

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ЗАЛПОВОГО ВЫБРОСА СЖИЖЕННОГО ГАЗА МЕТОДОМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Старовойтова Е.В., Галеев А.Д., Поникаров С.И.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: mahp\_kstu@mail.ru

Решения задачи по обеспечению пожарной и промышленной безопасности объектов химической промышленности предполагает прогнозирование последствий возможных аварийных выбросов взрывопожароопасных или токсичных сжиженных газов.

Предлагаемый в данной работе комплекс моделей позволяет с помощью численных экспериментов спрогнозировать различные аварийные ситуации, сопровождающиеся выбросом токсичного сжиженного газа, исследовать развитие аварии и, таким образом, оценить возможный ущерб и разработать методы локализации аварии.

При разгерметизации емкости с сжиженным газом 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 состояние равновесия, а температура оставшейся жидкой фазы понижается до температуры кипения при атмосферном давлении. При мгновенном испарении жидкости формируется первичное облако пара. Для оценки доли вещества  $x_v$ , мгновенно переходящего в пар, можно применить соотношение [1]:

$$x_v = 1 - \exp\left(-\frac{C_{p,liq}(T_0 - T_b)}{\Delta H_g}\right),$$

где  $C_{p,liq}$  – удельная теплоемкость жидкости, Дж/(кг·К);  $T_0$  – температура сжиженного газа в емкости, К;  $T_b$  – температура кипения жидкости, К;  $\Delta H_g$  – теплота парообразования, Дж/кг.

В результате мгновенного вскипания расширяющиеся пары диспергируют и увлекают часть жидкости, поэтому образующееся облако содержит смесь пара и жидкости в виде аэрозольных капель. Для описания движения аэрозольных капель использовали лагранжев подход [2]. Для прогнозирования перемещения аэрозольных частиц использовали уравнение:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u_l - u_p) + \frac{g_1(\rho_p - \rho)}{\rho_p},$$

где  $u_p$  – проекция скорости движения капли;  $u_l$  – проекция скорости несущей фазы;  $\rho_p$  – плотность капли, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho$  – плотность несущей фазы, кг/м<sup>3</sup>;  $dt$  – шаг по времени;  $F_D(u_l - u_p)$  – сила сопротивления на единицу массы частицы [2].

Уравнение, определяющее интенсивность испарения аэрозольных частиц, имеет вид:

$$\frac{dm_p}{dt} = -N_g \cdot A_p \cdot M_g,$$

где  $m_p$  – масса капли, кг;  $N_g$  – молярный поток пара, кмоль/(м<sup>2</sup>·с);  $A_p$  – площадь поверхности капли, м<sup>2</sup>;  $M_g$  – молекулярная масса, кг/моль.

Молярный поток пара от поверхности капли:

$$N_g = k_c(C_{g,s} - C_{g,\infty}),$$

где  $k_c$  – коэффициент массоотдачи, м/с;  $C_{g,s}$   $C_{g,\infty}$  – концентрация пара соответственно у поверхности капли и в окружающем газе, кмоль/м<sup>3</sup>.

Массу выброшенных капель жидкости принимали равной массе мгновенно образовавшейся паровой фазы [1].

Коэффициент массоотдачи  $k_c$  рассчитывается из соотношения:

$$k_c = \frac{Sh \cdot D_m}{d_p},$$

где  $Sh = 2,0 + 0,6Re_p^{1/2}Sc^{1/3}$  ( $Re_p$  – число Рейнольдса;  $Sc = \mu/(\rho D_m)$  – число Шмидта);  $D_m$  – коэффициент диффузии пара в сплошной фазе, м<sup>2</sup>/с;  $d_p$  – диаметр капли, м.

Изменение температуры капли определяется уравнением:

$$m_p C_{p,p} \frac{dT_p}{dt} = \alpha_s A_p (T_\infty - T_p) + \frac{dm_p}{dt} \cdot \Delta H_g,$$

где  $m_p$  – масса капли, кг;  $C_{p,p}$  – теплоемкость капли, Дж/(кг·К);  $\alpha_s$  – коэффициент конвективной теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $T_\infty$  – локальная температура несущей фазы, К;  $T_p$  – температура капли, К.

Обратное влияние дисперсной фазы на несущий поток, обусловленное межфазным обменом теплотой, импульсом и массой, учитывается включением соответствующих источников членов в уравнения переноса энергии, импульса, примеси и неразрывности для сплошной фазы.

Движение несущей фазы описывали системой трехмерных нестационарных уравнений Рейнольдса, замыкаемых уравнением состояния идеального газа и Realizable  $k$ - $\epsilon$  моделью турбулентности.

Для учета дополнительного нагрева воздуха вследствие конденсации водяного пара в холодном аэрозольном облаке использовалась функция источников члена  $Q_v$  в уравнении энергии и  $S_v$  в уравнении переноса компонента (паров воды) [3]:

$$Q_v = \rho_w \cdot \Delta H_w \cdot \frac{df}{dt} \quad S_v = \rho_w \cdot \frac{df}{dt},$$

где  $\Delta H_w$  – теплота парообразования воды, Дж/кг;  $\rho_w$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $f$  – разность между концентрацией паров воды в воздухе и концентрацией насыщения, кг/м<sup>3</sup>.

Оставшаяся после мгновенного вскипания часть сжиженного газа образует пролив. При расчете интенсивности парообразования  $W$ , кг/(м<sup>2</sup>·с), из пролива учитывался переход от режима кипения к диффузионному испарению, исходя из следующих условий:

$$W = \begin{cases} \frac{q_a + q_{grd} + q_s - q_p + q_{ar}}{\Delta H_g} & \text{при } q_a + q_{grd} + q_s - q_p + q_{ar} \geq J_{g,max} \cdot \Delta H_g \\ J_{g,s} & \text{при } q_a + q_{grd} + q_s - q_p + q_{ar} < J_{g,max} \cdot \Delta H_g \end{cases},$$

где  $q_a$  – 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>;  $q_p$  – тепловой поток, излучаемый поверхностью пролива, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_{ar}$  – тепловой поток к проливу вследствие излучения атмосферы, Вт/м<sup>2</sup>;  $J_{g,max}$  – диффузионный поток, определяемый с помощью пристеночных функций из условия, что мольная доля пара на межфазной границе  $Y_{g,s} \approx 1$ , кг/(м<sup>2</sup>·с);  $J_{g,s}$  – массовый поток пара при диффузионном испарении, кг/(м<sup>2</sup>·с).

Первое условие в данной формуле соответствует режиму кипения, при котором температура жидкости остается постоянной; второе условие – режиму диффузионного испарения, при котором изменение температуры жидкости  $T_{liq}$  рассчитывается по формуле:

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

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.

Массовый поток газа  $J_{g,s}$  с поверхности пролива определялся на основе стандартных функций стенки с учетом поправки на стефановский поток. Подробное описание модели парообразования на стадии диффузионного испарения дано в работе [4].

Вышеописанная методика реализована с использованием программного комплекса FLUENT.

Выполнен численный расчет размеров зон токсического поражения в случае залпового выброса 1 тонны сжиженного хлора. Скорость ветра варьировалась и имела значения 1, 2, 5 и 5 м/с на высоте 10 м. Начальная температура сжиженного газа в емкости принималась равной температуре окружающей среды  $T_0 = T_a = 308$  К.

Состояние атмосферы – изотермия. Тип подстилающей поверхности – бетон. В данной модели нами не учитываются химические реакции, протекающие при взаимодействии хлора с водой в воздухе. Первичное облако представляли в виде цилиндра радиусом равным высоте. Распределение капель по размерам в источнике задавалось с использованием соотношения Розин-Раммлера.

Предполагалось, что, оставшаяся после мгновенного вскипания часть сжиженного газа растекается по неограниченной поверхности, образуя при этом слой жидкости толщиной 0,05 м [5].

Время экспозиции принималось равным 30 минутам. Предполагалось, что в течение этого времени будет осуществлен вывод технического персонала из опасной зоны. Время действия залпового выброса паров хлора, обусловленного мгновенным вскипанием перегретой жидкой фазы, принималось равным 1 с.

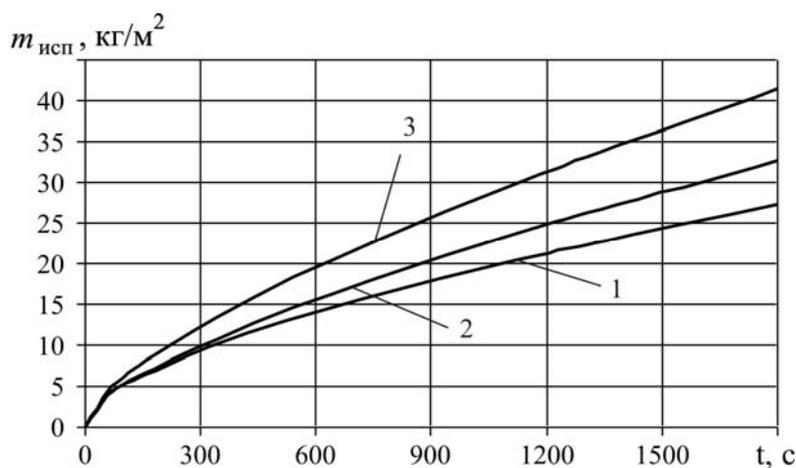
На рис. 1 и 2 представлены графики зависимости удельной массы газа, поступившего из пролива вследствие парообразования, и осредненной температуры жидкости. Масса испарившейся жидкости тем больше, чем выше скорость ветра.

Повышение интенсивности испарения с увеличением скорости ветра компенсируется ее падением вследствие более резкого снижения температуры обуславливает близкие значения удельной массы испарившейся жидкости при рассматриваемых скоростях ветра (масса жидкости, испарившейся за время 1800 с, при скорости ветра 5 м/с не более, чем на 60 % превышает количество пара, поступившего из пролива, при скорости ветра 1 м/с).

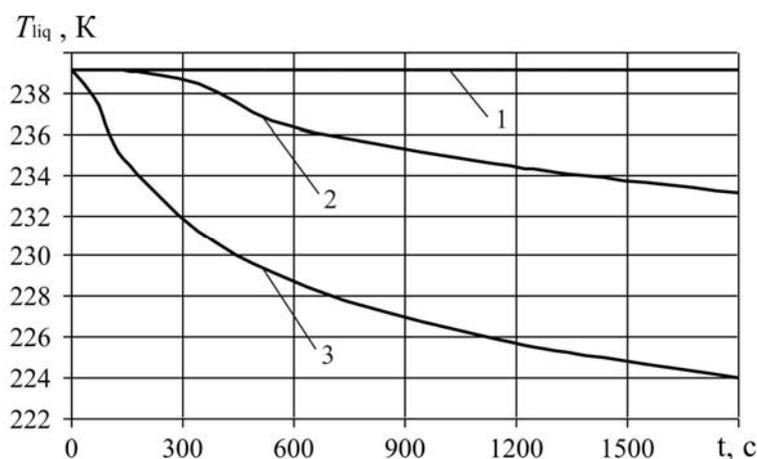
Из рис. 2 видно, что при рассматриваемых скоростях ветра (2,5 и 5 м/с) температура жидкости снижается тем сильнее, чем выше скорость ветра. Таким образом, в один и тот же момент времени давление насыщенных паров хлора будет тем ниже, чем выше скорость ветра. Это способствует сближению значений интенсивности парообразования при различных скоростях ветра.

При скорости ветра 1 м/с температура жидкости остается постоянной и равной температуре кипения ( $T_{liq} = T_b$ ) сжиженного хлора на протяжении всего рассматриваемого промежутка времени, процесс парообразования идет в режиме кипения. При скорости ветра 2,5 м/с переход от режима кипения к режиму диффузионного испарения происходит по истечении примерно 200 с. Данный переход наступает вследствие снижения теплового потока от грунта ниже теплоотвода при испарении. При скорости ветра 5 м/с снижение

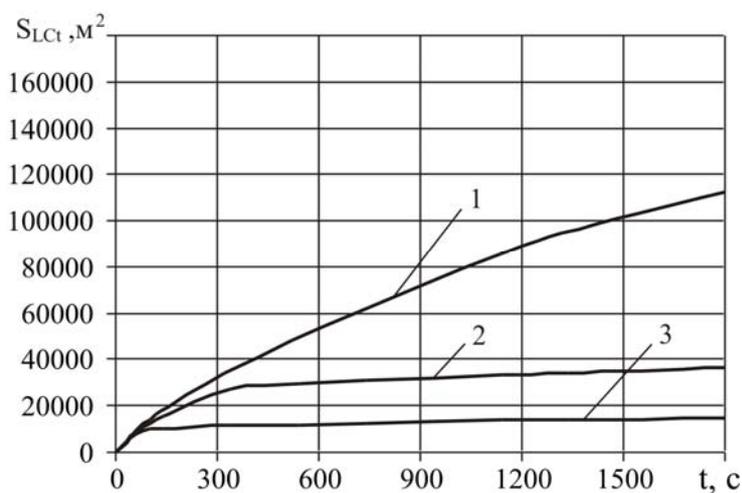
температуры жидкости происходит практически сразу после возникновения пролива, парообразование из пролива идет только в режиме диффузионного испарения.



**Рис. 1.** Изменение удельной массы испарившейся из пролива жидкости для ровной поверхности: 1, 2, 3 – скорость ветра соответственно 1; 2,5; 5 м/с



**Рис. 2.** Изменение осредненной температуры жидкости пролива для ровной поверхности здания: 1, 2, 3 – скорость ветра соответственно 1; 2,5; 5 м/с



**Рис. 3.** Временные зависимости площадей зон летального поражения для ровной поверхности: 1, 2, 3 – скорость ветра соответственно 1; 2,5; 5 м/с

На рис. 3 представлены временные зависимости площадей зон летального поражения при различных скоростях ветра. Границы зон поражения определены по летальной токсодозе (6 мг/мин·л). При скорости ветра 1 м/с возрастание площади зоны поражения на протяжении рассматриваемого промежутка времени носит экспоненциальный характер и обусловлено совместным действием как первичного, так и вторичного облака.

При скоростях ветра 2,5 и 5 м/с зона поражения вначале быстро возрастает вследствие интенсивного рассеивания первичного облака, затем наблюдается период медленного линейного увеличения зоны летального воздействия, связанный с испарением токсичного газа из пролива. При этом, чем выше скорость ветра, тем меньше период влияния первичного облака на формирование зоны поражения.

### **Литература**

- [1] Маршалл В. Основные опасности химических производств. М.: Мир. 1989. 672с.
- [2] Fluent Inc. Fluent 6.1. User's Guide, Lebanon. 2003.
- [3] Брушлинский Н.Н., Корольченко А.Я. Моделирование пожаров и взрывов. М.: Пожнаука. 2000. 492с.
- [4] Старовойтова Е.В., Галеев А.Д., Поникаров С.И. Численный анализ процесса парообразования при кипении аварийного пролива сжиженного газа. *Пожаровзрывобезопасность*. 2011. №2. С.24-28.
- [5] РД-03-26—2007. Методические указания по оценке последствий аварийных выбросов опасных веществ. М.: НТЦ «Промышленная безопасность». Вып.6. 2008.

## **СХЕМА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ**

Наумов И.С., Пушкарев А.М.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет.

E-mail: igor14-88@list.ru

Развитие системы предупреждения об опасных явлениях, способов уменьшения опасности и смягчения последствий чрезвычайных ситуаций (ЧС) считается одной из приоритетных областей деятельности на всех уровнях. Для устойчивого развития любого предприятия и страны в целом необходимо принятие мер по сокращению ущерба причиняемого ЧС и количества ресурсов, используемых при их предупреждении и ликвидации. Однако опасные природные и техногенные явления как источник ЧС могут прогнозироваться лишь на очень малых с точки зрения проведения превентивных мероприятий временных интервалах.

Необходимо совершенствование систем управления, ориентированных на локализацию и ликвидацию ЧС. Основными критериями формирования оптимального плана по предупреждению и ликвидации последствий ЧС являются минимум ущерба; минимум общих затрат на реализацию превентивных мероприятий; минимум общего времени реализации оперативных мероприятий по ликвидации ЧС и ее последствий.

Основными критериями формирования оптимального превентивного плана по предупреждению и ликвидации последствий ЧС являются минимум ущерба; минимум общих затрат на реализацию превентивных мероприятий; минимум общего времени реализации оперативных мероприятий по ликвидации ЧС и ее последствий.

Вследствие чего создана модель совершенствования и функционирования системы обеспечения ресурсами, на основании которой разработана методическая схема решения задачи, предполагающей автоматизацию процесса управления ресурсами.

На первом этапе использования методической схемы необходимо провести предварительную оценку общих затрат на систему обеспечения ресурсами. Это обеспечивает исходную информационную основу для последующей оптимизации параметров системы.

Для этого оценивается возможный ущерб от ЧС при отсутствии обеспечения ресурсами процесса ее ликвидации. Выражение этого ущерба сопоставляется с объективными потребностями в ресурсах на предотвращение ожидаемого ущерба. Полученное выражение потребности в ресурсах приводится к форме затрат на их приобретение.

Решение этой задачи базируется на известных моделях развития ЧС, применяемых в отношении конкретных промышленных объектов, данные о которых могут определяться по паспортам этих объектов. Кроме того, используются известные сведения о затратах на приобретение и ввод в эксплуатацию всех доступных видов ресурсов, а также об их производительности. Эти сведения могут быть конкретизированы для объектов, так как производительность и стоимость размещения ресурсов на различных объектах может различаться.

Полученные результаты ложатся в основу для выработки решений о финансировании создания или совершенствования системы ликвидации ЧС и позволяют выработать предварительное заключение о степени совершенства существующей системы.

Для завершения первого этапа методической схемы необходимо определить типы ресурсов и их количество на объектах.

Для реализации второго этапа методической схемы требуется обоснование структуры системы обеспечения ресурсами с учетом предлагаемого нового подхода. В сложившейся практике доминирует развитие систем обеспечения ресурсами как двухэшелонных систем. Для такой структуры необходимо определить центральный пункт размещения ресурсов с учетом сложившейся инфраструктуры района функционирования системы. Для этого, целесообразно использовать минимаксный критерий удаленности центра от потенциально опасных объектов. Задача решается полным перебором.

Третий этап реализации предложенной методической схемы предполагает обоснование порядка определения потенциальной опасности объектов для ликвидации ЧС, на которых создается система обеспечения ресурсами. Если на некоторых объектах возможна ЧС в течение времени ликвидации ЧС на одном из объектов, то с этих объектов нельзя направлять ресурсы на объект, где возникла ЧС. Кроме того, на центральной базе необходимо оставить ресурсы для ликвидации возможных ЧС на этих объектах. Поэтому необходимо определить максимальное количество объектов, на которых с вероятностью не меньше заданной, возможно возникновение ЧС в течение  $\tau_{\max}$ .

Четвертый этап предполагает обоснование распределения ресурсов между центральной базой и объектами, обеспечивающего минимум максимального ущерба от ЧС. Для минимизации возможного ущерба объектам выделяются ресурсы, как с центральной базы, так и с объектов, на которых нет ЧС.

В случае возникновения ЧС на  $i$ -м объекте, которая может привести к ущербу на этом объекте величиной  $U_i^{\max}$ , ресурсы, размещенные на нем, немедленно используются для ее ликвидации и предотвращают ущерб на величину  $U_i^0$ .

Задача решается последовательно для всех ситуаций. При этом алгоритм решения задачи состоит в следующем.

- Вычисляются оптимальные величины  $x_{ij}, x_{kj}, x_{lj}, U_i^{\Sigma}$ , решением целочисленной задачи линейного программирования.
- Эта процедура повторяется для всех возможных ситуаций.
- Строится матрица  $\|U_i^{\Sigma}\|$ .
- Распределяются ресурсы по варианту, для которого  $\|U_i^{\Sigma}\|$  максимально.

Тем самым, завершается предварительный процесс синтеза системы и осуществляется переход к решению задач, связанных с количественным анализом результатов функционирования системы обеспечения ресурсами.

## Литература

- [1] Вентцель Е.С. Введение в исследование операций. М.: Советское радио. 1964. 391с.  
[2] Цвиркун А.Д., Акинфиев В.К. Структура многоуровневых и крупномасштабных систем. М.: Наука. 1993. 160с.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ

Шпербер Е.Р., Шпербер Д.Р., Боковикова Т.Н.  
Кубанский государственный технологический университет.  
E-mail: eshperber@mail.ru

Очистка территории после пролива нефти и нефтепродуктов, аварийных разливах при разгерметизации технологических трубопроводов является актуальной задачей.

Разработана технология получения парогидроизолирующих прослоек в земляном полотне автомобильной дороги с целью борьбы с морозным пучением. При промерзании глинистых грунтов (в том числе суглинков, супесей, пылеватых песков) происходит подтягивание свободной влаги к зоне отрицательных температур, что приводит к увеличению в объеме до 9%, причем этот процесс носит неравномерный характер.

Способ нанесения парогидроизоляционного слоя (Патент РФ №2179609) включает: 1) подготовку основания путем нанесения на земляное полотно гидроизоляционного слоя ( $0,03-0,07\text{ м}^3/\text{м}^2$ ), в качестве которого используют нефтешламы (замазученный песок, нефтесляженный грунт); 2) его уплотнение; 3) укладки минерального материала (щебня, гравия или их смеси); 4) нанесение второго слоя из нефтешламов ( $0,05-0,01\text{ м}^3/\text{м}^2$ ); 5) повторное его уплотнение и выдержка в течение времени, зависящее от температуры окружающей среды (57-77,5 ч). Зависимость прочности образцов дорожного основания от расхода нефтешлама представлена на рис. 1.

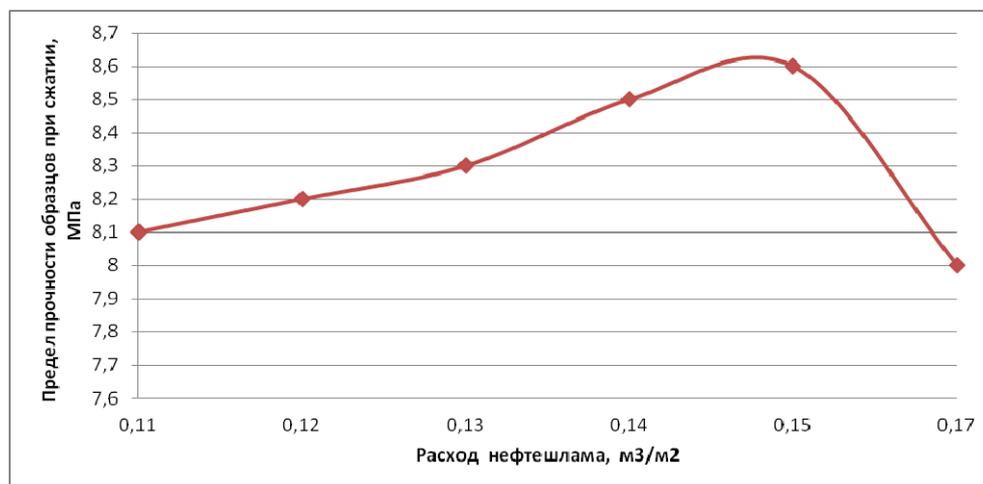


Рис. 1. Зависимость прочности образцов дорожного основания от расхода нефтешлама

При общем расходе  $0,01-0,15\text{ м}^3$  нефтешлама на  $1\text{ м}^2$  дорожного полотна прочность дорожного основания увеличивается, увеличение расхода свыше  $0,15\text{ м}^3/\text{м}^2$  приводит к понижению прочности, что связано с перенасыщением объема связующего с дорожной одеждой.

Описанным способом построено 12 км дорог. На всех участках применения прослойки параметры ровности не выходят за пределы, установленные нормативными документами, трещины, вызванные действием сил морозного пучения, отсутствуют. На участках где прослойка не применялась, наблюдаются просадки и пучины земляного полотна, а также отклонения параметров ровности от нормативных показателей.

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДОБЫЧИ УГЛЕВОДОРОДОВ НА ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОЙ СТАДИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Воронков И.В., Алексеев В.В.

Кызылординский государственный университет имени Коркыт Ата.

Республика Казахстан. E-mail: valexeevtt@mail.ru

Особенности развития любой нефтегазовой отрасли на современном этапе существенно зависят как от природных факторов, так и от производственной деятельности предприятий нефтегазовой компании. К природным факторам, включающим геологические и территориально-административные условия нахождения объектов нефти и газа, можно отнести следующие факторы:

- наличие в резерве относительно небольшого количества крупных объектов, содержащих малодебитные продуктивные пласты;
- большая глубина залегания продуктивных пластов, требующая дорогостоящего бурения;
- освоение морских территорий, например, акватории Каспийского моря;
- наличие трудноизвлекаемых запасов, к которым применяются методы повышения нефтеотдачи;
- нахождение нефтяных и газовых пластов под мощной толщей каменной соли, бурение через которую вызывает серьезные осложнения (например, в Прикаспии).

Такие факторы производственной деятельности компаний, как:

- распад СССР и нарушение хозяйственных связей государств РФ и Республики Казахстан;
- переход на новые формы хозяйствования (образование АО, ООО, НК и др. организаций), которые потребовали значительного периода адаптации;
- недостаточное финансирование, которое испытывали многие предприятия и компании, привели к ухудшению экономических показателей по результатам многих видов работ.

Освоение месторождения “Кумколь” в Республике Казахстан было начато в 1986 г. компанией “Южнефтегаз”. Нефтеотдача продуктивных пластов и объем извлеченной нефти зависят как от свойств нефти и коллекторов, так и от методов воздействия. Даже при самом благоприятном сочетании свойств пластов и нефти не удается извлечь на поверхность более 60%, а в редких случаях около 70% нефти от геологических запасов нефти в залежи.

В начальный период эксплуатации месторождения использовался фонтанный способ добычи нефти. При вышеуказанном способе добычи давление в эксплуатационных скважинах меньше, чем пластовое давление, в результате чего происходит движение пластовой жидкости на поверхность под действием пластового давления. В первые годы эксплуатации месторождения обводненность скважин была незначительной, позднее с повышением степени обводненности потребовалась закачка воды в водоносный горизонт для поддержания пластового давления и поддержания обводненности на неизменном уровне.

Далее до 2003-2004 гг. месторождение эксплуатировалось газлифтным способом Канадской компанией (пластовая жидкость с нефтью поднималась на поверхность за счет сжатого газа, нагнетаемого в колонну подъемных труб). Этот способ эксплуатации стал применяться тогда, когда заданные отборы нефти не обеспечиваются за счет энергии собственного пластового газа (свободного или растворенного), что требует закачки газа с поверхности.

С 2004-2005 гг. месторождение перешло в совместное владение Китайской компанией и добыча нефти, на заключительной стадии эксплуатации, стала осуществляться механизированным способом добычи с помощью глубинных насосов.

В настоящее время месторождение “Кумколь” имеет шесть горизонтов: два мелового (М-1, М-2) и четыре юрского (Ю - 1, Ю - 2, Ю - 3 и Ю - 4) периодов. Они состоят из четырех объектов эксплуатации с различными газовым фактором и степенью обводненности. Несмотря на то, что последние скважины были пробурены в 2010-2012 гг., общая обводненность нефти понизилась не существенно, и в среднем на различных скважинах достигла 90-98%.

На заключительном этапе добыча нефти осуществляется насосным оборудованием: плунжерными штанговыми глубинными, штанговыми винтовыми и электрическими погружными центробежными насосами. В этот период эксплуатации нефтедобывающая компания столкнулась с проблемой поддержания оптимальной добычи нефти при ее предельно высокой обводненности.

Процесс добычи нефти и газообразных углеводородов осуществляется на технологической схеме. Эта схема включает в себя запорную арматуру, состоящую из ручных и автоматических запорных клапанов, дроссельного клапана, размещенных на поверхности, замерной установки типа “Спутник” (АМ-40-8-400 и АМ-40-8-1500), сточного коллектора диаметром 159 мм, двух двухфазных сепараторов (С1 и С2), транспортирующих насосов (НБ1 - НБ6), путевого подогревателя (ПП - 0,63), узла учета нефти, состоящего из фильтра, счетчика и байпасной линии с запорной арматурой.

Продукция добывающих скважин по отдельным выкидным линиям поступает в замерные установки (ЗУ) типа “Спутник” (АМ-40-8-400 и АМ-40-8-1500), где производится поочередный замер дебита пластовой жидкости со скважин и по общему сточному коллектору из промысловых скважин направляется на групповую установку (ГУ), объединенную по территориальному признаку. На площадке групповая установка имеет два двухфазных сепаратора С1 и С2, насосы перекачки жидкости (НБ1 - НБ6), путевой подогреватель жидкости (ПП - 0,63) и узел учета нефти, состоящий из фильтра, счетчика и байпасной линии с запорной арматурой.

В начале процесса жидкость поступает в сепаратор С1, где происходит первичная сепарация пластовой жидкости со скважин на пластовую жидкость и газ. Жидкость принудительно откачивается насосами и через подогреватель поступает на узел учета и далее на установку предварительного сброса воды (УПСВ).

В оборудовании установки первичного сброса воды входит трехфазный сепаратор объемом 200 кубических метров с достаточной пропускной способностью, к которой подключены еще две подобные групповые установки. Для перекачки нефти в ЦППН применяются центробежные насосы. Отсепарированная вода также центробежными насосами перекачивается в блочную кустовую насосную станцию, где эта вода посредством более мощных насосов через нагнетательные скважины закачивается в разрабатываемые пласты для поддержания пластового давления.

Отсепарированный на установке предварительного сброса воды газ, как и на групповой установке, посредством газокompрессорной установки идет в цех утилизации газа.

Газ после сепарации в сепараторе С1 поступает в газовый сепаратор С2 и газокompрессорной установкой перекачивается в цех утилизации газа (ЦУГ) для получения электрической энергии. Производительность данной групповой установки по пластовой жидкости, в лучшем случае, составляет 5000 кубических метров в сутки. Но при этом общая добыча пластовой жидкости с 20 добывающих скважин составляет чуть более 7000 кубических метров в сутки.

Для поддержания оптимальной добычи нефти при ее предельно высокой обводненности было предложено соединить сточный коллектор одной из трех замерных установок (ЗУ-1, ЗУ-2, ЗУ-3) напрямую с установки предварительного сброса воды.

Газовый фактор с различных групповых установок сепарации изменяется более чем на порядок и на четырех установках групповой сепарации соответственно составляет 10, 112, 116 и 120 кубических метров газа на тонну нефти.

Для реализации данной цели была выбрана замерная установка ЗУ-3 со скважин с наименьшим газовым фактором, равным 10 метрам кубических на тонну нефти. Другой причиной является то, что установка предварительного сброса воды имеет ограничения по пропускной способности по жидкости и по газу.

Данное решение позволило снизить нагрузку на групповую установку по пластовой жидкости, что позволило иметь насосы в резерве для технического обслуживания без привлечения специальной техники, например, ЦА-320. Также это позволило увеличить количество добываемой пластовой жидкости за счет дополнительных ранее не работающих скважин. Кроме того, коэффициент эксплуатации скважин, определяемый отношением фактического времени эксплуатации к календарному за единицу времени, несколько повысился.

Применение модернизированной схемы прямого подключения сточного коллектора с малым газовым фактором позволило оптимизировать добычу нефти и несколько снизить себестоимость целевых продуктов – добываемой нефти и утилизируемого природного газа на заключительной стадии эксплуатации месторождения.

Такой подход может быть применен для поддержания оптимальной добычи нефти на других объектах данного месторождения.

## **УПРАВЛЕНИЕ ТЕСТОВЫМ СЕПАРАТОРОМ ПРИ ПУЛЬСИРУЮЩЕЙ ПОДАЧЕ ПЛАСТОВЫХ ЖИДКОСТЕЙ ИЗ ДОБЫВАЮЩИХ СКВАЖИН**

Тортбаев А.И., Алексеев В.В.

Казахский национальный технический университет. Республика Казахстан.

E-mail: a\_x\_a\_55@mail.ru

Добывающие скважины имеют различный срок эксплуатации и работают в различных условиях. Некоторые более поздние скважины работают в режиме фонтанирования, другие – более ранние работают в режиме закачки газа в пласт или в режиме газлифта, а самые ранние – работают с применением насосного оборудования, установленного в забое скважины. Такие скважины имеют различные дебиты, различные газовые факторы и степени обводненности.

Тестирование скважин, работающих на различных временных стадиях эксплуатации, вызывает проблемы в проведении сепарации в тестовом сепараторе. При переключении таких скважин из режима эксплуатации в режим тестирования создается пульсационный режим движения пластовых жидкостей на выкидных линиях, в коллекторе и на входе в тестовый сепаратор.

Ниже дается анализ процесса добычи пластовых жидкостей при их движении от устья скважины до тестового сепаратора и пути преодоления пульсационного режима тестирования.

На нефтедобывающих предприятиях пластовые жидкости под действием пластового давления или искусственно созданным давлением погружных насосов из природного нефтяного резервуара при определенной температуре и давлении из забоя скважины транспортируются к устью скважины.

На устье добывающей скважины пластовые жидкости проходят верхнюю запорную арматуру, состоящую из ряда ручных и автоматических клапанов. На каждой выкидной линии добывающей скважины расположены клапаны аварийно высокого и аварийно низкого давлений, которые работают под управлением системы аварийного отключения (САО) и клиновые задвижки в количестве, равном количеству коллекторов. Это позволяет переключать добычу пластовой жидкости (нефти и природного газа) с любой скважины на любую сепарационную систему, в том числе и на тестовый сепаратор.

Система добычи и первичной переработки пластовых жидкостей может включать несколько сепарационных линий, состоящих из нескольких ступеней сепарации (двух или

трехфазных). При малой степени обводненности нефти могут применяться двухфазные сепараторы, а при большой степени обводненности и при высоком газовом факторе – трехступенчатые.

Сепараторы нефти и газа представляют собой горизонтальные сосуды, работающие под высоким, средним или низким газовым давлением и предназначены для получения нефти, воды и газа (трехфазные), которые позднее подвергаются очистке от примесей физическими или физико-химическими методами.

Для тестирования каждой добывающей скважины пластовые жидкости регулярно направляются в тестовый сепаратор, который имеет конструкцию, подобную конструкции добывающего (объемного) сепаратора. При тестировании проверяется дебит скважины, а также расходы и составы выходных потоков нефти, газа и воды. Поэтому тестовый сепаратор снабжается необходимым и достаточным количеством контрольно-измерительных приборов (КИП): расходомерами, уровнемерами, манометрами, пробоотборниками и т.п.

Система управления (СУ) тестового сепаратора контролирует следующие основные параметры: давление газа, уровни нефти и границу раздела фаз “вода – нефть”. Для контроля вышеуказанных параметров применяются соответственно контроллер давления с клапаном регулятором давления, контроллер уровня нефти и клапан регулятор нефти и контроллер границы раздела фаз “вода – нефть” и соответствующий клапан регулятор.

При нормальном (штатном) протекании технологического процесса сепарации контроллер давления управляет клапаном регулятором давления и фактическое давление в оборудовании поддерживается в допустимом диапазоне регулирования. Однако, возможны ситуации, когда клапан регулятор давления не выполняет свои регулирующие функции – плохо приоткрывается при повышении давления или наоборот, плохо прикрывается при понижении давления.

Если давление в сепараторе начнет расти выше допустимого диапазона регулирования, тогда контроллер вырабатывает сигнал высокого давления в сепараторе и посылает его в центральную операторскую. В течение достаточного времени для принятия оперативного решения по устранению данной проблемы, полевой оператор может ее решить. Однако, если проблема высокого давления в сепараторе не была решена и давление продолжает увеличиваться, то при достижении аварийно высокого давления в оборудовании датчик аварийно высокого давления вырабатывает сигнал, который посылается на систему аварийного отключения (САО).

Система аварийного отключения посылает команду на клапан аварийно высокого давления, который отключает сепаратор от подачи пластовой жидкости на вход сепаратора. Очень высокое давление в сепараторе может привести к срабатыванию предохранительных клапанов и привести к выбросу газов в факельную систему. Такой выброс большого объема газа может отрицательно сказаться на работе факельной системы и привести к необоснованной потере газообразных углеводородов.

Если давление в сепараторе начнет падать ниже допустимого диапазона регулирования, тогда контроллер вырабатывает сигнал низкого давления в сепараторе и посылает его в центральную операторскую. В течение достаточного времени для принятия оперативного решения по устранению данной проблемы, полевой оператор может ее решить. Однако, если проблема низкого давления в сепараторе не была решена и давление продолжает уменьшаться, то при достижении аварийно низкого давления в оборудовании датчик аварийно низкого давления вырабатывает сигнал, который посылается на систему аварийного отключения (САО).

Система аварийного отключения посылает команду на клапан аварийно низкого давления, который отключает сепаратор от выхода газа из сепаратора. Очень низкое давление в сепараторе затрудняет транспортировку сырой нефти и пластовой жидкости по причине высоких сопротивлений трубопроводных линий.

Аналогично устроена логическая система управления уровнем нефти в бункере ее сбора и уровнем раздела фаз “вода – нефть” в бункере сбора жидкостей. Однако при пульсации пластовых жидкостей система управления уровнями более консервативна и менее подвержена быстрым изменениям. Поэтому она для анализа поведения процесса сепарации в оборудовании не приводится.

При пульсирующей подаче пластовых жидкостей из тестируемой скважины наблюдается пульсирующая подача в тестовый сепаратор. В тестовом сепараторе возникает импульс входного давления, который вызывает срабатывание сигнализатора высокого давления и подачи звукового и светового сигнала в центральную операторскую.

Оператор, приняв такой сигнал, передает информацию о высоком давлении полевому оператору, который должен понизить высокое давление в сепараторе. Однако при малых импульсах давления система управления быстро восстанавливается.

При очень высоких импульсах давления срабатывает датчик аварийно высокого давления, который посылает сигнал на САО. Система аварийного останова клапаном аварийно высокого давления отключает тестовый сепаратор от подачи пластовой жидкости. Процесс тестирования прекращается.

Для восстановления режима тестирования необходимо преодолеть эту проблему, которая устраняется в течение достаточно длительного времени. После восстановления подачи пластовой жидкости, пульсирующий режим может привести и приводит к повторению подобного отключения тестового сепаратора и останова процесса тестирования. Может потребоваться дополнительное время на возобновление работы тестового сепаратора.

Для преодоления пульсационного режима тестирования и прекращения частых остановок рекомендуется установка на входе пластовых жидкостей демпфирующей емкости, которая сглаживает входные пульсации и создает нормальный режим эксплуатации тестового сепаратора.

Конструкция такой демпфирующей емкости представляет собой сферический сосуд с гибкой мембраной, установленной в верхней части сосуда. Гибкая мембрана или диафрагма занимает одну треть часть сосуда и наполнена инертным газом. Демпфирующая емкость устанавливается в верхней точке трубопровода входа пластовых жидкостей. При входе пульсирующего потока пластовой жидкости часть более легких жидкостей и газа попадает из входного трубопровода внутрь этой емкости и за счет гибкой мембраны происходит сглаживание пульсаций.

Расчетными параметрами демпфирующей емкости являются входная производительность (дебет скважины), частота и амплитуда пульсаций, которые зависят от объема рабочего пространства сосуда. Объем рабочего пространства демпфирующей емкости может быть рассчитан по аналогии с расчетом расширительных емкостей поршневых компрессоров.

## **Выводы**

Предложены:

1. способ использования демпфирующей емкости, который позволит переключать скважины с различным режимом работы из режима эксплуатации в режим тестирования;
2. схема конструкции, которая не создаст проблемы в работе тестового сепаратора при пульсирующем режиме работы добывающей скважины.

## **ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ, СВЯЗАННЫЕ С ПРОИЗВОДСТВОМ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ**

Уразгулова М.М., Шорин С.В., Ожогина О.Р.

Дзержинский политехнический институт, филиал Нижегородского государственного  
технического университета имени Р.Е. Алексеева. E-mail: shorin-sergey@mail.ru

Современные, интенсивные методы ведения сельского хозяйства требуют использования очень больших количеств получаемых в промышленности химикатов-удобрений, пестицидов. Их применение гарантирует получение высоких урожаев, улучшает качество сельскохозяйственной продукции и предотвращает ее чрезмерные потери. Однако с развитием химизации сельского хозяйства возрастает и ее отрицательное влияние на окружающую среду.

Увеличение числа и мощностей предприятий, производящих удобрения, также связано с усилением загрязнения среды вредными газообразными, жидкими и твердыми отходами.

В сельском хозяйстве нежелательные последствия от внесения минеральных удобрений возникают, главным образом, вследствие неоправданного завышения их доз. Это приводит к ухудшению качества урожая и попаданию в биосферу (в почву, водоемы, атмосферу) значительного количества химикатов, неиспользованных растениями.

Особенно большой вред с экологической точки зрения наносит вымывание нитратов. Значительные количества азота при применении традиционных форм удобрений теряются также вследствие его денитрификации (то есть процесса восстановления нитратного азота почвенными микроорганизмами с образованием различных летучих соединений, вследствие чего из почвы теряется значительная часть азота, вносимого с удобрениями) и улетучивания.

Применение больших доз удобрений с водорастворимым фосфором вызывает эрозию почвы и ухудшение ее структуры.

От избытка удобрений и пестицидов, в частности гербицидов и продуктов их разложения, гибнут не только вредные, но и полезные насекомые и растения, уменьшается количество птиц, некоторых видов полезных животных.

Другая экологическая проблема заключается в том, что некоторые виды удобрений пылят, при этом ухудшаются санитарные условия труда при производстве и внесении в почву минеральных удобрений[1].

Без удобрений высокую производительность сельского хозяйства обеспечить невозможно, но для исключения вредных последствий их применения необходимо использовать удобрения в оптимальных дозах при сбалансированных соотношениях питательных веществ, зависящих от вида и сорта растения, его потребности в тех или иных элементах питания, от вида почвы, водного режима, климата и многих других условий. В связи с этим в последние годы наблюдается тенденция к увеличению производства сложных гранулированных удобрений. Это обусловлено их бесспорным преимуществом по сравнению с порошкообразными удобрениями.

Гранулированные сложные удобрения обладают лучшими физическими и агрохимическими свойствами – они не пылят, в результате, чего улучшаются условия труда в сфере их производства и применения, а также снижаются потери при транспортировании, хранении и внесении в почву; имеют повышенную сыпучесть и плотность, меньшую склонность к слеживанию и истиранию, узкий гранулометрический состав и небольшое количество мелкодисперсной фракции с размером частиц – менее 1 мм, что обеспечивает возможность их транспортирования и хранения навалом.

В гранулированных удобрениях достигается равномерное распределение основных питательных веществ и микроэлементов, что в значительной степени повышает их агрохимическую эффективность.

Гранулированные сложные удобрения не сегрегируют; легко рассеиваются с помощью туковых сеялок, с большей эффективностью используются растениями, так как медленнее

вымываются почвенными водами и в меньшей мере деградируют в почве вследствие меньшей поверхности контакта с ее компонентами; требуют меньших расходов на их транспортирование, хранение, внесение в почву. Производительность труда при внесении гранулированных удобрений в почву повышается в 1,5-2 раза [2].

Дзержинским политехническим институтом совместно с Научно-исследовательским институтом карбамида были получены удобрения, отвечающие всем требованиям сельского хозяйства. Данная технология позволяет получать широкий ассортимент гранулированных сложных минеральных удобрений с различным содержанием питательных веществ и микроэлементов в соответствии с требованиями заказчика.

Принципиальная схема лабораторной установки состоит из:

- барабана-гранулятора с насадкой, который приводится во вращение электрическим приводом, что позволяет активно перемешивать загруженный в него гранулированный аммофос или карбамид и создавать завесу из гранул;
- механической форсунки, совмещенной с плавителем, с помощью которой плава карбамида наносится на завесу из гранул в барабане;
- плавителя, который служит емкостью для плава карбамида;
- компрессора для создания давления 1,8-2,0 МПа в плавителе для распыления плава карбамида;
- температура в плавителе поддерживается постоянной с помощью прибора КСМ.

Выделяющийся в процессе аммиак и образующаяся пыль – являются источниками загрязнения, а порой и отравления окружающей среды. Поэтому проблема улавливания, обезвреживания и утилизации ценных веществ, содержащихся в отходящих газах, сродни проблемам комплексного использования сырья и создания безотходных технологий. К особенностям состава отходящих газов в производствах минеральных удобрений относится запыленность, иногда весьма значительная.

Осаждение пыли в коммуникациях и на поверхностях технологической аппаратуры приводит к образованию плотных осадков, что нарушает нормальную эксплуатацию установок. Кроме того пылеунос – это прямые потери сырья и готовой продукции.

Поэтому от газового потока первоначально необходимо отделить пыль. На лабораторной установке это осуществлялось с помощью фильтров-пылеуловителей (волоконистых или тканевых), а в производственных условиях очистку можно проводить с использованием электрофильтров или центробежных (пылеосадительных камер, циклонов). После этого осуществляется очистка отходящих газов от аммиака в адсорбере, где в качестве сорбента использовался активный уголь марки АГ-3.

## Литература

- [1] Кувшинников И.М. Минеральные удобрения и соли: Свойства и способы их улучшения. М.: Химия. 1987. С.7.
- [2] Позин М.Е. Технология минеральных удобрений. Л.: Химия. 1989. С.22.

## РЕШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ В ПРОИЗВОДСТВАХ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ И БУТАДИЕН-СТИРОЛЬНЫХ КАУЧУКОВ

Малявина Ю.М., Перегудов Ю.С., Корчагин В.И.

Воронежский государственный университет инженерных технологий.

E-mail: inorganic\_033@mail.ru

В производстве минеральных удобрений из природного сырья на ОАО «Минудобрения» (г. Россошь, Воронежская область) в качестве побочного продукта образуется большое количество химически осажденного мела (карбоната кальция). После дополнитель-

ной обработки карбонат кальция используется в качестве технологического мела при производстве строительных материалов (ТУ 2144-028-00260-486-2008 марка «А») и сельском хозяйстве материалов (ТУ 2182-1500206486-2000). Однако это не снимает проблему хранения и складирования мела. Ежегодно сотни тысяч тонн ссыпают на значительные площади, ухудшая состояние почвы и окружающей среды.

Потребность в меле в нашей стране существует. По оценкам аналитиков рынка, объем потребления тонкодисперсного мела составляет 400-420 тыс. тонн в год. Объемы импорта тонкодисперсного мела в Россию ежегодно растут (в среднем, на 20%). Мел широко применяется в качестве наполнителя и коагулянта для композиционных материалов, резиновых смесей, ПВХ, используется в лакокрасочной, бумажной, строительной промышленности.

При использовании наполнителя на основе химически осажденного мела можно значительно снизить себестоимость готовой продукции, не ухудшая ее качества, и воздействие на окружающую среду.

Предлагается решить проблему охраны окружающей среды, используя химически осажденный мел в качестве карбонатного наполнителя и коагулянта в каучуки на стадии латекса.

Для улучшения технологических свойств мела необходимо провести дополнительные операции: сушка для удаления аммиака и достижения влажности менее 0,2%; просев для отделения кремнезема и силикатов, измельчение для получения тонкодисперсного мела и гидрофобизация.

При влажности, превышающей 0,2% по массе, мел агрегируется из-за большой "связности" частиц, что приводит к его неравномерному распределению в полимере, негативно сказывается на работе оборудования и качестве получаемых изделий. Кроме того, мел зависает и слеживается в бункерах. Для устранения этих явлений мел подвергают поверхностной обработке – гидрофобизации.

Гидрофобный химически осажденный мел представляет интерес для производства синтетического каучука, так как он обладает рядом ценных свойств: белый цвет, относительно высокая дисперсность, округлая форма частиц, легкая диспергируемость в каучуке, малая гигроскопичность, низкая стоимость и нетоксичность. Были выбраны гидрофобные агенты и их количество.

На основании их были получены образцы карбонатных коагулянтов. Эти коагулянты были использованы для выделения каучука из латексов. При этом была установлена максимальная степень наполнения латекса коагулянтом и определен водородный показатель сточной воды после добавления мела в латекс, который равен 7,6. Значения рН латекса было равно 9,9. Полученные результаты свидетельствуют о том, что после использования карбоната кальция сточная вода имеет практически нейтральную среду.

На стадии получения высоконаполненных бутадиен-стирольных каучуков в большинстве случаев в качестве коагулянта используют хлорид натрия. В связи с этим сточные воды производства каучуков содержат значительные количества хлорида натрия.

При использовании химически осажденного мела в качестве наполнителя в латекс мы решаем ряд проблем связанных с охраной окружающей среды не только на стадии использования побочного продукта и освобождения значительных площадей от него, но и на стадии получения высоконаполненных бутадиен-стирольных каучуков, не нанося вред окружающей среде полученными сточными водами.

В целом на современном этапе антропогенное влияние человечества на природу так велико, что при осуществлении технических решений на передний план выдвигаются такие проблемы, как экологизация производства и экономия природных ресурсов.

В частности, производство эмульсионных каучуков связано с использованием для их выделения большого количества хлорида натрия (190-300 кг на 1 т выделяемого каучука). Ежегодно крупным заводом-производителем каучука сбрасывается в водоемы 20-30 тыс.

тонн хлорида натрия, что приводит к безвозвратной потере ценного сырья (хлорида натрия) и необратимому засолению пресных водоемов и, как следствие, ухудшению их экологического состояния. Физико-химические методы извлечения хлоридов из сточных вод трудоемки и дорогостоящи, поэтому не получили признания в промышленности. Кроме того, хлорид натрия оказывает отрицательное влияние на работу биологических сооружений, угнетая работу аэротенков. При использовании гидрофобного карбоната кальция проблема очистки сточных вод решается использованием фильтров, задерживающих частицы мела и их возврат в производство.

Таким образом, стадия выделения эмульсионных каучуков из латексов является проблематичной с точки зрения экологии. При отсутствии экономически приемлемых методов обессоливания сточных вод снизить содержание хлоридов в сбрасываемых стоках и исключить засоление пресных водоемов при производстве эмульсионных каучуков в настоящий момент возможно путем внедрения бессолевой или малосолевой технологии выделения каучуков.

Поэтому, изложенные выше экологические, технологические и экономические проблемы делают весьма актуальной разработку способа выделения каучуков из латексов с помощью гидрофобного карбонатного коагулянта, полученного из побочного продукта производства минеральных удобрений.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РЕМОНТА ДЕФЕКТОВ В СТЕКЛОЭМАЛЕВЫХ ПОКРЫТИЯХ

Кифятова А.Р., Шингаркина О.В., Алексеева Н.А., Кравцов В.В.

Уфимский государственный нефтяной технический университет.

E-mail: alina\_kifyatova@mail.ru

Опыт применения полимерных материалов и композиций для ремонта дефектов в стеклоэмалевых покрытиях технологических аппаратов и трубопроводов позволяет сделать вывод о том, что основными причинами, понижающими надежность ремонта и сроки межремонтного пробега оборудования до отказа, являются:

- различие в коэффициентах термического расширения (к.т.р.) затвердевшей композиции и металла;
- высокие значения коэффициентов сорбции и диффузии используемых полимерных материалов;
- протекание подпленочной коррозии и образование продуктов взаимодействия на границе раздела фаз «металл-полимер».

Сорбционно-диффузионные процессы в полимерах играют определяющую роль при использовании их в качестве защитных покрытий или герметизирующих материалов. Исследования проводили гравиметрическим методом в соответствии с ГОСТ 12020-72 в 32% HCl и 20% NaOH для температур эксплуатации 20, 40 и 60 °С.

Во всех случаях температурная зависимость коэффициентов хорошо описывается экспоненциальными зависимостями типа

$$\Delta m = \Delta m_{max} (1 - e^{-\gamma \tau}),$$
$$l_{\tau} = l_{max} (1 - e^{-\gamma \tau}),$$

где  $\Delta m_{\tau}$ ,  $l_{\tau}$  – превращение массы образца и глубины проникания среды через отрезок времени  $\tau$ ,  $\Delta m_{max}$ ,  $l_{max}$  – превращение массы образца и глубины проникания среды в состоянии насыщения.  $\gamma$  – эмпирический коэффициент.

$\tau$  – продолжительность экспозиции.

Параллельно часть образцов подвергались изучению глубины проникания фронта диффундирующей среды. С этой целью использовали разновидность индикаторного метода, заключающегося в измерении глубины окрашенного индикатором слоя в поперечных срезах образцов с помощью биологического микроскопа в проходящем свете.

После обработки экспериментальных данных рассчитаны коэффициенты диффузии, сорбции и проницаемости указанных сред в эпоксидную, полиэфирную, фенолоформальдегидную композиции, политетрафторэтилен.

Определены значения энергии активации и предэкспоненциальные множители математических зависимостей, позволяющие оценивать параметры переноса при любой рабочей температуре.

Результаты исследования дали возможность определить круг материалов для использования при ремонте технологического оборудования. Полученные данные по кинетике поглощения жидких сред полимерами во всех случаях могут быть описаны экспоненциальными уравнениями. Определены коэффициенты корреляции между гравиметрическими и глубинными показателями процессов переноса.

Материалы, используемые для ремонта, должны обладать оптимальным сочетанием свойств: минимальными деформациями при изменении температуры и набухании в рабочей среде, высокой сохранностью адгезионных связей в периоды диффузионной проницаемости и «конкурентной адсорбции».

Аналитическое определение сохранности начальных адгезионных связей (для «сухого» полимера) возможно на базе промежуточных измерений через некоторые интервалы времени при экспозиции образцов в среде с дальнейшей экстраполяцией результатов. Критическим можно принять время, через которое величина адгезии станет равной нулю.

Следует отметить также, что в реальных условиях немаловажную роль при выборе материалов для ремонта играет необходимость учета адгезии полимерной композиции с поверхностью стекловидного покрытия, примыкающего к дефектному участку.

Апробирован комплексный подход к выбору материалов для ремонта сколов в стеклоэмали и коррозионных язв в металле химических и нефтехимических аппаратов различного технологического назначения, получены положительные результаты.

При изучении химической стойкости материалов в качестве рабочей среды использовали 10%-ный раствор  $H_2SO_4$ , в качестве объекта исследования – образцы на полимерной основе, компонентный состав которых приведен в табл. 1.

**Табл. 1.** Характеристика образцов

Наименование компонентов	Содержание компонентов, %						
	эпоксидные		фенольные	феноло- эпоксидные		эпоксидно- фурановая	полиэфирная
	ЭК	ЭА	АЗ	ФЭС	ФЭА	ЭФ	ПЭ
Андезит (порошок)		69,5				58	
Арзамит-5 (порошок)			50				
Арзамит-5 (раствор)			50				
Гипериз							1,5
Дибутилфталат		25					
Модификатор СФГ-1							
Нафтенат кобальта							3
Полиэтиленполиамин	5	3					
Полиэфирная смола ПН-10							27,5
Титана диоксид	50						
Эпоксидная смола ЭД-20	45	25					
Эпоксидно-фурановая смола ФАЭД-8						35	

Температура испытания образцов всех видов составила 85°C, что обусловлено производственными параметрами.

Определение изменения массы образцов проводили с учетом ГОСТ 12020-72 в течение 30 суток и промежуточными взвешиваниями через 7 суток. Прочность сцепления композиций с субстратами определяли методом вытягивания цилиндра. С целью оценки устойчивости материалов к эрозионному воздействию сред проводили измерение твердости по Бринелю (ГОСТ 9012-59). Предполагалось при этом наличие корреляции между показателями твердости и износостойкости. Результаты расчетов, на основе полученных экспериментальных данных, приведены в табл. 2.

**Табл. 2.** Показатели стойкости полимерных композиций

Наименование композиции (шифр)	Набухание в среде, %	Показатели				Баллы стойкости с учетом нескольких факторов
		Прочность сцепления после экспозиции в среде, МПа		Твердость, НВ, МПа		
		со сталью	со стеклоэмалью	исходных образцов	после экспозиции	
ЭК	0,082	2,01	0,83	110	85	4
ЭА	0,080	2,08	0,65	104	72	5
АЗ	0,030	3,11	1,43	200	185	3
ФЭС	0062	2,82	1,37	172	150	1
ФЭА	0,055	2,77	1,15	164	146	2
ЭФ	0,074	2,43	0,95	160	128	6
ПЭ	0071	1,76	061	148	116	7

Полученные данные позволили принять в качестве композиций для ремонта заводского стеклоэмалированного оборудования феноло-эпоксидные ФЭС и ФЭА, это обеспечило на практике межремонтные сроки службы оборудования в течение 3-3,5 месяцев.

## МЕТОДЫ БОРЬБЫ СО СТАТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРИЗАЦИЕЙ ПОЛИМЕРОВ

Чиняков Е.М., Быковский Н.А., Пучкова Л.Н.

Филиал Уфимского государственного нефтяного технического университета. г. Стерлитамак. E-mail: nbikovsky@list.ru

В производстве многих полимеров (суспензионный поливинилхлорид, полистирол, полиэтилен высокого низкого и давления, полипропилен и другие) проблема их статической электризации является актуальной. Это приводит к «взбуханию» полимера, что негативно влияет на производительность установок, оборудование и обслуживающий персонал.

Наиболее ярко способность к электризации появляется у диэлектрических материалов. Чем выше сопротивление диэлектрика, тем сильнее его способность к электризации [1].

Существует множество способов борьбы со статическим электричеством полимеров. Все они могут быть условно разделены на две группы. К первой из них относятся способы, использование которых предотвращает накопление зарядов статического электричества на взаимодействующих телах.

Сюда входят заземление металлических и электропроводных неметаллических элементов оборудования; увеличение поверхностной и объемной проводимости диэлектриков, а также другие способы, в том числе подбор контактных пар.

Вторая группа способов, не исключая возможности накопления зарядов, предотвращает нежелательное или опасное их проявление. В этом случае задача решается установкой на технологическом оборудовании нейтрализаторов зарядов статического электричества, деионизаторов, а также другими способами, в том числе проведением технологических

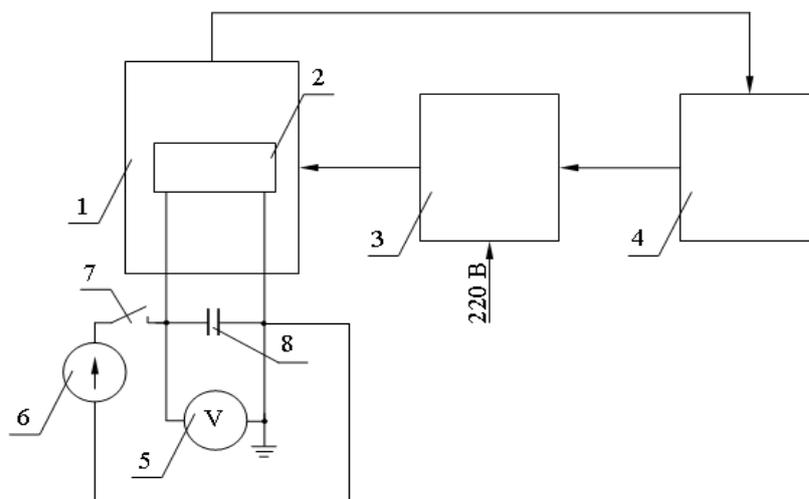
процессов в средах, в которых разряд статического электричества не вызывает пожаров и взрывов [2].

Многие из указанных выше способов вызывают определенные трудности при их реализации и требуют больших финансовых затрат. Нет гарантии, что установленное оборудование будет работать эффективно в конкретных производственных условиях. Поэтому при производстве полимеров наиболее простым и экономичным методом борьбы со статическим электричеством является увеличение поверхностной проводимости полимера за счет обработки его антистатиками.

Антистатиками можно обрабатывать готовый полимер или вводить их в полимеризатор вместе с различными добавками и стабилизаторами. Это приводит к значительному снижению сопротивления полимера, и как следствие этого существенно уменьшает время необходимое для стекания статического электричества с его поверхности. Антистатики вводят в состав материалов при их производстве или наносят на поверхность изделий в виде растворов, аэрозолей, эмульсий.

При этом величина удельного поверхностного сопротивления полимеров снижается в среднем с  $10^{16}$  до  $10^8$  Ом. В качестве антистатиков в промышленности чаще всего применяют различные поверхностно-активные вещества [3].

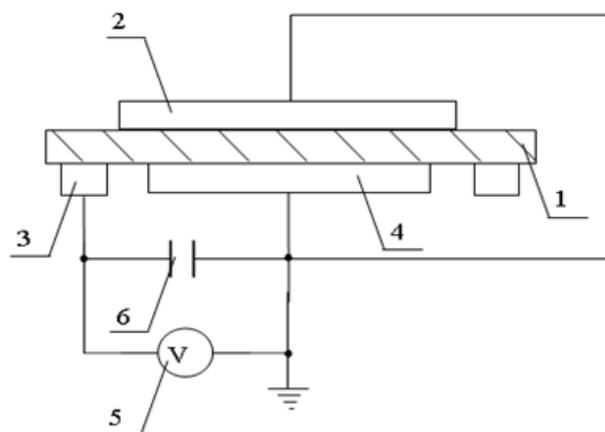
В целях выбора наиболее подходящего антистатика для обработки поливинилхлорида (ПВХ) нами были проведены исследования влияния различных веществ на удельное поверхностное сопротивление ПВХ. Измерение удельного поверхностного сопротивления порошка как чистого ПВХ, так и предварительно обработанного одним из антистатиков проводились на установке, схематично изображенной на рис. 1.



**Рис. 1.** Принципиальная схема измерительной установки. 1 – термостат; 2 – измерительная ячейка; 3 – электронный ключ; 4 – регулятор температуры; 5 – вольтметр; 6 – источник напряжения; 7 – ключ; 8 – конденсатор.

Измерительная ячейка 2 помещена в термостат 1, в котором поддерживается необходимая влажность и температура. Создание влажности в термостате осуществляется добавлением внутрь его расчетного количества дистиллированной воды. Измерение и поддержание заданной температуры в термостате осуществляется микропроцессорным измерительным регулятором 4 и электронным ключом 3. Для создания начального напряжения на измерительной ячейке используется источник высоковольтного напряжения 6 и нормально открытый контакт 7. Пределы измерения электрического сопротивления ячейки изменяются с помощью конденсаторов 8.

Измерительная ячейка, используемая в эксперименте представлена на рис. 2.



**Рис. 2.** Принципиальная схема измерительной ячейки

1 – исследуемый образец; 2 – защитный электрод; 3 – незащищенный электрод; 4 – защищенный электрод; 5 – электростатический вольтметр; 6 – конденсатор.

Измерительная установка представляет собой резистивно-емкостную цепь, образованную исследуемым образцом, измерительными электродами, конденсатором и электростатическим вольтметром.

Процесс разрядки конденсатора в электрической цепи, содержащей емкостной и резистивный элементы, определяется значениями емкости конденсатора и сопротивлением резистивного элемента. Если конденсатор зарядить, создав на нем постоянное напряжение  $U_0$ , то с течением времени это напряжение будет убывать вследствие протекания тока в резистивном элементе и разрядки конденсатора.

Согласно второму закону Кирхгофа, электрическое состояние такой цепи будет описываться уравнением:

$$Ri + \frac{1}{C} \int idt = 0, \quad (1)$$

где  $R$  – сопротивление резистивного элемента, Ом;  $i$  – сила тока в цепи, А;  
 $C$  – емкость конденсатора, Ф;  $t$  – время, с.

Поскольку  $i = \frac{dq}{dt}$ , а  $q = CU$  (где  $q$  – величина электрического заряда), ток в схеме будет определяться следующим выражением:

$$i = C \frac{dU}{dt}. \quad (2)$$

Заменяя в уравнении (1) значение тока из уравнения (2), получим:

$$RC \frac{dU}{dt} + U = 0. \quad (3)$$

Решение дифференциального уравнения (3) ищем в виде:

$$U = A \exp(\beta t), \quad (4)$$

где  $A$  – постоянная интегрирования;  $\beta$  – некоторый коэффициент.

Подставляя в уравнение (3) величину напряжения из уравнения (4), после несложных

вычислений получим:

$$RC\beta + 1 = 0 \text{ или } \beta = -\frac{1}{RC}. \quad (5)$$

Таким образом, зависимость напряжения на конденсаторе от времени описывается уравнением:

$$U = A \exp\left(-\frac{1}{RC}t\right). \quad (6)$$

Постоянную интегрирования  $A$  определяем в соответствии со вторым законом коммутации:

$$U_c(0_-) = U_c(0_+), \quad (7)$$

где  $U_c(0_-)$  – напряжение непосредственно перед коммутацией, В;  $U_c(0_+)$  – напряжение непосредственно после коммутации, В.

Напряжение непосредственно перед коммутацией равно начальному напряжению на конденсаторе  $U_0$ . Напряжение непосредственно после коммутации равно постоянной интегрирования  $A$ . Таким образом, постоянная интегрирования равна начальному напряжению на конденсаторе и уравнение (6) принимает вид:

$$U = U_0 \exp\left(-\frac{1}{RC}t\right). \quad (8)$$

В полулогарифмических координатах уравнение (8) представляет собой прямопропорциональную зависимость:

$$\ln U = \ln U_0 - \frac{1}{RC}t. \quad (9)$$

Уравнение (9) позволяет по экспериментальным данным зависимости напряжения на конденсаторе от времени определить постоянную времени разряда и при известной емкости конденсатора сопротивление измеряемого образца:

$$R = \frac{1}{C\tau}, \quad (10)$$

где  $\tau$  – постоянная времени разряда, 1/(Ф·Ом).

По экспериментальным данным строили графики зависимости логарифма напряжения на ячейке от времени, при этом тангенс угла наклона полученных прямых был равен значению  $\tau$ .

Удельное поверхностное сопротивление образцов определяли с учетом размеров измерительной ячейки (длины измерительных электродов  $L$  и расстояния между ними  $l$ ) по формуле:

$$\rho_l = R \frac{L}{l}. \quad (11)$$

Для применяемой нами ячейки отношение  $L/l$  равно 54,53.

В ходе эксперимента исследовано семь марок антистатиков: сульфанол, алкапав, текстапав, дон, шпан-20, полиэлектролит ВПК-402, динариевую соль хромотроповой кислоты. Экспериментальные данные по представлены в таблице.

Таблица. Экспериментальные данные по выбору антистатика

Тип антистатика	Уравнение зависимости $1000 \cdot \ln U = f(t)$	Постоянная времени разряда $\tau, 1/(\Phi \cdot \text{Ом})$	Емкость конденсатора, применяемого при измерении, $\Phi$	Удельное поверхностное сопротивление ПВХ, Ом
Антистатик отсутствует	$1000 \cdot \ln U = 7804 - 3,0587t$	$3,0587 \cdot 10^{-3}$	$1,78 \cdot 10^{-9}$	$1,002 \cdot 10^{13}$
Динариевая соль хромотроповой кислоты	$1000 \cdot \ln U = 7804 - 3,35t$	$3,35 \cdot 10^{-3}$	$1,78 \cdot 10^{-9}$	$9,145 \cdot 10^{12}$
Дон	$1000 \cdot \ln U = 7804 - 31,98t$	$31,98 \cdot 10^{-3}$	$1,78 \cdot 10^{-9}$	$9,579 \cdot 10^{11}$
Шпан-20	$1000 \cdot \ln U = 7804 - 7,035t$	$7,035 \cdot 10^{-3}$	$3,114 \cdot 10^{-7}$	$2,489 \cdot 10^{10}$
Сульфанола	$1000 \cdot \ln U = 7804 - 113,12t$	$113,12 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$2,41 \cdot 10^8$
Полиэлектролит ВПК-402	$1000 \cdot \ln U = 7804 - 117,37t$	$117,37 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$2,323 \cdot 10^8$
Текстапав	$1000 \cdot \ln U = 7804 - 81,3t$	$81,3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$2,236 \cdot 10^6$
Алкапав	$1000 \cdot \ln U = 7804 - 140,06t$	$140,06 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$1,298 \cdot 10^6$

Как видно из таблица, лучшее антистатическое действие по отношению к поливинилхлориду проявляет алкапав.

На основании всех вышеуказанных данных можно сделать вывод, что наиболее оптимальным методом борьбы со статической электризацией полимеров является применение антистатиков.

### Литература

- [1] Максимов Б.К., Обух А.А. Статическое электричество в промышленности и защита от него. М.: Энергия. 1978. 80с.
- [2] Василенок Ю.И. Защита полимеров от статического электричества. Л.: Химия. 1975. 192с.
- [3] Станкевич К.И., Бей Т.В., Пестова А.Г. Гигиена применения полимеров. Киев: Здоровье. 1976. 144с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМ ИЗНОСА ПРИВОДНЫХ И ОПОРНЫХ РОЛИКОВ КОНВЕЙЕРНЫХ ЛИНИЙ

Романова Е.С.<sup>1</sup>, Абиев Р.Ш.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный строительный университет.

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет). E-mail: rufat.abiev@gmail.com, lena-romanova88@mail.ru

Конвейерные линии используются во многих отраслях промышленности для транспортировки крупногабаритных изделий, ящиков и поддонов. В частности, в современных конвейерных линиях для заводского изготовления железобетонных изделий применяется транспортная система, состоящая из приводных и опорных одноребордных роликов, по которым передвигается поддон с изделием (рис. 1).

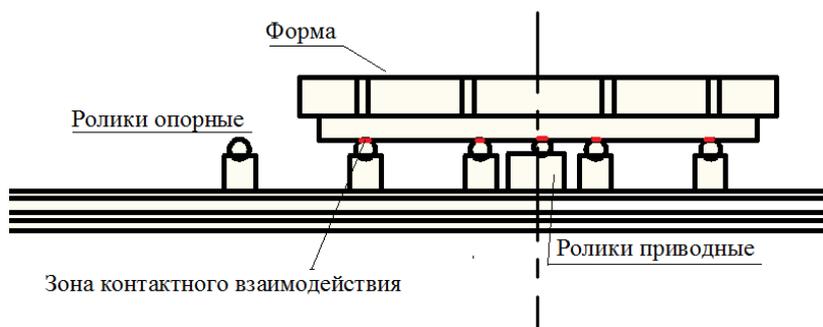
Приводной ролик (рис. 2) диаметром  $2R = 250$  мм и шириной 60 мм находится на выходном валу червячного мотор-редуктора. Мотор-редуктор смонтирован на подпружиненной плите, шарнирно закрепленной на опорной плите. Обод приводного ролика обрезинен (или имеет выполнен из полимерного материала) для лучшего контакта ролика с поверхностью транспортируемого поддона.

Мощность привода составляет 0.75-1.1 кВт. Скорость вращения приводного ролика обеспечивает передвижение поддона со скоростью  $V = 6 - 10$  м/мин. Приводные ролики расположены между опорными роликами так, чтобы поддон постоянно соприкасался с не менее чем с двумя приводными роликами. Опорный ролик смонтирован на оси, которая

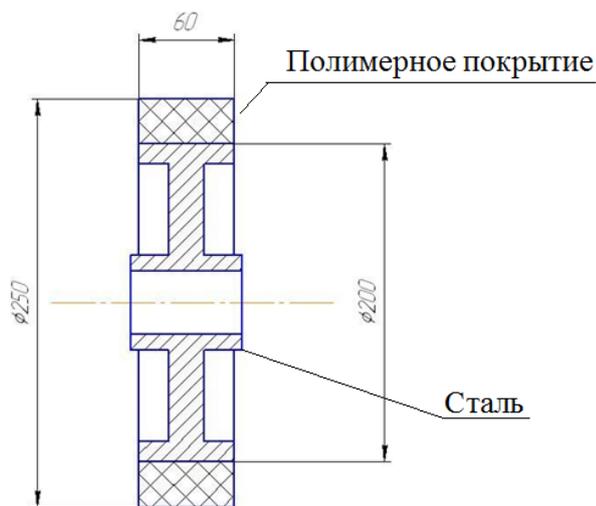
закреплена в корпусе, установленном на полу цеха или на опорном столе другого технологического оборудования. Он может свободно вращаться на подшипниках. Опорные ролики устанавливаются с шагом 1.5-2 м с обеих сторон поддона.

Ресурс транспортной системы лимитируется интенсивным износом ведущих и опорных роликов, а также разрушением направляющих поддона, находящихся в контакте с роликами.

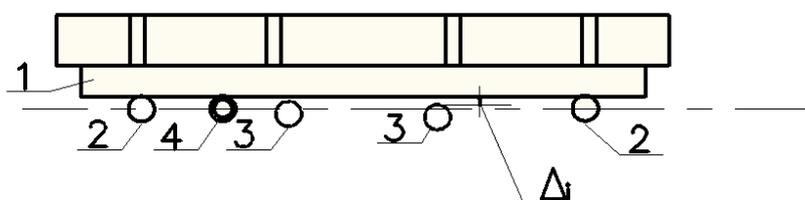
Целью работы является поиск причин ускоренного износа приводных и опорных роликов конвейерных линий, причин разрушения направляющих поддона, а также выработка предложений по увеличению ресурса конвейерных линий по износу.



**Рис. 1.** Схема транспортировки поддона (формы) с изделием



**Рис. 2.** Схема приводного ролика (вариант исполнения с полимерным покрытием)



**Рис. 3.** Перекачивание поддона по неидеально выровненным роликам:

1 – поддон, 2 – нагруженные ролики, 3 – ненагруженные ролики, 4 – приводной ролик.

### **Анализ проблемы**

Рассматриваемый процесс можно в первом приближении представить как идеальное перекачивание тяжелого плоского тела по цилиндрическим роликам без проскальзывания.

Однако в реальности существует ряд факторов, способствующих износу пары ролик – направляющая, которые могут быть объединены в пять групп:

А) Геометрические (точностные).

В результате неодинаковой высоты расположения роликов (рис. 3), неодинакового износа ободов, их возможной несоосности, а также неидеальной плоскостности дна поддона и закрепленных на нем направляющих, некоторые ролики будут нагружены полностью (взаимодействие без зазора), а часть роликов может быть нагружена частично, и даже не нагружена совсем (с образованием зазора  $\Delta$  между ободом и направляющей, см. рис. 3).

Это приведет к существенной неравномерности распределения нагрузки между роликами, т.е. послужит причиной возникновения одного из силовых факторов.

Б) Силовые.

Вследствие указанного в п. А неравномерного распределения веса поддона с изделием по роликам нагруженные ролики испытывают нагрузку, в несколько раз превышающую расчетную. В пределе вместо опирания на 8 опорных и 2 приводных ролика поддон может лежать всего на трех роликах, и тогда нагрузка возрастает в  $10/3 = 3.33$  раза. При этом по мере продвижения поддона повышенная нагрузка может ложиться сначала на одну группу соседних роликов, и уже через несколько секунд движения – на другую.

В) Кинематические.

Как известно [1-3], на интенсивность износа существенно влияет скорость относительного движения поверхностей. Причин проскальзывания роликов относительно направляющих поддона может быть, как минимум, три: а) повышенное трение в подшипниках опорных роликов, что приводит к переходу от качения к скольжению по ободу; б) недостаточная касательная сила взаимодействия между роликом и направляющей из-за слабой нормальной нагрузки (см. п. А и Б) также приводит к переходу от качения к скольжению по ободу; в) скорость вращения приводного ролика на холостом ходу выше скорости нагруженного ролика, и при накатывании поддона происходит резкое изменение скорости ролика – он замедляется, а при скатывании ролик ускоряется.

Г) Динамические.

Если считать, что поддон перекачивается по роликам без вертикальных перемещений, то динамическую нагрузку можно исключить (хотя этот вопрос нуждается в отдельном анализе). В любом случае, усталостные напряжения, возникающие в материале обода при перемещении зоны нагружения с частотой

$$\omega = V/R = (6 - 10)/(60 \cdot 0.125) = (0.8 - 1.3) \text{ с}^{-1}, \quad (1)$$

приведут к ускоренному разрушению полимерного или резинового обода, особенно если учесть повышенную в несколько раз нагрузку, как указано в п. В.

Д) Температурные.

В результате непрерывного циклического нагружения ободов роликов с повышенной нагрузкой неизбежен их нагрев, приводящий к снижению их прочности, что еще больше ускоряет процесс изнашивания.

### Предлагаемые способы увеличения ресурса конвейерных линий

На основании проведенного выше анализа в настоящее время прорабатываются следующие конструктивно-технологические решения:

1. Разработка системы автоматической либо автоматизированной компенсации зазоров для устранения одной из важнейших причин износа – потери контакта между некоторыми роликами и направляющей поддона.
2. Разработка системы адаптации скорости роликов при накатывании и скатывании с использованием обгонных муфт либо средств электронного управления.
3. Разработка системы качения поддонов без проскальзывания.
4. Установка системы охлаждения ободов роликов (при необходимости).

## **Литература**

- [1] Старосельский А.А., Гаркунов Д.Н. Долговечность трущихся деталей машин. М.: *Машиностроение*. 1967. 395с.
- [2] Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безызносность). М.: *Изд-во МСХА*. 2001. 616с.
- [3] Крагельского И.В., Алисина В.В. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. М.: *Машиностроение*. 1978. Т.1. 400с.; Т.2. 1979. 358с.

## **БЕЗОПАСНОСТЬ МОРСКИХ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩИХ ПЛАТФОРМ**

Щурихина О. В., Шакирова Р. Р., Баряхнина В.Б.,  
Уфимский государственный нефтяной технический университет.  
E-mail: verarosental@rambler.ru

Согласно Энергетической стратегии Российской Федерации до 2030 г. добыча нефти и газа на шельфе арктических, дальневосточных и южных морей является наиболее перспективным направлением [2].

Освоение континентального шельфа обусловлено суровыми климатическими условиями и сложной ледовой обстановкой, низкой геологической изученностью недр, ограниченностью и подчас невозможностью применения традиционных методов обеспечения безопасной работы буровых установок. В этих условиях решение ключевых технических проблем безаварийной работы нефтегазодобывающих платформ без применения методологии анализа и риск-ориентированного подхода для обоснования промышленной безопасности невозможно.

Негативные факторы, возникающие при эксплуатации морских буровых установок, зачастую имеют катастрофические последствия, поскольку темпы выделения энергии высоки, а возможности локализации и ликвидации аварий ограничены. Катастрофы на морских буровых платформах (МБП) могут сопровождаться большими человеческими жертвами и травматизмом, вследствие уязвимости персонала к термическому воздействию пожара и токсическому воздействию продуктов горения в силу ограниченности территории платформы и трудностей эвакуации обслуживающего персонала [3].

В мировую историю освоения континентального шельфа вписан ряд аварий с катастрофическими последствиями, которые возникли вследствие недостаточного внимания к мерам по выявлению и смягчению угроз безопасности. Наиболее крупные аварии на буровых судах и платформах различного типа (полупогружных, погружных, передвижных (ПБУ), стационарных) за период 2001-2011 гг. приведены в табл. 1.

Причинами техногенных аварий и катастроф на МБП могут стать неблагоприятные погодные условия, опрокидывание платформы в результате штормов и ураганов, столкновение танкеров с платформами, утечка углеводородов из-за разгерметизации оборудования вследствие коррозии, неисправность механизмов, разрушение конструкции, а также ошибочное или неправильное принятие решений обслуживающим персоналом в критических ситуациях, обусловленных отказами оборудования и систем противоаварийной защиты [1].

Обобщение и анализ сведений об авариях, происшедших на морских буровых сооружениях различного типа, позволяет объединить аварии по нескольким укрупненным и взаимосвязанным группам причин:

- неконтролируемый выброс нефти и/или газа из скважин;
- нарушение целостности несущих (или опорных) конструкций, а также отказы (или неполадки) оборудования;
- ошибки персонала;
- внешние воздействия техногенного характера (столкновение с морскими судами, падение вертолета, диверсии и др.);
- нерасчетные природные воздействия.

Табл. 1. Перечень наиболее крупных аварий на морских буровых судах и платформах

Дата и место	Вид аварии	Краткое описание аварии и основные причины
15.03.2001 Атлантический океан, побережье Бразилии	Взрыв, разрушение платформы	В результате серии мощных взрывов произошло повреждение одного из понтонов основания нефтедобывающей платформы компании «Petrobras». МБП затонула. В океан попало 125 тыс. тонн нефти. Погибло 10 человек.
27.07.2005 Индийский океан	Столкновение с судном, разрушение платформы	Прибойная волна ударила в стоящее рядом с платформой вспомогательное судно, в результате чего оно врезалось в конструкции платформы. Погибло 49 человек.
23.10.2007 Мексиканский залив	Штормовое столкновение, пожар	Штормовые ветры вызвали колебания МБП, что привело к удару о вершину клапана фонтанной арматуры соседней платформы. Произошла утечка нефти и газа с последующим воспламенением. Погиб 21 человек.
24.05.2008 Северное море	Утечка нефти	На нефтедобывающей платформе «Статфьорд А» произошла утечка нефти. Были эвакуированы 156 человек. Часть нефти попала в море.
15.06.2008 Северное море	Пожар на платформе	На норвежской нефтедобывающей платформе «Зеберг А» произошел пожар. Сразу же после возгорания четыре вертолета эвакуировали с платформы 311 нефтяников. Пожар удалось локализовать.
31.10.2008 Северное море	Утечка нефти	На нефтедобывающей платформе «Heather Alpha» произошла утечка нефти. С МБП были эвакуированы 56 человек, немногим более тридцати остались на платформе для устранения последствий аварии. Возгорания не произошло.
24.03.2009 Шельф о. Сахалин	Утечка нефти	В результате сбоя в работе одного из узлов на МБП "Моликпак", добывающей нефть на Сахалинском шельфе в рамках проекта "Сахалин-2", на лед, окружающий платформу, попало 165 литров углеводородов. Последствия аварии были ликвидированы оперативно, загрязнение моря не произошло.
01.11.2009 Тиморское море	Пожар на платформе	У северо-западного побережья Австралии произошел пожар на нефтяной платформе тайландской компании «РТТ Exploration & Production». Пожар начался во время работ по ликвидации утечки нефти. Никто из рабочих на платформе не пострадал. Утечка нефти была обнаружена 21 августа; за этот период в море вылилось более 28 тысяч баррелей сырой нефти.
22.04.2010 Мексиканский залив	Пожар, взрыв, большая утечка нефти	Буровая платформа «Deerwater Horizon» затонула в Мексиканском заливе у побережья штата Луизиана после 36-часового пожара, последовавшего вслед за мощным взрывом, унесшим жизни 11 человек.
18.12.2011 Охотское море	Опрокидывание платформы	Буровая платформа «Кольская», при буксировке с Камчатки на Сахалин, перевернулась в штормовых условиях при высоте волн 5-6 метров и температуре воды ноль градусов. Из 67 пострадавших, по последним данным, спасены лишь 14 человек.

Такое распределение свидетельствует о том, что значительная часть аварий происходит по вине персонала, допускающего нарушения технологического процесса, правил проводки судов или их причаливания к морским нефтегазопромысловым сооружениям [5].

По данным статистических материалов аварийные происшествия распределяются следующим образом (рис. 1).



**Рис. 1.** Статистика аварийных происшествий на морских нефтедобывающих платформах за период с 2001 по 2011 г

Как видно из рис. 1, максимум аварий на морских платформах связан с ремонтными работами при бурении и эксплуатации установок, а значительная часть всех аварий происходит из-за несоблюдения технологического регламента.

Наиболее частыми видами аварий при выполнении технологических операций являются выбросы, пожары и разливы (утечка нефти).

Больше всего аварий из общего числа происходит при добыче (около 30%) и бурении (26%). Следующее место занимает операция, связанная с перемещением объектов обустройства, вспомогательных и обслуживающих технических средств [4].

При распределении числа аварий по видам на объектах обустройства и в различных географических районах почти 50% произошли на мобильных нефтегазопромысловых сооружениях, а около 36% – на стационарных платформах. На месторождениях Северного моря их было примерно в 2 раза меньше, чем в Мексиканском заливе. Это можно объяснить наличием в последнем значительного количества стационарных, мобильных и других сооружений, а также подводных и надводных скважин.

## Литература

- [1] Вяхирев Р.И., Никитин Б.А., Мирзоев Д.А. Обустройство и освоение морских нефтегазовых месторождений. М. 1999. С.9-25.
- [2] Адамянц П.П., Гусейнов Ч.С., Иванец В.К. Проектирование обустройства морских нефтегазовых месторождений. М.: ООО «ЦентрЛитНефтеГаз». 2005. С.7-427.
- [3] Руденко, С.В. Анализ рисков открытого фонтанирования при бурении скважин и эксплуатации нефтегазодобывающих платформ континентального шельфа на стадии проектирования. Материалы научного семинара «Промышленная безопасность. Современные методы анализа техногенного риска в работах молодых ученых», НТЦ «Промышленная безопасность». М. 2004. С.23-28.
- [4] Лисанов М.В., Симакин В.В. Анализ риска аварий на опасных производственных объектах морских нефтегазовых месторождений. Материалы II Международной конференции ROOGD-2008 «Освоение ресурсов нефти и газа российского шельфа: Арктика и Дальний Восток». 2008. С.20-51.
- [5] Сафонов В.С., Одишария Г.Э., Шеберстов Е.В. Материалы тематического семинара «Об опыте декларирования промышленной безопасности и страхования ответственности. Развитие методов оценки риска аварий на опасных производственных объектах». НТЦ «Промышленная безопасность». М.: ООО «ВНИИГАЗ». 2003. С.124-142.

**ОПАСНОСТЬ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ОДЕЖДЫ**

Чистов Ю.С., Теляков Э.Ш., Еналеев Р.Ш., Хоменко А.А.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: yura-chistov@yandex.ru

При воздействии теплового излучения на сгораемые материалы может произойти их воспламенение. Наибольшую опасность для человека представляют зажигание материалов одежды лучистым потоком и возникновение вторичных ожогов. Пожарная опасность воспламенения в нормативных документах МЧС [1] представляется в виде экспериментальных данных по зависимости времени воспламенения от плотности теплового потока облучения таких материалов, как хлопок-волокно, темная вискоза, торф кусковый, ДСП, резина, древесина и т.д. Однако имеющаяся опытная информация не позволяет прогнозировать воспламенение материалов в реальных ситуациях.

Целью данной работы является моделирование физико-химических процессов при взаимодействии высокоинтенсивного теплового излучения с горючими материалами.

В математической постановке гетерогенного зажигания целлюлозных материалов уравнение распространения тепла для твердофазной тепловой модели [2] с учетом фазовых превращений, объемного источника поглощенного излучения, выгорания материала до момента воспламенения, для реакции первого порядка имеет следующий вид:

$$c\rho(\eta)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda(\eta)\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q_i k_i (1 - \eta_i) \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right) + q_0 \mu \exp(-\mu x). \quad (1)$$

$T$  – абсолютная температура, К;  $k$  – предэкспонент, 1/сек;  $c$  – удельная теплоемкость, Дж/кг/К;  $E$  – энергия активации, Дж/моль;  $\tau$  – время, сек;

$x$  – декартова координата, м;  $R$  – газовая постоянная, Дж/моль/К.

$\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – коэффициент поглощения, 1/м;  $q_0$  – заданное значение теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>,  $\eta$  – степень превращения.

Кинетические параметры для стадии испарения ( $i = 1$ ) взяты из [3], стадия пиролиза – из [4] ( $i = 2$ ), стадии химической реакции в коксовом остатке – из [2,5] ( $i = 3$ ).

Нелинейное уравнение теплопроводности (1) с физическими и химическими стоками тепла аналитического решения не имеет. Все разновидности приближенных методов связаны с различными выражениями для критического условия зажигания.

Горючие материалы имеют конечные размеры, сравнимые с шириной зоны химической реакции (например, ткани, бумага, растительные листья и так далее). Поэтому предлагается критические условия зажигания записывать не для зоны реакции [6], а для дифференциального объема, прилегающего к поверхности, в виде баланса тепла:

$$q_+ \geq q_-; \quad q_+ = \frac{\partial \eta(0, \tau)}{\partial \tau} Q\rho(\eta)dx; \quad q_- = -\lambda(\eta)\frac{\partial T(0 + dx, \tau)}{\partial x} \quad (2)$$

или в виде [7]:

$$\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$q_+$  – скорость теплоприхода в результате химических реакций в твердой фазе,

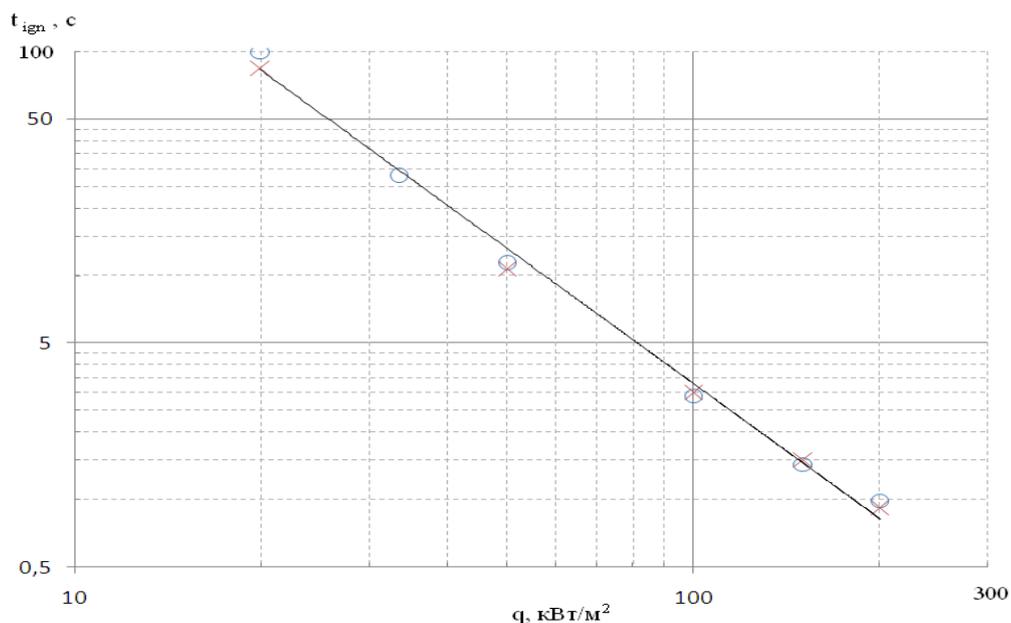
Вт/м<sup>2</sup>;  $q_-$  – теплоотвод вглубь конденсированного вещества, Вт/м<sup>2</sup>.

Результаты вычислительного эксперимента и сравнение с опытными данными ВНИИПО [1] представлены на рис. 1.

Практическое применение полученных результатов исследования заключается в возможности прогнозирования времени зажигания горючих материалов в зависимости от плотности тепловых потоков излучения пламени пожаров.

Другим важным аспектом применения результатов моделирования является оценка влияния температуры окружающей среды на время зажигания. Как видно из данных табл. 1, при увеличении температуры от  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  время зажигания возрастает в 1,7-1,8 раза во всем диапазоне изменения плотности теплового потока.

Температура зажигания в диапазоне  $20\text{-}200\text{ кВт/м}^2$  возрастает на 10%. А суммарная степень превращения от всех физико-химических процессов  $\eta$  в поверхностном дифференциальном объеме, наоборот, уменьшается примерно в четыре раза.



**Рис. 1.** Зависимость времени зажигания текстильного материала от плотности теплового потока излучения:  $\times$  – эксперимент ВНИИПО;  $\circ$  – математическая модель

**Табл. 1.** Влияние начальной температуры на характеристики зажигания

$t_0, ^{\circ}\text{C}$	$q, \text{кВт/м}^2$	$\tau_3, \text{сек}$	$t_s, ^{\circ}\text{C}$	$\eta$	$t_0, ^{\circ}\text{C}$	$q, \text{кВт/м}^2$	$\tau_3, \text{сек}$	$t_s, ^{\circ}\text{C}$	$\eta$
-50	200	1,39	322	0,18	-50	50	17,85	296	0,36
20		0,97	318	0,17	20		12,4	308	0,38
50		0,81	313	0,15	50		10,2	314	0,40
-50	150	2,26	310	0,19	-50	33	41,01	302	0,49
20		1,54	316	0,2	20		28	306	0,5
50		1,25	315	0,19	50		23,87	309	0,51
-50	100	4,33	307	0,23	-50	20	142,47	291	0,64
20		2,98	310	0,24	20		99	302	0,66
50		2,41	307	0,23	50		82,49	309	0,68

В данной работе впервые предлагается использовать поверхностный дифференциальный объем в качестве виртуальной или компьютерной ячейки с исследуемым материалом в методе термического анализа. Такой компьютерный термический анализ (КТА) сохраняет все аналогичные компоненты классического экспериментального термического анализа (ТА).

За температуру среды принимается температура нагреваемой поверхности  $t_s$ , за дифференциальную разность температур между эталоном и образцом – разность температур

поверхности со стоками тепла и инертного нагрева  $\Delta t = t_s - t_{ин}$ , за потерю веса – степень превращения массы образца за счет физико-химических превращений.

Преимущество КТА по сравнению с ТА заключается в возможности исследования процессов зажигания горючих материалов в реальных условиях облучения, более точного определения диапазона температур проявления тепловых эффектов всех высокотемпературных процессов. И самое главное, что нельзя реализовать методом ТА, – это определение характеристик зажигания горючих материалов и установление критических условий перехода воспламенения в устойчивое горение.

На рис. 2 приводятся типичные термограммы ТА и КТА целлюлозных материалов.

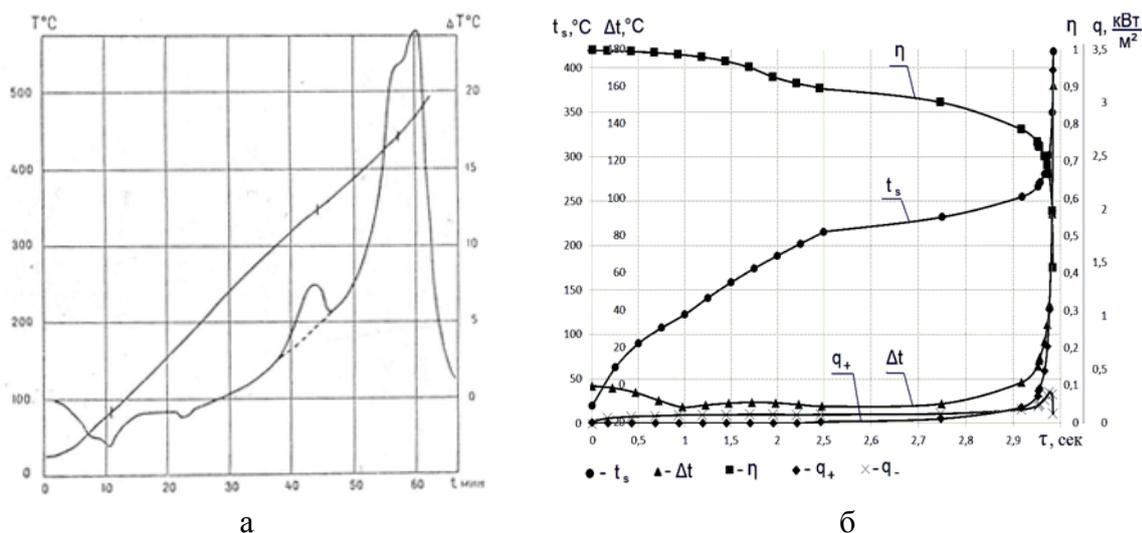


Рис. 2. Термограммы целлюлозных материалов  
а – хвоя ели (ТА); б – текстильный материал (КТА)

В соответствии с [8, 9] в диапазоне температур 30-160 °С (рис. 2 а) происходит испарения влаги. Аналогичная картина наблюдается и в КТА (рис. 2 в,  $\Delta t$  уменьшается). По [8, 9] при температурах 170-200 °С образец ведет себя как инертное вещество, что также наблюдается и по КТА ( $\Delta t$  сохраняет практически постоянное значение).

По [9] при температурах 200-250 °С начинается термодеструкция текстильного материала, сопровождаемая потерей массы. По данным КТА в этом диапазоне температур (рис. 2 в, время облучения от 2.5 до 3 сек.) также происходит уменьшение массы, резкое увеличение тепловыделения за счет химической реакции, увеличение  $\Delta t$  до нуля. Если в момент достижения критического условия (2) отключить внешний источник нагрева – наступает вырожденный режим (затухание реакции).

Если не отключать – температура повышается, как видно из табличных данных, до значений 302-318°С. Если после реализации критического условия (3) отключить источник нагрева, то режим условного воспламенения в кинетической области переходит в устойчивое горение.

Следует отметить, что в методе ТА текстильных материалов наблюдается два последовательных пика тепловыделений. Максимум первого соответствует температуре образца около 340 °С, максимум второго – в диапазоне 440-470 °С [9]. После второго максимума образцы полностью сгорают на воздухе. В реальных условиях интенсивного одностороннего нагрева текстильного материала излучением наблюдается молярная фильтрация воздуха через образец с не обогреваемой стороны к облучаемой поверхности.

Очевидно можно предположить, что зажигание материала происходит в кинетической области после достижения первого максимума. Экспериментальные данные [10] по окислению древесного угля в потоке воздуха, а также теоретические исследования Франк-

Каменецкого [11] по гетерогенному воспламенению угольной частицы в газовом потоке подтверждают высказанное предположение.

### **Литература**

- [1] Самотаев А.В. Исследование времени воспламенения веществ и материалов при пожаре. В кн. «Пожаро-техническая тактика и автоматические установки пожаротушения». М. 1989. С.137-147.
- [2] Merzhanov A.J. The Present State of the Thermal Ignition Theory: An Invited Review. *Combustion and Flame*. 1971. Vol.16. P.89-124.
- [3] Исаков, Г.Н., Касьянов Г.С., Несмелов В.В. Экспериментальное исследование сушки растительных горючих материалов в динамических условиях нагрева. В кн.: Исследование процессов неустойчивого горения. Чебоксары: Издательство ЧГУ. 1984. С.45-53.
- [4] Кислицын А.Н. Пиролиз древесины: химизм, кинетика, продукты, новые процессы. М.: Лесная промышленность. 1990. 305с.
- [5] Зельдович Я.Б., Лейпунский О.И., Либрович В.В. Теория нестационарного горения пороха. М.: Наука. 1975. 131с.
- [6] Аверсон А.Э., Барзыкин В.В., Мержанов А.Г. Приближенный метод решения задач тепловой теории зажигания. *ДАН СССР*. 1968. Т.178. №1. С.131.
- [7] Вилюнов В.И. Теория зажигания конденсированных веществ. Новосибирск: Наука. 1984. 189с.
- [8] Конев Э.В. Физические основы горения растительных материалов. Новосибирск: Наука. 1984. 237с.
- [9] Баратов А.Н., Константинова Н.И., Молчадский И.С. Пожарная опасность текстильных материалов. М. 2006. 273с.
- [10] Хайкина С.Э. Окисление углерода. *ЖТФ*. 1938. Т.8. Вып.1. С.53-64.
- [11] Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука. 1967. 491с.

## **ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ХИМИЧЕСКИ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ**

Баландина А.Г., Хангильдин Р.И.

Уфимский государственный нефтяной технический университет.

E-mail: secret\_anna@bk.ru

В последние годы процесс очистки промышленных стоков, как одно из мероприятий охраны природы, во многих индустриально развитых странах мира приобрел значение проблемы государственной важности. Залповые сбросы сточных вод, сбрасываемые нефтеперерабатывающими и нефтехимическими заводами, содержат большое количество нефтепродуктов, поверхностно-активных веществ (ПАВ), фенолов и других вредных веществ.

Основными источниками загрязнения окружающей среды, связанными с нефтехимперерабатывающей промышленностью, являются:

- сточные воды предприятий нефтехимического профиля;
- сток с загрязненных территорий и временных складов предприятий;
- фильтрат от свалок химического и бытового мусора [1].

Курьерами при этом могут быть фенолы, углеводороды и так далее. Так, весной 1991 года в Уфе в результате фенольной катастрофы (тогда фенол попал в водопроводную воду в количестве, во много раз превышающем ПДК) обнаружилось, что на территории завода «Химпром», ставшем виновником экологической катастрофы, скопилось более 500 тысяч тонн отходов - шламов, насыщенных фенолами и диоксинами.

Только в 2004 года технологические производства ОАО «Химпром» были выведены на длительную остановку с прекращением выпуска регламентной товарной продукции и последующей консервацией на длительный период всех производственных и хозяйственных объектов. Завод официально закрыт, но опасность загрязнения окружающей среды существует до сих пор. Самое опасное для города в этой ситуации то, что грунтовые воды в районе завода залегают неглубоко, на расстоянии 1-3 метров от поверхности, а это значит,

что остается угроза попадания в них фенолов и диоксинов и дальнейшего их распространения с территории завода.

В 2010 году исполнилось 20 лет фенольно-диоксиновой трагедии на уфимском «Химпроме», которая привела к официальному признанию потерпевшими от употребления отравленной питьевой воды около 700 тысяч уфимцев [2].

В этой связи проблема загрязнения окружающей среды химическими загрязнителями становится особенно актуальной. При попадании их в открытые водоемы и подземные горизонты изменяются органолептические и физико-химические характеристики воды. Присутствие в стоках высоких концентраций различных загрязнителей создает серьезные трудности при очистке сточных вод. В связи с этим разработка установки, которая была бы экологически обоснованной и экономически оправданной, представляется перспективной и является немаловажным вкладом в решение актуальной проблемы охраны окружающей среды.

В работе предложена экспериментальная установка, основными элементами которой являются: циркуляционная емкость, насос с частотным регулированием, эжектор, сатуратор и ультрафильтрационный мембранный модуль. В качестве исследуемой среды были взяты дренажные воды Уфимского полигона твердых промышленных и бытовых отходов. Для очистки стоков был использован мембранный блок с керамическими мембранами в присутствии катализаторов и окислителей. Выбор данной водной среды для проведения лабораторных исследований обусловлен актуальностью проблемы очистки фильтратов и тем, что эти сточные воды достаточно трудно окисляемы и требуют поиска путей по интенсификации их окисления. Показана высокая эффективность очистки дренажных вод с применением гомогенных катализаторов (железного купороса и хлорида марганца) [3]. В роли окислителей использовали кислород и озono-кислородную смесь.

#### Литература

- [1] Роев Г.А. Очистные сооружения. Охрана окружающей среды. М.: Недра. 2009. 287с.  
[2] Харлампович Г.Д., Чиркин Ю.В. Фенолы. М.: «Химия». 1974. 376с.  
[3] Мастерс К. Гомогенный катализ переходными металлами. М.: Мир. 2007. 304с.

### ПРОЧНОСТЬ СОСУДОВ ДАВЛЕНИЯ ИМЕЮЩИХ ДЕФЕКТЫ В УГЛОВЫХ СВАРНЫХ ШВАХ ПРИВАРКИ ПАТРУБКОВ ШТУЦЕРОВ

Сабитов М.Х., Поникаров С.И.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: sm9h@mail.ru, mahp\_kstu@mail.ru

Сварные сосуды и аппараты работающие под давлением являются основным технологическим оборудованием, безопасная эксплуатация которых определяет функционирование и развитие современных предприятий химического и нефтехимического комплекса. В тоже время большинство предприятий в данных отраслях вынуждены эксплуатировать отслужившее проектный ресурс оборудование из-за дороговизны модернизации производства в сложившихся рыночных условиях.

В таких условиях неизбежны различные отказы оборудования, одним из наиболее вероятных является развитие разрушения нагруженных сварных конструкций из – за развившихся дефектов сварки. Дефекты в ходе эксплуатации приводят к ускоренному коррозионному износу или образованию трещин в корпусах сосудов давления, поэтому развитие системы диагностирования и расчетного определения безопасного ресурса оборудования с дефектами является важной инженерной задачей.

В данной работе приводится подход к расчетному анализу напряженно – деформированного состояния в области угловых сварных швов сосудов давления имеющих наиболее распространенный дефект сварки – подрез. Нормативные документы требуют устра-

нения данных дефектов путем подварки сварных швов в ходе ремонта, однако в ряде случаев ремонт может быть невозможен по технологическим причинам или может быть не рекомендован из-за изменения физико-механических свойств металла. В таких случаях требуется точная оценка прочности сосуда с учетом фактических значений толщин стенок элементов, размеров и геометрии расположения дефектов, результатов исследований свойств металла.

Основная сложность расчетного анализа острых трещиноподобных дефектов заключается в том, что решения теории упругости для напряжений и деформаций в вершине острого дефекта стремятся к бесконечности и произвести оценку прочности традиционным методом по допускаемым напряжениям не представляется возможным. Оценка же по предельным нагрузкам из условия образования шарниров текучести не гарантирует прочности из-за того, что разрушение с образованием трещин может произойти и при нагрузках значительно ниже предельных.

Расчетный анализ связан в определении напряженно – деформированного состояния в вершине подреза косвенными методами механики разрушения – посредством величин  $K_I$  – коэффициента интенсивности напряжений (КИН) и  $J$  – интеграла.

В качестве характеристики напряжено – деформированного состояния материала у вершины подреза и критерия разрушения конструкции при наличии пластических деформаций в зоне концентрации используется величина, определяющая степень уменьшения потенциальной энергии тела в результате подрастания трещины – интеграл Райса – Черепанова или  $J$  – интеграл [1]:

$$J = \int_G W dy - \int_G \left( t_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + t_y \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) ds ,$$

где  $G$  – контур, охватывающий вершину трещины в плоскости сечения, начинающийся на одной поверхности трещины и заканчивающийся на другой (рис.1);  $W$  – плотность потенциальной энергии деформации в точках контура;  $t_x$  – проекция вектора напряжений на ось  $x$  (начало координат находится в вершине трещины, ось  $x$  направлена вдоль нижней поверхности трещины в направлении роста)  $t_x = \sigma_x n_x + \sigma_{xy} n_y$ ;  $t_y$  – проекция вектора напряжений на ось  $y$  (ось  $y$  перпендикулярна поверхности трещины)  $t_y = \sigma_y n_y + \sigma_{xy} n_x$ ;  $n_x, n_y$  – нормаль к контуру  $G$  в рассматриваемой точке;  $u_x, u_y$  – перемещения в точке контура;  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}$  – напряжения в точке контура;  $s$  – расстояние вдоль контура  $G$ .

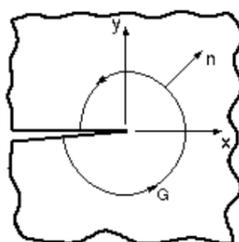


Рис. 1.

$J$  – интеграл связан с условным коэффициентом интенсивности напряжений (КИН) соотношением:  $J = K_I^2 / E'$ , где  $E'$  равен модулю упругости  $E$  для плоского напряженного состояния и  $E' = E / (1 - \nu^2)$  в условиях плоской деформации, здесь  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Определение J-интеграла и соответствующего ему коэффициента интенсивности напряжений  $K_I$  осуществляется с использованием метода конечных элементов, реализуемого в компьютерном комплексе КК «ANSYS».

При создании модели подрез в корне шва моделируется в форме V – образного надреза (рис. 2), размеры сварного шва принимаются в соответствии с РД 26-18-8-89 [2].

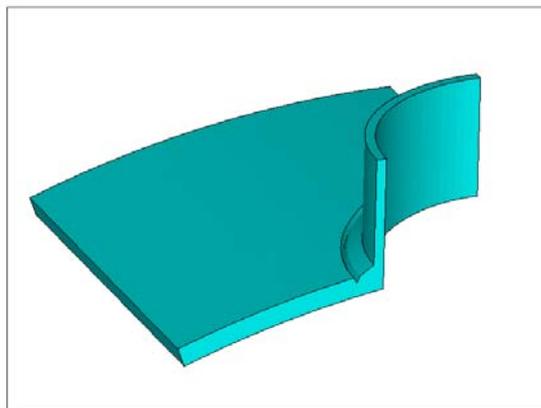


Рис. 2. Геометрическая модель с круговым подрезом корня углового шва по корпусу сосуда

Для обеспечения прочности корпуса разрушению с образованием трещины проверяется условие:

$$K_I \leq [K_I],$$

где  $[K_I]$  – допускаемый коэффициент интенсивности напряжений, определяется по величине критического коэффициента интенсивности напряжений (вязкости разрушения)  $K_C$  испытанием материала сосуда в соответствии с ГОСТ 25.506-85 [3], когда проведение испытаний невозможно (нельзя вырезать образцы из сосуда) рекомендуется принимать  $K_C$  по литературным источникам, при отсутствии таких данных допускаемый коэффициент интенсивности напряжений определяется согласно [4]:  $[K_I] = 0,35\sigma'_{0,2}(s \cdot 10^{-5})^{0,5}$ .

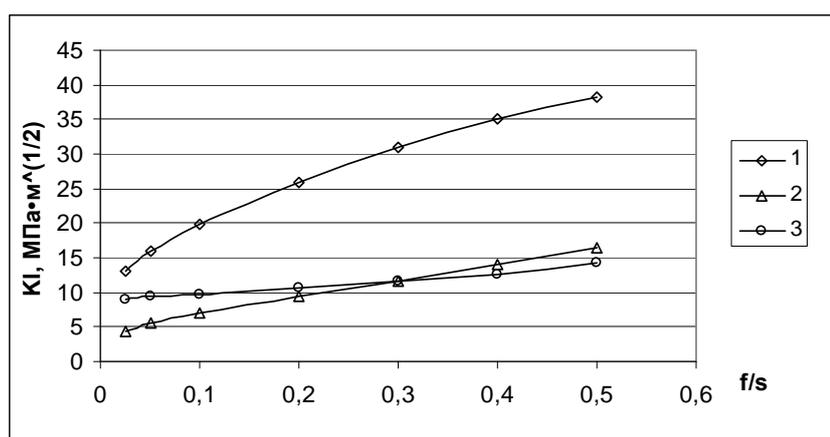


Рис. 3. Значения КИН для трех моделей

В качестве примера была принята модель цилиндрического корпуса с радиальным патрубком с отношением диаметров и толщин стенок патрубка и корпуса:  $d/D=0,156$ ;  $s_1/s=1$ ;  $s/D=0,01$  при изменении глубины подреза  $f$ . Материал корпуса – сталь ВСтЗсп с условным пределом текучести  $\sigma'_{0,2}=244$ МПа, при расчетной температуре  $50$  °С  $[K_I] = 11,07$  МПа·м<sup>1/2</sup>

Расчет показал (рис. 3), что при отсутствии избыточной толщины стенки (давление составляет 90% от нормативного кривая 1) анализ по критерию хрупкого разрушения дает отрицательный результат при любой глубине подреза в корне шва по корпусу.

При наличии избыточной толщины стенки корпуса (давление составляет 40% от нормативного кривая 2) подрез глубиной до 25% толщины корпуса не приводит к разрушению.

Так как стальные патрубки стандартных штуцеров имеют избыточную толщину, подрез в корне шва патрубка до 20% толщины патрубка (кривая 3) не приводит в рассматриваемом примере к разрушению при давлении равном предельному для корпуса сосуда.

Таким образом, работоспособность угловых швов приварки патрубков в корпус сосуда с подрезами корня шва определяется в первую очередь наличием избыточной толщины стенки оболочек и вязкостью разрушения материала сосуда в области дефекта.

### **Литература**

- [1] Морозов Е.М., Никишков Г.П. Метод конечных элементов в механике разрушения. Главная редакция физико – математической литературы. М.: Наука. 1980. 250с.
- [2] РД 26-18-8-89. Сварные соединения приварки люков, штуцеров и муфт. Основные типы, конструктивные элементы и размеры. Министерство химического и нефтяного машиностроения СССР.
- [3] ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. М.: Изд-во стандартов. 1985. 62с.
- [4] Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86)/ Госатомэнергонадзор СССР. М.: Энергоатомиздат. 1989. 525с.

## **ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА**

Атаниязова Т.М., Жунусова Э.Б.

Атырауский институт нефти и газа. Республика Казахстан.

E-mail: aing-atr@nursat.kz, tahmina.66@mail.ru

Производственная деятельность предприятий нефтегазовой отрасли оказывает воздействие на окружающую среду в следующих проявлениях:

- изъятие земельных ресурсов для строительства объектов нефтедобычи, нарушение и загрязнение земель;
- выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, сбросы в поверхностные и подземные воды, а также на подстилающую поверхность;
- извлечение с нефтью высокоминерализованных попутных вод;
- захоронение отходов бурения;
- аварийные разливы нефти [1].

Трудовая деятельность людей всегда была связана с необходимостью использования недр Земли. При этом человек, так или иначе, использует все породы и минералы Земли. Согласно данным Л. В. Виноградова, в земной коре преобладают следующие элементы, %: кислород – 49, кремний – 27, алюминий – 8,5, железо – 5, кальций – 3,5, калий – 2,5, натрий – 2,6, магний – 2,0.

В ближайшем будущем нефть и газ останутся главными первичными источниками, призванными удовлетворить основную часть потребностей современного человечества в энергии. Об этом свидетельствует непрерывное повышение удельной значимости этих природных углеводородов в топливно-энергетическом комплексе развитых стран мира.

Нефтедобывающая промышленность в нынешнем ее виде существует уже более века. За это время в мире добыто около 50 млрд. тонн нефти, и с каждым годом добыча нефти

увеличивается. По некоторым оценкам специалистов к настоящему времени запасы нефти составляют порядка 200 млрд. тонн [1, с. 17].

Так страны Содружества располагают почти 18% разведанных мировых запасов нефти и 40% запасов природного газа. Например, в 2002 г. в них добыто 460 млн. тонн нефти, 710 млрд. куб. метров газа. В 2002 г. по сравнению с 2001 г. добыча нефти (включая газовый конденсат) увеличилась в Казахстане – на 18%, России – на 9%, Азербайджан – на 3%, Украине – на 0,6%. В Казахстане в истекшем году был достигнут максимальный уровень добычи нефти – 47,2 млн. тонн (по данным Статкомитета СНГ за 2002 г.).

Основным источником среди загрязнителей воздушного бассейна на нефтяных месторождениях, разрабатываемые на суше и в морских шельфах, а также на предприятиях переработки углеводородов продолжают оставаться продукты сгорания попутных нефтяных и сбросные газы (ПНГ и СГ), сжигаемые на факельных установках.

Это, несмотря на то, что степень утилизации нефтяного газа находится в пределах 52,3-95%, в зависимости от месторождений, а на основных месторождениях, где имеются все необходимые для этого сооружения, используется 80-95% добываемого вместе с нефтью газа [2, с. 97].

Попутный нефтяной газ выходит из недр нашей земли вместе с нефтью, и всегда рассматривался скорее как побочный продукт. Переработка попутного нефтяного газа и движение в направлении по увеличению переработки, одновременно решает экологические, экономические, социальные задачи.

Переработка попутного нефтяного газа напрямую связана с вопросом защиты экологии. По оценке экологов, на сегодняшний день в атмосферу выбрасывается до 400 тысяч тонн вредных веществ, которые являются, в том числе, продуктами сжигания попутного нефтяного газа.

Очевидна серьезность экологической проблемы, возникающей за счет сжигания попутного нефтяного газа. Только по официальным данным в России ежегодно сжигается более 15 млрд. кубометров попутного нефтяного газа, (по американским оценкам на основе анализа спутниковых данных в России сжигается 60 млрд. кубометров газа в год), на переработку попадает менее 40% всего ПНГ, а как химическое сырьё используется только 1,5% попутного нефтяного газа.

На факелах горит не только метан — основной компонент углеводородного газа, но и широкая фракция углеводородов: этан, пропан, бутан, пентан, гексан и прочие. В результате в России извлекается не более 25% компонентов C<sub>3</sub>-C<sub>4</sub> от их потенциала в пластовом газе, а степень извлечения этана не превышает 8%. В Республике Казахстан проблема утилизации ПНГ не менее остра. Добычу в стране ведет 61 компания, 24 из них сжигают попутный газ. В 2009 году в Казахстане сожгли свыше 1,8 млрд/ кубометров попутного газа.

В настоящее время по официальным данным из 9 млрд. куб.м. ежегодно добываемого в стране ПНГ утилизируется только две трети. В этой связи действительно стоит задуматься и еще быстрее начать развить программу по сбору и утилизации данного продукта. Действительно, сегодня сжигается невосполнимый источник природных ресурсов, который мог быть использован и как энергетическое сырьё, и как сырьё для получения продуктов более высоких переделов.

На попутный нефтяной газ приходится почти половина всего добываемого в стране газа и, темпы роста добычи ПНГ на данный момент, опережают темпы роста добычи природного газа. Эксперты считают, что в результате прекращения сжигания попутного нефтяного газа на нефтяных месторождениях можно получить дополнительно 15-20 миллиардов кубометров природного газа, полученных из ПНГ.

Следовательно, ПНГ (представляющий собой смесь газов и парообразных углеводородов) является ценнейшим сырьем для нефтехимии. И по мере увеличения добычи "черного золота" проблема утилизации попутного газа становится все актуальнее и имеет важное научно-прикладное значение в области нефтехимии.

Во многих факельных хозяйствах до сих пор отсутствуют факельные оголовки или используются устаревшие модели факельных горелок (ФГ). В перспективе ожидается спрос на новые виды ФГ, обеспечивающих стабильное горение факела с низким выходом токсичных веществ ( $SO_x$ ,  $NO_x$  и т.д.), так как в последние годы интенсивно осваиваются нефтегазовые месторождения, где сопутствует добыча попутных и сбросных газов, содержащие сернистые соединения [3].

Разработка и создание газовых горелок для топливосжигающих установок (факельное хозяйство, ГТУ, печи подогрева и т.д.) нефтегазовых предприятий в значительной мере связаны с непрерывным ужесточением требований по охране окружающей среды при нефтедобыче и переработке углеводородного сырья.

Основными трудностями, возникающие при совершенствовании конструкции ФГ являются [4]:

- наличие постоянного воздействия высокотемпературной и кислотной среды на элементы конструкции ФГ;
- нестабильность состава и расхода газа;
- сжигание больших объемов попутных нефтяных и сбросных газов на факельных установках.

Возможность комплексного уменьшения продуктов неполного горения и концентрации оксидов азота и серы в факелах, представляет новое и актуальное направление в методах подавления вредных выбросов в атмосферу. Существует много способов, в частности – это очистка дымовых газов или воздействие на процессы образования непосредственно при горении.

Перспективность применения тех или иных процессов (абсорбция, адсорбция, гетерогенный катализ и др.), технологических (двухстадийное сжигание, микрофакельное сжигание и др.) или конструктивных решений (создание факельных горелок с их использованием) зависит от характеристик газовых выбросов, фоновых загрязнений атмосферы в данном регионе. Анализ эффективности перечисленных методов показывает, что с помощью какого-то одного метода обычно удается снизить выбросы  $NO_x$  и  $SO_x$  не более чем в 2-2,5 раза.

Существенное снижение оксидов азота и серы может быть достигнуто применением горелок, использующих одновременно несколько методов. В этой связи наиболее актуальным является разработка новых конструкций микрофакельных горелок (МФГ), использующие различные методы и технологии сжигания и подавления вредных образований в процессе горения, в том числе методов улавливания оксидов серы.

Таким образом, разработки и исследования, направленные на дальнейшее совершенствования ФГ имеют важное научно-прикладное значение в области промышленной экологии.

Общая отличительная особенность нефтяного газа большинства месторождений от природного – более высокое содержание этана, пропана, бутана и пентана. Доля этих ценных углеводородов наиболее значительна в нефтяном газе, что обуславливает необходимость его сбора и переработки.

Доля этих фракций в нефтяном газе большинства месторождений составляет до 60-70 мас. %. Эта особенность нефтяного газа определяет его значение не только как топлива, но и как незаменимого сырья в самых различных отраслях промышленности.

Поэтому обеспечение наиболее полного и рационального использования нефтяного газа одновременно с вводом в разработку нефтяных месторождений – важная задача в деле повышения экономической эффективности нефтяной промышленности. Для решения этой задачи требуется своевременное осуществление комплекса мероприятий по созданию необходимых производственных мощностей с применением соответствующих технических средств и технологических производств, совокупность которых создает условия, позволяющие использовать нефтяной газ.

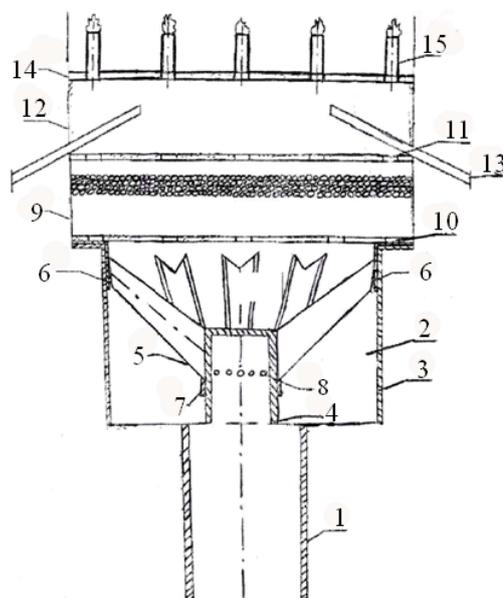
Во многих нефтепромыслах на территории Казахстана сложилась такая обстановка, что

значительная часть добываемого вместе с нефтью попутного газа сжигается на факелах. Основные причины обусловлены следующими обстоятельствами:

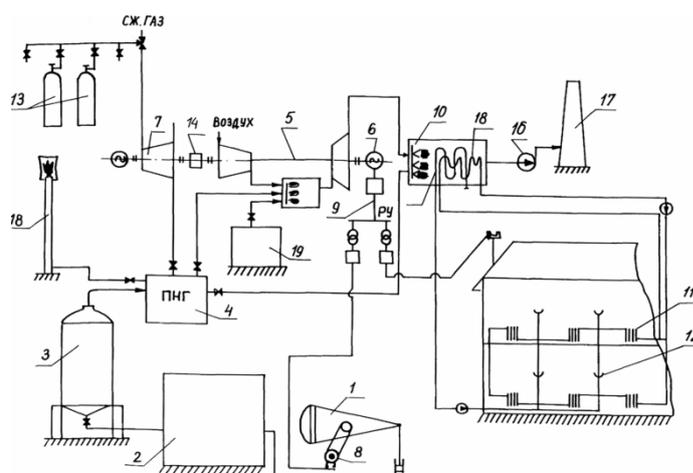
- отдаленное расположение нефтепромыслов от населенных пунктов и использование незначительного объема ПНГ только на собственные нужды;
- отсутствие необходимых газосборных сетей, газопроводов и газохранилищ;
- из-за не стабильности состава, расхода и низкого давления ПНГ, во многих случаях его переработка экономически не выгодно;
- нехватка мощностей переработки ПНГ, по причине опережения темпов добычи углеводородного сырья существующий объем перерабатывающей отрасли.

Исследованы элементы устройства «Способ сжигания газа нефтяных скважин и горелочное устройство для сжигания газа нефтяных скважин» по предварительному патенту на изобретения РК №7224 от 15.02.1999 г [5].

Общий вид исследованной горелки представлен на рис. 1.



**Рис. 1.** Принципиальная схема горелочного устройства для сжигания газа нефтяных скважин



**Рис. 2.** Принципиальная схема экологически чистой технологии использования ПНГ

Изобретение предназначено для сжигания газов нефтяных месторождения, которые содержат сернистые соединения. Технический результат – более полное сжигание газа и снижение выброса вредных соединений в атмосферу.

Основная цель, предлагаемой нами комплексной программы сбора и использования попутных нефтяных газов в условиях Казахстана, – автономное обеспечение нефтепромыслов тепловой и электрической энергией при минимальных выбросах в атмосферу вредных веществ [6]. Принципиальная схема экологически чистой технологии использования ПНГ приведена на рис. 2.

В предлагаемой технологии сбора и использования ПНГ существует три топливосжигающих установок: камера сгорания ГТУ, водогрейный отопительный котел и факельная горелка, которая использует микрофакельный принцип сжигания попутного газа. Это позволит значительно улучшить качество окружающей среды в районе нефтедобычи.

### **Литература**

- [1] Цыркин Е.Б., Щлегов С.Н. О нефти и газе без формул. *Ленинград. 1989.* 160с.
- [2] Мазур И.И., Молдаванов О.И. Курс инженерной экологии: Учебник для вузов. *М.: Высш. шк. 1999.* 447с.
- [3] Большаков Г.Ф. Сероорганические соединения нефти. *Новосибирск: Наука. 1986.* 246с.
- [4] Жунусова Э.Б. Использование нефтяного газа: проблемы и решения. *М.: Нефтегазовые технологии. 2001.* №4. С.20-22.
- [5] Достияров А.М., Жунусова Э.Б. Предвар. пат. 7224. РК. Способ сжигания газа нефтяных скважин и горелочное устройство для сжигания газа нефтяных скважин; опубл. **1999.**
- [6] Жунусова Э.Б., Достияров А.М. Комплексное использование ПНГ. *Поиск. – Алматы. 1996.* №2. С.109-114.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОЗОЛЕОБРАЗОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙНЫХ ПРОЛИВОВ БИНАРНЫХ РАСТВОРОВ**

Салин А.А., Галеев А.Д., Поникаров С.И.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: mahp\_kstu@mail.ru

Обеспечение приемлемого уровня промышленной безопасности объектов химической и нефтехимической отраслей может быть достигнуто путем прогнозирования последствий возможных техногенных аварий на основе концепции риска. В аварийных ситуациях, связанных с проливом токсичных веществ, на опасных производственных объектах с целью принятия компенсационных мер предполагается прогнозирование зон распространения опасных веществ в открытом пространстве. Решение данной задачи осуществляется с использованием математических моделей, описывающих поступление паров с поверхности пролива и их адвективно-диффузионный перенос в атмосфере.

Применение программных комплексов CFD (Computational Fluid Dynamics) для оценки последствий подобных аварий, в отличие от разработанных и апробированных нормативных методик [1, 2], позволяет учитывать нестационарность поступления токсичного вещества в атмосферу при его испарении из пролива, а так же наличие в непосредственной близости от пролива строений, которые оказывают влияние на характеристики испарения и на направление распространения примеси.

На современном этапе развития моделей испарения выделяют следующие основные факторы, влияющие на интенсивность процесса массопереноса опасного вещества с поверхности пролива в окружающую среду [3]:

- термодинамические параметры системы (температура, давление их распределение в пространстве и во времени);
- физико-химические свойства жидкой и газовой фаз (коэффициенты диффузии, вязкости, молярные массы, давление паров или парциальное давление в случае смесей);
- наличие фазовых превращений, химических реакций разлитой жидкости;

- площадь межфазной поверхности;
- внешние тепловые потоки, механические воздействия, электромагнитные поля, излучение.

На данный момент разработана и с помощью вычислительного комплекса FLUENT реализована комплексная математическая модель оценки последствий аварийных проливов бинарных растворов, которая базируется на численном решении дифференциальных уравнений в частных производных. Основу математической формулировки задачи составляют трехмерные нестационарные дифференциальные уравнения сохранения массы, дифференциальные уравнения переноса импульса, массы, энергии, замыкаемые к-ε моделью турбулентности.

Концентрация испаряющегося компонента на границе раздела фаз определяется исходя из гипотезы о термодинамическом равновесии между жидкостью и ее паром у поверхности раздела. Таким образом, в случае испарения бинарного раствора, мольная доля компонентов на межфазной границе равна:

$$Y_{g,w} = \frac{P_{g,w}(X_g, T_l)}{P_0}, \quad (1)$$

где  $P_{g,w}(X_g, T_l)$  – парциальное давление компонента на поверхности испарения в зависимости от содержания компонента  $X_g$  в жидкой фазе и температуры последней  $T_l$ ,  $P_0$  – давление окружающей среды. Модель позволяет учесть изменение со временем величины  $P_{g,w}(X_g, T_l)$  вследствие изменения температуры и состава жидкой фазы.

Массовый поток ( $J_{g,w}$ ) с поверхности разлива определяется на основе стандартных функций стенки с учетом поправки на стефановский поток [4], [5]. Для дискретизации дифференциальных уравнений применялся метод контрольных объемов.

Изменение массы испаряющегося вещества в жидкой фазе рассчитывается из уравнения:

$$\frac{dm_l}{d\tau} = -J_{g,w}. \quad (2)$$

В модели учтена сопряженность процессов тепло- и массообмена, для чего в модель введено уравнение теплового баланса для слоя жидкости:

$$\frac{dT_l}{d\tau} = \frac{q_a + q_n + q_{sol} - q_p + q_{ar} - q_{ucn}}{m_l C_{pl}}, \quad (3)$$

где  $q_a$  – тепловой поток из атмосферы;  $q_n$  – поток тепла от жидкости к глубинным слоям подстилающего грунта;  $q_{sol}$  – поток тепла за счет солнечной радиации;  $q_{ucn}$  – теплота, отводимая от жидкости при испарении;  $q_p$  – потери тепла вследствие длинноволнового излучения поверхности пролива [4];  $q_{ar}$  – теплоприток к проливу вследствие длинноволнового излучения атмосферы [4];  $m_l$  – масса жидкости, отнесенная к единице поверхности пролива;  $C_{pl}$  – удельная теплоемкость жидкости.

Для учета теплообмена с грунтом численно решается уравнение теплопроводности для подстилающего слоя. Теплообмен с атмосферой описывается с помощью стандартных функций стенки.

Зависимость интенсивности испарения от времени использовалась в качестве граничного условия в задаче распространения опасного газа, решение которой получено путем численного анализа полной системы трехмерных нестационарных уравнений Рейнольдса, замыкаемых уравнением состояния идеального газа и к-ε моделью турбулентности.

При разработке математического описания испарения для слоя жидкости были сделаны следующие допущения:

- жидкость считается перемешанной по высоте слоя;
- свободная граница жидкости при испарении считается неподвижной.

Кроме того, на данный момент в разработанной математической модели оценки последствий аварийных проливов бинарных растворов не учитываются фазовые превращения, химические реакции в разлитой жидкости, процессы конденсации водяных паров и испаряющегося вещества над зеркалом пролива.

Так как присутствие аэрозольных частиц оказывает влияние на состояние паровоздушной смеси над проливом, и, как следствие, на интенсивность испарения, то особый интерес представляет дополнение разработанной математической модели уравнениями описывающими зарождение, рост, испарение, коагуляцию и химическое взаимодействие сконденсировавшихся капель примеси в газовой среде.

К основным свойствам аэрозольных частиц относят их форму, структуру и характерные размеры. Изучение особенностей и закономерностей этих характеристик позволяет глубже понять физико-химические процессы образования и эволюции аэрозолей, что имеет большое значение при построении физико-математических моделей аэродисперсных систем.

В состоянии термодинамического равновесия бинарная система жидкость–пар (аэрозоль) характеризуется давлением насыщенного пара жидкости над плоской границей раздела фаз при фиксированной температуре  $p_{\infty}(T)$ . Отношение фактического давления газовой среды к давлению насыщенного пара обычно называют *пересыщением*  $S = p(T) / p_{\infty}(T)$ . Если величина  $S > 1$ , то говорят о пересыщении пара при температуре  $T$ , а при  $S < 1$  – о недосыщении пара.

Кривую равновесия системы капля–пар определяет термодинамическое уравнение Кельвина:

$$\ln S = \frac{2 \cdot \sigma \cdot M}{r \cdot \rho_{ж} \cdot R \cdot T}, \quad (4)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости,  $M$  – молярная масса вещества,  $r$  – радиус капли,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  – температура.

Испарение капель жидкости в газообразной среде и обратный процесс конденсационного роста при наличии пересыщения пара имеют нестационарный характер и протекают в среде с неоднородной температурой и концентрацией пара; капли движутся в газе и могут деформироваться, а внутри них возникает циркуляция жидкости; теплообмен между каплями и средой осуществляется тремя различными механизмами – теплопроводностью, конвекцией и излучением.

В качестве основы математического описания аэрозолеобразования в разработанной модели первоначально предполагается использование идеализированных моделей аэрозольных систем, которые в дальнейшем могут уточняться посредством введения поправок на неучтенные факторы, с целью адаптации под решение конкретных задач.

В 2002 году в работе Кима и Гаутама [7], была представлена математическая модель, в которой концентрация выбросов твердых частиц определялась из состава топлива и окружающих условий, и в дальнейшем использовалась для численного моделирования коагуляции, конденсации и нуклеации частиц аэрозоля. В их работе скорость аэрозолеобразования определялась по классической теории нуклеации, в которой скорость гомогенной нуклеации в бинарной системе (количество капель сформировавшихся в одном см<sup>3</sup> за одну секунду) описывается следующим выражением:

$$J = C \cdot \exp(-\Delta G^* / k \cdot T), \quad (5)$$

где  $C$  – частотный фактор, а  $\Delta G^*$  – свободная энергия необходимая для формирования критических частиц,  $k$  – константа Больцмана.

Частотный фактор в уравнении (5) определяется как:

$$C = N_v \cdot A \cdot B_{av} \cdot Z_n, \quad (6)$$

где  $N_v$  – общая плотность паровой фазы,  $A$  – площадь поверхности ядер,  $B_{av}$  – средняя скорость роста и  $Z_n$  – неравновесный фактор, аналогичный фактору Зельдовича для однокомпонентных систем [8].

В 2008 году Г.И. Марчук и А.Е. Алоян [9] в Институте вычислительной математики РАН разработали базовую математическую модель, включающую динамические газо- и жидкофазные химические процессы, а также кинетические процессы нуклеации, конденсации/испарения и коагуляции, с использованием неравновесной функции распределения частиц по размерам. В их работе описана модель аэрозолеобразования в системе  $H_2O-H_2SO_4$ .

Образование новых ядер из паров происходит в основном посредством бинарной гомогенной нуклеации капель серной кислоты и воды. Скорость нуклеации  $J$  зависит от трех переменных: массовой концентрации паров серной кислоты в паровой фазе, относительной влажности воздуха и температуры.

В модели принято допущение, что в атмосфере в пересыщенном паре при температуре  $T$  и давлении  $P_v$  имеется бинарный кластер, состоящий из  $n_w$  молекул вещества  $w$  и  $n_a$  молекул вещества  $a$  с мольными фракциями  $x_{iv}$  ( $i = w, a$ ). Считается, что частицы имеют сферическую форму и находятся в жидкой фазе; в таком случае свободную энергию образования жидкого зародыша в бинарной смеси можно представить в следующем виде:

$$\Delta G = n_w \cdot \Delta\mu_w + n_a \cdot \Delta\mu_a + A \cdot \sigma, \quad (7)$$

где  $\Delta G$  изменение свободной энергии Гиббса,  $A$  – площадь поверхности,  $\sigma$  – поверхностное натяжение,  $\Delta\mu_i = \mu_{il}(T, P_v, x_{il}) - \mu_{iv}(T, P_v, x_{iv})$ , где  $\mu_{il}$  и  $\mu_{iv}$  – химические потенциалы в жидкой и паровой фазе соответственно.

Для пересыщенного пара функция  $\Delta G$  имеет максимум в точке с критическим радиусом  $r^*$ . Пар является пересыщенным по отношению ко всем каплям, у которых  $r > r^*$ . Энергия образования критических частиц  $\Delta G^*$  определяется путем решения следующих уравнений [10]:

$$\left( \frac{\partial \Delta G}{\partial n_w} \right) n_a = 0, \left( \frac{\partial \Delta G}{\partial n_a} \right) n_w = 0 \quad (8)$$

$$\Delta G^* = \frac{16 \cdot \pi \cdot \sigma^3 \cdot V^2}{3 \cdot (R \cdot T \cdot \ln S)^2} \quad (9)$$

$$V = (1 - [n_a / (n_w + n_a)]) \cdot \bar{V}_w + [n_a / (n_w + n_a)] \cdot \bar{V}_a, \quad (10)$$

где  $V$  – молярный объем раствора; а  $V_w$  и  $V_a$  – парциальные мольные объемы вещества  $w$  и вещества  $a$ , соответственно.

Подход, представленный в работе Марчука и Алояна, позволяет в рамках единой модели учитывать сложные взаимосвязи между динамическими и физико-химическими процессами и процессами формирования аэрозолей в атмосфере. В частности, с помощью этой модели можно воспроизвести эволюцию газовых примесей и аэрозолей в атмосфере, начиная с молекулярного уровня до образования частиц в несколько микрон с учетом их ионного состава, а так же представить пространственно-временную изменчивость газовых примесей и аэрозолей в атмосфере.

В 2010 году Эрик Херрман в своей академической диссертации [11] представил математическую модель аэрозолеобразования, реализованную в программном комплексе вычислительной гидродинамики Fluent, под названием Fine Particle Model. В этой модели при помощи классической теории нуклеации определяется скорость роста частиц в случае гетерогенного аэрозолеобразования [12]:

$$J_{het} = K \cdot \exp\left(\frac{-\Delta G_{het}^*}{k \cdot T}\right), \quad (11)$$

где  $K$  – кинетический коэффициент,  $\Delta G_{het}^*$  – энергия образования критических гетерогенных частиц.

$$\Delta G_{het}^* = f(m, X) \cdot \Delta G_{hom}^* \quad (12)$$

$$f(m, X) = 1 + \left(\frac{1-m \cdot X}{g}\right)^3 + X^3 \cdot \left(2 - 3 \cdot \left(\frac{X-m}{g}\right) + \left(\frac{X-m}{g}\right)^3\right) + 3 \cdot m \cdot X^2 \cdot \left(\frac{X-m}{g} - 1\right) \quad (13)$$

$$g = \sqrt{1 + X^2 - 2 \cdot m \cdot X}, \quad (14)$$

где  $g$  – геометрический фактор, который зависит от отношения радиуса сухих частиц к критическому размеру кластера  $X = R_{dry}/r^*$  и от угла смачивания  $m = \cos\theta$ .

Кроме нуклеации Fine Particle Model учитывает рост частиц за счёт конденсации, сопровождающейся выделением тепла, коагуляции, диффузии частиц, термо- и гравитационного оседания, а так же изменение химического состава частиц. Конденсационный рост капель описывается в соответствии с уравнениями Баррета и Клемента [13]:

$$\frac{\partial m_{p,i}}{\partial t} = \frac{2 \cdot \pi \cdot d_p \cdot (S - S^*)}{\frac{R_v \cdot T \cdot (1 - \omega_v \cdot M/M_v)}{D_v \cdot p_{v,e} \cdot f_{mass}} + \frac{L_v^2 \cdot S^*}{R_v \cdot T^2 \cdot \lambda \cdot f_{heat}}}, \quad (15)$$

где  $S$  и  $S^*$  – степень насыщения пара в газовой фазе и на поверхности частицы соответственно,  $d_p$  – диаметр капли,  $R_v$  – удельная газовая постоянная пара,  $p_{ve}$  – равновесное давление паров,  $\omega_v$  – массовая доля паров,  $M$  – молекулярный вес парогазовой смеси,  $M_v$  – молекулярный вес пара,  $D_v$  – коэффициент диффузии паров,  $L_v$  – теплота парообразования,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $f_{heat}$ ,  $f_{mass}$  – коэффициенты.

Таким образом, в настоящее время представляется возможным дополнение разработанной модели прогнозирования последствий аварийных проливов уравнениями, описывающими зарождение, рост, испарение, коагуляцию и химическое взаимодействие сконденсировавшихся капель примеси в газовой среде.

## Литература

- [1] 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).

- [2] TNO Yellow Book. Methods for the calculation of physical effects due to releases of hazardous materials (liquids and gases). Committee for the Prevention of Disasters, CRP 14E. The Hague. *The Netherlands*. 1997. 870p.
- [3] Иванов А.В. Разработка методических основ оценки последствий химических промышленных аварий (на примере металлургического комбината): дис. ... канд. техн. наук:05.26.04. М. 1999. 283с.
- [4] Fluent Inc. Fluent 6.1. User's Guide, Lebanon. 2003.
- [5] Померанцев В.В., Арефьев К.М., Ахмедов Д.Б. Основы практической теории горения. Л.: Энергоатомиздат. 1986. 312с.
- [6] Береснев С.А., Грязин В.И. Физика атмосферных аэрозолей. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та. 2008. 227с.
- [7] Dong-Hee Kim, Mridul Gautam, et al. Modeling Nucleation and Coagulation Modes in the Formation of Particulate Matter inside a Turbulent Exhaust Plume of a Diesel Engine. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2002. Vol.249. P.96-103.
- [8] Kulmala M., Viisanen Y. *J. Aerosol Sci.* 1991. Vol.22. No.1. P.97.
- [9] Марчук Г.И., Алоян А.Е. Динамика и кинетика газовых примесей и аэрозолей в атмосфере и их значение для биосферы. *Междисциплинарный научный и прикладной журнал «Биосфера»*. 2009. Т.1. №1.
- [10] Mirabell P.J., Jaeger-Voirol A. Binary Homogeneous nucleation. Departement de Chimie, Universite Louis Pasterur. BP 296. 67000 – Strasbourg, France.
- [11] Herrmann, E. Computational fluid dynamics simulations in aerosol and nucleation studies. *Academic dissertation, Helsinki*. 2010.
- [12] Fletcher N.H. Size effect in heterogeneous nucleation. *J. Chem. Phys.* 1958. Vol.29. P.572-576.
- [13] Barrett J.C., Clement C.F. Growth rates for liquid drops. *J. Aerosol Sci.* 1988. Vol.19. P.223-242.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В КАЧЕСТВЕ ОРГОМИНЕРАЛЬНОГО УДОБРЕНИЯ ДЛЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА (НА ПРИМЕРЕ ПШЕНИЦЫ)

Солодкова А.Б., Собгайда Н.А.

Саратовский государственный технический университет.

Энгельсский технологический институт (филиал). E-mail: conata07@list.ru

В процессе переработки нефти ежегодно образуется порядка 125 млн. тонн отходов. Метод складирования нефтесодержащих отходов не отвечает экологическим и техническим требованиям, приводит к длительному и безвозвратному отчуждению земельных ресурсов, сопровождается экологическими рисками загрязнения экосистемы не только на территории нефтеперерабатывающего объекта, но и близлежащих населенных пунктов [1].

На нефтеперерабатывающих предприятиях после биохимической очистки сточных вод (СВ) образуется порядка 3,2-3,5 м<sup>3</sup> отработанного активного ила (ОАИ) влажностью ≈ 97-98% на каждые 1000 м<sup>3</sup> очищенных стоков.

ОАИ можно отнести к твердым и высоковязким НСО отходам II класса опасности. ОАИ обладает многими «достоинствами»: считая на сухое вещество АИ содержит 37-52% белков, 20-35% аминокислот, жиры, углеводы, а также витамины группы В [2].

Существует ряд способов утилизации АИ, один из которых захоронение в почвенной среде. Почва на сегодняшний день остается средой наиболее используемой для размещения АИ в форме накопления.

Предложенный способ утилизации АИ в качестве органоминерального удобрения является одним из наиболее экономически выгодных, т.к. в нем содержатся физиологически сбалансированное количество микро- и биогенных элементов, необходимых для развития растений. Однако его использование требует осторожного подхода и строгого соблюдения сроков внесения.

Анализ обзорных материалов по данной проблеме показал, что из общего количества ОАИ в России как удобрение используется 1-6%, перерабатывается не более 3%, основная

же масса десятилетиями хранится в илонакопителях. За рубежом в качестве удобрения используется в среднем 32,4% осадка СВ [3-4].

Исследования проводились с целью определения возможных путей размещения в окружающей среде накопленных и образующихся на ОАО «Саратовский НПЗ» отходов. В ходе эксперимента по использованию ОАИ в качестве удобрения для с/х культур, образцы ила были предварительно подвергнуты детоксикации путем реагентной обработки 1% хлорной известью и термической деструкции при  $t = 500 \pm 50$  °С [5].

**Табл. 1.**

№ образца	Количественное соотношение удобрение/ОАИ, %	Культура
образец 1	ОАИ 30% - Опилки 70%	фасоль
образец 2	ОАИ 50% - Опилки 50%	фасоль
образец 3	ОАИ 70% - Опилки 30%	фасоль
образец 4	ОАИ 30% - Шелуха подсолнечника 70%	пшеница
образец 5	ОАИ 50% - Шелуха подсолнечника 50%	пшеница
образец 6	ОАИ 70% - Шелуха подсолнечника 30%	пшеница
образец 7	ОАИ – 100%	фасоль
образец 8	ОАИ – 100%	пшеница
образец 9	чистый грунт	пшеница
образец 10	чистый грунт	фасоль

Полученные образцы были использованы в качестве добавки к удобрениям при посадке зерновых культур. Как удобрение использовали отходы – опилки и шелуху подсолнечника.

В ходе работы проведен анализ почвенного пути утилизации ОАИ.

Научно-исследовательская работа проводилась в 2011 году в естественных условиях на учебно-опытном участке в соотношении введения в почву удобрений в норме 10т/га (табл. 1).

По природно-географическому районированию земельная площадь учебно-опытного участка относится к Саратовской области. В механическом составе преобладают фракции глины. Реакция почвенной среды рН 4,5-6,4. Глубина посадки экспериментальных образцов составляет 18-22 см.

**Объекты исследований:**

- АИ с иловых площадок Саратовского нефтеперерабатывающего завода;
- Почва, с плотностью загрязнения тяжелыми металлами;
- Зерновая культура: пшеница.

**Схема опыта:**

- Контроль (возделывание с/х культур без АИ);
- АИ в дозе 10т/га по СВ в соотношении 30%;
- АИ в дозе 10т/га по СВ в соотношении 50%;
- АИ в дозе 10т/га по СВ в соотношении 70%;
- АИ в дозе 10т/га по СВ в соотношении 100%.

Размер опытной делянки 0,12 x 0,15м. Общая площадь делянки 0,018м<sup>2</sup>. Общее количество делянок – 10.

**Характеристика методов исследования.** Фазы развития пшеницы отмечались глазомерно. Учет засоренности производился подсчетом количества сорняков на делянке. Измерение роста растений по основным фазам развития производилась с помощью линейки. Учет урожая проводился сплошным методом с учетной делянки.

Образцы ОАИ подвергли анализу для определения химического состава компонентов. Анализ и обработка результатов осуществлялись с использованием рентгенофлуоресцентной спектрометрии. Для исследования процессов термической деструкции образцов ОАИ были использованы методы термического анализа: дифференциально-термический анализ (ДТА), термогравиметрия (ТГ). Образующиеся при разложении газы подвергались анализу методом ИК-Фурье спектрометрии. Для получения изображения структуры образцов (органиноминеральная композиция) был использован метод микроскопии. Бактериологический и гельминтологический анализ осадков очистных сооружений «ОАО Саратовский НПЗ» выполнялся санитарной лабораторией. Математическая обработка данных проводилась на ПК с использованием стандартных программ [5].

### Результаты экспериментальной работы.

У пшеницы можно выделить следующие фазы: всходы – кущение – выход в трубку – колошение – цветение – спелость (табл. 2) [6]. На первых этапах развития нет различий в датах наступления фаз. Разница контроля на фоне внесения в почву различных доз АИ составила в среднем 3-5 дней. Наиболее поздняя фаза наступления восковой спелости - при внесении 70% дозы АИ и без внесения АИ, а наиболее ранняя – 30% доза АИ.

Результаты опыта (табл. 3) доказывают эффективность АИ на увеличение высоты роста растений, влияние улучшения питательного режима почв за счет внесения различных доз АИ. Наибольшие значения высоты развития растений наблюдается на участках с внесением рекомендованной дозы АИ – 10т/га (по сухому веществу) и дозы АИ в соотношении 30%. Наименьшее значение высоты роста отмечается с внесением АИ в соотношении 70% и без внесения АИ. Разница в высоте растений в восковую спелость между этими вариантами достигает 10-60 мм. Хорошую динамику роста растений дают 50% дозы АИ. Интенсивный рост наблюдается от фазы кущения до цветения.

Табл. 2. Сроки наступления основных фаз развития пшеницы

Вариант опыта	Фазы развития пшеницы							
	Посев	Всходы	Кущение	Выход в трубку	Колошение	Цветение	Молочная спелость	Восковая спелость
Норма введения в почву АИ, %								
0	10.05	16.05	27.05	11.06	24.06	08.07	25.07	12.08
30	10.05	16.05	25.05	09.06	21.06	05.07	22.07	04.08
50	10.05	16.05	28.05	13.06	26.06	11.07	26.07	08.08
70	10.05	16.05	30.05	15.06	29.06	13.07	29.07	14.08

Табл. 3. Динамика роста растений пшеницы по вариантам опыта

Вариант опыта	Фаза развития пшеницы, мм							Разница
	Кущение	Выход в трубку	Колошение	Цветение	Молочная спелость	Восковая спелость		
Норма введения в почву АИ, %								
0	115	234	360	435	440	440	-	
30	130	285	390	470	500	500	+60	
50	124	250	370	460	480	480	+40	
70	110	230	345	440	450	450	+10	

**Табл. 4.** Урожайность пшеницы, (ц/га)

Вариант опыта	Средняя урожайность	Разница	
		ц/га	%
0	12	-	-
30	22	+10	83,3
50	18,2	+6,2	51,2
70	13,2	+1,2	10

Урожайность пшеницы в условиях внесения различных доз АИ (табл. 4) доказывает, что использование АИ в качестве удобрения (на примере пшеницы) приводит к существенному повышению его урожайности.

### **Выводы**

1. АИ содержит органические минеральные соединения, повышающие плодородие почв, обладает высоким удобряющим эффектом при выращивании с/х культур, способствует накоплению продуктивной влаги в почве, что способствует оптимальному росту и развитию с/х растений, однако его использование требует осторожного подхода.
2. Выявлено, что в условиях Саратовской области применения АИ в дозах 10 т/га по сухому веществу и внесения в почву АИ в соотношении 30% наблюдается максимальный линейный рост и наибольшая площадь колосьев у пшеницы. Урожай пшеницы возрос на 110-183,3%, (1,2-10 ц/га) по сравнению с контрольным образцом.
3. Утилизация ОАИ, его использование в качестве органоминерального удобрения одновременно решает ряд задач: исключается необходимость хранения (захоронения) многотоннажных отходов, повышается плодородие почв и урожайность с/х культур, не загрязняется ОС, сохраняется чистота природных ландшафтов.

### **Литература**

- [1] Бобович Б.Б. Переработка отходов производства и потребления: справочное издание. М.: «Интермет Инжиниринг». 2000. 496с. ISBN 5-89594-040-4.
- [2] Родионов А.И., Клушин В.Н., Систер В.Г. Технологические процессы экологической безопасности (Основы энвайронменталистики): учебник для студентов технических и технологических специальностей. 3 –е изд., перераб. и доп. Калуга: Издательство Н. Бочкаревой. 2000. 800с. ISBN 5-89552-013-3.
- [3] Зыкова И.В., Панов В.П. Утилизация избыточных активных илов. *Экология и промышленность России*. 2001. №12. С.29-30.
- [4] Трубникова Л.И. Утилизация избыточного активного ила предприятий нефтехимии. *Экология и промышленность России*. 2001. №8. С.9-11.
- [5] Собгайда Н.А., Ольшанская Л.Н., Солодкова А.Б. Экологические проблемы утилизации отработанного активного ила предприятия ОАО «Саратовский НПЗ» и пути их решения. *Известия вузов «Химия и химическая технология»*. 2011. №3. С.32-35.
- [6] «Использование активного ила в качестве удобрения с/х культур в условиях радиоактивного загрязнения территории» (<http://www.bestreferat.ru/referat-116061.html>).

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ЗОНЕ СОЕДИНЕНИЯ «ТРУБА-ТРУБНАЯ РЕШЕТКА» С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Волкова О.И., Мугинова К.С., Хабирова Г.Ф.

Уфимский государственный нефтяной технический университет.

E-mail: mfugntu@mail.ru

Жесткое крепление трубных решеток к корпусу в кожухотрубчатых теплообменниках обуславливает возникновение температурных усилий в трубках и самом корпусе при различных температурах их нагрева, что может привести к нарушению развальцовки, продольному изгибу и др. В связи с этим кожухотрубчатые теплообменные аппараты жесткого типа обычно применяют, когда разность температур стенок труб и корпуса не превышает 30-50 °С. В работе [1] была выполнена оценка остаточных напряжений в зоне вальцованного соединения "труба-трубная решетка" кожухотрубчатого теплообменника. При вводе теплообменника в эксплуатацию происходит суммирование остаточных напряжений с напряжениями от действия рабочих нагрузок и температурных деформаций.

Для численного моделирования напряженного состояния в зоне соединения «труба-трубная решетка» был использован метод конечных элементов, реализованный в виде программного комплекса ABAQUS. Пространственная задача моделирования полей напряжений в зоне соединения "труба-трубная решетка" для упрощения расчетов была заменена осесимметричной задачей "труба-эквивалентная втулка".

Конечно-элементная модель зоны соединения "труба-втулка" представлена на рис. 1. Ограничения на осевое перемещение были заданы для узлов конечно-элементной сетки трубы и втулки на левой торцевой поверхности в соответствии с приведенным рисунком. Первоначально было смоделировано поле остаточных напряжений, возникающих в процессе роликовой развальцовки трубы. После этого на остаточные напряжения от развальцовки были наложены осевые температурные напряжения в трубе различного знака и величины.

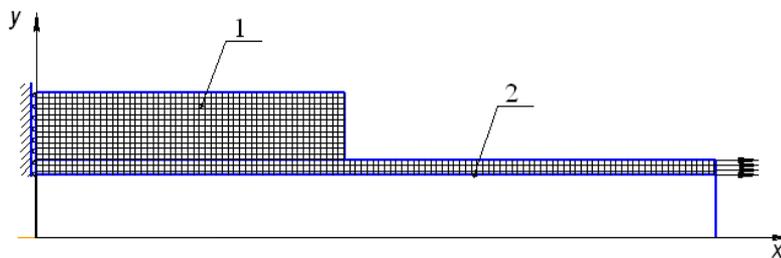
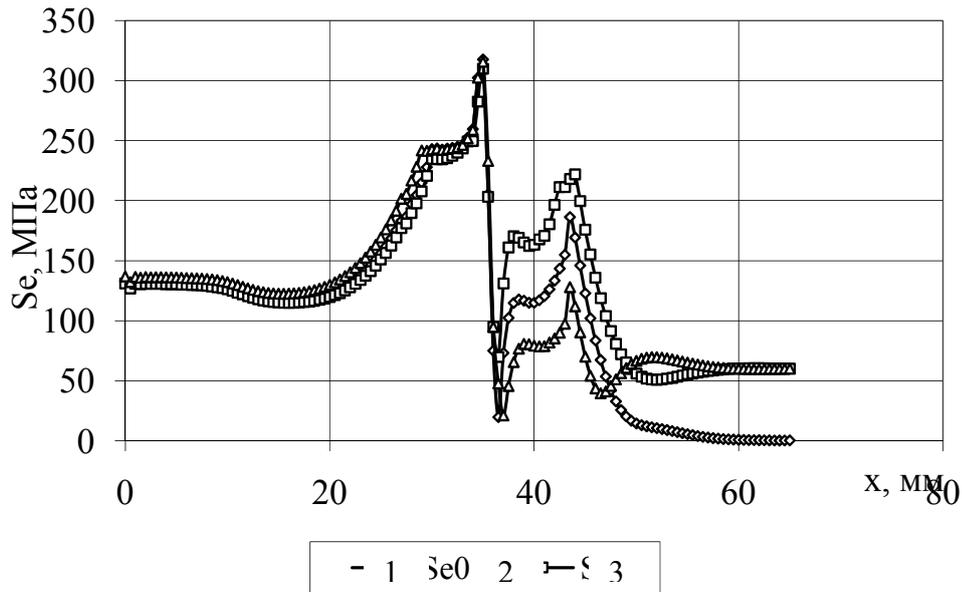


Рис. 1. Осесимметричная конечно-элементная модель соединения "труба-эквивалентная втулка": 1 – эквивалентная втулка, 2 – труба

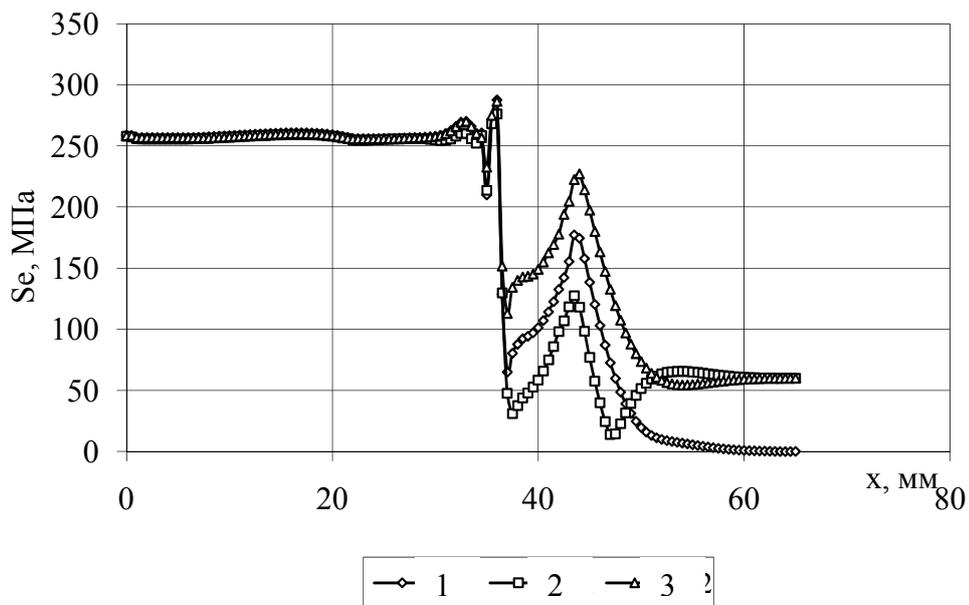
При определении температурных напряжений предполагают, что решетки теплообменника не деформируются и поэтому температурные усилия распределяются равномерно на все трубы. Температурное напряжение в трубе определяется по следующей формуле [2]

$$\sigma_t = \frac{Q_T}{F_T} = \frac{(\alpha_T t_T - \alpha_K t_K) E_T E_K F_K}{E_T F_T + E_K F_K}, \quad (1)$$

где  $Q_T$  – усилие сжатия или растяжения труб, Н;  $\alpha_T$ ,  $\alpha_K$  – температурные коэффициенты линейного расширения материала соответственно труб и корпуса, °С<sup>-1</sup>;  $t_T$ ,  $t_K$  – температуры соответственно трубы и корпуса, °С;  $E_T$ ,  $E_K$  – модули упругости материала соответственно труб и корпуса, МПа;  $F_T$ ,  $F_K$  – площади поперечного сечения соответственно всех труб и корпуса, мм<sup>2</sup>.



а)



б)

**Рис. 2.** Распределение суммарных эквивалентных напряжений (по Мизесу) вдоль оси трубы:  
 а) на наружной поверхности трубы; б) на внутренней поверхности  
 (1 –  $\sigma_t = 0$  МПа; 2 –  $\sigma_t = -60$  МПа, 3 –  $\sigma_t = 60$  МПа)

При максимальной разности температур кожуха и труб  $\Delta t = 50$  °С температурные напряжения в трубе достигают  $\sigma_t = 40,2-60,5$  МПа, в периферийных трубах эти напряжения могут достигать  $\sigma_t \approx 100$  МПа.

Растягивающие температурные напряжения возникают в трубе, когда температура трубки ниже температуры корпуса теплообменника. Действие растягивающих напряжений реализовывалось прикладыванием распределенной осевой нагрузки к свободному правому торцу трубки в направлении от втулки, как показано на рис. 1. Сжимающие температурные напряжения возникают в трубе, когда температура корпуса ниже температуры трубок.

Для моделирования действия сжимающих напряжений к свободному правому торцу трубки прикладывалась распределенная нагрузка в направлении к втулке. При расчетах для обоих случаев распределенная нагрузка изменялась в течение 20 шагов от 0 до 60 МПа. Такое максимальное значение распределенной нагрузки было выбрано исходя из того, что оно является средним для центральных и периферийных трубок в кожухотрубчатых теплообменниках жесткого типа при максимальной разности температур  $\Delta t = 50$  °С. Размеры деталей при расчетах были приняты как в работе [1].

Результаты расчетов представлены на рис. 2. В зоне соединения трубы с трубной решеткой (эквивалентной втулкой) после развальцовки можно выделить три участка на трубе. Первый участок ( $0 < x < 35$  мм) представляет собой радиально расширенную область трубы, которая контактирует по наружной поверхности с отверстием в трубной решетке. На данном участке на трубу по ее наружной поверхности действует остаточное контактное давление.

Второй участок ( $35 \text{ мм} < x < 55 \text{ мм}$ ) – переходная зона от расширенной части к недеформированному участку. На данном участке действуют максимальные растягивающие остаточные осевые напряжения на внутренней поверхности трубы. Также на данном участке остаточные эквивалентные напряжения близки к пределу текучести материала трубы ( $\sigma_T = 190$  МПа). Третий участок ( $x > 55$  мм) – недеформированная часть трубы. Как видно из рис. 2, в переходной зоне трубы при действии сжимающих температурных напряжений эквивалентные напряжения на наружной поверхности увеличиваются, на внутренней – уменьшаются примерно на 50 МПа; при растягивающих температурных напряжениях, наоборот, на наружной поверхности – уменьшаются, на внутренней – увеличиваются примерно на 50 МПа. При этом, так как эквивалентные напряжения на конечном участке переходной зоны превышают предел текучести материала трубы, в этом месте возникают пластические деформации.

## Литература

- [1] Хабирова Г.Ф., Галеев Э.У., Ризванов Р.Г. Оценка остаточных напряжений в зоне вальцованного соединения "труба-трубная решетка" теплообменников. VII Международная молодежная научная конференция «Севергеоэкотех-2006»: Материалы конференции. Ч.1. Ухта: УГТУ. 2006. С.336-339.
- [2] Михалев М.Ф., Третьяков Н.П., Мильченко А.И., Зобнин В.В. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств: Примеры и задачи. Л.: Машиностроение. 1984. 301с.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТЕРИЯ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ НА ПРИМЕРЕ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 20

Закирничная М.М., Закирьянова А.Б.

Уфимский государственный нефтяной технический университет.

E-mail: mmo3111@mail.ru

Современные нефтеперерабатывающие предприятия представляют собой комплекс сложных технологических установок, относящихся к опасным производственным объектам. Наиболее ответственным оборудованием технологических установок являются колонные аппараты, представляющие собой вертикальные сосуды, работающие под давлением. Обеспечение их надежной и безопасной работы с каждым годом становится все более актуальной задачей, так как значительная часть данного типа оборудования достигла физического и морального износа, отработав нормативный срок службы [1]. Вследствие этого их дальнейшая эксплуатация возможна только после тщательного обследования технического состояния, установления работоспособности и определения остаточного ресурса.

Для получения достоверных результатов расчета остаточного ресурса объектов, эксплуатируемых длительное время, необходимо знать как фактические механические

характеристики материала и напряженно–деформированное состояние (НДС), так и иметь критерии предельного состояния. В качестве критерия предельного состояния в данной работе предлагается использовать значение напряжения, при котором происходит зарождение дефекта, приводящего к разрушению.

Изучение данного вопроса проводилось на примере образцов из стали 20. Экспериментальные образцы, изготовленные по ГОСТ 1497–84, были испытаны на растяжение на разрывной машине ИР 5113–100 при температуре 20 °С. В ходе испытаний измерялась напряженность магнитного поля после каждой серии статического одноосного нагружения с помощью магнитоизмерительного феррозондового прибора Ф205–30А. Данный прибор предназначен для обнаружения дефектов в намагниченных ферромагнитных деталях, в том числе в сварных конструкциях, а также измерения нормальной ( $H_n$ ), тангенциальной ( $H_t$ ) составляющих напряженности постоянного магнитного поля ( $G$ ) на поверхностях деталей и в свободном пространстве [2]. В качестве результирующего принимались средние значения трех измерений по длине рабочей зоны образца.

Перед испытанием было произведено измерение начальных геометрических размеров образцов с использованием штангенциркуля и микрометра с погрешностью не более  $\pm 0,5\%$  (толщина и ширина образцов). Образцы были промаркированы по длине рабочей зоны образца (рис. 1).

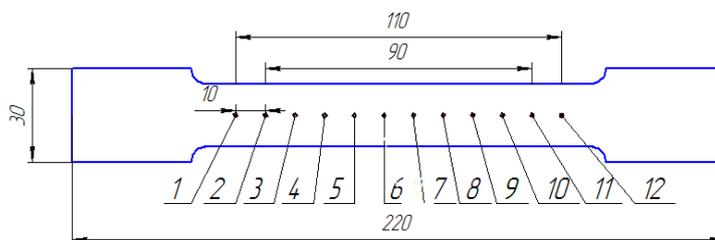


Рис. 1. Схема расположения точек замера напряженности магнитного поля по длине рабочей зоны образца

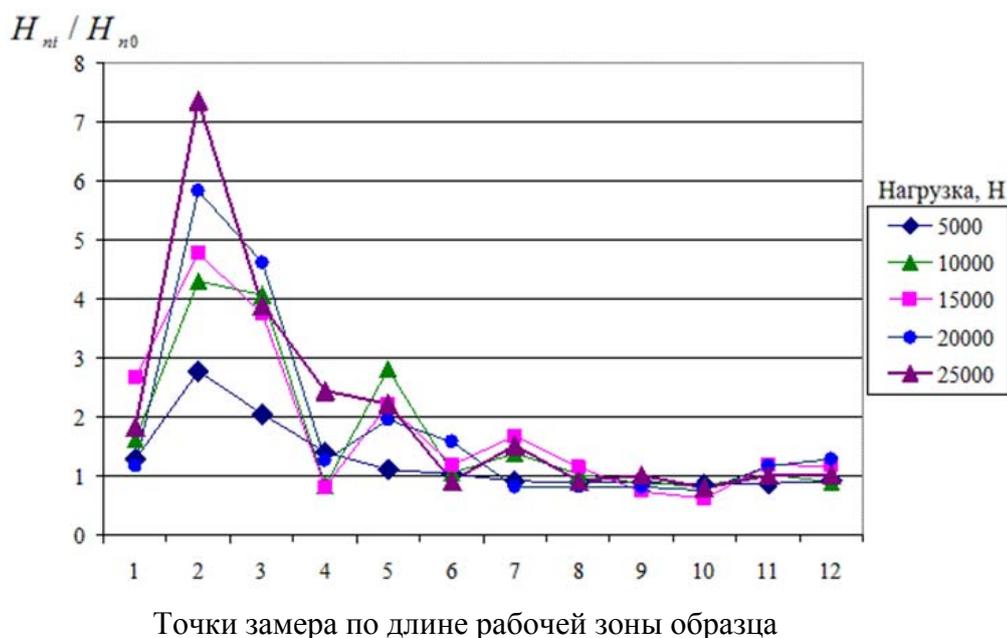


Рис. 2. Зависимость степени изменения напряженности магнитного поля по длине рабочей зоны образца №1 из стали 20

В ходе экспериментов были получены зависимости степени изменения напряженности магнитного поля  $H_{ni} / H_{n0}$ , анализ которых позволил выявить точное место разрушения экспериментальных образцов. Например, для первого образца анализ результатов показал, что отношение  $H_{ni} / H_{n0}$  при увеличении нагрузки возрастает и достигает своего наибольшего значения в точке 2, в которой и произошел разрыв образца при дальнейшем нагружении. На рис. 2 представлена зависимость степени изменения напряженности магнитного поля  $H_{ni} / H_{n0}$  для образца №1. По данной зависимости видно, что уже при нагрузке в 10 кН можно точно определить место возможного разрушения образца.

На рис. 3 представлен экспериментальный образец №1 после разрыва.



Рис. 3. Экспериментальный образец после разрыва

Реакция объектов на растяжение контролировалась с использованием прибора акустической эмиссии ЛОКУС 4181. В процессе нагружения наблюдали за изменениями уровня амплитуд, активности импульсов АЭ сигналов и энергии локаций. В качестве примера на рис. 4 показано изменение энергии локаций по длине рабочей зоны образца №1.

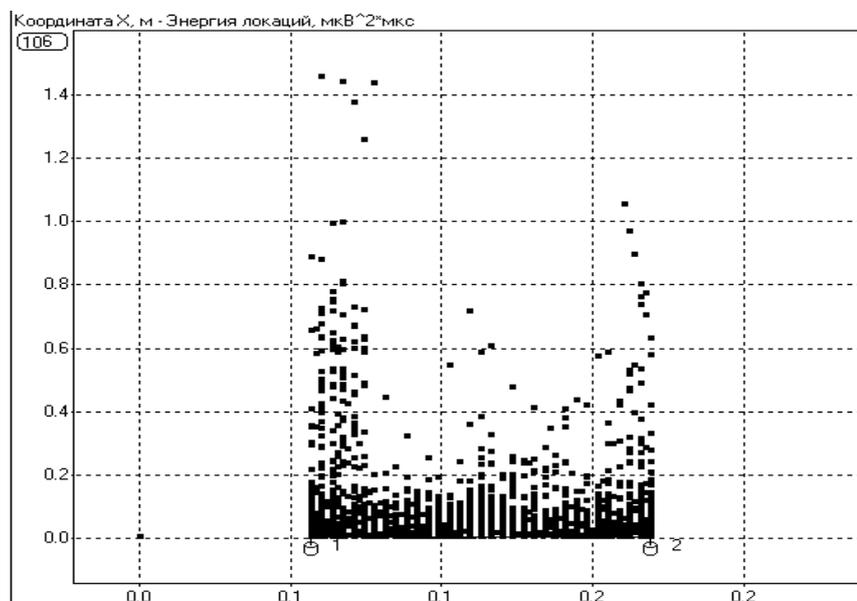


Рис. 4. Изменение энергии локаций по длине рабочей зоны образца №1

На рис. 5 изображена зависимость энергии локаций от времени нагружения. Из рис. 4, 5 отчетливо видно, что энергия локаций имеет максимальное значение в первой четверти образца, именно в этой четверти образовался дефект и впоследствии произошел разрыв

образца, что подтверждает результаты, полученные с помощью феррозондового прибора. По данным акустико-эмиссионного контроля было зафиксировано точное время зарождения дефекта, который, при дальнейшем нагружении, привел к разрушению экспериментального образца №1.

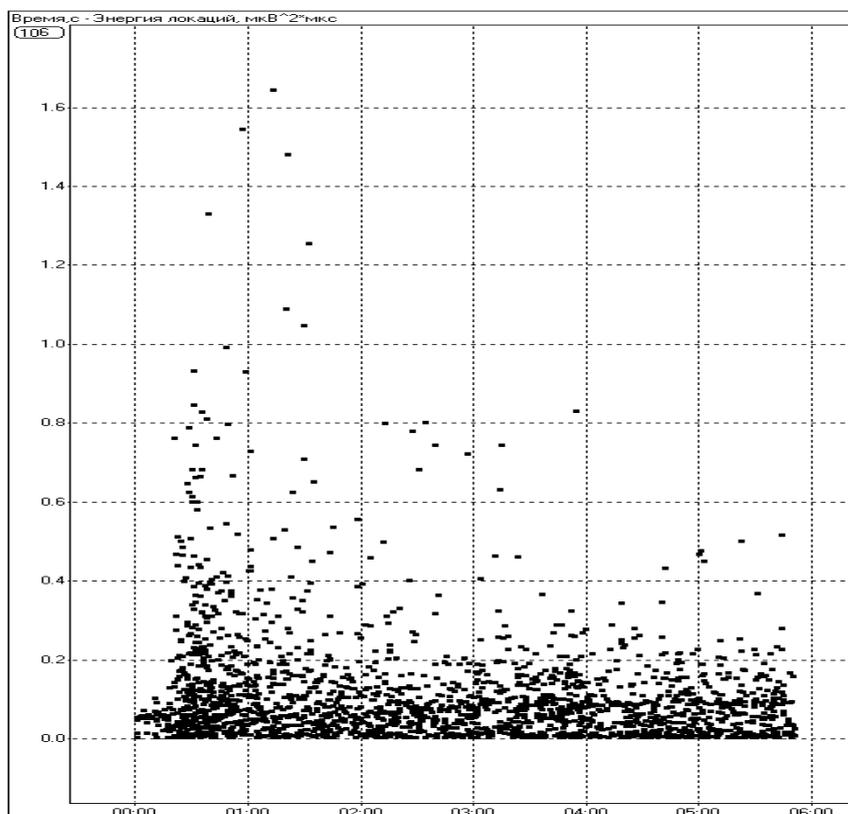


Рис. 5. Зависимость энергии локаций от времени нагружения образца №1

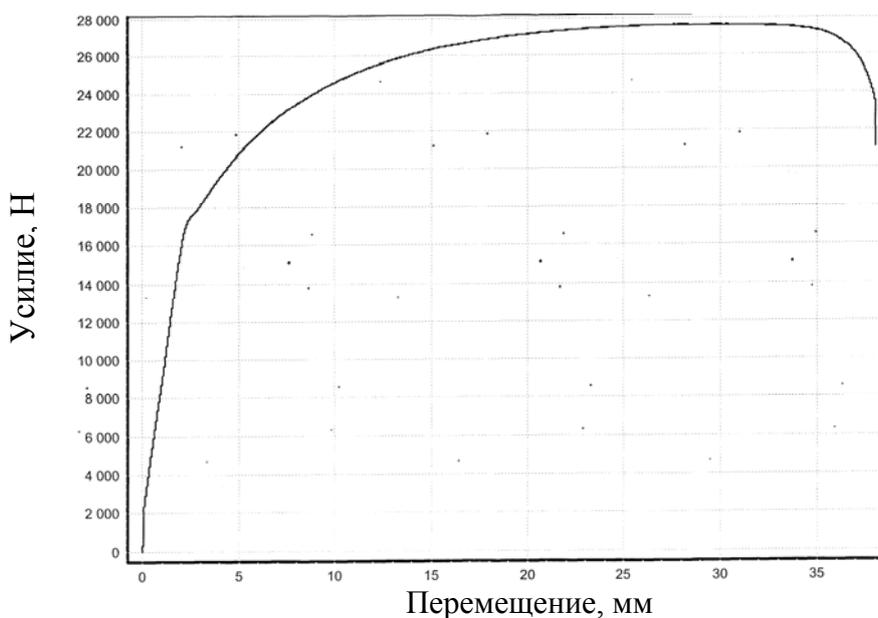


Рис. 6. Пример диаграммы растяжения для образца №1

Анализ полученных данных акустико-эмиссионного контроля и сопоставление их с диаграммой растяжения (рис. 6), позволил определить значения напряжений, при которых

происходит зарождение дефекта, приводящего к разрушению экспериментальных образцов. Значение этого напряжения для образца №1 составило 384,1 МПа, тогда как допускаемое напряжение для стали 20 при расчетах на прочность принимается 147 МПа.

Таким образом, комплексные исследования изменения магнитных и акустических характеристик металла экспериментальных образцов из стали 20 в процессе одноосного статического растяжения, позволили определить напряжения, при которых происходит быстрый рост дефекта, приводящего к разрушению, а также заранее определить место возможного разрушения.

### Литература

- [1] Кузеев И.Р., Захаров Н.М., Евдокимов Г.И. Повреждаемость колонных аппаратов нефтепереработки и нефтехимии. Учебное пособие. Уфа: УГНТУ. 1997. 54с.
- [2] Кондрашова О.Г., Наумкин Е.А., Кузеев И.Р. Определение ресурса безопасной эксплуатации нефтегазового оборудования путем оценки адаптивных свойств металла по изменению его магнитных характеристик.- Мировое сообщество: проблемы и пути решения: Сб. науч. ст. Уфа: Изд-во УГНТУ. 2006. №19. С.16-26.

## УТИЛИЗАЦИЯ ТОКСИЧНЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ В СВЕРХКРИТИЧЕСКОЙ ВОДЕ

Мухтаров Т.М.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: TVshow2007@yandex.ru

Рациональное использование природных ресурсов и защита окружающей среды от загрязнения производственными выбросами является важнейшей народнохозяйственной задачей нашего времени. Эта задача решается на базе создания и внедрения малоотходных и безотходных производств.

Для перехода к малоотходным и безотходным производствам требуется комплекс мероприятий, включающий разработку и внедрение принципиально новых и совершенствование действующих технологических процессов с целью существенного сокращения производственных отходов, использование отходов в самом производстве или в других производствах, разработку и внедрение наиболее совершенных методов очистки, переработки и обезвреживания неиспользуемых по техническим или экономическим причинам отходов.

Проходя преддипломную практику на производственном предприятии ОАО «Казань-оргсинтез» цех №88 переработки и утилизации жидких и газообразных отходов, был проведен анализ работы цеха.

Были предложены новые методы по энерго- и ресурсосбережению, а также, новый метод по обезвреживанию солесодержащих сточных вод и кубовых остатков.

Новый метод включает в себе решение проблемы экологически чистой утилизации токсичных органических веществ (ОВ) и отходов посредством окисления в сверхкритической воде (СКВ).

Для утилизации токсичных органических веществ (ОВ) и отходов наиболее широко используются методы адсорбции, биологического окисления, консервации и захоронения в грунте, сжигания и паровоздушного окисления. На предприятии ОАО «Казаньоргсинтез» для обезвреживания значительной группы жидких, твердых, пастообразных и газообразных промышленных отходов с большим набором и высокой концентрацией органических и минеральных веществ, применяют термические методы, а именно, огневой метод.

Они заключаются в тепловом воздействии на отходы, при котором происходит окисление или газификация горючих компонентов, термическое разложение или восстановление некоторых вредных веществ с образованием безвредных или менее вредных. Сжигание обводненных токсичных ОВ при 900-1100 °С в избытке кислорода является

экономически оправданным только при их содержании более 25%. При этом основная часть затрат связана с улавливанием недогоревших токсичных веществ для предотвращения их попадания в атмосферу.

В последние годы интенсивно развивается новый метод утилизации токсичных ОВ и отходов, основанный на использовании воды при сверхкритических параметрах ( $T > 374$  °C,  $P > 22.1$  МПа).

Окисление обводненных токсичных органических отходов, особенно содержащих ксенобиотики и небиodeградируемые вещества, в сверхкритической воде (СКВ) имеет по сравнению с паровоздушным окислением или сжиганием существенные экономические и экологические преимущества. В СКВ при варьировании температуры и концентрации реагентов достигается практически полная утилизация ОВ за приемлемое время. В качестве окислителя наиболее часто используют воздух, чистый кислород или пероксид водорода, реже – нитраты аммония или щелочных металлов.

Важно, что при окислении в СКВ органических и неорганических веществ продукты даже неполного окисления не содержат диоксинов и  $\text{NO}_x$ , а аммиак и цианиды превращаются в  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{N}_2$ . Гетероатомы – хлор, сера, фосфор конвертируются с образованием соответствующих минеральных кислот, которые при помощи оснований можно выделить в виде солей.

Утилизация ОВ в СКВ включает следующие стадии: сжатие реагентов, растворение, окисление, сепарацию минеральных веществ, регенерацию тепла и разгерметизацию реакционной системы. Утилизацию обычно осуществляют при 450-650 °C и 24-30 МПа.

Поскольку основные экономические затраты связаны с нагревом реагентов и их сжатием, то применение воздуха для окисления токсичных ОВ не целесообразно из-за большого содержания азота.

Тепловой режим процесса поддерживается, как правило, за счет внутриреакторного сжигания добавленного в воду топлива, например, метанола, гидротермальное горение которого характеризуется высокой скоростью (степень превращения 99,95% за 100 мс при увеличении  $T$  в процессе горения от 400 до 800 °C). С целью повышения экономической эффективности утилизации высокоэнтальпийный поток реактантов на выходе из реактора можно использовать в качестве источника тепла или рабочего тела электрогенерирующих устройств.

При сверхкритических условиях вода становится неполярным растворителем, неограниченно растворяет органические вещества и газы, но не растворяет минеральные соли. В гомогенных СКВ растворах газов и ОВ реализуются газофазные скорости реакций, то есть, гетерогенные процессы уже не лимитируют скорость окисления. Низкая вязкость и высокая плотность СКВ способствуют быстрому проникновению растворителя в поры твердых субстанций и экстракции ОВ, что обеспечивает разделение минеральной и органической составляющих токсичных отходов в процессе утилизации.

Основными параметрами, влияющими на скорость окисления ОВ, являются температура, концентрация реагентов и давление (плотность СКВ).

Интерес к фенолу и его производным обусловлен тем, что эти вещества содержатся в сточных водах ОАО «Казаньоргсинтез» поступающих в цех для их дальнейшей утилизации, и многих других предприятий химической промышленности.

Кроме того, фенол является наиболее устойчивым интермедиатом окисления в СКВ ароматических соединений. Установлено, что вода ингибирует скорость окисления фенола при 442-465 °C и низкой плотности и ускоряет окисление при 380-440 °C и высокой плотности воды (концентрация фенола 0,18 и кислорода 6,4 ммоль/дм<sup>3</sup>, плотность воды 1,6-30 моль/дм<sup>3</sup>).

Одной из причин ингибирования окисления является то, что при низкой плотности воды и высокой температуре процесс лимитируется диффузией. В работе при исследовании кинетики окисления монозамещенных фенолов при 460 °C, 25,3 МПа, их концентрации  $\sim 10^{-4}$

моль/дм<sup>3</sup> и O<sub>2</sub> ~10<sup>-2</sup> моль/дм<sup>3</sup> показано, что скорость процесса зависит от типа заместителей и их положения в кольце.

Обнаружено, что замещенные фенолы имеют большую скорость окисления, чем фенол, скорость окисления которого зависит от его концентрации. При низкой концентрации (1–3·10<sup>-5</sup> моль/дм<sup>3</sup>) скорость пропорциональна концентрации фенола в первой степени, а кислорода – в степени 0,4. При этом реализуется полное окисление фенола до CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O. В случае высокой концентрации фенола (до 2%) при 350–450 °С, 25 МПа полному окислению препятствует образование смолистых веществ из-за преобладания радикальных реакций между ароматическими фрагментами.

Отметим, что концентрация ОВ при заданных значениях *T* и *P* не должна превышать пороговые величины, соответствующие образованию кластеров, а тем более, возникновению конденсированной фазы.

Это может приводить к образованию смолистых веществ из-за рекомбинации радикальных фрагментов, как, например, в случае окисления фенола. Предотвратить образование смолистых веществ, можно, очевидно, повышением температуры и уменьшением концентрации ОВ. Другими словами, при окислении парциальное давление ОВ должно быть существенно ниже давления насыщенных паров.

В заключение хочется отметить некоторые достоинства и недостатки метода утилизации токсичных органических веществ в сверхкритической воде.

Преимущества использования СКВ заключаются в возможности полного окисления ОВ в замкнутых системах за короткое время.

Основные трудности утилизации токсичных ОВ и отходов посредством окисления в СКВ связаны с высокими величинами *T* и *P*, отложением солей на стенках реакторов, коррозией конструкционных материалов, и, как следствие, их быстрым износом. Все эти факторы требуют нетривиальных решений в плане развития материаловедения, конструирования безопасных в эксплуатации реакторов и создания энергоэффективности технологических схем.

Полное описание метода утилизации токсичных органических веществ и отходов в сверхкритической воде, а также, вопросы связанные с коррозией конструкционных материалов при частичном и полном окислении органических веществ в СКВ и способы снижения коррозии, предложения конструкции реакторов для утилизации токсичных отходов в СКВ опубликованы в научном журнале «Сверхкритические флюиды. Теория и практика» 2012 год, том 7, №1, стр. 64–88.

## **Литература**

- [1] «Сверхкритические флюиды. Теория и практика». 2012. Т.7. №1.
- [2] Постоянный технологический регламент цеха №88 переработки и утилизации жидких и газообразных отходов №65-05.

## **ИДЕНТИФИКАЦИЯ НАРАБОТКИ РЕСУРСА ТРУБОПРОВОДА ПО ЗНАЧЕНИЯМ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ**

Биктимеров М.М., Сильвестров А.С., Булкин В.А.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: mahp\_kstu@mail.ru

Технические устройства (ТУ), эксплуатирующиеся на потенциально опасных производствах, к которым можно отнести оборудование химических газо- и нефтеперерабатывающих производств, длительное время находившиеся в эксплуатации, потенциально подвержены высокой степени деградации структуры и изменению физико-механических

свойств материала, его повреждением, как в результате воздействия эксплуатационных факторов, так и технологических факторов на стадии изготовления и монтажа.

Как известно, в качестве базовой концепции оценки технического состояния ТУ опасных производств используется подход, основанный на принципе «безопасной эксплуатации по техническому состоянию», согласно которому оценка технического состояния ТУ осуществляется по параметрам технического состояния (ПТС). В качестве определяющих ПТС принимают параметры, изменение которых может привести объект в неработоспособное или предельное состояние, то есть к его разрушению или созданию аварийной ситуации.

Металлографическая структура может также является ПТС, однако существующие гостированные шкалы металлографической структуры не в полной мере и далеко не для всех случаев позволяют качественно охарактеризовать состояние металла и принять обоснованное решение по возможности дальнейшей эксплуатации объекта.

Нет сомнений в том, что изображение металлографической структуры несет огромную информацию о природе металла, при этом стандартными методами металлографии удается извлекать лишь небольшую ее часть.

Перспективным методом извлечения подобной информации является применение методологии мультифрактальной параметризации к анализу изображений металлографической структуры. Ранее показаны [2, 3] возможности метода мультифрактальной параметризации как метода обладающего высокой чувствительностью к изменениям структуры металла и его механических характеристик. Метод позволяет улавливать практически неразличимые и слабо различимые человеческим глазом изменения на фотографиях структуры.

Для апробации данной теории были изготовлены и испытаны 2 образца: 1-й образец

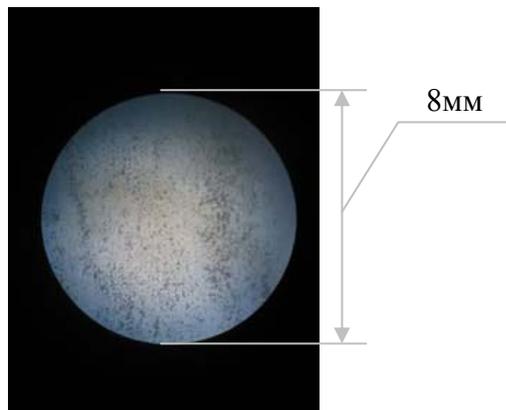


Рис.1. Изображение, видимое в окуляр микроскопа МПМ-1К при 100 кратном объективе.

изготовлен из металла аварийного запаса (с исходными свойствами и структурой), 2-й образец из металла трубопровода, отработавшего расчётный ресурс. Марка материала в обоих случаях соответствовала стали 17Г1С.

При анализе были приняты следующие допущения: структура металла фотографировалась с использованием микроскопа МПМ-1К при увеличениях 100х и 400х крат путем совмещения оптической оси микроскопа и фотоаппарата, при этом подбирать настройки фотоаппарата таким образом, чтобы поле зрения доступное к просмотру через окуляр микроскопа максимально занимало рабочее пространство кадра.

При анализе исследовали 3 поля зрения (3 варианта) для каждого образца.

Для универсальности все фотографии приводили к единым параметрам, при этом приняли, что рабочее пространство, видимое через окуляр, составляет 8мм – (8см на изображении при 100х) разрешение фотографии приводили к 300 пикс/дюйм (рис.1). Далее вырезался квадрат 600х600 пикселей.

В предыдущих работах показана невозможность качественного мультифрактального анализа без предварительной подготовки изображений в двухоттенковом виде. Однако привести изображение к такому виду возможно различными способами. В данной работе в качестве подобной предварительной обработки фотографий структур к анализу применяли фильтр «photosору» программы Photoshop, при этом значения параметров фильтра приняли следующие: detal (детализация) – 12 (среднее значение), darkness (затемненность) – 50 (максимальное значение).

Графики распределения значений мультифрактальных параметров для описанных выше образцов представлены на рис. 2 и 3.

Как видно из рисунков, вариант исследования изменений в структуре материала по фотографиям 400 кратности не приемлем (ограниченно приемлем), вследствие пересекающихся значений параметров для образцов различных состояний. Максимальный разброс значений для фотографий 100 кратности составляет соответственно  $\pm 0,028$  для параметра упорядоченности и  $\pm 0,15$  для параметра однородности.

Разница между значениями мультифрактальных параметров образцов различных состояний для 100 кратных образцов соответственно составляет 0,033 для параметра упорядоченности и 0,233 для параметра однородности.

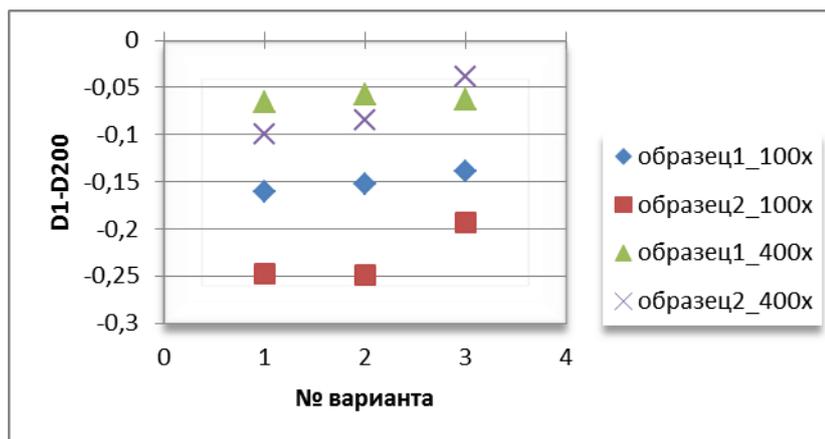


Рис. 2. Разброс значений мультифрактального параметра упорядоченности по вариантам изображений структур

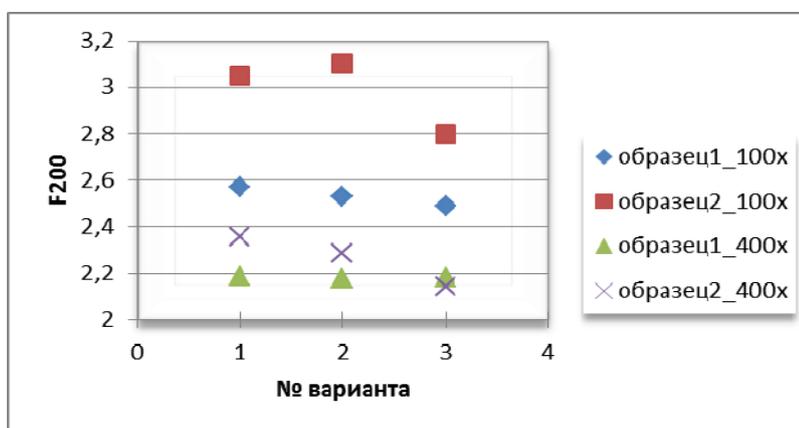
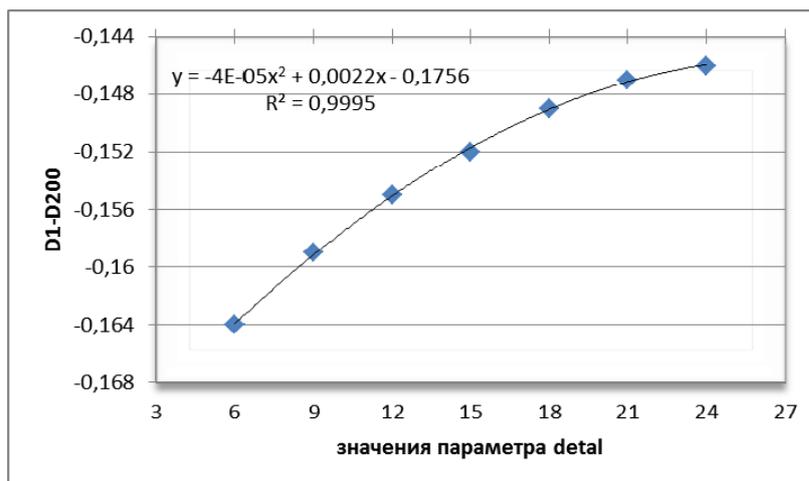
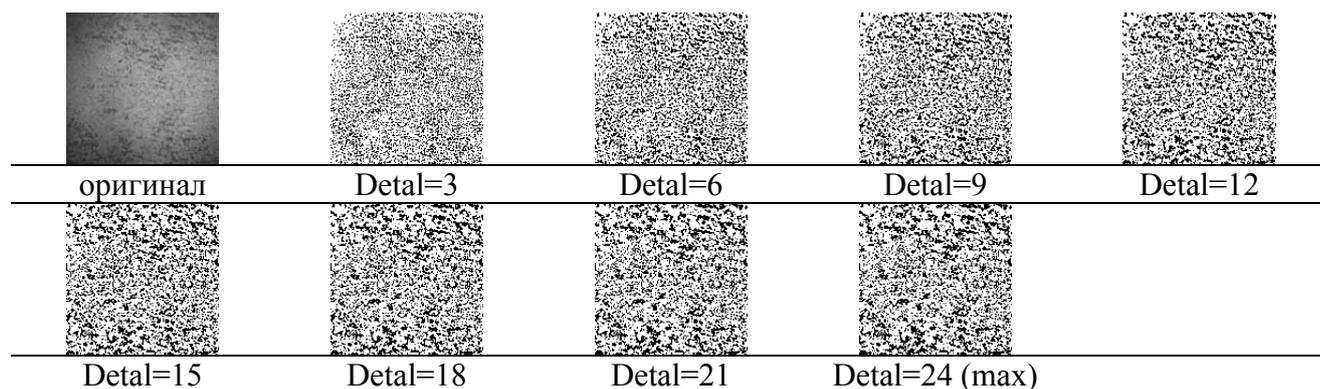
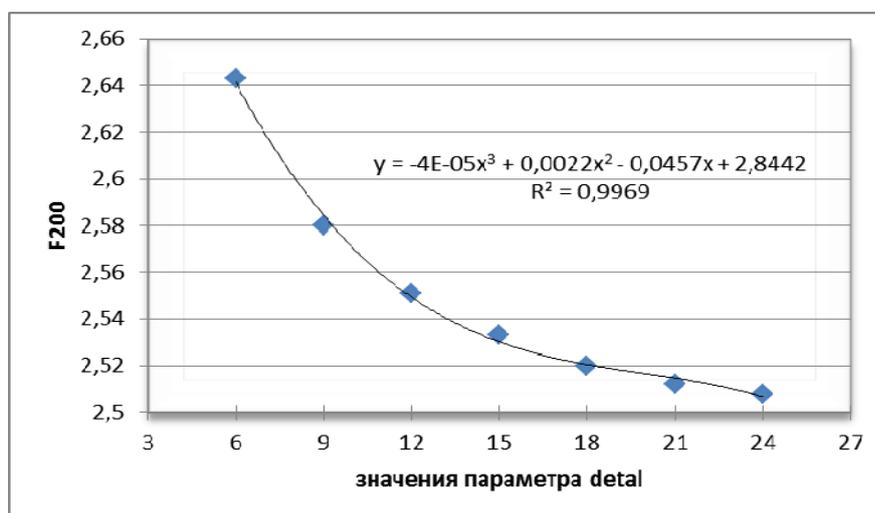


Рис. 3. Разброс значений мультифрактального параметра однородности по вариантам изображений структур

Дополнительно была определена степень влияния фильтра «photosору» программы Photoshop, примененного при предварительной обработке изображений структур. Для этого аналогично приведенному выше алгоритму была обработана тестовая фотография структуры, параметр «deta1» данного фильтра последовательно изменяли от минимального до максимального значения:



**Рис. 4.** Влияние предварительной обработки фотографии на результаты мультифрактального параметра упорядоченности



**Рис. 5.** Влияние предварительной обработки фотографии на результаты мультифрактального параметра однородности

Результаты анализа приведены на рис. 4 и 5. Значения мультифрактальных характеристик для фотографии с параметром «Detail» =3 не учитывались, вследствие чрезмерно засвеченного эффекта, приводящего к потере информации на фотографии. Характер влияния предварительной обработки изображения структуры (изменение параметра «detail» фильтра «photoscopy» программы Photoshop) на значения мультифрактальных характеристик

описываются уравнениями полинома 2-й степени с высокой величиной достоверности аппроксимации.

Согласно результатам анализа разброс значений мультифрактальных параметров от действия фильтра составляет соответственно  $\pm 0,008$  для параметра упорядоченности и  $\pm 0,117$  для параметра однородности.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. вариант исследования изменений в структуре материала по фотографиям 400 кратности не приемлем (ограниченно приемлем), вследствие пересекающихся значений параметров для образцов различных состояний;
2. разброс значений мультифрактальных параметров от действия фильтра, примененного при предварительной обработке фотографий структур, имеет меньшие значения, чем подобный разброс по вариантам самих структур (в различных полях зрения). Таким образом, вносимые фильтром искажения не существенно влияют в результаты мультифрактального анализа (тем более при работе на среднем значении параметра фильтра);
3. разница между значениями мультифрактальных параметров образцов различных состояний, имеет большие значения, чем подобный разброс по вариантам самих структур (в различных полях зрения), что позволяет идентифицировать эти состояния по мультифрактальным параметрам;
4. полученные уравнения зависимости значений мультифрактальных характеристик от действия фильтра, позволяет корректно анализировать значения мультифрактальных характеристик изображения, полученные при различных значениях параметра «detail» фильтра «photosору» программы Photoshop при предварительной обработке изображения металлографической структуры.

#### **Литература**

- [1] Сильвестров А.С., Анваров А.Д., Булкин В.А. Пути совершенствования системы оценки работоспособности магистральных трубопроводов нефти и газа. *Контроль. Диагностика*. **2010**. №6. С.19-22.
- [2] Анваров А.Д., Маминов А.С., Булкин В.А., Встовский Г.В. Возможность идентификации механических свойств металла оборудования химических производств при экспертизе промышленной безопасности на базе метода мультифрактальной параметризации. *Вестник Казанского технологического университета*. **2006**. №1. С.77-82.

## **ЭКОЛОГИЯ И ПРОБЛЕМА ПЕРЕРАБОТКИ МУСОРА В ГОРОДАХ**

Ага Гул Бариалай, Алексеев В.В.

Казанский национальный исследовательский технологический университет.

E-mail: mahp\_kstu@mail.ru

В большинстве стран мира, включая Россию, с бытовым мусором поступают следующим образом: его сжигают или закапывают. И то, и другое плохо для человека и окружающей среды.

При сжигании мусора на мусоросжигающих заводах (МСЗ) образуются опасные газы и твердые пылевые частицы, что способствует глобальному потеплению и загрязняет города, леса, реки, озера, моря и океаны.

В настоящее время в индустриально развитых странах на МСЗ удаляют большое количество пыли и загрязняющих веществ, обеспечивая более чистый воздух. Но большая часть этого оказывается на свалке.

Захоронение мусора также вызывает загрязнение, как воздуха, так и воды, а транспортировка этого мусора до полигона ведет к дополнительному расходу автомобильного топлива и загрязнению воздуха выхлопными газами.

Повышенное внимание свалке твердых бытовых отходов (ТБО) связано отчасти потому, что достигнутые улучшения в технологиях на МСЗ повысило их загруженность. А отчасти потому, что большая часть мусора в России отправляется на свалки, нежели на МСЗ.

Поэтому в качестве альтернативы сжиганию или захоронению ТБО рассматривается компостирование мусора с образованием газов типа метана и двуокиси углерода и с последующим производством тепловой или электрической энергии.

Ниже приведен ориентировочный подсчет ТБО, образующихся в городе Казани, где проживает примерно 1,5 миллиона человек и возможное производство тепловой или электрической энергии на опыте работы Калифорнийского газогенераторного завода.

Если считать, что каждый человек производит около 1 кг мусора в день, то будет образовано примерно 1500 тонн ТБО. Служба городского хозяйства вывозит мусор за город и обеспечивает его захоронение. Если это чисто органические вещества, то они взаимодействуют между собой и производят такие газы, как  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$ . Однако, в мусоре присутствуют также и неорганические вещества, такие как стекло, пластмасса, бумага, металл, дерево и т.д.

Поэтому необходимо предварительно отсортировать органические материалы от неорганических на сортировочной фабрике (СФ). Расположение последней должно быть около полигона ТБО, т.к. сначала мусор грузовиками должен быть доставлен на СФ, где он сортируется.

Схематически процесс переработки и сортировки мусора включает следующие объекты: мусорный полигон, газовая, генераторная и электрическая станции.

После сортировки мусора, его органическая часть направляется на подземное складирование. Для получения газов разложения, полигон должен быть оборудован сетью газовых трубопроводов. Верхняя часть полигона герметизируется, а газ газодувками или компрессорами направляется на газогенераторы, которые могут производить тепловую и (или) электрическую энергию.

Такой способ переработки мусора может быть очень перспективным и экологически более чистым, чем просто захоронение или сжигание ТБО.

