

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Комиссаров, Л.А.** О перспективах применения обводнённых топлив в виде эмульсий на тепловых электростанциях / Л.А. Комиссаров, В.М. Иванов, Б.Н. Сметаников, В.С. Леванский // В кн.: Новые методы сжигания топлива и вопросы теории горения. – М.: Наука, 1972. – С. 103 – 111.

2. **Соколов, Е.Я.** Струйные аппараты /

Е.Я. Соколов, Н.М. Энгер. – М : Энергоатом издат, 1989. – 352 с.

3. Патент № 2586233 Российская Федерация, МПК F16J 3/04 (2006.01). Двойное сильфонное уплотнение : 2015106756/06 : заявл. 26.02.2015 : опубл. 10.06.2016 / Салькова А.Г., Прокопьев А.А., Подоплелов Е.В. ; заявитель АНГТУ. – 9 с.

УДК 66.021

Подоплелов Евгений Викторович,

*к.т.н., доцент, зав. кафедрой «Машины и аппараты химических производств»,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: uch_sovet@angtu.ru*

Дементьев Анатолий Иванович,

*к.т.н., доцент, профессор кафедры «Машины и аппараты химических производств»,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: anatdementev@mail.ru*

Авраменко Станислав Андреевич,

*студент ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: artemabramov562@gmail.com*

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТАНОВКИ УТИЛИЗАЦИИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ГАЗОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ АМИНОВ**

Podoplelov E.V., Dementev A.I., Avramenko S.A.

**IMPROVING THE EFFICIENCY OF WASTE GAS DISPOSAL IN THE AMINE
PRODUCTION**

Аннотация. В работе предложен способ повышения эффективности установки утилизации технологических газов в производстве аминов, позволяющий снизить количество стоков.

Ключевые слова: аммиак, амины, десорбция, стоки.

Abstract. The paper proposes a method for increasing the efficiency of process gas utilization in the production of amines, which reduces the amount of wastewater.

Keywords: ammonia, amines, desorption, and wastewater.

АО «Ангарская нефтехимическая компания» является одним из ведущих в России производителей товарных метиламинов. Производство метиламинов было введено в эксплуатацию в 1960 г. и за это время не подвергалось существенным реконструкциям. Низкая эффективность работы действующего оборудования производства метиламинов по сравнению с зарубежными аналогами и меняющаяся конъюнктура рынка товарных аминов в РФ обуславливают необходимость анализа работы оборудования и разработку мер по повышению его эффективности.

Производство метиламинов предназначено для получения товарных продуктов:

монометиламина, диметиламина и триметиламина. Метиламины получают в промышленности каталитическим аминированием метилового спирта. Синтез метиламинов протекает при температуре до 435 °С и давлении 5,0 МПа на катализаторе, представляющем собой активную окись алюминия с добавкой диоксида кремния. В процессе реакции одновременно образуются все метиламины. Разделение реакционной смеси с извлечением монометиламина, диметиламина, триметиламина и метилового спирта производится методом ректификации. Получаемые после процесса ректификации технологические газы, в состав которых входят амины, аммиак, оксид углерода, метан и азот, необ-

ходимо утилизировать с целью снижения выбросов вредных веществ в атмосферу [1-2]. Более полное извлечение аммиака и аминов из технологических газов и возвращение их в схему ректификации позволит повысить эффективность работы установки и качество получаемых продуктов.

В действующей технологической схеме установки очистка газовой смеси от аммиака и аминов производится последовательно в абсорберах поз. 200 и 200А. В качестве абсорбента в колоннах используется вода. В схеме до реконструкции насыщенный абсорбент из колонн 200 и 200А поступал на ректификацию, где происходило выделение из абсорбента аммиака и аминов, а далее абсорбент направлялся в биологическую очистку стоков. С целью экономии абсорбента предлагается новая схема утилизации технологических газов с обеспечением замкнутого цикла по абсорбенту (рисунок 1) за счет включения в схему десорбционной колонны поз. 1 (рисунок 1). Применение новой схемы позволит не только снизить расход абсорбента, но и уменьшить количество промышленных стоков, а, следовательно, расходы по очистке стоков. На обогрев куба десорбционной колонны потребуется дополнительное количество пара, однако, при этом общий расход пара на установке не увеличится, поскольку на эту же величину снизится расход пара, подаваемого в ректификационные колонны.

В новой схеме (рисунок 1) предлагается установка десорбционной колонны поз. 1, двух насосов, теплообменников поз. 3, 4 и сепаратора поз. 5. Насыщенный абсорбент перед подачей в десорбционную колонну поз. 1 нагревается в теплообменнике поз. 3 за счет теплоты очищенного абсорбента, выходящего с низа колонны поз. 1, что позволяет сэкономить значительное количество теплоты и пара. Далее насыщенный абсорбент с температурой около 80°C поступает на орошение в десорбционную насадочную колонну поз. 1, куб которой обогревается глухим паром (10 ата). В колонне поз. 1 абсорбент нагревается до температуры кипения, при этом происходит десорбция аммиака и аминов и частичное испарение абсорбента. Далее парогазовая смесь с верха десорбционной колонны поступает в конденсатор, где происходит конденсация водяного пара, содержащегося в газовой смеси. Для отделения

аммиака и аминов от конденсата водяного пара предназначен сепаратор поз. 5. Конструкция сепаратора аналогична конструкции циклона. Водяной конденсат после сепаратора возвращается в виде флегмы в десорбционную колонну. Осуществление работы абсорбционной установки по данной схеме не потребует больших капитальных вложений, поскольку на установке имеется не используемая в процессе колонна, которая может быть задействована. Таким образом, циркуляция абсорбента будет осуществляться через абсорбер поз. А-200, абсорбер поз. 200А и десорбер поз. 1. В реконструируемой схеме предусмотрена также подпитка колонн «свежим» абсорбентом. Поскольку в технологическую схему добавляется десорбционная колонна для выделения из воды аммиака и аминов, то требуется спроектировать её и определить основные геометрические размеры. В действующей схеме имеется колонна диаметром 600 мм, которую возможно использовать в процессе и поэтому для колонны необходимо выполнить поверочный расчет.

В кубе десорбционной колонны происходит образование паров при кипении жидкости и выделение из жидкой фазы в газовую поглощенных ранее жидкостью компонентов (аммиака и аминов). В расчете принимался расход жидкости, поступающей на десорбцию, 1,42 кг/с. В качестве насадки для десорбционной колонны предварительно выбираются керамические кольца Рашига размером 35×35×4 мм, размещенные «внавал» и имеющие следующие характеристики: удельная поверхность насадки $f=140 \text{ м}^2/\text{м}^3$, свободный объем $\varepsilon=0,78 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

Предельная фиктивная скорость газа $\omega_{пр}$ в точке захлёбывания (инверсии) определяется по формуле:

$$\lg \left(\frac{\omega_{пр}^2 \cdot f \cdot \rho_y \cdot \mu_x^{0,16}}{g \cdot \varepsilon^3 \cdot \rho_x} \right) = A - 1,75 \cdot \left(\frac{L}{G} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{\rho_y}{\rho_x} \right)^{0,125},$$

где ρ_y – плотность газовой смеси, кг/м³; ρ_x – плотность абсорбента, кг/м³; μ_x – динамическая вязкость абсорбента, мПа·с; L – расход абсорбента, кг/с; G – расход газовой смеси, кг/с; $A=0,022$ – коэффициент для кольцевой насадки.

Далее в соответствии с рекомендациями рабочая скорость газа принимается на 25 % меньше предельной:

$$\omega_y = 0,75 \cdot \omega_{пр}.$$

Диаметр десорбционной колонны

определяется из уравнения расхода по формуле:

$$d = \sqrt{\frac{4G}{\pi \cdot \omega_y \cdot \rho_y}}$$

По результатам расчетов диаметр колонны составил 400 мм, что является достаточным, поскольку диаметр имеющейся колонны 600 мм.

Для проверки правильности выбранной насадки рассчитывается отношение плотности орошения к оптимальной. Плотность орошения рассчитывается:

$$U = \frac{L}{0,785 \cdot d^2 \cdot \rho_x}$$

Оптимальная плотность орошения:

$$U_{\text{опт}} = b \cdot f,$$

где $b = 0,158$ – постоянный коэффициент для абсорбции (десорбции).

Отношение $\frac{U}{U_{\text{опт}}} = 0,82$ соответствует коэффициенту смоченности насадки $\psi_n = 0,82$, что является допустимым.

Для определения движущей силы процесса строится рабочая линия и равновесная кривая. Поскольку начальная концентрация NH_3 в воде незначительная и составляет $\bar{X} = 0,011 \frac{\text{кг } NH_3}{\text{кг } H_2O}$, то кривую равновесия можно представить в виде прямой $\bar{Y}^* = 2,4424 \cdot \bar{X}$.

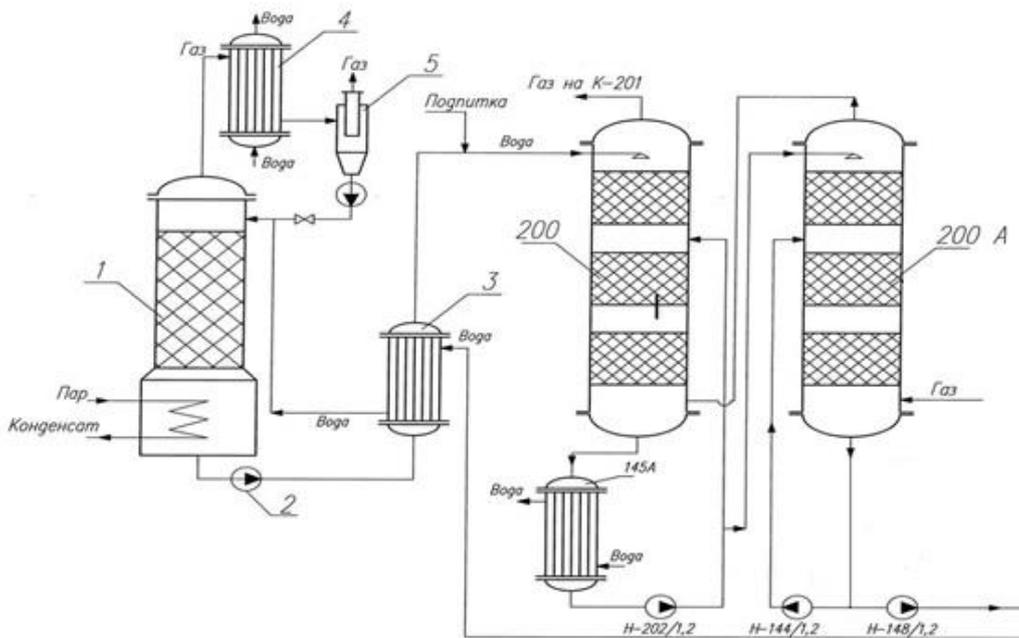


Рисунок 1 – Технологическая схема

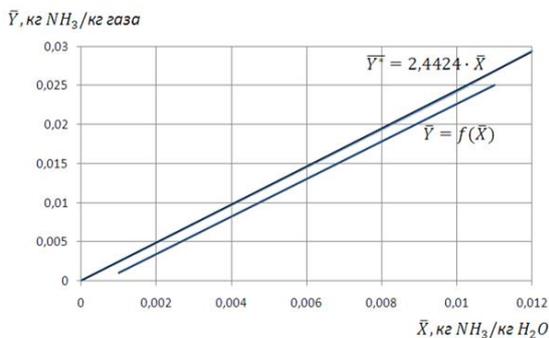


Рисунок 2 – К расчету средней движущей силы

Средняя движущая сила процесса:

$$\Delta \bar{Y}_{\text{ср}} = \frac{\Delta \bar{Y}_6 - \Delta \bar{Y}_m}{2,3 \lg \left(\frac{\Delta \bar{Y}_6}{\Delta \bar{Y}_m} \right)}$$

где $\Delta \bar{Y}_6$, $\Delta \bar{Y}_m$ – большая и меньшая разности концентраций на концах колонны.

Высота насадки определялась по формуле через общую высоту $h_{\text{оу}}$ единицы переноса (ВЕП) и общее число единиц переноса (ЧЕП):

$$H = h_{\text{оу}} \cdot n_{\text{оу}}$$

Высота насадки с 25 % запасом по поверхности составила 1 м, что является при-

емлемым для размера имеющейся колонны.

Для нагрева абсорбента (воды) в кубе десорбционной колонны предлагается использовать трубчатый погружной змеевик. Обогрев рабочей среды можно также производить острым паром, не используя при этом никаких дополнительных теплообменных устройств. Однако, в данном случае концентрация водяных паров в газовой смеси увеличится, что может отразиться на эффективности процесса десорбции.

Расход греющего пара определяется из уравнения:

$$Q = G_{гр.п} \cdot r_{H_2O},$$

где Q – тепловая нагрузка на обогреватель внизу десорбера, Вт; r_{H_2O} – теплота парообразования воды, Дж/кг; $G_{гр.п}$ – массовый расход греющего пара, кг/с.

Откуда

$$G_{гр.п} = \frac{Q}{r_{H_2O}}.$$

Диаметр трубчатого змеевика определяется по формуле:

$$d = \sqrt{\frac{G_{гр.п}}{0,785 \cdot \rho \cdot \omega}},$$

где: ρ – плотность водяного пара, кг/м³; ω – скорость водяного пара в трубе, м/с (принимается из рекомендаций $\omega=20$ м/с).

По результатам расчетов внутренний диаметр змеевика составил 51 мм. Для изготовления трубного змеевика выбирается стальная электросварная труба по ГОСТ 10704-76, $D_y = 50$ мм, $D_H \times S = 57 \times 3$ мм, масса 1 м трубы 4,0 кг, минимальный радиусгиба 110 мм, $R_y \leq 2,5$ МПа, материал сталь 20.

Радиус витка трубчатого змеевика, для дальнейших расчетов, принимаем 250 мм, что является допустимым при минимальном радиусегиба 110 мм.

В трубный змеевик подается водяной пар под давлением 4 кгс/см² и температурой 140°C. Пар отдает тепло воде в кубе десорбера и конденсируется.

Требуемая поверхность трубного змеевика находится из основного уравнения теплопередачи:

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta t_{cp}.$$

Откуда

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{cp}},$$

где: K – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²К); Δt_{cp} – средняя движущая сила теп-

лового процесса, °С. Для определения Δt_{cp} составляется температурная схема и определяются большая Δt_6 и меньшая Δt_m разности температур на концах теплообменника.

Температурная схема.

$$\Delta t_6 = \frac{140^\circ\text{C} - 80^\circ\text{C}}{60^\circ\text{C}} \quad \begin{array}{c} \text{пар} \\ \text{H}_2\text{O} \end{array} \quad \Delta t_m = \frac{140^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C}}{40^\circ\text{C}}$$

$\frac{\Delta t_6}{\Delta t_m} < 2$, тогда $\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_6 + \Delta t_m}{2} = \frac{60 + 40}{2} = 50^\circ\text{C}$.

Коэффициент теплоотдачи от пара к стенке трубного змеевика [3]:

$$\alpha_1 = 1,36 \cdot A \cdot q^{0,5} \cdot L^{0,35} \cdot d^{-0,25} \quad (1)$$

где A – коэффициент, объединяющий физико-химические константы воды и пара [3]; q – удельная тепловая нагрузка, Вт/м²; L – длина трубы, м; d – внутренний диаметр трубы, м.

Подставим в уравнение (1) следующее выражение:

$$q = \frac{Q}{F} \text{ и } L = \frac{F}{\pi \cdot d}, \text{ получим}$$

$$\alpha_1 = 1,36 \cdot A \cdot \frac{Q^{0,5}}{F^{0,5}} \cdot \frac{F^{0,35}}{(\pi \cdot d)^{0,35}} \cdot d^{0,25};$$

$$\alpha_1 = 1,36 \cdot A \cdot Q^{0,5} \cdot \frac{F^{-0,15}}{\pi^{0,35}} \cdot d^{-0,6};$$

$$\alpha_1 = 1,36 \cdot 7,2 \cdot 173748^{0,5} \cdot \frac{F^{-0,15}}{1,49} \cdot 0,051^{-0,6};$$

$$\alpha_1 = 16334,39 \cdot F^{-0,15} \quad (2)$$

Для изогнутых труб (змеевиков) полученное значение коэффициента теплоотдачи (2) умножаются на коэффициент x , учитывающий относительную кривую змеевика:

$$\alpha_{зм} = x \cdot \alpha_1;$$

$$x = 1 + 3,54 \cdot \frac{d}{D},$$

D – диаметр витка змеевика.

$$x = 1 + 3,54 \cdot \frac{51}{250} = 1,72;$$

$$\alpha_{зм} = 1,72 \cdot 16334,39 \cdot F^{-0,15} = 27768,46 \cdot F^{-0,15}.$$

Для определения коэффициента теплоотдачи от стенки трубчатого змеевика к воде в условиях свободной конвекции, необходимо предварительно определить критерий Нуссельта:

$$Nu = 0,5 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}}\right)^{0,25},$$

где: Gr – критерий Грасгофа, $Gr = \frac{d^3 \cdot \rho^2 \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot g}{\mu^2}$, где величина $\beta \cdot \Delta t$ находится по

уравнению: $\beta \cdot \Delta t = \frac{V_{140^{\circ}\text{C}} - V_{100^{\circ}\text{C}}}{V_{80^{\circ}\text{C}}}$, где $V_{140^{\circ}\text{C}}$ – удельный объем воды при 140°C ; где $V_{100^{\circ}\text{C}}$ – удельный объем воды при 100°C .

$$V_{140^{\circ}\text{C}} = \frac{1}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}^{140}} = \frac{1}{926} = 0,00108 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{100^{\circ}\text{C}} = \frac{1}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}^{100}} = \frac{1}{958} = 0,001044 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$\beta \cdot \Delta t = \frac{0,00108 - 0,001044}{0,001044} = 0,0346.$$

Критерий Грасгофа:

$$Gr = \frac{0,057^3 \cdot 958^2 \cdot 0,0346 \cdot 9,8}{(282 \cdot 10^{-6})^2} = 724,7 \cdot 10^6.$$

Критерий Прандтля:

при 100°C

$$Pr = \frac{\mu_{100^{\circ}\text{C}} \cdot C_{100^{\circ}\text{C}}}{\lambda_{100^{\circ}\text{C}}} = \frac{282 \cdot 10^{-6} \cdot 4230}{68,3 \cdot 10^{-2}} = 1,75;$$

при $t_{\text{ст}} = 140^{\circ}\text{C}$

$$Pr_{\text{ст}} = \frac{\mu_{\text{ст}} \cdot C_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} = \frac{196 \cdot 10^{-6} \cdot 4270}{68,5 \cdot 10^{-2}} = 1,22.$$

Критерий Нуссельта:

$$Nu = 0,5 \cdot (724,7 \cdot 10^6 \cdot 1,75)^{0,25} \cdot \left(\frac{1,75}{1,22}\right)^{0,25} = 103,3.$$

Коэффициент теплоотдачи от змеевика к воде в кубе десорбера:

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} = \frac{103,3 \cdot 68,3 \cdot 10^{-2}}{0,057} = 1237,8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Коэффициент теплоотдачи:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{зм}}} + \frac{\delta}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_2}},$$

где: δ – толщина стенки трубы, м; $\lambda_{\text{ст}}$ – коэффициент теплопроводности стенки стальной трубы.

$$K = \frac{1}{\frac{1}{27768,46 \cdot F^{-0,15}} + \frac{0,003}{51} + \frac{1}{1237,8}} = \frac{1}{\left[\frac{1}{27768,46 \cdot F^{-0,15}} + 0,00087 \right]}$$

Поверхность трубчатого змеевика:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{\text{ср}}};$$

$$F = \frac{173748}{\left[\frac{1}{27768,46 \cdot F^{-0,15}} + 0,00087 \right] \cdot 50} \quad (3)$$

Уравнение (3) было решено численным методом в программе MathCAD. По результатам расчетов требуемая поверхность змеевика составила $3,2 \text{ м}^2$.

Таким образом, новая схема утилизации технологических газов позволит осуществить замкнутый цикл по абсорбенту. Экономический эффект будет получен не только за счет экономии абсорбента, а также за счет уменьшения количества стоков, отправляемых в биологическую очистку, что благоприятно повлияет на экологию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учеб. пособие / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков. – Москва : ООО ТИД Альянс, 2006. – 576 с.
2. Бальчугов, А.В. Совершенствование технологической схемы получения метиламинов с целью снижения жесткости воды / А.В. Бальчугов, Е.В. Подоштелов, В.Ю. Рахманин, А.В. Подоштелова // Сборник научных трудов Ангарского государственного техни-

ческого университета. – 2014. – Т. 1. – С. 80-83.

3. Бальчугов, А.В. Анализ работы и способы повышения эффективности абсорбционной установки для очистки технологических газов от аммиака и аминов / А.В. Бальчугов, Е.В. Подоштелов, В.Ю. Рахманин, А.В. Подоштелова // Вестник Ангарской государственной технической академии. – 2014. – № 8. – № 1. – С. 71-77.