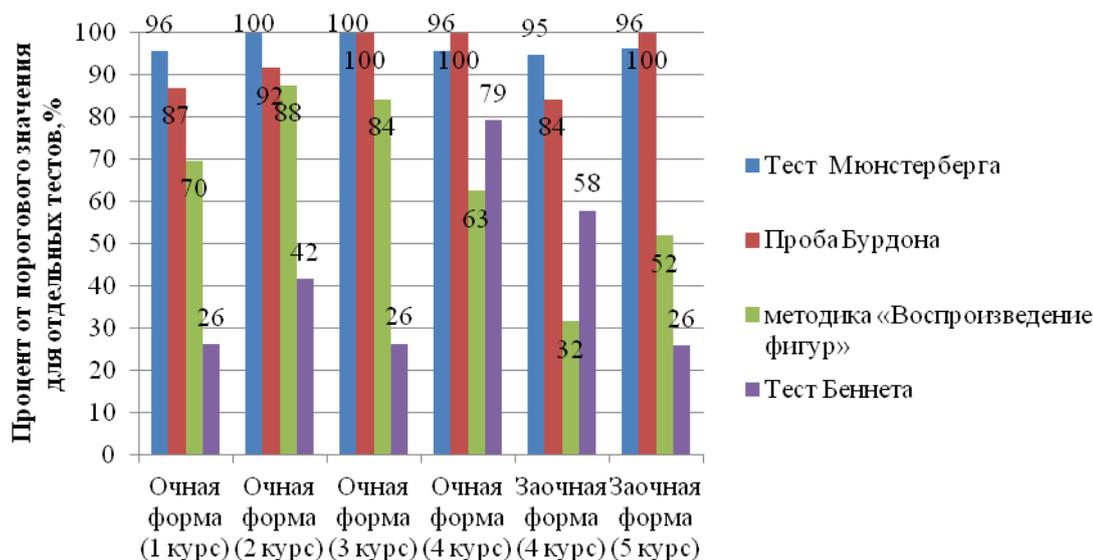
самообладания в аварийных ситуациях и др. качества, связанные как с индивидуальными особенностями нервной системы, так и с формированием важных для профессии качеств оператора.

Несоответствие ряда физиологических и психологических параметров работника требованиям, предъявляемым профессией, может быть, с одной стороны, причиной перенапряжения, а с другой стороны, может стать причиной несчастных случаев на производстве и аварийных ситуаций. Основными профессионально значимыми психофизиологическими качествами оператора технологических установок являются такие, как: внимание, память, технический интеллект, логическое мышление, зрительное восприятие; а также личностные качества - ответственность и эмоциональная устойчивость.

В настоящее время профессиональный отбор потенциальных работников для НПЗ осуществляется по уровню образования и квалификации, и выявлением медицинских противопоказаний к данной профессии, при этом можно оценить зрительное восприятие и эмоциональная устойчивость, однако не учитываются психофизиологические качества кандидатов, память и внимание, технический интеллект. Для осуществления профессионального отбора оператора технологических установок подобраны четыре психодиагностические методики, отвечающие требованиям надежности и валидности [3,4]: методика корректурной пробы Бурдона для исследования устойчивости и распределения внимания; теста Мюнстерберга для исследования избирательности и концентрации внимания; методика «Воспроизведение фигур» для исследования кратковременной и долговременной памяти; тест механической понятливости Беннета для исследования технического интеллекта

Программа протестирована на четырёх группах, общее количество опрошенных составило более 150 человек. Исследуемые группы, студенты либо выпускники специальности «Химическая технология природных энергоносителей и углеродных материалов» Полоцкого государственного университета (1, 2, 3, 4 и 5-го года обучения очной и заочной форм).

Сложившаяся практика подготовки специалистов химиков-технологов показала, что все выпускники вузов начинают карьеру с самой первой степени, в большинстве случаев юноши получают профессию оператор технологических установок. Анализ результатов исследования профессионально важных качеств для профессии оператор технологических установок показал высокий уровень устойчивости и концентрации внимания для студентов всех форм обучения, и лучшие показатели по запоминанию и техническому интеллекту у очной формы по сравнению с заочной рис. 1.



**Рис. 1.** Результаты исследования профессионально важных качеств для профессии оператор технологических установок

При сравнении групп заочников видно, что по развитию памяти выпускная группа выше, что вероятно обусловлено активизацией интеллектуальной деятельности в последний год обучения, однако по техническому интеллекту студенты четвертого года показали более чем в два раза лучший результат, чем студенты пятого курса, что, вероятно, связано с тем, что большинство студентов четвертого года работают по профессиям связанным с эксплуатацией оборудования, техники и технологий. Результаты анализа профессионально важные качества среди мужчин показали, что кратковременная и долговременная память более развита среди очников у юношей.

Результаты тестов на уровень технического интеллекта также выше среди мужчин, обучавшихся как в очной, так и в заочной форме, уровень устойчивости и концентрации внимания практически одинаков для обоих полов, но уровень запоминания у женщин, в заочной форме, выше чем у мужчин.

Студенты очной формы по всем тестам показывают результаты выше, чем студенты заочной формы, что обусловлено необходимостью постоянной тренировки памяти, внимания и технического интеллекта на протяжении всего семестра, большим объемом воспринимаемого учебного материала и ступеней периодического контроля знаний, к примеру, рейтинговый контроль предусмотрен только для студентов очной формы обучения.

Профессиональная пригодность оценивалась по минимальным показателям, полученным в группе контроля по инженерно-техническим работникам белорусского НПЗ, условная пригодность оценивалась по пороговым значениям для отдельных тестов. Выполненные диагностические исследования с использованием программного комплекса для профессионального отбора студентов профильных специальностей для работы в нефтегазовой отрасли показали, что 9 % студентов очной формы выпускных курсов (по мужчинам 9,5 %), и только 2 % студентов заочной формы (по мужчинам 3 %) можно отнести к профпригодным к профессии оператор, к условно пригодным можно отнести 28 % студентов очной формы (по мужчинам 26 %), и 17 % студентов заочной формы (по мужчинам 16 %).

Внедрение системы оценки профессиональной пригодности оператора для работы на НПЗ принесёт как социальный, так и экономический эффект, выражающийся в сокращении числа аварийных ситуаций, обусловленных «человеческим фактором».

### Литература

- [1] Булавка, Ю.А. Концептуальный подход к оценке профессионального риска на опасных производственных объектах / Ю.А.Булавка, О.О. Смиловенко, // Чрезвычайные ситуации: образование и наука, Том 8, №1.– 2013 . – С.125-131.
- [2] Булавка, Ю.А. Проблема выбора наиболее опасного аппарата для оценки взрывоопасности технологического блока на нефтеперерабатывающих и нефтехимических производства / Ю.А. Булавка //Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. - 2016. - № 11. - С. 125-129.
- [3] Кожемятов, К.Ю. Совершенствование подбора человеческих ресурсов для нефтегазовой отрасли / К.Ю. Кожемятов, Ю.А. Булавка, Д.С. Юхно // Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России: Сборник тезисов XII Всероссийская научно-техническая конференция (12-14 февраля 2018 г., г. Москва).- РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина.- Москва, 2018.-С.493.
- [4] Yukhno, D.S., Bulauka, Y.A. Reduction of occupational risks for workers of the oil refinery by introducing of automated system for evaluation of professional ability of operators/ D.S. Yukhno, Y.A. Bulauka // Tatarstan UpExPro 2018: материалы II Международной молодежной конференции (14–17 февраля 2018 г., Казань). – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2018. –С.101-102.

## СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ CO<sub>2</sub>

Гафуров Н.М., Гатина Р.З.

*Казанский национальный исследовательский технологический университет*

*E-mail: hankmpro@mail.ru*

На нефтехимических производствах тепловые потоки низкого потенциала с температурой меньше 90 °С для жидких сред и температурой меньше 150 °С для газообразных сред практически не находят применения, т.е. попросту выбрасываются в окружающую среду. Примером может служить стадия газоразделения совместного производства этилена и пропилена, в котором имеется значительный резерв неиспользуемого низкопотенциального тепла оборотной воды (до 47 °С) и отработанного пара низких параметров (до 143 °С) [1].

В большинстве случаев утилизация неиспользуемого низкопотенциального тепла осуществляется путем прямой прокачки пресной озерной или речной воды через теплообменники-охладители, и затем возвращение её в естественные водоёмы без предварительного охлаждения. Причем для соблюдения нормативных требований «Правил охраны поверхностных вод», ограничивающих повышение температуры не более чем на 5 °С зимой и на 3 °С – летом, требуется прокачивать огромные

расходы охлаждающей воды со значительными затратами электрической мощности на приводы циркуляционных насосов. Поэтому объемы тепловых выбросов соизмеримы с объемами потребления топливно-энергетических ресурсов, и представляет собой термическое загрязнение окружающей среды.

В настоящее время проводятся исследования и разработки новых систем охлаждения, в которых промежуточным теплоносителем вместо воды служит низкокипящее рабочее тело, которое испаряется в поверхностном теплообменнике-испарителе, расширяется в турбодетандере и конденсируется затем в охладительной башне, где теплота конденсации передается наружному воздуху. При этом главным достоинством низкокипящего рабочего тела является возможность его адаптации к различным источникам тепловой энергии. За счет варьирования рабочего тела его можно использовать в широком диапазоне температур и давлений.

Учитывая суровые климатические условия России и продолжительность зимнего периода времени появляется возможность осуществления низкотемпературных термодинамических циклов с использованием низкокипящих рабочих тел. Поэтому предлагается способ утилизации тепловых потоков нефтехимического производства с помощью низкотемпературного теплового двигателя с замкнутым контуром циркуляции на сжиженном  $\text{CO}_2$  с возможностью дополнительной выработки электроэнергии в зимний период времени рис. 1.

Углекислый газ широко используется в холодильных установках, не имеет цвета, запаха и не токсичен, а его использование в различных агрегатных состояниях позволяет решать различные технологические задачи. При этом обезвоженный диоксид углерода (как газообразный, так и жидкий) не подвергает коррозии металлов. Однако температурный диапазон использования сжиженного газа  $\text{CO}_2$  в качестве низкокипящего рабочего тела в низкотемпературном тепловом двигателе ограничивается показателями критической температуры в  $31\text{ }^\circ\text{C}$  и температурой в тройной точке минус  $56,56\text{ }^\circ\text{C}$ . Поэтому использование сжиженного газа  $\text{CO}_2$  в температурном диапазоне от  $80\text{ }^\circ\text{C}$  до минус  $55\text{ }^\circ\text{C}$  позволит обеспечить приемлемые давления контура циркуляции теплового двигателя и затраты на его сжатие [2].

Низкотемпературный тепловой двигатель на  $\text{CO}_2$  рис. 1 работает следующим образом. Сжиженный углекислый газ сжимают в насосе до высокого давления  $7,45\text{ МПа}$  и направляют в теплообменник-испаритель, где осуществляется процесс нагрева и испарения сжиженного углекислого газа до перегретого состояния за счет подводимой теплоты от нефтехимических производств. Полученный перегретый газ  $\text{CO}_2$  направляют в турбодетандер, где в процессе расширения газа происходит снижение его температуры и давления, а мощность на валу турбодетандера передается соединенному на одном валу электрогенератору.

После турбодетандера углекислый газ с температурой в  $4,31\text{ }^\circ\text{C}$  направляют в конденсатор воздушного охлаждения, который охлаждается наружным воздухом окружающей среды при температуре около минус  $10\text{ }^\circ\text{C}$ . В процессе охлаждения углекислого газа ниже его температуры насыщения происходит процесс интенсивного сжижения, после чего сжиженный газ с температурой в  $1,25\text{ }^\circ\text{C}$  направляют в насос и цикл повторяется [3].

Таким образом, допустимый температурный перепад в  $52\text{ }^\circ\text{C}$  обеспечивает дополнительную выработку полезной электрической мощности в  $1,05\text{ МВт}$  низкотемпературным тепловым двигателем на  $\text{CO}_2$  без использования дополнительного топлива и без увеличения эмиссии вредных веществ. При этом эксергетическая эффективность данной установки может достигать  $30\text{ }%$  при температурном перепаде в  $60\text{ }^\circ\text{C}$  между источником низкопотенциальной теплоты и окружающей средой. Однако наибольшей термодинамической эффективности можно достичь при более низких температурах окружающей среды рис. 2.

Возможность применения  $\text{CO}_2$  в качестве низкокипящего рабочего тела обусловлено его термодинамическими и теплофизическими свойствами. Поэтому сравним основные термодинамические и теплофизические свойства  $\text{CO}_2$  со свойствами воды  $\text{H}_2\text{O}$ , которая является традиционным теплоносителем и рабочим телом для теплоэнергетических станций (табл. 1).

Из таблица видно, что углекислый газ обладает уникальными свойствами по сравнению с традиционным теплоносителем  $\text{H}_2\text{O}$ . В частности  $\text{CO}_2$  характеризуется высокой плотностью и теплопроводностью газообразной фазы, имеет низкую кинематическую вязкость жидкой и газообразной фазы, характеризуется низкой удельной теплотой парообразования, что позволяет создавать на их основе малогабаритные и весьма эффективные низкотемпературные тепловые двигатели.

При этом создание конструкций низкотемпературного теплового двигателя на  $\text{CO}_2$  возможно из обычных материалов и отечественных комплектующих (низкий уровень температур, минимальные окружные скорости и напряжения).

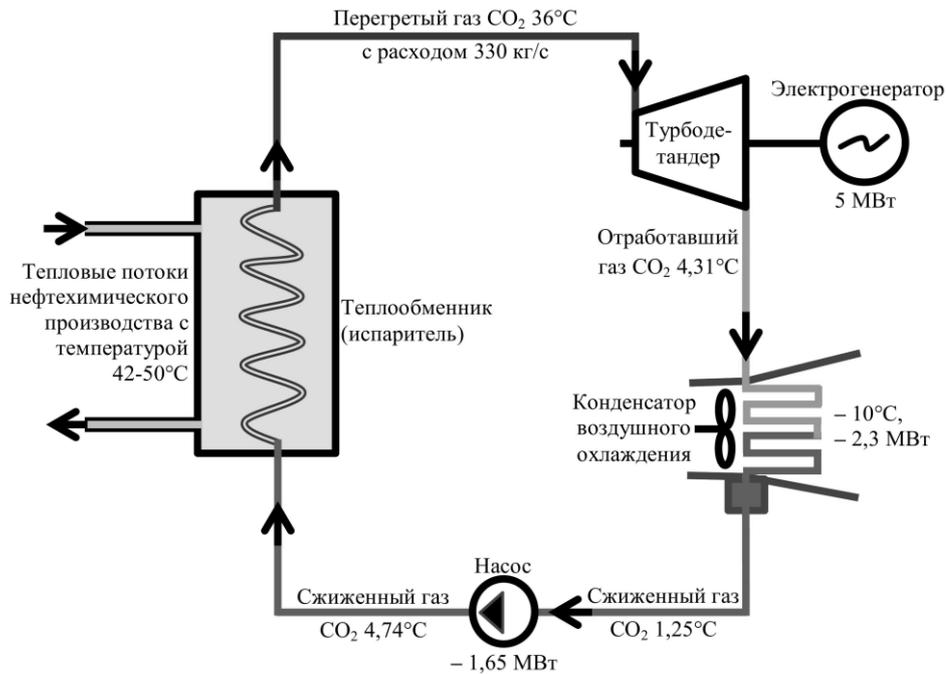


Рис. 1. Принципиальная схема способа работы низкотемпературного теплового двигателя на CO<sub>2</sub> от источника низкопотенциальной теплоты в зимний период времени

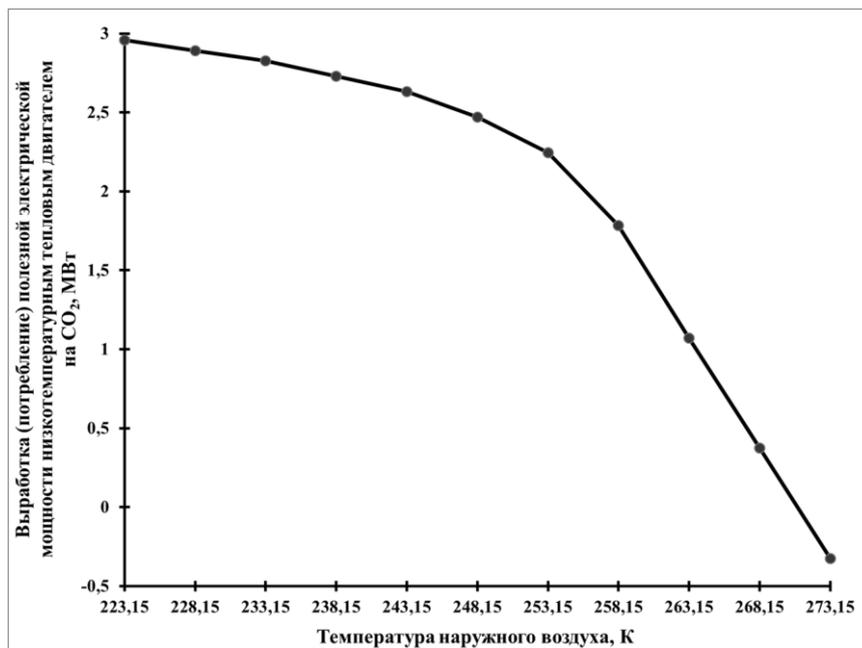


Рис. 2. Показатель прироста дополнительной выработки электроэнергии с помощью низкотемпературного теплового двигателя на CO<sub>2</sub> в зимний период времени

Учитывая, что основным фактором влияния на глобальное потепление является эмиссия парниковых газов, в первую очередь углекислого газа CO<sub>2</sub>, то в будущем наиболее экономически эффективным решением должно стать извлечение углекислого газа из дымовых газов и непосредственное его использование в качестве рабочего тела для различных тепловых машин. При этом наиболее доступным способом извлечения углекислого газа из дымовых газов является абсорбционно-десорбционный способ с использованием в качестве абсорбента водного раствора моноэтаноламина (или аммиака). Все технологические процессы выполняются идентично: промывка дымовых газов раствором абсорбента, при котором раствор поглощает CO<sub>2</sub>, далее раствор направляется в десорбер, где за счет подвода теплоты регенерируется и из него выделяется чистый CO<sub>2</sub>, и затем раствор снова возвращается в абсорбер [4].

**Таблица.** Термодинамические и теплофизические свойства CO<sub>2</sub> в сравнении с H<sub>2</sub>O

Показатель параметра, размерность	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Преимущества
Температура тройной точки, К	216,59	273,16	CO <sub>2</sub>
Давление тройной точки, МПа	0,518	0,00061	CO <sub>2</sub>
Плотность жидкой фазы, кг/м <sup>3</sup>	896	1000	H <sub>2</sub> O
Плотность газообразной (паровой) фазы, кг/м <sup>3</sup>	114	0,0068	CO <sub>2</sub>
Кинематическая вязкость жидкой фазы, см <sup>2</sup> /с	0,001	0,015	CO <sub>2</sub>
Кинематическая вязкость газообразной (паровой) фазы, см <sup>2</sup> /с	0,0013	13,36	CO <sub>2</sub>
Теплопроводность жидкой фазы, Вт/м·К	0,1043	0,57	H <sub>2</sub> O
Теплопроводность газообразной фазы, Вт/м·К	0,0216	0,0173	CO <sub>2</sub>
Удельная теплота парообразования, кДж/кг	215	2489	CO <sub>2</sub>
Критическая температура, К	304,13	647,1	CO <sub>2</sub>
Критическое давление, МПа	7,3773	22,064	CO <sub>2</sub>
Максимальная температура нагрева, К	2000	2000	-

Также возможно обеспечение пожарной безопасности нефтехимических производств, когда в случаи необходимости и предусмотренной дополнительной коммуникации перенаправлять углекислый газ высокого давления, циркулирующий в замкнутом контуре низкотемпературного теплового двигателя, на тушение пожаров, путем осуществления процесса дросселирования углекислого газа высокого давления с образованием хлопьев углекислотного «снега», что является наиболее эффективным и дешевым способом.

### **Литература**

- [1] Утилизация вторичных энергоресурсов в нефтехимической промышленности. [Электронный ресурс] / Режим доступа: [http://www.ateffekt.ru/publ/teploobmenniki/utilizacija\\_vtorichnykh\\_energoresursov\\_v\\_neftekhimicheskoy\\_promyshlennosti/6-1-0-95](http://www.ateffekt.ru/publ/teploobmenniki/utilizacija_vtorichnykh_energoresursov_v_neftekhimicheskoy_promyshlennosti/6-1-0-95).
- [2] Гафуров А.М., Гатина Р.З. Выбор низкокиспящего рабочего тела по термодинамическим показателям для использования в тепловом двигателе в области температур от 80°С до минус 55°С. // Форум молодых ученых. – 2017. – №5 (9). – С. 493-496.
- [3] Гатина Р.З., Хакимуллин Б.Р., Потапов А.А. Возможности использования тепловых отходов промышленности для выработки электроэнергии. // Форум молодых ученых. – 2017. – №10 (14). – С. 181-184.
- [4] Гафуров А.М., Осипов Б.М., Гатина Р.З., Гафуров Н.М. Возможные пути снижения выбросов углекислого газа. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. – № 9-10 – С. 21-31.

### **ВОЗМОЖНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ (НА ПРИМЕРЕ СЕПАРАТОРА, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ОЧИСТКИ ГАЗА ОТ КАПЕЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ) С ДЕФЕКТАМИ ТИПА «ВМЯТИНА»**

Валеев С.И., Соловьева Р.М.

*Казанский национальный исследовательский технологический университет.*

*E-mail: nogumanovar@bk.ru*

Самыми распространенными техническими устройствами нефтехимической отрасли, являются аппараты и сосуды.

В процессе производства, а также монтажа аппараты и сосуды подвергаются различного рода повреждениям в виде вмятины.

Под вмятиной понимается дефект поверхности элемента оборудования в виде локального полового углубления, возникшего в результате механического взаимодействия с твердым телом, при этом сплошность металла поверхности повреждаемого элемента не нарушается.

Очевидно, что при эксплуатации данного оборудования должны возникнуть различного рода напряжения в зоне вмятины, нарушение работы аппарата, уменьшение ресурса данного аппарата и снижение несущей способности сосуда. Все эти факторы должны вывести аппарат из строя, дальнейшая эксплуатация которого возможна после ремонта.

Рассмотрим вмятину, образованную при монтаже оборудования, расположенную на цилиндрической обечайке сепаратора изготовленного из стали 12Х18Н10Т представленного на рис. 1. Цель данной работы заключается в подтверждении работоспособности сепаратора.

Для более полного понимания задачи, а также представления оборудования, о котором идет речь, ответим на вопрос: Что же такое сепарация?

Сепарация – это разделение смесей разнородных частиц, в нашем случае разделение газа от капелек жидкости в газе, которыми он насыщается по мере подъема газа из скважины. При сепарации компоненты не изменяют своего фазового и химического состава. Для этого и предназначено оборудование под названием Сепаратор, это оборудование имеет лидирующие позиции не только в химической и нефтехимической отрасли, но и в других отраслях производства, где требуется разделение компонентов.

На обечайку в ходе монтажа была нанесена круговая вмятина радиусом 41 мм и глубиной 16 мм.

Таблица

Исходные данные	
Диаметр, мм (внутренний)	1200
Толщина стенки, мм	10
Расчетное давление, МПа	1,6
Max температура рабочей среды, °С	45
Min температура рабочей среды, °С	5



Рис. 1. Модель сепаратора предназначенного для очистки газа от капельной жидкости

Согласно документу, СО 153-34.17.439-2003 «Инструкция по продлению срока службы сосудов, работающих под давлением», рассмотрим, допустим, ли данный дефект при эксплуатации аппарата.

По выполненным измерениям определяем относительный прогиб:

$$\text{При условии: } m = n = r_b * 2 = 41 * 2 = 82 \text{ мм} \quad (1)$$

$$\frac{\delta}{m} * 100\% = \frac{16}{82} * 100\% = 19,51\% \quad (2)$$

Сразу видно, что относительный прогиб не попадает под нормативы, вследствие чего требуется дополнительно оценить возможность дальнейшей безопасной эксплуатации сосуда с вмятиной.

Выполним проверку прочности обечайки с вмятиной при нагружении внутренним избыточным давлением согласно ГОСТ Р 52857.11-2007 «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Метод расчета на прочность обечаек и днищ с учетом смещения кромок сварных соединений, угловатости и некруглости обечаек».

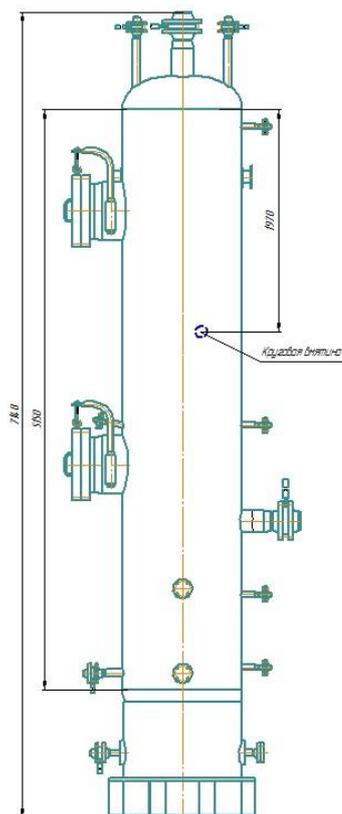


Рис. 2. Геометрическое расположение круговой вмятины

Условие прочности:

$$\sigma_{\max} \leq 3\varphi[\sigma] \quad (3)$$

$$\sigma_{\max} = \alpha\sigma\sigma_n \quad (4)$$

где  $\varphi=0.9$  – коэффициент прочности сварных соединений

$[\sigma]=180,875$  МПа – допускаемое напряжение материала обечайки и днища при  $t = 45^\circ\text{C}$

$\sigma_n$ -номинальные напряжения, МПа;

$\alpha\sigma$ -коэффициент концентрации;

Первым делом рассчитываем номинальное напряжение  $\sigma_n$ :

$$\sigma_n = \frac{pD}{2(s-c)} = \frac{0.016 \cdot 10^6 \cdot 1.2}{2 \cdot (0.01 - 0.002)} = 1,2 \text{ МПа} \quad (5)$$

Далее рассчитываем коэффициент концентрации  $\alpha\sigma$ :

$$\alpha\sigma = 1 + B \cdot \left(\frac{\delta'}{m_2}\right)^m = 1 + 1.33 \cdot \left(\frac{0.160}{0.350}\right)^{0.350} = 2,01 \quad (6)$$

$$B = -0.234 \cdot \frac{r}{Ds} + \frac{r}{\sqrt{Ds}} + 1.05 = -0.234 \cdot \frac{0.041^2}{1.2 \cdot 0.01} + \frac{0.041}{\sqrt{1.2 \cdot 0.01}} + 1.05 = 1.33 \quad (7)$$

$$m = 0.315 \cdot \frac{r}{\sqrt{Ds}} + 0.232 = 0.350 \quad (8)$$

$$\delta' = \delta \cdot (1 - \sigma/R) = 0.16 \cdot (1 - 1.2/481) = 0.160 \quad (9)$$

Где  $R$ - минимальное значение временного сопротивления (предела прочности) при расчетной температуре МПа.

Отсюда следует, что при круглой вмятине максимальное напряжение на корпусе обечайки равно (3):

$$\sigma_{\max} = 2,01 \cdot 1,2 = 2,412 \text{ МПа}$$

Далее получим условие прочности для цилиндрической обечайки (4):

$$\sigma_{\max} \leq 3\varphi[\sigma] = 3 \cdot 0,9 \cdot 2,412 = 6,51 \text{ МПа}$$

$$6,51 < 180,875 \text{ МПа}$$

Проведенные расчеты позволяют сделать вывод, что максимальные расчетные напряжения для материала обечайки в районе вмятины меньше допустимого напряжения для бездефектного материала обечайки. Следовательно, наличие вмятины на поверхности обечайки сосуда не приведут к меха-

ническим разрушениям, а также работоспособность аппарата не будет нарушена и выдержит весь срок службы.

### Литература

- [1] Валеев С.И., Ларин А.А.. Исследование структуры металла оборудования длительное время находящегося в эксплуатации // В сборнике: Перспективы развития науки и образования Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции в 13 томах. Тамбов. Часть 3. 2015. С.28-30.
- [2] Валеев С.И., Поникаров С.И. Техническая диагностика. Казан.нац.исслед.технол.ун-т.-Казань: Изд-во Академия наук РТ, 2015.-124 с.
- [3] Ивасишина Ю.Б., Валеев С.И. Безопасная эксплуатация линзовых компенсаторов с дефектами формы // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т.17, № 9, с.237-238.
- [4] Информационно - поисковая система [http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS\\_Ru](http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru)
- [5] Кантор Б.Я., Долинский В.М., Онацкий Р.Л. Влияние вмятин на несущую способность сосудов//Вестник НТУ «ХПИ».- 2010.- 99 с.
- [6] Кантор Б.Я., Шупиков А.Н., Онацкий Р.Л. Разрушение цилиндрической оболочки в зоне вмятины по действию внутреннего давления // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012.- 7 с.

## ПРОВЕРКА МОДЕЛИ ЗАЩИТНОЙ ПАРОВОЙ ЗАВЕСЫ ПРИ ПОМОЩИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Насибуллин Р.Р., Галеев А.Д., Поникаров С.И.

*Казанский национальный исследовательский технологический университет.*

*E-mail: rail90ongp@yandex.ru*

Нефть, в процессе её подготовки и переработки, необходимо нагревать до определённых температур. Эту задачу в промышленности выполняют высокопроизводительные трубчатые технологические печи [1]. Нефть, перемещаясь по трубам внутри корпуса печи, нагревается горячими продуктами сгорания топлива, которое подаётся и горит при помощи горелок печи. С точки зрения промышленной безопасности, технологические печи несут повышенный риск возникновения опасных ситуаций, ведь на производственных площадках нефтегазовой отрасли промышленности получают, обращаются или хранятся легко воспламеняющиеся газы, такие, как например, сжиженный пропан. Образованное в результате аварийной разгерметизации ёмкости горючее парогазовое облако, достигнув печи, может вызвать взрыв с последующим развитием пожара. С целью снижения или полного устранения вероятности возникновения указанных случаев, используют паровые завесы, формируемые вокруг печей, которые призваны блокировать проникновение горючих газов извне во внутрь печи.

Паровые завесы представляют собой преграду определённой высоты из потоков водяного пара, формируемых вокруг защищаемого объекта. Потоки создаются при помощи трубопровода с верхней перфорацией, внутри которого водяной пар содержится под определённым давлением и температурой. Вырываясь наружу сквозь отверстия трубы, расположенной на уровне земли вдоль периметра печи, водяной пар создаёт завесу, которая призвана задерживать перемещение горючего облака в зону горения печи. Потоки пара завесы, помимо экранирования, также обезвреживают опасное горючее облако, поднимая его выше уровня защищаемого объекта, интенсивно рассеивая на высоте с одновременным разбавлением горючего газа водяным паром.

Существует небольшое количество документов и стандартов [2], в которых содержатся методы и рекомендации по проектированию завес. Но, к сожалению, данные методы недостаточно параметризованы и они не позволяют выявить эффективность спроектированных завес. К тому же, опасные происшествия могут развиваться в очень широком диапазоне переменных параметров: количество выбрасываемого в атмосферу сжиженного газа, метеоусловия, характер промышленной застройки и т.д. Поэтому авторами данной статьи была разработана методика, которая позволяла бы количественно определять эффективность защиты паровых завес, учитывающая все внешние факторы, оказывающие влияние на развитие аварии. Основу методики оценки защитной способности паровых завес составляет математическая модель в виде системы дифференциальных уравнений с определёнными начальными и граничными условиями, и от того, насколько правильно они заданы, зависит точность результатов расчёта методики. Поэтому в данной работе было осуществлено сравнение результатов лабораторного эксперимента рассеивания газового облака паровой завесой, выполнен-

ных сторонними авторами натурно [3], с рассчитанными по математической модели результатами численного эксперимента, полностью идентичного по исходным данным реальному.

### Исходные данные эксперимента

В статье [3] отражены условия проведения и результаты лабораторного эксперимента по исследованию защитной способности паровой завесы. На лабораторной установке, изображённой на рис. 1, проводилась серия из трёх экспериментов по выпуску углекислого газа расходом в 15,6 л/с при помощи баллонов и присоединённого к ним приспособления, выравнивающего газы потоки. В первом эксперименте газ распространялся в пространстве без паровой преграды, во втором и третьем исследованиях – при работающих завесах со значениями давления пара в подводящем трубопроводе в 3 кгс/см<sup>2</sup> и 5 кгс/см<sup>2</sup>. С помощью воздуходувного устройства в зоне действия завесы создавался ветер со скоростью 1,5 м/с. Трубопровод, формирующий паровую преграду, находится на расстоянии 4 метров от места выхода газа наружу, в небольшом углублении поверхности площадки так, чтобы паровая завеса начиналась с уровня пола лабораторной установки. Потоки пара выпускаются вверх при помощи форсунок диаметром 8 мм, установленных на трубе, с расстоянием между форсунками в 20 см. Углекислый газ в экспериментах выпускался до момента, когда его концентрация с подветренной стороны завесы становилась постоянной (не зависящей от времени), после чего подача газа прекращалась. Датчики, измеряющие концентрацию углекислого газа, расположены на расстоянии в 1 метр перпендикулярно от линии завесы по направлению ветра, на высоте в 5 см от уровня пола установки.

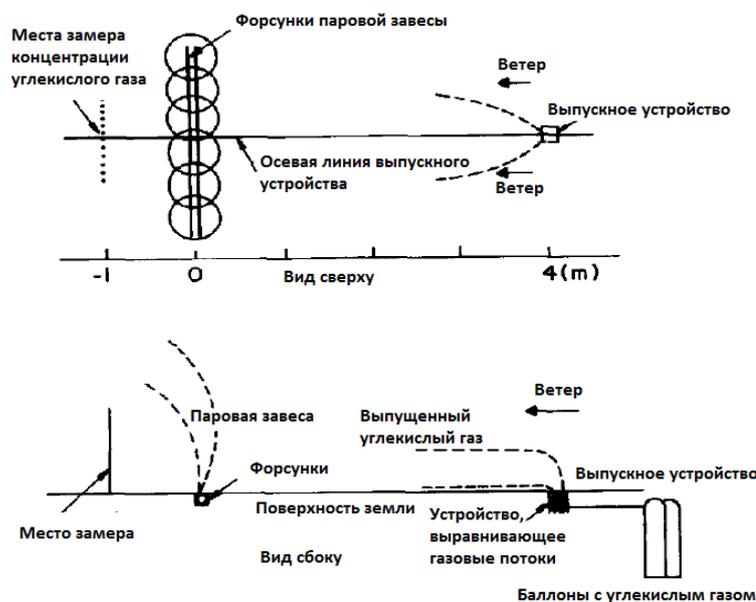


Рис. 1. Схематическое изображение лабораторной установки

Разработанная с целью анализа работоспособности паровой завесы математическая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений сохранения массы, энергии и импульса, дополненную уравнениями к-ε модели турбулентности. Решение указанных уравнений осуществлялось численным способом, основанным на методе конечных объёмов, специализированной расчётной CFD программой Fluent [4]. Все геометрические характеристики эксперимента были учтены при помощи создания трёхмерной сетки с размерами, равными пространственным величинам лабораторной установки. Ветер моделировался при помощи задания на входной грани расчётной области граничного условия в виде массового потока воздуха со скоростью в 1,5 м/с. Шероховатость на поверхности пола была принята как высота шероховатости для материала бетона. На выходной грани расчётной области устанавливалось граничное условие нулевого избыточного давления, на боковых гранях, перпендикулярных потоку – условие симметрии. Устройство, высвобождающее углекислый газ, моделировалось при помощи выделения группы ячеек на расчётной сетке по реальным его размерам (20 см × 20 см) согласно местоположению на лабораторной установке рис. 1. К уравнениям сохранения массы и химической компоненты, описывающих данную группу ячеек, добавляются члены источника, соответствующие значению расхода углекислого газа. Таким же образом моделируем завесу: выделяем на нижней грани группу ячеек в виде линии с соответствующей длиной и расположением,

устанавливаем значения массового расхода пара завесы в членах источника уравнения неразрывности и сохранения химической компоненты. Прежде чем задать массовый расход пара, необходимо определить характер и режим истечения потока завесы через форсунки. Эта задача решалась при помощи методики, изложенной в документе [2], которая учитывает площадь отверстий, из которых пар вырывается наружу, состояние пара в подводящем трубопроводе (давление, плотность, температуру и т.д.). Все рассчитанные величины, необходимые для вычисления массовой скорости истечения пара, выражены в таблице 1. Согласно режиму истечения пара (сверхзвуковое движение на выходе из сопла), массовый расход определялся по уравнению:

$$q = S \cdot \mu \left[ P_2 \cdot \rho_2 \cdot \gamma \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)} \right]^{1/2},$$

где  $q$  - массовый расход пара, кг/с;  $S$  - площадь отверстия форсунки, м<sup>2</sup>;  $\rho_2$  - плотность пара при температуре и давлении в паропроводе, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  - коэффициент истечения ( $\mu=0,3$  по умолчанию);  $\gamma$  - показатель адиабаты пара.

**Таблица.** Рассчитанные параметры потока пара завесы

Параметр завесы	Давление пара	Значение
Массовый расход пара $q$ , кг/с	3 кгс/см <sup>2</sup>	0,0187
	5 кгс/см <sup>2</sup>	0,0306
Температура пара, $K$	3 кгс/см <sup>2</sup>	406
	5 кгс/см <sup>2</sup>	425
Показатель адиабаты пара $\gamma$	3 кгс/см <sup>2</sup>	1,31
	5 кгс/см <sup>2</sup>	
$\frac{P_0}{P_2}$	3 кгс/см <sup>2</sup>	0,34
	5 кгс/см <sup>2</sup>	0,2
$\left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma/(\gamma-1)}$	3 кгс/см <sup>2</sup>	0,54
	5 кгс/см <sup>2</sup>	

где  $P_0$  – давление окружающей среды. Начальными параметрами турбулентности для источников выброса газа, потоков ветра и пара были установлены гидравлический диаметр и интенсивность турбулентности. Последний параметр приближённо можно вычислить по уравнению:

$$I = \frac{v'}{v_{\text{сред}}} = 0,16 (\text{Re}_{D_H})^{-1/8}$$

где  $I$  - интенсивность турбулентности, %;  $v'$  - пульсационная скорость потока, м/с;  $v_{\text{сред}}$  - осредненная скорость потока, м/с;  $\text{Re}_{D_H}$  - число Рейнольдса движущегося потока; Плотность пара и участвующих в эксперименте газов вычислялись по уравнению состояния идеального газа:

$$\rho = \frac{P}{RT}$$

где  $\rho$  - плотность вещества потока, кг/м<sup>3</sup>;  $P$  - давление потока вещества, Па;  $R$  - универсальная газовая постоянная,  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{моль} \cdot \text{К}}$ ;  $T$  - температура потока, К.

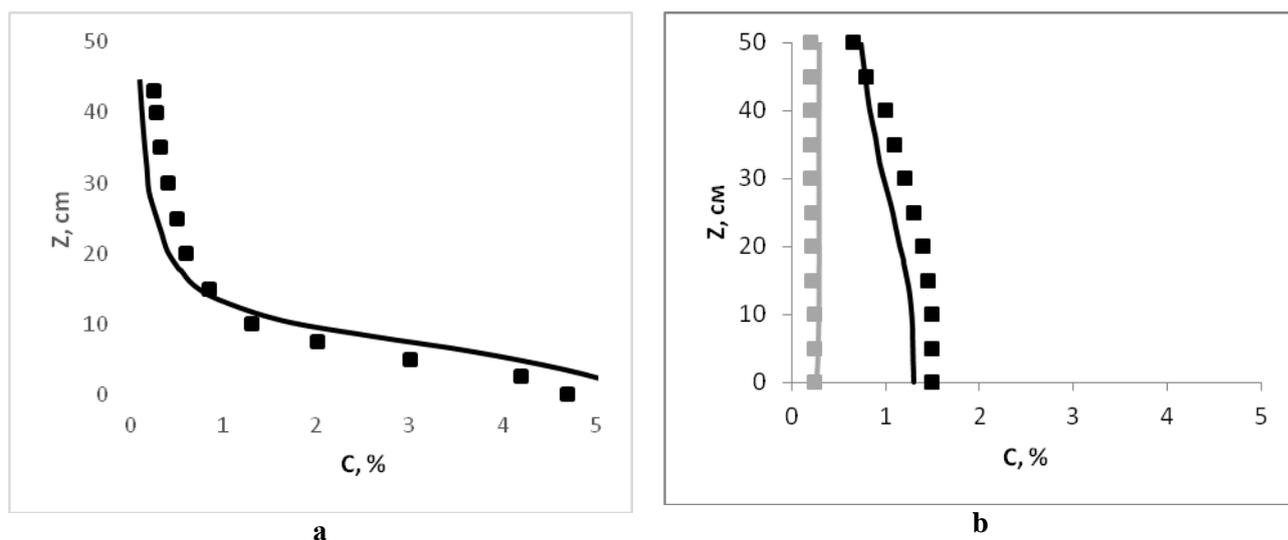
### Результаты расчетов и выводы

Численное моделирование защиты паровой завесы проводилось в полном соответствии с реальными экспериментами, для чего была построена трёхмерная сеточная расчётная область, в которой, в соответствии с геометрией и местоположением отдельных элементов установки, имитировались физические процессы эксперимента. Граничные и начальные условия для паровой завесы устанавливались в соответствии с рассчитанными параметрами, отражёнными в таблице 1, начальные турбулентные характеристики, температура, скорость потоков для завесы, окружающего воздуха, ис-

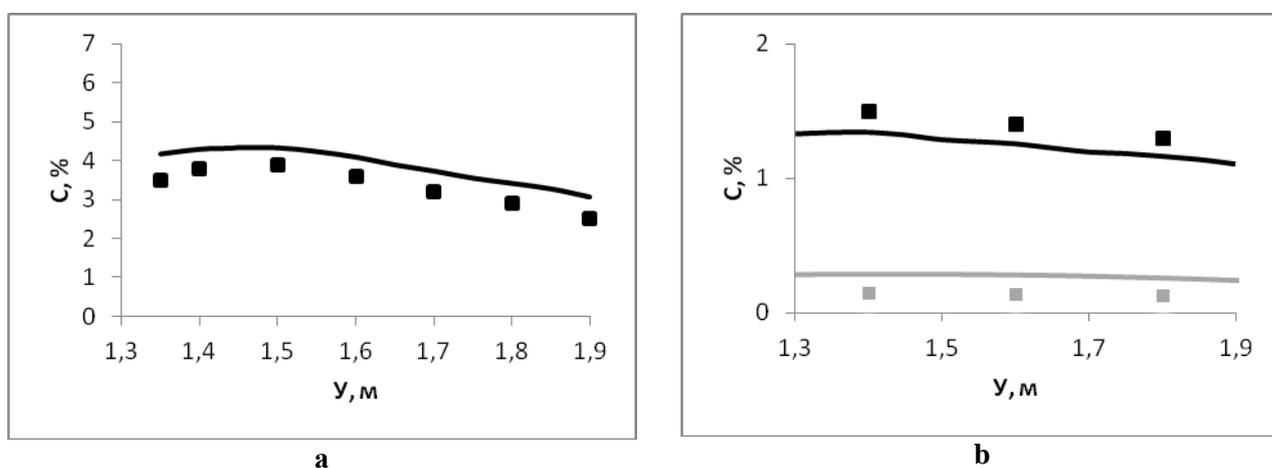
точника выброса углекислого газа – согласно информации, изложенной в предыдущем пункте настоящей статьи. Результаты натурных и численных экспериментов изображены на рис. 2 и 3.

Точками на рисунках изображены экспериментальные значения измеренных концентраций  $\text{CO}_2$ , сплошными линиями – рассчитанные с помощью математической модели концентрации. На рисунках 1 и 2 под буквой *b* чёрный цвет обозначает принадлежность данных эксперименту с завесой, в которой давление пара в подводящем паропроводе  $3 \text{ кгс/см}^2$ , серый цвет – завесой, с давлением пара в паропроводе  $5 \text{ кгс/см}^2$ .

Иллюстрации результатов расчёта по разработанной модели свидетельствуют о хорошей её сходимости с измеренными концентрациями  $\text{CO}_2$  натурального эксперимента. Наибольшее расхождение между расчётом и экспериментом не превышает 13 %, что вполне приемлемо и допустимо для целевого использования модели.



**Рис. 1.** Измеренные и вычисленные концентрации углекислого газа после завесы в вертикальном направлении: *a* – без действия защитной завесы; *b* – при функционирующей паровой преграде.



**Рис. 2.** Измеренные и вычисленные концентрации углекислого газа после завесы в горизонтальном направлении: *a* – без действия защитной завесы; *b* – при функционирующей паровой преграде.

Расхождения были получены в результате воздействия множества факторов, таких как: погрешности в методах проведения физического эксперимента, погрешности измерительных приборов, ошибки исследователей, проводивших эксперимент, абстрагированность математической модели (неучёт некоторых аспектов реальных исследуемых процессов) и т.д. В дальнейшем, с целью более тщательной верификации разработанной математической модели, необходимо снова провести сравнение результатов прогнозирования эффективности паровой завесы с результатами эксперимента других исследователей.

## Литература

- [1] S. A. Akhmetov, T. P. Serikov and I. R. Kuzeev, *Technology and equipment of oil and gas refining processes* [in Russian], Nedra, St Petersburg (2006).
- [2] Приказ МЧС РФ от 10 июля 2009 г. N 404 "Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах".
- [3] Kimio Sato. Gas screening effect caused by steam curtains. // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2, 209-214, (1989).
- [4] Fluent Inc. *Fluent 6.1. User's Guide*, Lebanon (2003).

### СКРИНИНГ РАЦИОНАЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОКОВ АО «ЭЛЕКТРОСОЕДИНИТЕЛЬ»

Гвоздева Н.С., Кравчук Д.А., Ахмадуллина Ф.Ю., Закиров Р.К.  
Казанский национальный исследовательский технологический университет.  
E-mail: natahanik@icloud.com

В современных условиях безопасность функционирования действующих промышленных предприятий, особенно являющихся источниками токсичных отходов, несомненно связана со снижением экологических рисков. Это диктует обязательность реализации мероприятий, связанных с обезвреживанием образующихся отходов и, как следствие, с уменьшением негативного техногенного воздействия на окружающую среду. В первую очередь это касается производственных сточных вод, как наиболее многотоннажных сбросов, содержащих экотоксиканты, среди которых можно выделить высокотоксичные тяжелые металлы.

Последние характерны для промышленных стоков предприятий металлургической, машиностроительной, приборостроительной, автомобильной и других отраслей промышленности, где используются гальванохимические производства. АО «Электросоединитель» не является исключением. Однако данное предприятие на сегодняшний день не располагает очистными сооружениями, в связи с чем были проведены исследования по изысканию и обоснованию рациональной технологии очистки промышленных стоков АО «Электросоединитель», который является источником 3 типов стоков, характеристики которых приведены в таблице 1.

Табл. 1. Усредненные характеристики сточных вод АО «Электросоединитель»

Тип сточных вод	Компоненты					pH	Объем, м <sup>3</sup> /сут
	Ключевой компонент	не более, мг/дм <sup>3</sup>					
		Fe	Cu	Zn	Mg		
Хромсодержащие	351 - 817	67	17	11	54	1,7 - 2,1	3 м <sup>3</sup> /нед.
Никельсодержащие	1400 - 2030	0,7	0,7	0,9	43	2,7 - 2,8	3 - 7
Промывные воды (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	1591 - 1670	9,7	0,3	1,6	45	8 - 13,5	50 - 60

Они отличаются непостоянством расхода и состава сточных вод, высоким содержанием тяжелых металлов, а также агрессивностью среды, что предполагает их токсичность, обуславливающую необходимость многократного разбавления промышленных стоков при условии их спуска в систему канализования для последующей очистки на городских очистных сооружениях, что было подтверждено экспериментально.

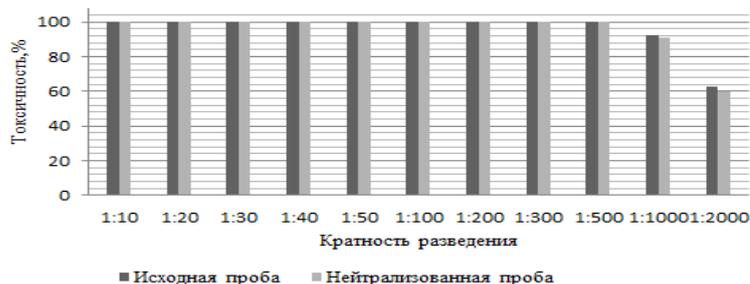
Оценку токсичности сточных вод осуществляли по уровню смертности (обездвиженности) тест-объекта (равноресничной инфузории *Paramecium Caudatum*) как исходных, так и нейтрализованных стоков в зависимости от кратности их разведения [1] (рис. 1, в качестве примера).

Высокая кратность разведения для большинства исследованных проб (> 1:2000), при которой промышленный сток не оказывает острого токсического воздействия на тест-объект, указывает на их очень высокую токсичность, причем их нейтрализация не приводит к положительному эффекту.

Аналогичные результаты были получены и для хромсодержащих сточных вод табл.2.

Высокая токсичность изученных стоков предопределила обязательность организации локальных очистных сооружений с реализацией в качестве основного метода обезвреживания всех 3 типов сточных вод – реагентный, к преимуществам которого следует отнести: простоту эксплуатации, возможность применения его для обезвреживания кислотно-щелочных сточных вод различных объемов

с различной концентрацией ионов тяжелых металлов, универсальность по отношению к различным тяжелым металлам, а также относительную дешевизну реагентов [2, 3].

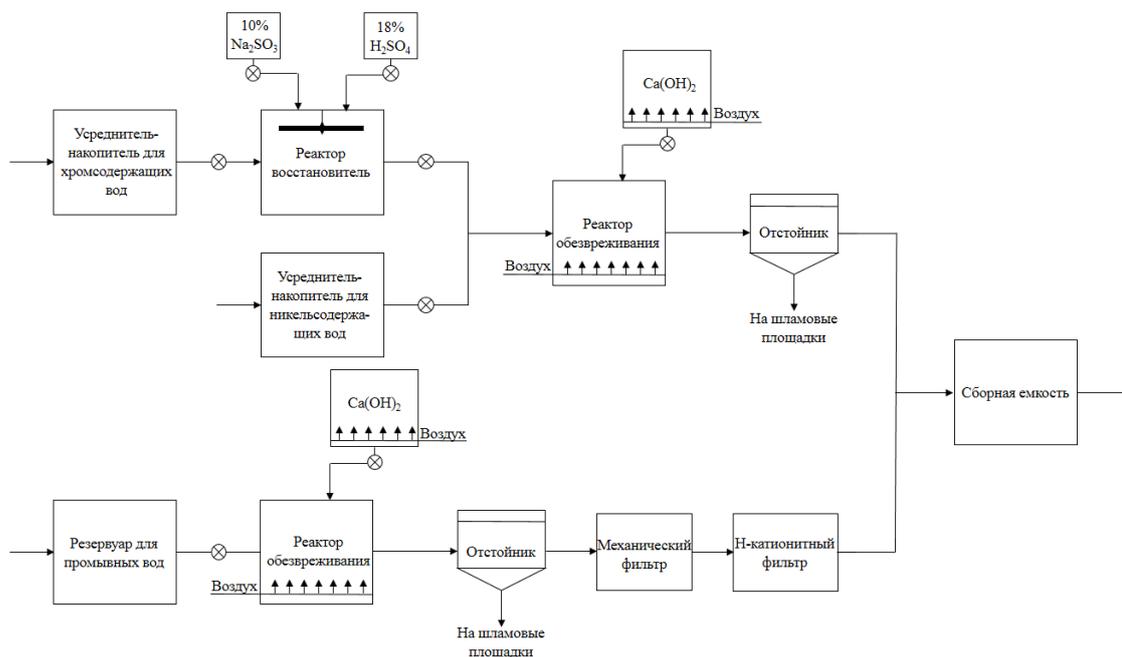


**Рис. 1.** Токсичность исходного и нейтрализованного никельсодержащего промышленного стока (%)

**Табл. 2.** Токсичность хромсодержащего промышленного стока

Кратность разбавления		1:10	1:50	1:100	1:150	1:200	1:300
N <sub>особей</sub>	До	7	5	5	7	7	6
	После	0	0	2	3	6	6
Токсичность		100	100	60	51,14	14,28	0

Выбор гашеной извести в качестве эффективного реагента для осаждения гидроксидов тяжелых металлов был обусловлен тем, что в этом случае не наблюдается столь резкого повышения солевого содержания, как при применении других реагентов. Это происходит потому, что нейтрализация известью сопровождается образованием осадка, который может быть выведен из воды [4].



**Рис. 2.** Схема локальной очистки промышленных стоков АО «Электросоединитель»

Проведенные комплексные исследования позволили установить оптимальные условия обезвреживания индивидуальных сточных вод и разработать рациональную технологию водоочистки АО «Электросоединитель», включающей ряд подсистем:

1. Обезвреживание сточных вод, содержащих хром (VI): предварительное восстановление хрома (VI) до трехвалентного состояния 10% раствором бисульфита натрия при pH 1,5-1,9 в зависимости от концентрации экотоксиканта с последующим их смешением с никельсодержащими сточными водами;

2. Совместное обезвреживание никель- и хромсодержащих стоков 5% раствором гашеной извести с последующим осаждением нерастворимых гидроксидов металлов при рН, равном 9-10 в зависимости от их содержания в стоке;

3. Обезвреживание промывных вод: предполагает осаждение фосфатов кальция при рН в диапазоне 10-12, в зависимости от содержания фосфатов.

Предлагаемая схема локальной очистки промышленных стоков АО «Электросоединитель» представлена на рис. 2.

### Литература

- [1] ФР.1.39.2007.03221. Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов по смертности и изменению плодovitости цериодафний, Издательство стандартов, Москва, 2007, 45 с.;
- [2] Москалева О.А. Очистка сточной воды от солей тяжелых металлов на ОАО ТЗ «Октябрь» г. Тамбова / О.А. Москалева, Е.Д. Таныгина, П.Н. Бернацкий // Вестник Тамбовского Университета. Серия: Естественные и Технические науки. – Тамбов, 2014. Т 19. № 2. С 801-804.
- [3] Матвеева В.А. Оценка и снижение техногенного воздействия ОАО «Ковдорский ГОК» на поверхностные воды: дис. канд. тех. наук. – Санкт-Петербург, 2015. – 212 с.
- [4] Тимонин А.С. Инженерно-экологический справочник. Т. 2. – Калуга: Издательство Н. Бочкаревой, 2003. – 884 с.

## ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРОВ С ПОНИЖЕННОЙ ГОРЮЧЕСТЬЮ

Газизуллин М.М., Карноухов В.Е., Строганов И. В., Хайруллин Р.З.

*Казанский национальный исследовательский технологический университет.*

*E-mail: gazizullinmar@mail.ru*

В последнее время все более активно происходит замена традиционных материалов (металл, дерево, стекло, бетон) на полимерные, в т. ч. эпоксидные.

Эпоксидные смолы впервые синтезированы более 50 лет назад, но по-прежнему являются одними из важнейших видов синтетических смол, благодаря ценным технологическим и эксплуатационным свойствам и разнообразию областей применения материалов на их основе. Они используются как в качестве электроизоляционных компаундов, разнообразных лакокрасочных материалов и порошковых красок, так и в качестве связующих для композиционных материалов, применяемых для изготовления изделий различного функционального назначения [1-3].

Эпоксидные полимеры, благодаря возможности их модификации являются наиболее перспективными среди других органических высокомолекулярных веществ [4-5].

Вместе с тем, эпоксидные смолы имеют недостатки, наиболее существенным из которых является высокая горючесть. Исходя из этого разработка полимерных композиций на основе эпоксидных смол с пониженной горючестью, обладающих высокими физико-механическими свойствами является достаточно актуальной.

### Экспериментальная часть

Объектом исследования являлся эпоксидный олигомер ЭД-20. В качестве отвердителя использовался изометилтетрагидрофталевый ангидрид (изо-МТГФА) и аминный отвердитель АФ-2. В качестве ускорителя процесса отверждения эпоксидной смолы применяли УП 606/2 в количестве 1 % мас.

В качестве антипирена использовали гидроксид алюминия (TS-104) и гидроксид магния, которые вводили в эпоксидную смолу в количестве до 40 % мас.

Температуру воспламенения определяли по п. 4.7 ГОСТ 12.1.044-89 «Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения» при температуре реакционной камеры соответствующей температуре начала разложения исследуемого вещества (материала) при температуре реакционной камеры 300 °С.

Разрушающее напряжение при разрыве определяли по ГОСТ 11262-80 «Пластмассы метод испытания на растяжение» на 5 образцах типа 2 на универсальной испытательной машине GT-AI7000-M (производство Gotech, Тайвань) при скорости движения подвижного зажима 50 мм/мин.

Ударную вязкость по Шарпи определяли по ГОСТ 4647-2015 «Метод определения ударной вязкости по Шарпи» на 10 образцах типа 2 на ударном копре GT-7045-MDL (производство Gotech, Тайвань) при скорости движения маятника 3,46 м/с, энергии удара маятника 5,5 Дж и расстоянии между опорами 60 мм, удар в ребро.

Определение ударной вязкости по Изоду проводили по ГОСТ 19109-84 «Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Изоду» на 10 образцах типа 4 на ударном копре GT-7045-MDL (производство Gotech, Тайвань) при скорости движения маятника 3,46 м/с и энергии удара маятника 5,5 Дж, удар в ребро.

Плотность определяли на автоматическом плотнотере HildebrandH300-S при комнатной температуре.

### Обсуждение результатов

В настоящее время используется достаточно большое количество различных веществ в качестве отвердителей для эпоксидных олигомеров, эффективных в широком интервале температур от 0 до 200 °С. На рис. 1 представлена классификация отвердителей для эпоксидных полимеров.

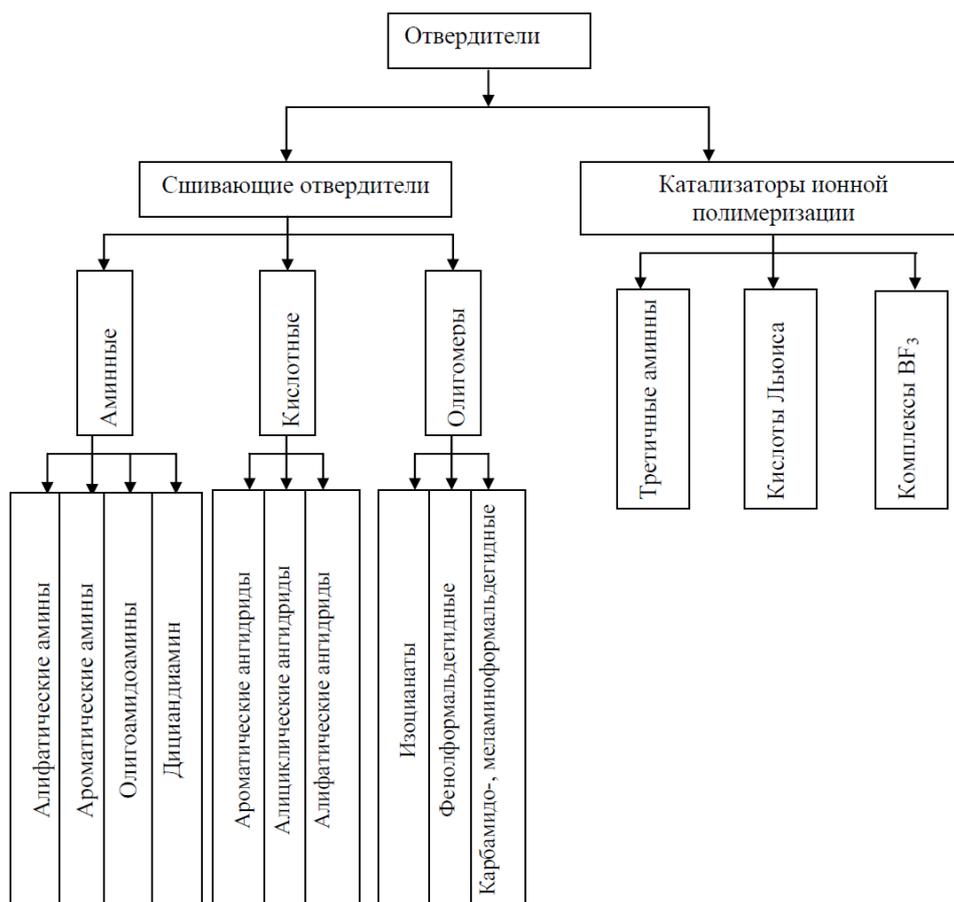


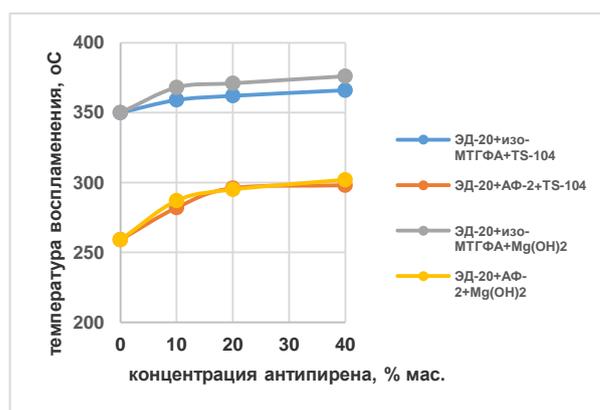
Рис. 1. Классификация отвердителей эпоксидных полимеров

Для проведения сравнительного анализа эффективности действия антипиренов (гидроксид магния, гидроксид алюминия) в работе были использованы отвердители, работающие как при комнатной, так и при повышенной температуре.

В ходе проведенных исследований установлено, что режим и температура отверждения, а также химическая природа отвердителя имеет большое значение для получения эпоксидных смол с высокими физико-механическими свойствами, обладающих пониженной горючестью.

Так в случае использования в качестве отвердителя изо-МТГФА температура воспламенения эпоксидного полимера находится в интервале 350-370 °С, в то время как полимерные системы, полученные при использовании в качестве отвердителя АФ-2, имеют температуру воспламенения в диапазоне 250-300 °С рис. 2.

Это можно объяснить прежде всего различием структуры пространственной полимерной сетки, образующейся в ходе протекания процесса отверждения эпоксидного полимера, а также влиянием температуры отверждения на скорость и характер отверждения.



**Рис. 2.** Зависимость температуры воспламенения эпоксидной смолы от концентрации антипирена и природы отвердителя

При проведении сравнительного анализа влияния типа отвердителя на основные прочностные характеристики эпоксидной смолы можно видеть, что в случае использования отвердителя АФ-2 некоторые физико-механические характеристики имеют меньшее значения по сравнению со значениями, полученными для систем с использованием отвердителя изо-МТГФА табл. 1.

Так значения ударной вязкости по Изоду при использовании в качестве отвердителя АФ-2 практически в 2 раза ниже значений, полученных для эпоксидных смол, отвержденных изо-МТГФА.

**Табл. 1.** Свойства эпоксидной смолы, отвержденной различными отвердителями

Свойство	Концентрация гидроксида алюминия в эпоксидной смоле, % мас.			
	0	10	20	40
Ударная вязкость по Шарпи. кДж/м <sup>2</sup>	18,36 /17,67	18,205 /17,53	18,24 /17,41	18,29 /16,96
Ударная вязкость по Изоду. кДж/м <sup>2</sup>	28,31 /16,46	26,81 /16,30	26,75 /16,10	27,10 /15,96
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	38,92 /32,32	36,86 /33,75	37,98/33,45	38,24 /31,13
Твердость по Шор Д	84/76	83/77	83/79	85/78
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1217 /1184	1281 /1165	1303 /1159	1314 /1147

\*в числителе значение при использовании изо-МТГФА, в знаменателе при использовании АФ-2.

**Табл. 2.** Свойства эпоксидной смолы, отвержденной различными отвердителями

Свойство	Концентрация гидроксида магния в эпоксидной смоле, % мас.			
	0	10	20	40
Ударная вязкость по Шарпи. кДж/м <sup>2</sup>	18,36 /17,67	17,85 /17,51	17,67 /17,48	17,52 /16,96
Ударная вязкость по Изоду. кДж/м <sup>2</sup>	28,31 /16,46	27,80 /16,40	27,21 /16,32	26,78 /15,83
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	38,92 /32,32	36,30 /33,65	37,32 /31,80	38,85 /30,91
Твердость по Шор Д	84/76	84/76	84/77	84/77
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1217 /1184	1276 /1166	1228 /1158	1212 /1146

Также меньшее значение по сравнению с системами, отвержденными изо-МТГФА, имеет показатель разрушающего напряжения при растяжении. Полученные результаты можно объяснить более

высокой хрупкостью образцов эпоксидной смолы, отвержденной АФ-2, о чем косвенно свидетельствует более низкие значения твердости по Шор Д систем, отвержденных с помощью АФ-2 (табл. 2).

В числителе значение при использовании изо-МТГФА, в знаменателе при использовании АФ-2

Было также проведено исследование влияния типа вводимого антипирена и его концентрации в эпоксидной смоле на комплекс его свойств, а также температуру воспламенения. Установлено, что температура воспламенения в большей степени зависит от используемого отвердителя, чем от природы антипирена, что говорит о том, что рассматриваемые антипирены имеют схожий механизм действия.

### **Выводы**

На основании проведенных исследований установлено, что наиболее предпочтительным является использование в качестве антипирена гидроксида магния, который при меньших концентрациях обеспечивает повышение температуры воспламенения эпоксидной смолы. Большое значение на горючесть эпоксидной смолы оказывает отвердитель. Так использование в качестве отвердителя изо-МТГФА позволяет повысить температуру воспламенения практически на 100 °С по сравнению с системами в которых в качестве отвердителя применяется АФ-2.

### **Литература**

- [1] Мостовой, А.С. Разработка составов, технологии и определение свойств микро- и наноуполненных эпоксидных композитов функционального назначения: дис. ... канд. тех. наук: 05.17.06: защищена 18.4.2014. –Саратов. -2014. -149с.
- [2] Строганов, И.В. Повышение безопасности эксплуатации трубопроводов (в том числе из разнородных материалов) с применением термоусаживающихся муфт из эпоксидных полимеров/ И.В. Строганов, Р.З. Хайруллин// Вестник Казанского технологического университета. -2014. -Т. 17. -№9. -С. 98-101.
- [3] Чиждова, М.А. Токсичность продуктов горения полимерных материалов при введении в их состав антипиренов/ М.А. Чиждова, Р.З. Хайруллин Р.З.// Вестник Казанского технологического университета. -2014. -Т. 17. -№9. -С. 144-145.
- [4] Петрова, Н.П. Исследование пожароопасных свойств резиновых смесей, содержащих различные антипирены/ Н.П. Петрова, Н.Ф. Ушмарин, Н.И. Кольцов, И.В. Строганов, Р.З. Хайруллин// Клеи. Герметики, Технологии. -2015. -№9. -С. 20-23.
- [5] Золотарева, В.В. Оценка физико-механических характеристик эпоксидных полимеров, наполненных дисперсными наполнителями/ В.В. Золотарева, О.С. Попова// Фундаментальные и прикладные исследования кооперативного сектора экономики. -2015. -№3. -С. 135-142.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ОТХОДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНОЙ ДОБАВКИ МЕФОСФОН**

Сафиуллина А.Р., Халиуллина З.М., Шулаев М.В.

*Казанский национальный исследовательский технологический университет,*

*E-mail: mshulaev@mail.ru*

Увеличение количества животноводческих комплексов и рост их производительности приводят к возрастанию интереса к рентабельности системы утилизации и хранения отходов животноводства и птицеводства. Складируемые при предприятиях животноводческие отходы наносят вред окружающей среде, являются источниками плохих запахов. К тому же, при длительном хранении навозы теряют свою удобрительную ценность.

Существует достаточное количество методов переработки животноводческих отходов. Одним из способов утилизации является активное компостирование навозов с помощью добавок. Широкое распространение получило компостирование отходов с добавлением микробиологических препаратов – эффективных микроорганизмов, способствующих разложению органических веществ. Для данных целей применяются препараты Триходермин, Тамир, Байкал ЭМ – 1 [1]. При компостировании возможно применение минеральных веществ, способствующих росту микрофлоры, закреплению питательных веществ за счет обменных реакций, например, фосфогипса [2]. Наименее изученным является действие на процессы компостирования отходов биологически активных добавок [3].

Целью работы было исследование влияния препарата Мефосфон на скорость разложения органических веществ и снижение токсичности отходов для дальнейшего использования добавки при утилизации животноводческих отходов. Биологически активный малоопасный препарат Мефосфон представляет собой меламинаковую соль бис(оксиметил)фосфиновой кислоты, проявляющий рострегулирующую активность в сверхнизких концентрациях (до  $1 \cdot 10^{-8} - 10^{-7} \%$ , что соответствует примерно  $1 \cdot 10^{-10} - 10^{-9} \text{ М}$ ) [4].

В эксперименте в качестве добавок для ускорения переработки были выбраны Мефосфон и Байкал-ЭМ1. Эксперимент проводили на пробах бесподстилочного навоза крупного рогатого скота (КРС) и куриного помета. Процесс переработки осуществляли в анаэробных условиях. Выбор анаэробного режима связан с тем, что при хранении полужидких бесподстилочных отходов в выгребных ямах предприятий создаются бескислородные условия.

Опытные образцы по 4 кг обрабатывались выбранными препаратами, увлажнялись (50 мл воды на 1 кг навоза) и помещались в герметичную тару. Препараты вносились из расчета 0,5 мл неразбавленного препарата на 1 кг отхода, при совместном внесении – 0,25 мл каждого препарата. Пробы в течение 4 месяцев выдерживались в нормальных условиях, перемешивались через каждые две недели и повторно обрабатывались препаратами и увлажнялись. Течение процесса переработки оценивалось по изменению содержания аммонийного азота ( $\text{NH}_4^+$ ), который определялся фотокolorиметрическим методом по Ромашевичу.

Изменение содержания аммонийного азота в пробах представлено в таблице 1.

Таким образом, при обработке навоза КРС Мефосфоном содержание аммонийного иона было больше, чем в параллельных пробах. Это можно объяснить более интенсивной работой микроорганизмов-деструкторов за счет антистрессовой, стимулирующей способности препарата.

**Таблица.** Изменение содержания аммонийного азота, в мг/100 г сухого навоза

Образец	0	1 мес.	2 мес.	3 мес.	4 мес.	1 год
Навоз КРС						
№ 1 (контрольный)	103	100	76	71	86	74
№ 2 (обработанный Байкалом ЭМ-1)		123	79	103	97	69
№ 3 (обработанный Мефосфоном)		124	106	106	117	101
№ 4 (обработанный Байкалом ЭМ-1 и Мефосфоном)		99	65	76	102	89
Куриный помет						
№ 5 (контрольный)	607	531	625	602	678	623
№ 6 (обработанный Байкалом ЭМ-1)		570	728	710	638	478
№ 7 (обработанный Мефосфоном)		573	782	740	590	525
№ 8 (обработанный Байкалом ЭМ-1 и Мефосфоном)		535	800	706	543	434

В образцах куриного помета с добавками содержание аммонийного азота возрастало на второй месяц, а контрольном – лишь на 4 месяц эксперимента. Полученные результаты говорят о более быстром разложении азотсодержащих органических веществ при добавлении препаратов. Максимальный выход  $\text{NH}_4^+$  в курином помете зафиксирован в образце №8, что на 15,3% больше от максимального выхода в контрольной пробе. За год хранения помета аммонийный азот уменьшился на 14-29%.

За 4 месяца опыта в пробах обработанных Мефосфоном отмечалось почти полное исчезновение неприятных запахов.

Проведенные исследования процесса ферментации навозов показывают, что внесение препарата Мефосфон ускоряет переработку отходов, способствует уменьшению неприятных запахов. Применение препарата будет способствовать улучшению экологического состояния территорий навозохранилищ животноводческих комплексов.

## Литература

- [1] Лысенко, В.П. Биопрепараты для компостирования птичьего помета / В.П. Лысенко, Г.Е. Мерзлая, Р.А. Афанасьев // Птицеводство. – 2014. – №3. – С. 39-44.
- [2] Белюченко, И.С. Отходы быта и производства как сырье для подготовки сложных компостов: монография / И. С. Белюченко. – Краснодар: КубГАУ, 2015. – 405 с.

- [3] Шайморданова, А.А. Исследование влияния препарата Мелафен на процесс переработки отходов животноводства и птицеводства / А.А.  
[4] Шайморданова, З.М Халиуллина // Зерновое хозяйство России. – 2017. – №2. – С. 66-69.  
[5] Фаттахов, С.Г. Мелафен: механизм действия и области применения / С.Г. Фаттахов, В.В. Кузнецов, Н.В. Загоскина. – Казань: Печать-Сервис XXI век, 2014. – 408 с.

## **ИННОВАЦИОННЫЕ ПОДХОДЫ К ПОВЫШЕНИЮ КАЧЕСТВА ЗАЩИТЫ И БЕЗОПАСНОСТИ ТРУБОПРОВОДОВ**

Мадюкова А.Э., Шильникова Н.В.

*Казанский государственный национальный технологический университет.*

Современное использование трубопроводного транспорта различного назначения, постоянно нуждается в анализе их фактического состояния и применения инновационных подходов к усовершенствованию видов применяемых для их изготовления материалов, комплектующих, средств защиты. Актуальными остаются вопросы социальной, материальной и экологической безопасности при эксплуатации этих опасных производственных объектов, работающих в специфических коррозионных условиях, с учетом физического износа, качества защиты и других факторов. К тому же необходимость обеспечения безопасности трубопроводного транспорта связана с большой протяженностью действующих и проектируемых трубопроводов.

Целью работы является анализ современных подходов по внедрению превентивных мероприятий по защите трубопроводного транспорта от возможных разрушений и дефектов, направленных на повышение промышленной и экологической безопасности. В процессе эксплуатации трубопроводов источниками материальных и экологических ущербов могут быть разливы при авариях на трубопроводах, пожары, утечки через негерметичные соединения, не качественная защита труб и др.

В настоящее время хорошо изучены причины, приводящие к аварийным ситуациям на трубопроводах, однако в России около 42 % всех аварий, например на газотрубопроводах, происходит по причине их коррозии, что отражается на затратах по борьбе с ней. Вместе с тем, из-за аварийных ситуаций, ввиду коррозионного износа снижено рабочее давление на многих участках газотрубопроводов и их пропускная способность сокращена.

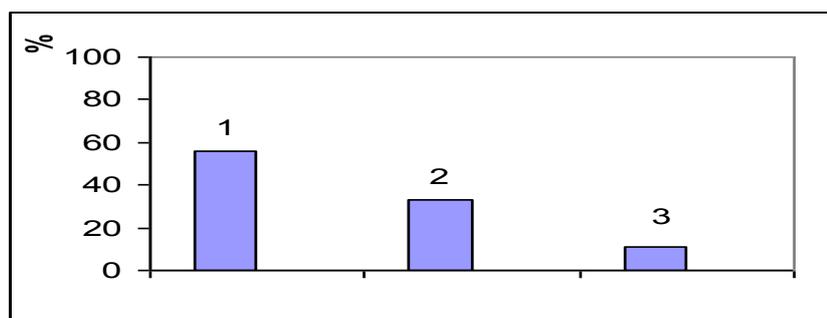
Прокладка трубопроводов в грунте проводится с учетом его твердого скелета - пространственной решетки, заполненной воздухом, водой, различными солями. Разные естественные или искусственные грунты отличаются по влажности, солевому, минеральному и гранулометрическому составу, что сказывается на сроке службы конструкций, возникновению коррозии металла табл. 1.

Отметим, что в процессе разработки проектов учитывают технические (наличие или отсутствие блуждающих токов, коррозионной активности грунтов, вид противокоррозионной изоляции и пр.) и экономические факторы (размеры различных затрат, эксплуатационные расходы и др.). Эффективность противокоррозионной защиты в большой степени определяет уровень надежности трубопровода. На практике требуются огромные материальные затраты на специальные технические программы по диагностике, ремонту и реконструкции объектов трубопроводов, в связи с недостаточно надежной защитой трубопроводов от коррозии.

**Табл. 1.** Скорость коррозии железа в различных грунтах

Вид грунта	Единицы измерения	
	мм/год	г/(м <sup>2</sup> ·год)
Нейтральный	0,01-0,05	70-350
Коррозионно-активный	0,05-0,2	350-1400
Неаэрированный	0,1-0,4	700-2800

Наиболее эффективными антикоррозионными покрытиями трубопроводов заводского нанесения являются покрытия на основе экструдированного 2-х или 3-х слойного полиэтилена или пропилена. По сравнению с битумно-мастичными и полимерными покрытиями заводские покрытия обладают более высокой ударной прочностью, высокой адгезией и механической прочностью, устойчивостью к абразивному износу. Покрытие устойчиво к сдвиговым нагрузкам при осадке грунта или при подвижках трубопроводов и обладает низкой влагопроницаемостью.



1 – 56 % - в агрессивных средах;  
 2 – 33 % - в слабоагрессивных средах;  
 3 – 11 % - не требуют антикоррозионной защиты.

**Рис. 1.** Грунтовые условия эксплуатации подземных трубопроводов в РФ (2000-2013 гг.)

**Табл. 2.** Способы защиты трубопроводов

Пассивная защита	Активная защита	Снижение агрессивности окружающей среды
В основном - изоляция поверхности сооружения от контакта с внешней агрессивной средой, также новое применение пассивных защитных заземлителей	Применение электрохимической защиты подземных металлических сооружений	Деаэрация электролита почвы, гидрофобизация грунтов, нейтрализация различными кислотами и щелочами, уменьшение опасности биокоррозии и замена грунта на менее агрессивный

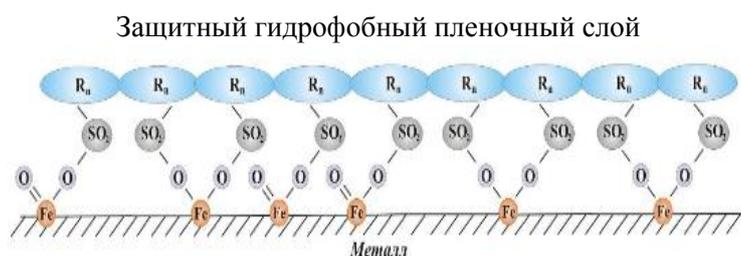
При капитальном ремонте газопроводов и замене изоляции в основном используют покрытия на основе битумно-полимерных мастик. Существенный их недостаток, который выявляется в процессе эксплуатации, заключается в снижении адгезионной прочности покрытий, в результате проникновения под покрытие компонентов агрессивной среды.

Современные разработки инновационных изоляционных материалов позволяют продлить срок службы трубопроводов, который возможно оценивать в течение нескольких лет. В этой связи проведен сравнительный анализ трех видов новых покрытий:

- изоляционные материалы на основе нефтеполимера Асмол;
- комбинированное изоляционное покрытие «Пластобит»/«Армопластобит»;
- двухслойное полимерное покрытие «БИУРС».

Нефтеполимер Асмол – асфальтосмолистый олигомер, не имеющий аналогов в мире, основан и получен из отходов нефтехимического производства – разработка ООО научно-исследовательского центра «Поиск», а также ряда изоляционных материалов на основе нового химически активного материала. Исследования последних лет, опубликованные в ряде работ [4, 5], свидетельствуют о том, что Асмол является эффективным протектором коррозии стальных труб и имеет уникальные свойства, которые принципиально отличают его от других изоляций и материалов. Процесс формирования и образования на поверхности металла металлополимерного комплекса относится к нанотехнологиям.

При нанесении на поверхность металла этого нефтеполимера, функциональные кислородосодержащие группы Асмол вступают во взаимодействие с активными атомами железа, с образованием устойчивых соединений – комплекс Асмол-железо, металл при этом не подвергается дальнейшему окислению. Кислородосодержащие группы Асмол вступают в химическое взаимодействие с имеющимися на поверхности продуктами коррозии с образованием комплекса, также ориентированного на поверхности металла. В результате на поверхности происходит не накопление продуктов коррозии, а их растворение с образованием комплексов в поверхностном слое, рисунок 2 [5].



Предположительно, ориентация комплекса на поверхности металла обеспечивает гидрофобность поверхностного слоя покрытия, т.е. на поверхности металла, внутри покрытия образуется гидрофобный слой.

**Рис. 2.** Образование ориентированного комплекса Асмол-металл

Как видно из рисунка, покрытие плотно прилегает к телу трубы, что исключает доступ коррозионной среды под покрытие и обеспечивается защитная функция. Также дополнительным положительным свойством является водопоглощение, обеспечивающее полное удаление влаги с поверхности металла в момент нанесения и, как следствие, полный сплошной контакт покрытия с металлом. Функциональные группы полимера способны образовывать гель при взаимодействии с водой, в этом случае вода становится не коррозионно-активной, т.к. она связана. С другой стороны, этот гель является дополнительным барьером, исключая дальнейшее проникновение к поверхности металла влаги и кислорода, как на неповрежденных, так и на случайно поврежденных участках покрытия. Проведенное в 2009 году комиссионное обследование состояния изоляционных покрытий, после нескольких лет эксплуатации на ряде газопроводов ОАО «Газпром», показали, что за 5-6 лет эксплуатации, покрытия сохранили свои защитные свойства и требуемое качество пассивной защиты газопроводов от почвенной коррозии.

Другим рассматриваемым материалом является комбинированное изоляционное покрытие «Пластобит»/«Армопластобит», разработанный ВНИИСПТнефть (ныне ИПТЭР). Конструкция комбинированного изоляционного покрытия «Пластобит» не имеет недостатков ее предшественников, например, применяемых в нашей стране покрытия на основе липких полимерных лент. Практика их использования показала, что они очень технологичны (простота нанесения, удобство механизации работ), однако легко уязвимы – острые выступы и камешки прокалывают такую изоляцию, нарушая ее целостность.

Изоляционное покрытие «Пластобит»/«Армопластобит» - комбинация битумного и пленочного покрытий: на слой грунтовки наносится битумная мастика толщиной 3-4 мм, которая сразу же обматывается поливинилхлоридной пленкой без подклеивающего слоя. Величина нахлеста регулируется в пределах 3-6 см. В момент намотки полимерного слоя часть мастики выдавливается под нахлест, что обеспечивает герметизацию мест нахлеста [6].

Для расширения области применения покрытия типа «Пластобит-40» для защиты от коррозии трубопроводов диаметром 1020-1420 мм была разработана новая конструкция покрытия с условным названием «Армопластобит». Его прочностные характеристики повышены за счет введения в конструкцию покрытия «Пластобит-40» армированного рулонного материала – нитепрошивной стеклосетки, срок службы защищаемого трубопровода увеличится. В результате экспериментов установлено, что перемещение труб, зажатых грунтом, вызывает в изоляционном покрытии местные сдвиговые деформации, которые приводят к нарушению сплошности покрытия. Причем повреждений в армированных стеклохолстом покрытиях было в 2-2,5 раза меньше, чем у битумного покрытия. Покрытие «Армопластобит», армированное стеклотканью, не имело повреждений, что подтвердило повышенные прочностные свойства покрытия [6].

Следующим рассматриваемым покрытием является система наружного антикоррозионного покрытия «БИУРС» группы компаний «ПОРСИЛ» (Россия), которая является отечественным аналогом эпоксидно - полиуретанового покрытия UP 1000/FRUCS 1000A [7]. Рассматриваемое покрытие - двухслойное полимерное, на основе двухкомпонентной эпоксидной грунтовки «Праймер-МБ» и двухкомпонентной, не содержащей растворителя, битумно-уретановой мастики «БИУР», табл. 3.

**Табл. 3.** Конструкция системы наружного антикоррозионного покрытия «БИУРС»

1	2
слой эпоксидной грунтовки «Праймер-МБ» быстроотверждающийся – толщ.100±30 мкм	слой битумно-уретановой мастики «БИУР» – толщ. не менее 2,5 мм

Указанное наружное покрытие прошло испытания на соответствие предъявляемым техническим требованиям и уже используется в системе ПАО «Газпром» и АО «АК «Транснефть» в качестве защитного покрытия для изоляции газотрубопроводов, для изоляции технологических трубопроводов, компрессорных и насосных станций. Также в качестве противокоррозионной защиты оно может применяться для отводов, крановых узлов, задвижек, мест врезок при температурах эксплуатации не выше плюс 60 °С. Время полного отверждения покрытия составляет от 6 до 10 суток (в зависимости от температуры окружающей среды). Необходимое время выдержки покрытия «БИУРС» до засыпки траншеи должно быть не менее 24-х часов.

В результате отметим, что предлагаемые новые виды изоляционных покрытий трубопроводов, повышают качество противокоррозионной защиты и следовательно, обеспечивают безопасность при их долгосрочной эксплуатации. При этом комбинированное изоляционное покрытие «Армопласто-

бит» имеет большее преимущество, поскольку сочетает в себе комбинацию битумного и пленочного покрытий, что увеличивает его надежность и срок службы.

#### **Литература**

- [1] Мустафин, Ф.М. Защита трубопроводов от коррозии: Том 2: учебное пособие /Ф.М. Мустафин, Л.И. Быков, А.Г. Гумеров и др. – СПб.: ООО «Недра», 2007. – 708 с.
- [2] Андрияшин, В.А. Коррозионное разрушение поверхностей магистральных труб нефтепровода после длительной эксплуатации /В.А. Андрияшин, А.А. Костюченко, А.И. Комаров // Защита металлов. - 2006. - т. 42. - №1. - С. 52-56.
- [3] СП 86.13330.2012 Магистральные трубопроводы/ М.: Госстрой, Минрегион России, 2013.
- [4] Черкасов Н.М., Гладких И.Ф., Загретдинова Н.М., Гумеров К.М. Инновационный подход к повышению надежности изоляционного покрытия трубопроводов // Коррозия «Территории Нефтегаз». 2007. №3. С.24 – 29.
- [5] Черкасов Н.М., Гладких И.Ф., Филимонов В.А. Сергеев В.И. Опыт применения изоляционных покрытий на основе нефтеполимера Асмол для ремонта магистральных трубопроводов. Нефтегазовое дело. 2010.
- [6] Харисов Р.А., Хабирова А.Р., Мустафин Ф.М., Хабиров Р.А. Современное состояние защиты трубопроводов от коррозии полимерными покрытиями //Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело», 2005. 26с.
- [7] Агинея Р. В., Никулин С. А., Александров Ю. В., Юшманов В. Н. Защитные покрытия нефтегазопроводов. Основные виды покрытий – Ухта : УГТУ, 2017. – 128 с.

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЛИВА НЕФТЕПРОДУКТОВ ПРИ АВАРИЯХ НА ПОДВОДНЫХ ПЕРЕХОДАХ МАГИСТРАЛЬНЫХ НЕФТЕПРОВОДОВ**

Пронудин Е.А., Алексеев В.А.

*Казанский национальный исследовательский технологический университет.*

*E-mail: pronudin@yandex.ru, alekseev\_v\_a@mail.ru*

Состояние подводных переходов магистральных нефтепроводов влияет на окружающую среду и вызывает обратимые или необратимые последствия. Мониторинг является ключевым элементом в системе обеспечения безопасности подводных переходов магистральных нефтепроводов. Безопасность эксплуатации подводных переходов зависит от надлежащего условия контроля; выбора рациональных методов предупреждения аварийных ситуаций и готовности к их ликвидации.

По магистральным трубопроводам этой 93 % всего добываемого в России «черного золота». Их протяжённость составляет чуть больше полумиллиона километров. В этой огромной сети 2000 переходов под водой, которые проходят по трубам длиной 1800 км. Кроме того, в этой транспортной нефтяной империи находится 400 переходных конструкции в 2-3 ветки трубы, 1200 сооружений траншейного типа. Наиболее значительными из них являются переходные устройства через следующие реки:

Волга (2300-8200 м., 8 веток).

Енисей (800 м., 3 нитки).

Кама (830-5090 м., 10 ниток).

Обь (735-1230 м., 14 веток).

Подводные переходы магистральных нефтепроводов (ППМН, - ред.) являются конструкциями, строительство и эксплуатация которых требует строго выполнения профильного нормативно-технического регламента. Они представляют собой линейные участки нефтяных трубопроводов (с соответствующей инженерно-технической инфраструктурой), проложенные под водными преградами. Ширина ППМН составляет 10 м., глубина свыше 1,5 м.

Прогнозирование последствий аварий включает в себя оценку следующих показателей:

- объем вылившихся из продуктопровода жидких углеводородов;
- объем углеводородов, выделившихся в атмосферный воздух;
- площадь и степень загрязнения водоемов;
- площадь, объем и степень загрязнения почвогрунтов.

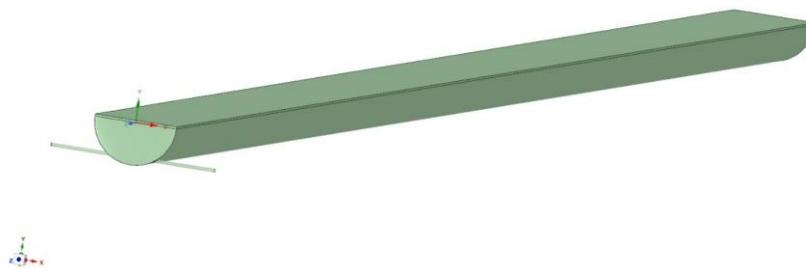


Рис. 1. Трехмерная модель реки

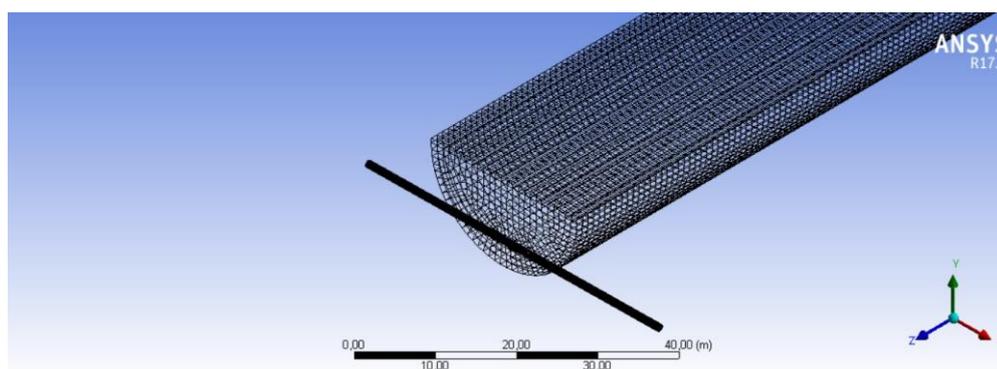


Рис. 2. Сеточная модель реки

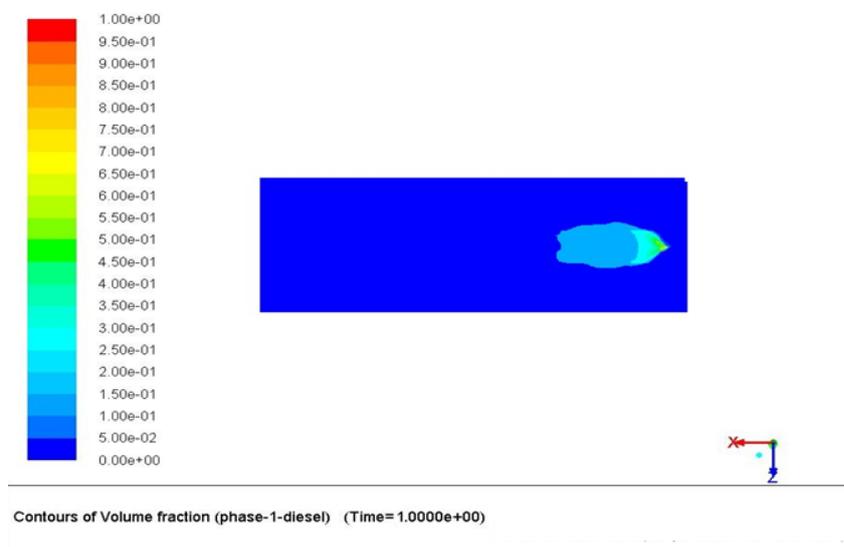


Рис. 2. Пятно разлива дизельного топлива за 1 час

Моделирование геометрической модели для расчетной области проводится в модуле Spaceclaim, а моделирование процесса разлива нефтепродукта по водной поверхности проводится в решателе программного комплекса Fluent. Моделирование процесса разлива состоит из следующих этапов [2]:

1. Создание геометрии

Построение геометрической модели проводим в модуле Spaceclaim начале, создаем эскизы (Surface), далее по этим эскиза создаем объемы с помощью функции выдавливания (Pull). Полученные объемы нужно объединить в группу.

Модель представляет собой моделирование реки с подводным переходом трубопровода. В трубопроводе задается одно отверстие, размером 11 мм через которое происходит истечение дизельного топлива. Размеры модели 40x25x600 м. рис. 1.

Расчетную сетку создаем в модуле Mesh, для всех объемов выбираем метод построения сетки MultiZone. Зададим граничные условия, путем назначения наименований нужных нам поверхностей с помощью «Createnamedselection». Для входа и выхода дизельного топлива “Inlet\_t” и “Outlet\_t”, для воды “Inlet\_water” и “Outlet\_water”, соответственно, для стенок “Wall”.

Результаты моделирования показывают, что наиболее опасным сценарием аварий связанной с разгерметизацией подводного перехода магистрального нефтепровода является истечение нефтепродукта на водную поверхность при имеющемся течении. Течение способствует уносу и увеличению площади нефтяного пятна, что вызовет тяжелые экологические последствия.

Предприятиям, транспортирующим нефть, вблизи проблемных участков нефтепроводов необходимо иметь определенный ресурс технических средств и осознанно использовать их. Это поможет избежать неверных стратегических решений на начальном этапе аварии и существенно сократить ликвидационный период.

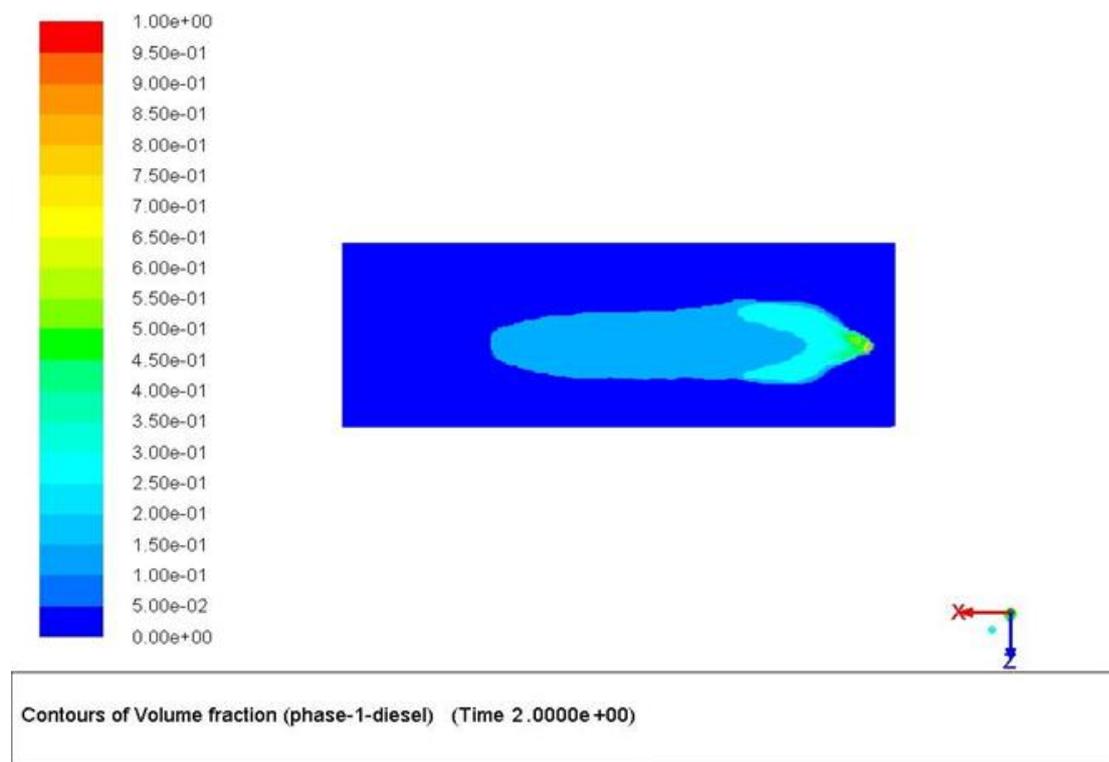


Рис. 3. Пятно разлива дизельного топлива за 2 часа

## Литература

- [1] Шарапов М.Э., Алексеев В.А. Численное моделирование разлива при разгерметизации трубопровода./ Вестник Казанского технологического университета, 2012, №16, с. 221-223.
- [2] Вицин Д.Ю., Алексеев В.А. Моделирование аварийного истечения нефтепродуктов на проницаемой поверхности./ Вестник Казанского технологического университета. Т. 17. №4, 216 (2014).

## ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫЕ ИВВ

Мухтарова Э.Р., Хусаинов Р.М., Галиакберов И.Ф., Сагдуллин З.Р., Камалова А.А.  
Казанский национальный исследовательский технологический университет.  
E-mail: muhtarova.elza@mail.ru

Одним из основных направлений развития отрасли, производящей средства инициирования, является создание экологически безопасных инициирующих взрывчатых веществ (ИВВ), составов и средств инициирования на их основе. Перспективными и доступными экологически безопасными ИВВ, на основе которых возможно создание УВС [1], отвечающих комплексу свойств, могут служить диазосоединения ароматического ряда [2].

По известной методике [Ошибка! Закладка не определена.] в кислой среде был получен 2-диазо-4,6-динитрофенол диазотированием пикраминовой кислоты. Условия синтеза и взрывчатые

свойства полученного в различных условиях 2-диазо-4,6-динитрофенола представлены в таблицах 1 и 2 соответственно.

**Табл. 1.** Условия синтеза 2-диазо-4,6-динитрофенола

2-амино-4,6-динитрофенол, м.ч.	Среда, (конц.)	Количество кислоты, м.ч.	Температура реакции, °С	Гравиметрическая плотность, г/см <sup>2</sup>	Выход, %
1	(25%) HCl	12	18-20	0,40	85-90
1	(40%) H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	10	15-17	0,35	65-69

**Табл. 2.** Взрывчатые характеристики 2-диазо-4,6-динитрофенола

№	ДДХ получен в среде (конц.)	Твсп., °С	Чувствительность к удару, К-44-I, ВП см	Чувствительность к трению К-44-III, МПа	Чувствительность к лучу огня, см	
					НП	ВП
1	(25%)HCl	178-180	16	60,5	5	15
2	(40%)H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	173-175	18	60,5	4	16

Кроме того, была определена инициирующая способность для 2-диазо-4,6-динитрофенола. Определение минимального инициирующего заряда проводилось в КД№8. В качестве вторичного взрывчатого вещества использовался гексоген массой 1 гр., давление прессования 700 кгс/см<sup>2</sup>. ИВВ прессовали под давлением 200 кгс/см<sup>2</sup> с чашечкой. Наличие чашечки препятствует оттоку газов, способствуя повышению давления и ускорению горения 2-диазо-4,6-динитрофенола. Также чашечка защищает поверхность ИВВ от трения при введении в гильзу огнепроводного шнура и повышает безопасность обращения с КД. Инициирование осуществлялось действием луча огня от огнепроводного шнура. Испытания показали, что количество 2-диазо-4,6-динитрофенола в количестве до 0,3 гр. не приводит к полной детонации вторичного взрывчатого вещества в КД№8. Дальнейшее увеличение массы заряда ИВВ ограничено габаритными размерами капсуля-детонатора.

Таким образом, отработан способ получения экологически безопасного ИВВ 2-диазо-4,6-динитрофенола и определены его взрывчатые характеристики. Определение инициирующей способности данного ИВВ показало, что 2-диазо-4,6-динитрофенол с гравиметрической плотностью до 0,4 г/см<sup>2</sup> можно отнести к псевдоинициирующим взрывчатым веществам.

### Литература

- [1] Разработка технологии получения экологически безопасных инициирующих веществ в ряду диазосоединений ароматического ряда / И.Ф. Фаляхов [и др.] Материалы докладов Международной научно-технической и методической конференции “Современные проблемы технической химии” – Казань – 2004 – с. 359-36.
- [2] Гильманов Р.З., Фаляхов И.Ф., Гильманова Т.Б., Хайрутдинов Ф.Г., Разработка экологически безопасных инициирующих веществ / Вестник технологического университета. 2012, т.15, в.13, с. 55-56.

## СРАВНЕНИЕ МЕТОДИК ДЛЯ РАСЧЕТА ИНТЕНСИВНОСТИ ИСПАРЕНИЯ ЛЕТУЧЕЙ ЖИДКОСТИ ПРИ АВАРИЙНЫХ ПРОЛИВАХ

Старовойтова Е.В., Галеев А.Д., Артемьев С.А., Поникаров С.И.  
Казанский национальный исследовательский технологический университет.  
E-mail: starovojtova@inbox.ru

Корректное прогнозирование последствий аварийных ситуаций является ключевым компонентом для реализации соответствующих защитных возможностей и планирование мер по смягчению последствий.

Это требует использования надежных математических моделей, описывающих высвобождение токсичных химических или легковоспламеняющихся веществ из пролива и их последующее распространение в атмосфере. Полная модель события можно условно разделить на три части: моделирова-

ние источников, моделирование распространения и моделирование воздействия [1]. Приводится большое количество работ по моделированию распространения опасных веществ в окружающую среду, в то время как моделированию источника выброса уделяется мало внимания. При аварийных разливах стабильных жидкостей поступление опасных веществ в окружающую среду происходит в результате испарения с поверхности пролива.

В основном, существует два основных типа математических моделей для оценки скорости испарения с пролива: полуэмпирические модели и модели вычислительной гидродинамики (CFD).

Существующие полуэмпирические модели [2, 3] получены из предположения, что пар ведет себя как пассивная примесь, то есть не влияет на поле потока. Это допущение может быть ошибочным, когда молекулярная масса испаряющего вещества отлична от молекулярной массы окружающего воздуха [4].

Используя модель CFD, можно преодолеть ограничения существующих полуэмпирических моделей. Подход, в котором решаются трехмерные уравнения сохранения массы, импульса и энергии, позволяет учитывать комплексное взаимодействие процесса испарения и распространения паров.

Целью данной работы является сравнение результатов расчета интенсивности испарения летучей жидкости (гексана), полученных с использованием известных полуэмпирических соотношений и численной модели. Расчеты выполнены для различных значений скорости ветра и размеров пролива.

### Описание математических моделей

Изменение массы жидкой фазы определялось из уравнения

$$\frac{dm_{liq}}{dt} = -J_{g,s}. \quad (1)$$

Массовый поток газовой фазы с поверхности пролива вследствие испарения  $J_{g,s}$  определялся с помощью стандартных пристеночных функций [5] с учетом поправки на стефановский поток [5]. Распространение паров в атмосфере определяется решением трехмерных уравнений переноса энергии, массы и импульса осредненных по Рейнольдсу. Уравнения Навье-Стокса замыкаются  $k$ - $\epsilon$  моделью турбулентности.

Изменение температуры испаряющейся жидкости определялось из выражения

$$\frac{dT_{liq}}{dt} = \frac{q_a + q_{grd} + q_s - J_{g,s} \cdot \Delta H_g}{C_{p,liq} \cdot m_{liq}}, \quad (2)$$

где  $m_{liq}$  — масса жидкости, отнесенная к единице площади поверхности пролива, кг/м<sup>2</sup>;  $C_{p,liq}$  — удельная теплоемкость жидкости, Дж/(кг·К);  $T_{liq}$  — температура жидкости, К;  $t$  — время, с;  $q_a$  — тепловой поток из атмосферы, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_{grd}$  — поток тепла от грунта к жидкости, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_s$  — поток тепла от солнечной радиации, Вт/м<sup>2</sup>;  $J_{g,s}$  — массовый поток пара при испарении, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $\Delta H_g$  — теплота испарения, Дж/кг.

Для численного моделирования тепловой поток из атмосферы  $q_a$  вычислялся с помощью пристеночных функций [5]. Тепловой поток, подводимый от грунта к жидкой фазе,  $q_{grd} = \lambda_{grd}(\partial T_{grd}/\partial y)_{y=0}$  определялся из численного решения трехмерного нестационарного уравнения теплопроводности для твердого подстилающего слоя.

Для сравнения проводился расчет изменения массы жидкости по формуле, приведенной в нормативной методике [2]:

$$\frac{dm_{liq}}{dt} = \sqrt{M} \cdot 10^{-6} (5.38 + 4.1U) \cdot P_g, \quad (3)$$

где  $M$  — молекулярная масса опасного вещества, кг/моль;  $U$  — скорость воздушного потока на высоте 10 м, м/с;  $P_g(T_{liq})$  — давление насыщенных паров жидкости при температуре  $T_{liq}$ , мм.рт.ст.

В зарубежных методиках оценки опасности промышленных объектов при расчете испарения разлившейся жидкости применяется эмпирический подход, основанный на использовании следующих выражений [3]:

$$\frac{dm_{liq}}{dt} = -\frac{k_g \cdot M \cdot P_g}{R_0 T_{liq}}, \quad (4)$$

где коэффициент массотдачи  $k_g$  рассчитывается по формуле

$$k_g = 0,0048 \cdot U^{0,78} \cdot L^{-0,11} \cdot Sc^{-0,67}. \quad (5)$$

При этом в формуле (2) тепловой поток из воздуха  $q_a$  определялся по формуле [6]:

$$q_a = h(T_a - T_{liq}), \quad (6)$$

где коэффициент теплоотдачи  $h$  рассчитывается как

$$h = Nu \cdot \lambda_a / L, \quad (7)$$

$$Nu = 0,0366 Re^{4/5} Pr^{1/3},$$

где  $T_a$  – температура воздуха, К;  $Nu$  – критерий Нуссельта;  $Re$  – критерий Рейнольдса;  $Pr$  – критерий Прандтля;  $L$  – характерный размер пролива, м;  $\lambda_a$  – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К);

Тепловой поток от грунта к жидкости  $q_{grd}$  рассчитывается из уравнения

$$q_{grd} = (T_a - T_{liq}) \frac{\sqrt{\lambda_{grd} \cdot C_{p,grd} \cdot \rho_{grd}}}{\sqrt{\pi \cdot t}}. \quad (8)$$

где  $C_{p,grd}$  – удельная теплоемкость твердого подстилающего слоя, Дж/(кг·К);  $\lambda_{grd}$  – коэффициент теплопроводности твердого подстилающего слоя, Вт/(м·К);  $\rho_{grd}$  – плотность твердого подстилающего слоя, кг/м<sup>3</sup>.

Во всех случаях  $q_s$  принимался равным 450 Вт/м<sup>2</sup> [4].

### Результаты расчетов

Представлен анализ влияния размера пролива на испарение гексана. Гексан является высоколетучим (при температуре пролива 303 К давление парового гексана равно 25кПа) и тяжелее воздуха в три раза. Эти факторы влияют на испарение пролива и процесс распространения паровоздушного облака в атмосфере. Размеры пролива принимались 10 м x 10 м, 30 м x 30 м, 60 м x 60 м, 100 м x 100 м. Начальная температура окружающего воздуха и пролива равна 303 К. Исследования проводились при скоростях ветра 1; 2,5 и 5 м/с. Время экспозиции – 3600 с.

Исходные данные при моделировании принимались следующими:  $D_{m,g}=6,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $\mu_g=6,6 \cdot 10^{-6} \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{сек})$ ;  $\mu_a=1,78 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{сек})$ ;  $C_{p,g}=1680 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $C_{p,a}=1006 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $C_{p,liq}=2300 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $\lambda_g=0,013 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;  $\lambda_a=0,0242 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;  $\Delta H_g=370000 \text{ Дж}/\text{кг}$ ;  $\lambda_{grd}=1,28 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;  $C_{p,grd}=1130 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $\rho_{grd}=2300 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Здесь,  $D_m$ ,  $\mu$ ,  $C_p$ ,  $\lambda$ ,  $\rho$  обозначены коэффициент молекулярной диффузии, молекулярная вязкость, теплоемкость, теплопроводность и плотность соответственно; индексы  $a$ ,  $g$  и  $grd$  относятся к воздуху, испаряющему газу и грунту соответственно.

Давление насыщенного пара  $P_g$  гексана является функцией зависимости от температуры  $T_{liq}$  и определяется по формуле [4]:

$$P_g(T_{liq}) = \exp(A + B/T_{liq} + C \cdot \ln(T_{liq}) + D \cdot T_{liq}^E), \quad (9)$$

где  $A=104,65$ ;  $B=-6995,5$ ;  $C=-12,702$ ;  $D=0,000012381$ ;  $E=2$ .

Результаты расчетов, выполненные по численному моделированию, а также по вышеописанным методикам [2, 3], приведены в таблице.

При расчете по численной модели, значения удельной массы испарившейся жидкости тем ниже, чем больше размеры пролива, при прочих равных условиях. Влияние размеров пролива на интенсивность испарения снижается с увеличением скорости ветра. С увеличением размеров пролива увеличивается концентрация пара над поверхностью испарения и, следовательно, увеличивается плотность паровоздушного облака. Отрицательный вертикальный градиент плотности, образующийся над зеркалом пролива, вызывает подавление турбулентности, что создает значительное сопротивление отводу паров от поверхности испарения [4]. В методике [2] влияние размеров пролива на интенсивность испарения не учитывается, в связи с чем дает завышенные значения удельной массы испарившейся жидкости при низкой скорости ветра и больших размерах пролива. В случаях, когда эффект плавучести незначителен (малые размеры пролива, высокая скорость ветра) методика [2], в целом, дает заниженные значения интенсивности испарения. В методике [3] интенсивность испарения пропорциональна  $L^{-0,11}$  в не зависимости от скорости ветра, тогда как по численной модели получено, что интенсивность испарения пропорциональна  $L^n$ , где  $n$  принимает значения между -0,553 и -0,0578 для скоростей ветра между 1 и 5 м/с [4]. Следует отметить, что в случаях, когда эффект плавучести мал, значения удельной массы испарившейся жидкости, полученные по численной модели и методике [3], отличаются незначительно.

**Таблица. Результаты расчета удельной массы гексана**

Удельная масса испарения, кг/м <sup>2</sup> за t= 3600с	Скорость ветра		
	1 м/с	2,5 м/с	5 м/с
	Размер пролива 10м x 10м		
Численное моделирование	2,88	7,88	13,63
Методика [2]	2,31	3,42	4,97
Методика [3]	6,05	9,41	12,73
	Размер пролива 30 м x 30 м		
Численное моделирование	1,57	6,66	12,99
Методика [2]	2,31	3,42	4,97
Методика [3]	5,57	8,76	11,84
	Размер пролива 60 м x 60 м		
Численное моделирование	1,03	5,07	12,51
Методика [2]	2,31	3,42	4,97
Методика [3]	5,28	8,38	11,36
	Размер пролива 100 м x 100 м		
Численное моделирование	0,83	3,74	11,92
Методика [2]	2,31	3,42	4,97
Методика [3]	5,08	8,08	10,96

Таким образом, результаты численного анализа показали, что при низких скоростях ветра и больших размерах пролива, эффект плавучести может играть большую роль, что необходимо принимать во внимание при прогнозировании последствий аварийных проливов легковоспламеняющихся жидкостей.

#### Литература

- [1] Vik, T. Implementation of a New and Improved Evaporation Model in Fluent. / Vik, T., Pettersson Reif. // Norwegian Defence Research Establishment, 2011.
- [2] Руководство по безопасности «Методика моделирования распространения выбросов опасных веществ»: [утверждено приказом Ростехнадзора N 158 от 20.04.2015]. – М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2015. – 21 с.
- [3] Kawamura, P.I. The evaporation of volatile liquids. / P. I. Kawamura, D.Mackay // Journal of Hazardous Materials. — 1987. — №15. — p. 343-364.
- [4] Galeev, A.D. Numerical simulation of evaporation of volatile liquids / A.D.Galeev, A.A.Salin, S.I.Ponikarov // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. — 2015. — №38. — p. 39-49.
- [5] Старовойтова, Е.В. Моделирование парообразования с поверхности аварийного пролива сжиженного газа/ Е.В.Старовойтова, А.Д. Галеев, С.И. Поникаров // Вестн. Казан. технол. ун-та. — 2012. — №4. — с. 110-112.
- [6] Khajehnajafi, S. Correlations for mass transfer from a liquid spill: comparisons and recommendations/ Khajehnajafi, S., Pourdarvish, R // Process Saf.Prog. — 2011. — №30. — p. 178-184.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОБРАЗОВАНИЮ И РАСПРОСТРАНЕНИЮ ПАРОВОЗДУШНЫХ ОБЛАКОВ ПРИ АВАРИЙНЫХ ПРОЛИВАХ ЛВЖ

Хасанов Э.И., Старовойтова Е.В.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: elvir.khasanov.bks@gmail.com

Развитие промышленных производств в современных условиях неизбежно ведет к возрастанию числа аварий и масштабов последствий, связанных с разгерметизацией резервуаров, сопровождающихся проливами токсичных и пожаровзрывоопасных жидкостей. В связи с этим обеспечение безопасности взрывопожароопасных промышленных объектов приоритетная цель для обеспечения безопасности людей. Составной частью управления промышленной безопасностью является анализ риска аварий, который предполагает получение количественных оценок потенциальной опасности промышленных объектов. Основу методологии риска составляет определение последствий и вероятности нежелательных событий. Один из важных этапов оценки риска аварий – определение количества опасного вещества, способного участвовать в образовании взрывоопасной смеси. Для решения дан-

ной задачи необходимо знание количественных характеристик процесса испарения со свободной поверхности для чего и были созданы модели испарения.

Одна из методик расчета количественных характеристик процесса испарения была предложена Хлуденевым С.А. [1]. Автором было проведено экспериментальное исследование кинетических закономерностей испарения опасных веществ с поверхности аварийных проливов. Объектом исследования служили крупнотоннажные продукты нефтехимии: бензол, метил-*трет*-бутиловый эфир, а также этилбензол, являющиеся легко воспламеняющимися жидкостями и опасными химическими веществами II и III класса опасности. Кинетические исследования проводили на специальной лабораторной установке методом динамической термогравиметрии в политермических условиях при различной подвижности воздушной среды. Скорость обтекания пролива воздушным потоком варьировали от 0,5 до 3,5 м/с.

Экспериментальные данные обрабатывались в соответствии с молекулярно-кинетической теорией испарения по уравнению:

$$J_w = K \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (1)$$

где  $J_w$  – интенсивность испарения, кг/с·м<sup>2</sup>;  $E$  – наблюдаемая энергия активации, кДж/моль;  $R$  – универсальная газовая постоянная, кДж/моль·К;  $K$  – коэффициент, зависящий от химического состава вещества;  $T$  – абсолютная температура, К.

На основе результатов эксперимента делается вывод, что процесс нестационарного испарения складывается из двух стадий: стадии падающей интенсивности испарения и стадии стабилизации. Длительность каждой из них определяется свойствами конкретного вещества и подвижностью воздушной среды. В условиях подвижной воздушной среды длительность обеих стадий резко сокращается.

В данной работе автор не учитывает искажение воздушного потока над зеркалом пролива, вызванных неоднородностью подстилающей поверхности или наличием зданий, сооружений, элементов оборудования; влияние материала подстилающей поверхности; толщины слоя жидкости, а также нестационарность процесса испарения. Процесс испарения с поверхности аварийных проливов носит нестационарный характер, обусловленный изменением со временем температуры жидкости. В результате интенсивность испарения, вычисленная по формуле (1) не может давать адекватных значений в случае испарения жидкости в открытом пространстве.

В статье [2] представлена модель, позволяющая рассчитывать массовый поток паров при испарении со свободной поверхности пролива нефти и определять массу горючего вещества в облаке с суммарной концентрацией горючих компонентов в диапазоне между нижним (НКПР) и верхним (ВКПР) концентрационными пределами распространения пламени. Модель базируется на численном решении трехмерных нестационарных уравнений гидродинамики и теплообмена. Данная модель реализована в программном продукте FLUENT. Нефть (ЛВЖ) представлена дискретной смесью, состоящей из фиксированного числа условных компонентов (псевдокомпонентов), каждый из которых соответствует узкой фракции на кривой истинных температур кипения (ИТК).

Результаты численного моделирования показали, что динамика формирования взрывоопасного облака при испарении с поверхности аварийного пролива нефти существенно зависит от толщины слоя разлитой жидкости. Корректное определение массы реагирующей смеси важно при оценке потенциала взрывоопасности технологических блоков и определении ожидаемых последствий аварий в рамках процедуры анализа риска.

Однако, при разработке модели испарения нефти [1] были сделаны следующие допущения, что смесь компонентов идеальна; не учитывается взаимное влияние процессов молекулярной диффузии компонентов (приближение независимой диффузии), наличие зданий, сооружений, влияющих на скорость образования и распространения паровоздушной смеси.

В работах [3], и [4] представлены результаты численного моделирования распространения горючих облаков при авариях, связанных с переполнением резервуаров для хранения летучих жидкостей, с учетом влияния формы ограждающей стены и ее расположения. При моделировании не учитывалось испарение из пролива. Моделировалось только испарение капель из распадающихся струй.

В дальнейшем нашей задачей является усовершенствование существующих методик для расчета испарения и распространения паровоздушных облаков при аварийных проливах ЛВЖ с учетом гидродинамических характеристик потока, материала подстилающей поверхности, метеорологических условий, локальных особенностей местонахождения пролива, а также нестационарности процесса испарения.

**Литература**

- [1] Хлуденев С.А. Оценка воздействия нефтехимических производств на объекты окружающей среды при различных условиях функционирования: Автореферат дисс. канд. тех. наук. - Пермь, 2007. — 17 с.
- [2] Галеев А.Д., Поникаров С.И., Моделирование формирования взрывоопасного облака при испарении с поверхности аварийного пролива нефти/ Пожаровзрывобезопасность. 2010, т.19, в.2, с. 22-27.
- [3] Atkinson, G.T., Gant, S.E., 2012. Flammable vapour cloud risks from tank overfilling incidents. Health and Safety Laboratory Research Report, RR 937.
- [4] Coldrick, S., Gant, S.E., Atkinson, G.T., Dakin, R., 2011. Factors affecting vapour production in large scale evaporating liquid cascades. Process Saf. Environ. Prot. 89, 371–381.

**ВЛИЯНИЕ АНТИПИРЕНОВ НА КОМПЛЕКС СВОЙСТВ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ ЭД-20**

*Халикова Р.Н., Строганов И.В., Хайруллин Р.З., Князьков Н.А.*

*Казанский национальный исследовательский технологический университет*

*E-mail: rainbow.rinkid@mail.ru*

Эпоксидные смолы и полимерные материалы на их основе находят широкое применение в качестве клеев, лакокрасочных материалов, для изготовления препрегов на основе стеклоткани, используемых для изготовления и ремонта различных корпусов (лодки, элементы кузова автомобиля и др.), выполнения гидроизоляции помещений (пол и стены подвальных помещений, бассейны) и связующих для разнообразных композиционных материалов.

Широкие области применения эпоксидных полимеров определяются превосходной адгезией отвержденных эпоксидных смол к металлам, наполнителям, стеклу, строительным и другим материалам, в сочетании с высоким уровнем физико-механических и электротехнических свойств, хорошими антикоррозионными характеристиками, водо- и хемостойкостью [1, 2].

Однако присущая эпоксидным полимерам и композиционным материалам на их основе горючесть обуславливает необходимость принятия мер для обеспечения безопасного их использования в тех случаях, когда существует потенциальная опасность возгорания. Одним из эффективных способов увеличения пожаробезопасности является введение в полимер при переработке добавок, замедляющих горение – антипиренов [3, 4].

Роль антипиренов, как правило, выполняют ингредиенты, которые повышают термостойкость полимеров, а также разлагаются при высоких температурах с выделением негорючих веществ. В качестве антипиренов в настоящее время широко используют гидроксиды алюминия и магния, которые при достаточно низкой стоимости обладают высокой эффективностью [4, 5].

Необходимо отметить, что способность антипиренов снижать горючесть полимера достигается при достаточно высоких концентрациях, что в ряде случаев может привести к снижению его прочностных свойств, поэтому представляет интерес проследить влияние различных антипиренов на физико-механические свойства композиционных материалов на основе эпоксидных полимеров при сохранении эффективности действия антипиренов по снижению горючести.

Объектом исследования являлся эпоксидный олигомер ЭД-20. В качестве антипиренов применяли гидроксид алюминия (TS-104) и магния, которые вводили в эпоксидную смолу в количестве до 40 % мас. В качестве ускорителя процесса отверждения эпоксидной смолы применяли УП 606/2 в количестве 1 % мас. в качестве отвердителя изо-МТГФА в количестве 1% мас.

Температуру воспламенения определяли по п. 4.7 ГОСТ 12.1.044-89 «Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения» при температуре реакционной камеры 300°C.

Разрушающее напряжение при разрыве определяли по ГОСТ 11262-80 «Пластмассы метод испытания на растяжение» на 5 образцах типа 1 на универсальной испытательной машине GT-AI7000-M (производство Gotech, Тайвань) при скорости движения подвижного зажима 50мм/мин.

Ударную вязкость по Шарпи определяли по ГОСТ 4647-2015 «Метод определения ударной вязкости по Шарпи» на 10 образцах типа 2 на ударном копре GT-7045-MDL (производство Gotech,

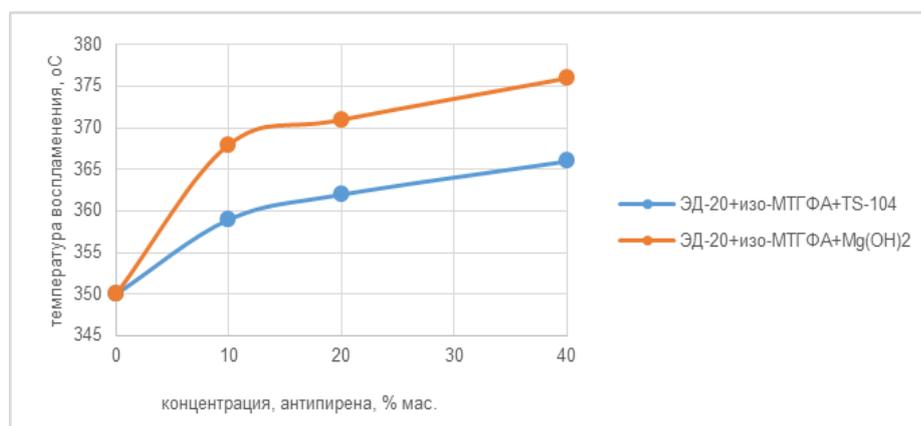
Тайвань) при скорости движения маятника 3,46 м/с, энергии удара маятника 5,5 Дж и расстоянии между опорами 60 мм, удар в ребро.

Определение ударной вязкости по Изоду проводили по ГОСТ 19109-84 «Пластмассы. Метод определения ударной вязкости по Изоду на 10 образцах типа 4 на ударном копре GT-7045-MDL (производство Gotech, Тайвань) при скорости движения маятника 3,46 м/с и энергии удара маятника 5,5 Дж, удар в ребро.

Плотность определяли на автоматическом плотнотере Hildebrand H300-S при комнатной температуре.

Для проведения сравнительного анализа влияния антипиренов на физико-механические свойства эпоксидных полимеров проведены исследования с использованием в качестве антипирена широко используемых для данных целей веществ: гидроксида алюминия TS-104 и гидроксида магния.

Установлено, что с увеличением концентрации антипирена в эпоксидной смоле ЭД-20 температура воспламенения закономерно повышается (рисунок).



**Рисунок**

**Табл. 1.** Свойства эпоксидной смолы, наполненной гидроксидом алюминия

Свойство	Концентрация TS-104 в эпоксидной смоле, % мас.			
	0	10	20	40
Ударная вязкость по Шарпи. кДж/м <sup>2</sup>	18,36	18,21	18,24	18,29
Ударная вязкость по Изоду. кДж/м <sup>2</sup>	28,31	26,81	26,75	27,1
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1217	1281	1303	1314
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	38,92	36,86	37,98	38,24

Аналогичная закономерность физико-механических свойств эпоксидной смолы наблюдается при использовании в качестве антипирена гидроксида магния. Отметим, что в данном случае эффект по увеличению температуры воспламенения наблюдается уже при концентрации 10%, в то время как в случае использования гидроксида алюминия данное увеличение температуры воспламенения достигается только при концентрации антипирена в эпоксидной смоле ЭД-20 достигающей 40%. Зависимость физико-механических свойств эпоксидной смолы, наполненной гидроксидом магния, от концентрации антипирена представлена в табл. 2.

**Табл. 2.** Свойства эпоксидной смолы, наполненной гидроксидом магния

Свойство	Концентрация гидроксида магния в эпоксидной смоле, % мас.			
	0	10	20	40
Ударная вязкость по Шарпи. кДж/м <sup>2</sup>	18,36	17,85	17,67	17,52
Ударная вязкость по Изоду. кДж/м <sup>2</sup>	28,31	27,8	27,21	26,78
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1217	1276	1228	1212
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	38,92	36,30	37,32	38,85

Увеличение концентрации TS-104 в эпоксидной смоле с 10 до 40 % мас. практически не оказывает влияния на основные физико-механические свойства, в частности на значение ударной вязкости по Шарпи и Изоду, а также величину разрушающего напряжения при разрыве, что позволяет сделать

вывод о том, что данный антипирен не только повышает температуру воспламенения эпоксидной смолы, но и может быть использован в качестве наполнителя данной системы (табл. 1).

На основании проведенных исследований установлено, что концентрация антипирена и его природа оказывают незначительное влияние на физико-механические свойства эпоксидных полимеров, что позволяет в ряде случаев использовать гидроксиды магния и алюминия также в качестве наполнителей эпоксидных полимеров.

#### **Литература**

- [1] Строганов, И.В. Повышение безопасности эксплуатации трубопроводов (в том числе из разнородных материалов) с применением термоусаживающихся муфт из эпоксидных полимеров/ И.В. Строганов, Р.З. Хайруллин// Вестник Казанского технологического университета. -2014. -Т. 17. - №9. - с. 98 - 101.
- [2] Петрова, Н.П. Исследование пожароопасных свойств резиновых смесей, содержащих различные антипирены/ Н.П. Петрова, Н.Ф. Ушмарин, Н.И. Кольцов, И.В. Строганов, Р.З. Хайруллин// Клеи. Герметики, Технологии. -2015. -№ 9. - с. 20 - 23.
- [3] Чижова, М.А. Токсичность продуктов горения полимерных материалов при введении в их состав антипиренов. М.А. Чижова, Р.З. Хайруллин Р.З.// Вестник Казанского технологического университета. -2014. -Т. 17. -№ 9. - с. 144 - 145.
- [4] Ушмарин, Н.Ф. Влияние стабилизаторов на свойства силиконовой резины/ Н.Ф. Ушмарин, К.В. Ефимов, Н.И. Кольцов, И.В. Строганов, Р.З. Хайруллин// Клеи. Герметики, Технологии. - 2017. -№ 4. - с. 23 - 25.
- [5] Золотарева, В.В. Оценка физико-механических характеристик эпоксидных полимеров, наполненных дисперсными наполнителями/ В.В. Золотарева, О.С. Попова// Фундаментальные и прикладные исследования кооперативного сектора экономики. -2015. -№3. - с. 135 - 142.

*Пятая Всероссийская студенческая научно-техническая конференция  
“Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология”*

Материалы конференции. Пятая Всероссийская студенческая научно-техническая конференция «Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология» г. Казань, 23-25 мая 2018 г. г. *Казань: Инновационно-издательский дом “Бутлеровское наследие”*. 2018. 440с.

*Верстка:* к.т.н., доц. **В.В. Алексеев**

*Корректор и изготовление оригинал-макета:* к.х.н., нач. отдела информатизации ЦНИТ КГТУ

**А.И. Курдюков**

Издательство: Инновационно-издательский дом “Бутлеровское наследие”.

Адрес издательства: ул. Бондаренко, 33-44. г. Казань, 420066.

Республика Татарстан. Россия.

Сот. тел.: 8 917 891 2622; E-mail: *butlerov@mail.ru*

Подписано к печати 17.05.18.

Тираж 50 экз. Заказ 3.