

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Подоплелов, Е.В.** Математическое моделирование термогравитационной и термокапиллярной конвекции в газожидкостных процессах / Е.В. Подоплелов, А.В. Бальчугов, А.И. Дементьев, А.А. Готов // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. – 2021. – Т. 1. – № 18. С. 58-66.
2. **Podoplelov, E.V.** Simulation of the evaporation process of 1,2-dichloroethane into nitrogen / E.V. Podoplelov, A.V. Balchugov, A.I. Dementev, A.S. Ryabov // Journal of Physics: Conference Series. 13. "Computer-Aided Technologies in Applied Mathematics". – 2020. – P. 012041.
3. **Шиляев, М.И.** Моделирование тепломассообмена при формировании пузырей в барботажных аппаратах / М.И. Шиляев, А.В. Толстых, А.Н. Деренок, Е.М. Хромова // Теор. основы хим. технологии. – 2003. – Т. 37. – № 6. – С. 575-583.

УДК 66.021.3

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

Щербин Сергей Анатольевич,
к.т.н., доцент, доцент кафедры «Машины и аппараты химических производств»,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: dekan_ftk@angtu.ru

Семенов Иван Александрович,
к.т.н., доцент, доцент кафедры «Химической технологии топлива»,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: semenovia.chem@yandex.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

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ДЕСОРБЦИОННОЙ КОЛОННЫ
ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ СЕРОВОДОРОДА ИЗ ФЕНОЛЬНО-СУЛЬФИДНОЙ ВОДЫ**

Podoplelov E.V., Scherbin S.A., Semenov I.A., Dement'ev A.I.

**EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF A DESORPTION COLUMN FOR
THE EXTRACTION OF HYDROGEN SULFIDE FROM PHENOLIC SULFIDE WATER**

Аннотация. В работе на основании проверочных технологических расчетов произведена оценка эффективности работы десорбционной колонны для извлечения сероводорода из фенольно-сульфидной воды в цехе 86/57 производства нефтехимии АО «Ангарская нефтехимическая компания». По результатам расчетов сделан вывод о низкой эффективности установленных в колонне контактных устройств, и предложено мероприятие по повышению эффективности работы десорбционной колонны.

Ключевые слова: десорбция, сероводород, фенольно-сульфидная вода, контактные устройства, поверхность массопередачи.

Abstract. In this work, based on verification technological calculations, the efficiency of the desorption column for extracting hydrogen sulfide from phenol-sulfide water in workshop 86/57 of the petrochemical production of Angarsk Petrochemical Company JSC was assessed. Based on the calculation results, a conclusion was made about the low efficiency of the contact devices installed in the column, and measures were proposed to increase the efficiency of the desorption column.

Keywords: desorption, hydrogen sulfide, phenol-sulfide water, contact devices, mass transfer surface.

Процесс абсорбции находит широкое применение при получении готового продук-

та путем поглощения газа жидкостью (абсорбентом), разделении газовых смесей на составляющие их компоненты, при очистке газов от вредных компонентов из газовых выбросов. При физической абсорбции поглощение компонента не сопровождается химической реакцией, и процесс в большинстве случаев обратим. На этом свойстве основано выделение поглощенного компонента из раствора – десорбция. В промышленности процесс абсорбции обычно сочетают с десорбцией, что позволяет многократно использовать абсорбент и выделять поглощенный компонент в чистом виде.

С точки зрения методики расчета абсорбционные и десорбционные колонны можно разделить на две группы – с непрерывным контактом фаз (распылительные, насадочные колонны) и ступенчатым контактом фаз (тарельчатые колонны) [1-3]. В зависимости от вида контакта фаз могут использоваться различные уравнения рабочих линий, скоростей газового потока в колонне, расчеты высоты колонны. Эффективность работы колонных аппаратов для проведения процесса абсорбции и десорбции, прежде всего, зависит от качества проектирования, выбора эффективных контактных устройств и соблюдения параметров технологического процесса [4-5]. В работе поставлена задача оценить эффективность работы колонны, предназначенной для десорбции сероводорода из фенольно-сульфидной воды в цехе 86/57 производства нефтехимии АО «Ангарская нефтехимическая компания». Десорбционная колонна изготовлена диаметром 1600 мм, по высоте колонны имеются 4 тарелки, расположенные на расстоянии 4400 мм друг от друга. Схема материальных потоков в колонне представлена на рис. 1. В нижнюю часть колонны подается отдувочный газ – азот, на верхнюю тарелку осуществляется подача фенольно-сульфидной воды, содержащей сероводород. Очищенная от сероводорода фенольно-сульфидная вода выводится снизу колонны, а сероводородом с азотом – сверху колонны.

Расход фенольно-сульфидной воды, поступающей в колонну, является одним из основных технологических параметров, определяющим требуемый расход отдувочного газа (азота). В расчетах, в соответствии с практикой эксплуатации колонны, принят расход фенольно-сульфидной воды 80000 кг/ч. Концентрация сероводорода в феноль-

но-сульфидной воде на входе и выходе из колонны влияет на количество тарелок. Количество тарелок возрастает с увеличением концентрации сероводорода в фенольно-сульфидной воде на входе в колонну и с уменьшением концентрации сероводорода в фенольно-сульфидной воде на выходе из колонны [6-7]. В расчетах, в соответствии с технической документацией, принята концентрация сероводорода в фенольно-сульфидной воде на входе в колонну 791 мг/дм^3 , а на выходе – 35 мг/дм^3 . Давление в колонне избыточное – $0,015 \text{ МПа}$, температура фенольно-сульфидной воды на входе в колонну составляет не более $100 \text{ }^\circ\text{C}$, расход отдувочного газа не более $795 \text{ м}^3/\text{ч}$.

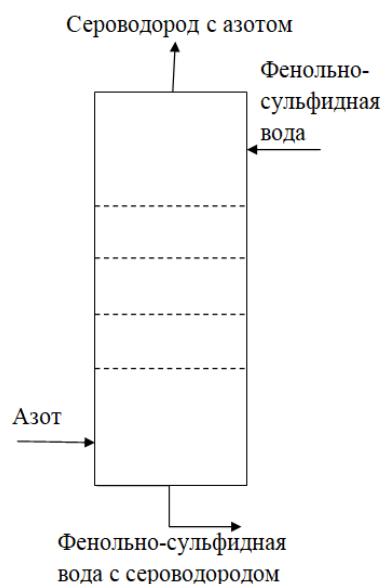


Рисунок 1 – Схема материальных потоков в колонне

На рис. 2 представлена конструкция контактных устройств колонны – тарелок, представляющих собой диск с отверстиями, к которому приварены переливные трубы с внутренним диаметром 96 мм и длиной 400 мм. Данная конструкция не относится к конструкциям стандартных тарелок, но используется в настоящее время в колонне.

Хотя тарельчатые колонны относятся к колоннам со ступенчатым контактом фаз, но в данном случае колонну можно рассматривать как с непрерывным контактом фаз, в которой газ и жидкость соприкасаются на поверхности текущей жидкой пленки внутри вертикальных труб, т.е. условно можно считать десорбер пленочным. Таким образом,

расчет контактных устройств можно свести к определению требуемой поверхности массопередачи, а затем требуемую поверхность массопередачи сравнить с действительной поверхностью тарелок, определяемой внутренней поверхностью переливных труб.

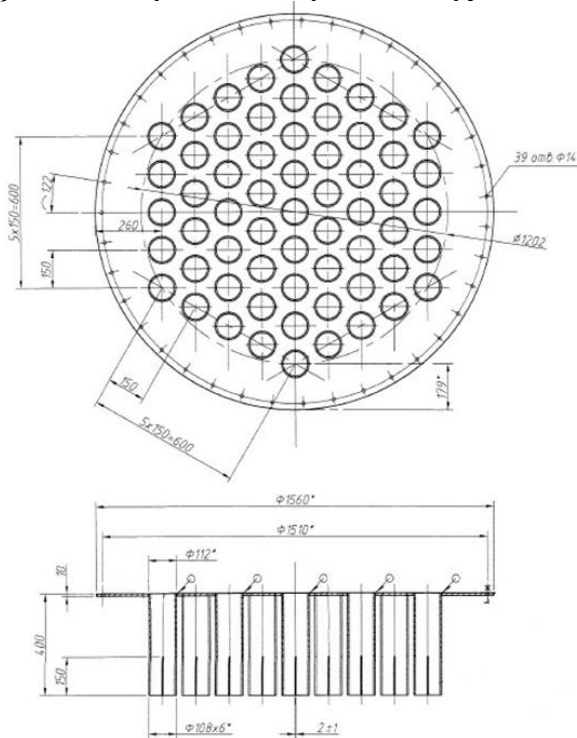


Рисунок 2 – Конструкция контактного устройства колонны

В процессе проектирования колонны принималось допущение, что линия равновесия – это прямая линия. Уравнение линии равновесия имеет вид [3]:

$$\bar{Y}^* = \frac{M_K}{M_H} \cdot \frac{\psi \bar{X}}{P},$$

где: M_K – мольная масса компонента (сероводорода), кг/кмоль; M_H – мольная масса инертного носителя (азот), кг/кмоль; ψ – коэффициент; P – абсолютное давление в колонне.

Расход отдувочного газа определялся из уравнения материального баланса:

$$M = G \cdot (\bar{Y}_K - \bar{Y}_H) = L \cdot (\bar{X}_H - \bar{X}_K),$$

где: M – количество десорбированного сероводорода, кг/ч; G – расход инертного носителя (азота), кг/ч; L – расход фенольно-сульфидной воды, кг/ч.

Отсюда минимальный расход азота:

$$G_{\min} = \frac{L \cdot (\bar{X}_H - \bar{X}_K)}{(\bar{Y}_K^* - \bar{Y}_H)},$$

где: \bar{X}_H , \bar{X}_K – относительные массовые концентрации сероводорода в фенольно-сульфидной воде на входе и выходе из колонны соответственно, кг/кг; \bar{Y}_K^* – равновесная концентрация сероводорода в газе на выходе из колонны, кг/кг; \bar{Y}_K – конечная концентрация сероводорода в азоте на выходе из колонны, кг/кг.

Действительный расход азота принимался при 20 % запасе:

$$G = 1,2G_{\min}.$$

Конечная концентрация сероводорода в азоте на выходе из колонны:

$$\bar{Y}_K = \frac{M}{G} + \bar{Y}_H.$$

Средняя движущая сила процесса:

$$\Delta \bar{Y}_{CP} = \frac{\Delta \bar{Y}_{ВЕРХ} - \Delta \bar{Y}_{НИЗ}}{2,3lg \left(\frac{\Delta \bar{Y}_{ВЕРХ}}{\Delta \bar{Y}_{НИЗ}} \right)},$$

где: $\Delta \bar{Y}_{ВЕРХ}$, $\Delta \bar{Y}_{НИЗ}$ – движущая сила процесса сверху и внизу колонны соответственно, кг/кг.

Скорость газа в трубах тарелок составляет:

$$\omega_y = \frac{G}{S_{mp} \cdot \rho_y},$$

где: S_{mp} – площадь сечения труб, м²; ρ_y – плотность азота, кг/м³.

Критерий Рейнольдса для газовой фазы рассчитывался по формуле:

$$Re_r = \frac{\omega_y \cdot d \cdot \rho_y}{\mu_y},$$

где: d – внутренний диаметр переливных труб, м; ρ_y – плотность азота, кг/м³; μ_y – коэффициент динамической вязкости азота, Па·с. По результатам расчетов $Re_r = 360$, что соответствует ламинарному режиму.

Критерий Прандтля для газовой фазы:

$$Pr_r' = \frac{\mu_y}{\rho_y \cdot D_y},$$

где D_y – коэффициент диффузии сероводорода в азоте, м²/с.

При ламинарном режиме критерий Нуссельта для коротких труб рассчитывается по формуле [1]:

$$Nu_r' = 1,62 Re_r'^{1/3} (Pr_r')^{1/3} \left(\frac{d}{l} \right)^{1/3},$$

где l – длина переливных труб, м.

Коэффициент массоотдачи в газовой фазе:

$$\beta_G = \frac{Nu'_G \cdot D_G}{d}, \text{ м/с}$$

или в кг/(м²·с)

$$\beta_y = \beta_G \cdot \rho_y$$

Критерий Рейнольдса для жидкой фазы рассчитывался по формуле:

$$Re_{ж} = \frac{4\Gamma}{\mu_x},$$

где: μ_x – коэффициент динамической вязкости фенольно-сульфидной воды, Па·с;

$\Gamma = \frac{L}{\pi \cdot d \cdot n}$ – линейная плотность орошения, кг/(м·с); n – количество переливных труб.

Критерий Прандтля для жидкой фазы:

$$Pr'_{ж} = \frac{\mu_x}{\rho_x \cdot D_x},$$

где D_x – коэффициент диффузии сероводорода в фенольно-сульфидной воде, м²/с.

В соответствии со значением $Re_{ж} = 17163$ воспользуемся формулой Борисова [1]:

$$Nu'_{ж} = 0,000077 Re_{ж} Pr_{ж}^{0,5}.$$

Коэффициент массоотдачи в жидкой фазе:

$$\beta_{ж} = \frac{D_{ж}}{\mathcal{G}_{прив}} \cdot Nu'_{ж}, \text{ м/с}$$

где $\mathcal{G}_{прив} = \left(\frac{\mu_x^2}{\rho_x^2 \cdot g} \right)^{1/3}$ – приведенная толщина пленки жидкости, м.

или в кг/(м²·с)

$$\beta_x = \beta_{ж} \cdot \rho_x.$$

Коэффициент массопередачи рассчитывался по формуле:

$$K_y = \frac{1}{\frac{1}{\beta_y} + \frac{k}{\beta_x}},$$

где k – угол наклона линии равновесия.

Поверхность массопередачи:

$$F = \frac{M}{K_y \cdot \Delta \bar{V}_{CP}}.$$

По результатам расчетов $F = 327,5 \text{ м}^2$.

Действительная поверхность массопередачи:

$$F_d = \pi \cdot d \cdot l \cdot n \cdot n_m,$$

где n_m – количество тарелок.

Действительная поверхность тарелок по результатам расчетов составила 29,4 м², что значительно меньше требуемой поверхности массопередачи. Выходом из данной ситуации может быть увеличение расхода отдувочного газа до предельного значения 795 м³/ч, которое позволит увеличить движущую силу процесса абсорбции и в целом снизить требуемую поверхность массопередачи. По результатам моделирования процесса при работе колонны на предельной нагрузке требуемая поверхность массопередачи составила 72,4 м², что также значительно меньше, чем действительная поверхность массопередачи, установленных в колонне тарелок.

Таким образом, даже при работе на предельной нагрузке по отдувочному газу, поверхности массопередачи четырех тарелок будет не достаточно. Проанализировав конструкцию десорбционной колонны цеха 86/57 производства нефтехимии АО «Ангарская нефтехимическая компания» можно сделать вывод, что внутренний объём колонны используется нерационально из-за большого межтарельчатого расстояния. Наиболее рациональное решение для повышения эффективности работы колонны и увеличения поверхности массопередачи, без дополнительных конструктивных изменений – это расположить на имеющихся тарелках слой насадки, толщину которого необходимо определить расчётом. Толщина полотна тарелок равная 10 мм позволяет, в данном случае, разместить на них дополнительную нагрузку. В качестве насадки можно рекомендовать керамические кольца Рашига размером 100×100×10 мм, размещенные рядами на четырех тарелках. Использование в сочетании с тарелками насадки позволит увеличить поверхность массопередачи. Правильный выбор контактных устройств колонных аппаратов во многом определяет эффективность работы колонны, достижения установленных технологическим регламентом концентраций компонентов. В последнее время в промышленности многих стран внедряются новые насадки (регулярные и не регулярные), обладающие лучшими характеристиками, взамен тарельчатых контактных устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рамм, В.М.** Абсорбция газов. Изд. 2-е, переработ. и доп. / В.М. Рамм. – М: Химия, 1976. – 656 с.
2. **Рыбалко, Л.И.** Процессы и аппараты химической технологии. Массообменные процессы : учебное пособие по специальности 240801 "Машины и аппараты химических производств" с примерами решения задач / Л.И. Рыбалко, Е.В. Подоплелов, А.И. Дементьев. – АнГТУ: Ангарск, 2009. – 134 с.
3. **Рыбалко, Л.И.** Расчет абсорбционных аппаратов : учебное пособие по курсовому проектированию процессов и аппаратов химической технологии / Л.И. Рыбалко, Е.В. Подоплелов, Л.В. Щукина, Д.П. Свиридов. – АнГТУ: Ангарск, 2012. – 77 с.
4. **Бобылев, Е.П.** Проектирование абсорбционной колонны для улавливания газообразного аммиака из железнодорожных цистерн / Е.П. Бобылев, Е.В. Подоплелов, А.И. Дементьев // Современные технологии и научно-технический прогресс. – 2020. – Т. 1. – № 7. С. 25-26.
5. **Подоплелов, Е.В.** Проектирование десорбционной колонны установки водной отмывки технологических газов от аммиака и аминов / Е.В. Подоплелов, А.И. Дементьев, М.Н. Король // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. – 2018. – Т. 1. – № 15. – С. 32-35.
6. **Подоплелов, Е.В.** Повышение эффективности установки водной отмывки технологических газов от аммиака и аминов / Е.В. Подоплелов, А.И. Дементьев, М.Н. Король // Современные технологии и научно-технический прогресс. – 2018. – Т. 1. – С. 34-35.
7. **Бальчугов, А.В.** Анализ работы и способы повышения эффективности абсорбционной установки для очистки технологических газов от аммиака и аминов / А.В. Бальчугов, А.В. Подоплелова, В.Ю. Рахманин, Е.В. Подоплелов // Вестник Ангарской государственной технической академии. – 2014. – № 8. – С. 71-77.