

ВОЛОДИНА Ю. И., ТИМОШИШИН А. Ю.
АВТОМАТИЗАЦИЯ ОЧИСТКИ КОНВЕРТИРОВАННОГО ГАЗА
ОТ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

УДК 661.53:004.94, ГРНТИ 28.23.29

Статья поступила в редакцию 20.05.2026

Автоматизация очистки
конвертированного газа от диоксида
углерода

Automation of purification of
converted gas from carbon dioxide

Ю. И. Володина,
А. Ю. Тимошишин

Yu. I. Volodina,
A. Yu. Timoshishin

Березниковский филиал
ФГАОУ ВО «Пермский национальный
исследовательский политехнический
университет», г. Березники

Berezniki branch
Federal State Autonomous
Educational Institution of Higher
Education "Perm National Research
Polytechnic University", Berezniki

В системе MathCAD построена математическая модель процесса очистки конвертированного газа от диоксида углерода в производстве аммиака. Определены возможности применения модели.

A mathematical model of the process of purifying converted gas from carbon dioxide in ammonia production was built in the MathCAD system. The possibilities of using the model are determined.

Ключевые слова: производство аммиака, математическое моделирование, MathCAD

Keywords: ammonia production, mathematical modeling, MathCAD

Введение

В современных условиях развития химической промышленности особую значимость приобретает совершенствование технологий производства аммиака как основы для минеральных удобрений. Мировое производство аммиака демонстрирует устойчивый рост, что обусловлено необходимостью обеспечения продовольственной безопасности населения планеты.

Очистка конвертированного газа от диоксида углерода является критически важным этапом в производстве аммиака. Эффективность данного процесса напрямую влияет на качество конечного продукта, срок службы катализатора, энергоэффективность производства, экологическую безопасность.

Важную роль в производстве аммиака играет очистка газов. Она предусматривает удаление из промышленных или природных газов вредных и балластных примесей с тем, чтобы очищенный газ был пригоден для

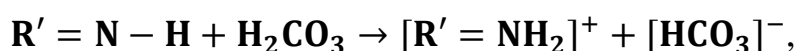
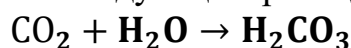
транспортирования, дальнейшей химической переработки и непосредственного использования.

Исследование процессов МДЭА-очистки конвертированного газа имеет важное практическое значение для оптимизации работы абсорбционных колонн, повышения эффективности удаления CO_2 , снижения энергозатрат на регенерацию раствора и продления срока службы технологического оборудования.

Очистка газа производится абсорбцией CO_2 30%...40% водным раствором метилдиэтанолamina с добавкой активатора – пиперазина.

Рабочий раствор на абсорбер подается двумя потоками.

Процесс абсорбции идет по следующим реакциям [1, 2]:



где R – группа HOCH_2CH_2 ; ($\text{R}_2\text{-N-CH}_3$ – метилдиэтанолamin),

R' – группа $\text{NH}(\text{CH}_2\text{CH}_2)_2$; ($\text{R}' = \text{NH}$ – пиперазин).

Целью работы является разработка математической модели процесса для оптимизации работы абсорбционной колонны и поддержания заданного уровня.

Задачи исследования:

- Анализ технологического процесса очистки газа;
- Разработка математической модели динамики уровня жидкости в абсорбере;
- Определение основных параметров процесса;
- Моделирование переходных процессов;
- Оценка эффективности предложенной модели.

Техническая характеристика абсорбера:

- Вертикальный сварной тарельчатый аппарат, состоящий из 2-х секций;
- Диаметр внутренний – 3800 мм (3,8 м);
- Высота – 36615 мм (36,615 м);
- Рабочая среда - конвертированный газ, 20% раствор МДЭА;
- Рабочее давление – 2,5 МПа (25 кг/см²);
- Рабочая температура 25-70 °С (298,15 – 343,15 К);
- Количество тарелок:
- 15 ситчатых и две колпачковых;
- На аппарате устанавливается кран-укосина;
- Нижняя часть аппарата изолируется на высоту 10 м; Срок службы 15 лет;

Материал, способы антикоррозионной защиты:

- Углеродистая сталь, легированная сталь. 09Г2СГОСТ 5520-79.

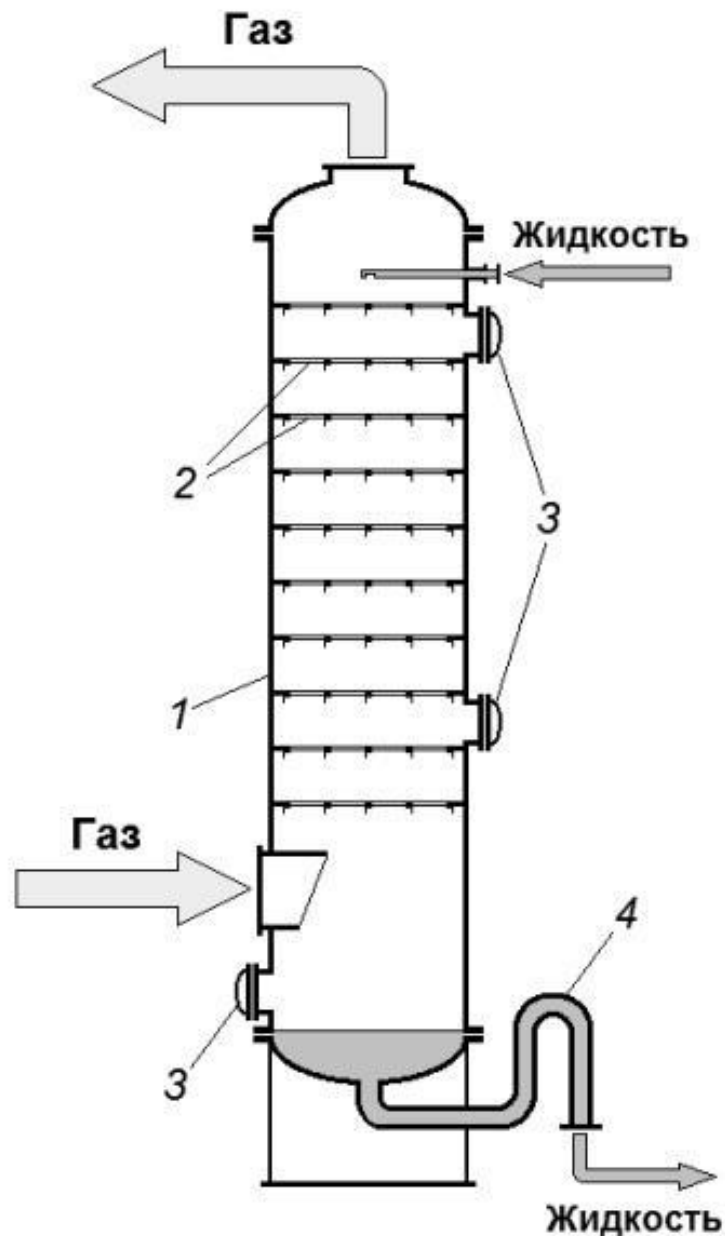


Рисунок 1. Абсорбционная колонна:

1 – корпус, 2 – тарелки, 3 – люки для обслуживания, 4 – гидрозатвор

Из материального баланса следует, что изменение объема жидкости в резервуаре за время dt при $A=const$ зависит от разности расходов на притоке $F_{вх}$ и стоке $F_{вых}$:

$$F_{вх} dt - F_{вых} dt = dV = d(AL) = AdL.$$

Разделив правую и левую части на dt , получим уравнение, определяющее уровень жидкости L в резервуаре (состояние объекта) при изменении расходов на притоке $F_{вх}$ и стоке $F_{вых}$:

$$A \frac{dL}{dt} = F_{вх}(\tau) - F_{вых}(\tau).$$

Таблица 1. Краткая характеристика сырья и продуктов

Наименование сырья, вспомогательных материалов, полупродуктов, энергоресурсов	Обозначение (наименование) стандарта, технических условий, регламента или методики сырья	Наименование показателей	Нормы показателей по НТД
Конвертированный газ, поступающий на установку МДЭА-очистки	Технологический регламент	Объемная доля: двуокси углерода (CO ₂)	не более 17,66 % об.
		• N ₂	20,56 % об.
		• H ₂	60,44 % об.
		• CO	0,22 % об.
		• CH ₄	0,31 % об.
		Плотность при 50 °С :	14,37 кг/м ³
Конвертированный газ после МДЭА-очистки	Технологический регламент	Объемная доля: двуокси углерода (CO ₂)	не более 0,03 % об.
		• N ₂	25,02 % об.
		• H ₂	73,57 % об.
		• CO	Не более 0,1 % об.
		• CH ₄	0,38 % об.
		Плотность при 50 °С:	8,34 кг/м ³
Метилдиэтаноламин	ТУ 2423-005-11159873-2010	Массовая доля: • Метилдиэтанолamina	Не менее 99,0 % об.
		• Примесей	Не более 1 % об.
		• Воды	Не более 0,2 % об.
		Плотность при 50 °С	1038-1046 кг/м ³

Для определения скорости истечения из выходного отверстия v жидкости на уровне L используем формулу Торричелли [3]:

$$v(L) = \mu \sqrt{2gL},$$

где μ - безразмерный коэффициент скорости жидкости ($0 < \mu < 1$), $g = 9,8$ м/с² - ускорение свободного падения.

Примем, что расход жидкости на линии притока $F_{вх}$ не зависит от уровня жидкости в объекте, а расход жидкости на линии стока $F_{вых}$ зависит от уровня жидкости в объекте в соответствии с равенством:

$$F_{\text{ВЫХ}} = a\sqrt{L},$$

где $a = \mu\sqrt{2g}$ – коэффициент расхода. Отсюда находим коэффициент расхода:

$$a = \frac{F_{\text{ВЫХ}}}{\sqrt{L}}.$$

Дальнейшие расчеты проведем в программе MatCAD. Подставляя исходные значения в лист MathCAD [4], получаем значение коэффициента расхода: $\alpha = 0,051$.

Предположим, что отклонения $\Delta L = L - L_0$ от исходного значения уровня L_0 малы [5]. При этом становится возможной линеаризация нелинейной зависимости путем разложения \sqrt{L} в окрестности исходного значения L_0 в ряд Тейлора по степеням ΔL в соответствии с известной формулой:

$$(1 + x)^{1/2} = 1 + \frac{x}{2} - \frac{1 \cdot 1 \cdot x^2}{2 \cdot 4} + \frac{1 \cdot 1 \cdot 3 \cdot x^3}{2 \cdot 4 \cdot 6} - \dots,$$

где $x^2 \leq 1$. Тогда

$$\begin{aligned}\sqrt{L + \Delta L} &= \sqrt{L_0} * \sqrt{1 + \frac{\Delta L}{L_0}} = \sqrt{L_0} + \frac{\Delta L}{2\sqrt{L_0}} - \frac{(\Delta L)^2}{8 * (\sqrt{L_0})^2} + \frac{3 * (\Delta L)^3}{48 * (\sqrt{L_0})^3} - \dots, \\ \sqrt{L} &= \sqrt{L_0} + \frac{\Delta L}{2\sqrt{L_0}} - \frac{(\Delta L)^2}{8 * (\sqrt{L_0})^3} + \frac{3 * (\Delta L)^3}{48 * (\sqrt{L_0})^5} - \dots.\end{aligned}$$

Ограничиваясь двумя членами разложения и отбрасывая члены высших порядков малости, получаем:

$$\sqrt{L} \approx \sqrt{L_0} + \frac{\Delta L}{2\sqrt{L_0}} = \frac{F_{\text{ВЫХО}}}{a_0} + \frac{\Delta L}{2\sqrt{L_0}}.$$

Составим линейное дифференциальное уравнение объекта в приращениях:

$$\frac{2A\sqrt{L_0}}{a_0} * \frac{d\Delta L(\tau)}{d\tau} + \Delta L(\tau) = \frac{2\sqrt{L_0}}{a_0} * \Delta F_{\text{ВХ}}(\tau),$$

где $\Delta F_{\text{ВХ}}(\tau) = F_{\text{ВХ}}(\tau) - F_{\text{ВХО}}$ – отклонение притока $F_{\text{ВХ}}$ от исходного значения $F_{\text{ВХО}}$, a_0 – значение коэффициента расхода при уровне жидкости L_0 .

$$a_0 = \frac{F_{\text{ВЫХО}}}{\sqrt{L_0}},$$

$$\frac{2A * L_0}{F_{\text{ВЫХО}}} * \frac{d\Delta L(\tau)}{d\tau} + \Delta L(\tau) = \frac{2L_0}{F_{\text{ВЫХО}}} * \Delta F_{\text{ВХ}}(\tau).$$

Переходная характеристика определяет изменение во времени уровня жидкости при ступенчатом входном воздействии $\Delta F_{\text{ВХ}}(\tau) = \Delta F_{\text{ВХО}} * 1(\tau)$, где $1(\tau)$ – единичная функция, равная нулю при $\tau < 0$ и единице при $\tau \geq 0$, и начальном условии $F_{\text{ВЫХ}}(0) = F_{\text{ВЫХО}}$.

При $\tau > 0$ уравнение можно записать в виде:

$$T * \frac{d\Delta L(\tau)}{d\tau} + \Delta L(\tau) = K_1 * \Delta F_{\text{ВХО}},$$

где T – постоянная времени и K_1 – статический коэффициент изменения входного потока. Передаточная функция объекта, как отношение изображений по Лапласу функций выхода и входа, определяется выражением:

$$W(s) = \frac{K}{T * s + 1},$$

где $K = K_1 * \Delta F_{\text{ВХО}}$. Изображение переходной характеристики $H(s)$ равно передаточной функции, умноженной на изображение единичной функции (деленной на оператор s).

Подставляя исходные значения в лист MatCAD (Рисунок 2), определим численные значения констант. Рассчитаем переходную функцию абсорбционной колонны в программе MathCAD:

$$L0 := 2.5 \text{ м} \quad A := 11.34 \text{ м}^2 \quad F_{\text{вых}} := 0.138 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \quad F_{\text{вх}} := 0.18 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \quad a := \frac{F_{\text{вых}}}{\sqrt{L0}} \quad a = 0.087$$

$$\tau := 2 \cdot A \cdot \frac{L0}{F_{\text{вых}}} \quad \tau = 410.87 \text{ с} \quad K := 2 \cdot L0 \cdot \frac{F_{\text{вх}}}{F_{\text{вых}}} \quad K = 6.522 \quad W(s) := \frac{K}{\tau \cdot s + 1} \quad H(s) := \frac{W(s)}{s}$$

$$h(t) := H(s) \text{ invlaplace} \rightarrow 6.5217391304347826087 - 6.5217391304347826087 \cdot e^{-0.0024338624338624338624 \cdot t}$$

Рисунок 2. Исходные данные для расчёта

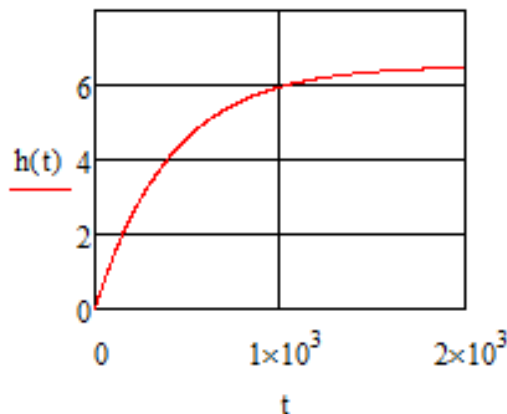


Рисунок 3. Переходный процесс объекта

Из Рисунка 3 можно видеть, что переходная характеристика является экспоненциальной. Постоянная времени T является угловым коэффициентом касательной в точке $\tau = 0$ [6]. Поскольку $F_{\text{вых}} < F_{\text{вх}}$, уровень жидкости в резервуаре будет повышаться и примерно через $4 \cdot T \sim 1643,48 \text{ с} = 27,4 \text{ мин}$ достигнет нового значения равновесия, превышающего исходное на 6,522 м. Решение вопроса целесообразно производить путем моделирования.

Заключение

В результате проведённого исследования достигнута поставленная задача, а именно:

1. Разработана математическая модель процесса;
2. Определены основные параметры процесса очистки;
3. Построена переходная характеристика объекта;
4. Получены данные для оптимизации процесса.

Полученные результаты могут быть использованы для автоматизации процесса очистки, прогнозирования поведения системы, оптимизации режимов работы оборудования и повышения эффективности производства аммиака.

Список использованных источников и литературы

1. Беспалов А.В., Харитонов Н.И. Задачник по системам управления химико-технологическими процессами. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. – 308 с.
2. Попов А. Д., Андреева Д. В. Механизм процесса нейтрализации раствора азотной кислоты газообразным аммиаком в технологии производства аммиачной селитры // Молодежь. Наука. Общество-2021. – 2023. – С. 863-866.
3. Зотов В. А. Истечение жидкости из резервуара через регулируемое отверстие // Актуальные задачи математического моделирования и информационных технологий. Сочи, 2008. - С. 133-135.
4. Копотева А. В., Затонский А.В., Мамаев Д.А. Применение математического пакета для разработки и визуализации решения задачи аналитической геометрии с параметром // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2025. – Т. 25, № 3. – С. 16-25.
5. Тугашова Л. Г., Гапонцев А.Д. Применение программ технологического моделирования в задачах управления процессами подготовки нефти // Системный анализ в науке и образовании. – 2023. – № 2. – С. 36-44.
6. Ерыпалова М.Н. Влияние нестационарности объекта управления на параметры установившихся автоколебаний / М. Н. Ерыпалова, В. Ф. Беккер, А. В. Затонский, Ю. П. Кирич // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2008. – № 4(8). – С. 50-57.

List of references

1. Bespalov A.V., Kharitonov N.I. Problem book on control systems for chemical-technological processes. – M.: ICC “Akademkniga”, 2005. – 308 p.
2. Popov A.D., Andreeva D.V. The mechanism of the process of neutralization of a solution of nitric acid with gaseous ammonia in the technology of production of ammonium nitrate // Youth. Science. Society 2021. – 2023. – P. 863-866.
3. Zotov V. A. Flow of liquid from a reservoir through an adjustable hole // Current problems of mathematical modeling and information technologies. Sochi, 2008. - pp. 133-135.
4. Kopoteva A.V., Zatonsky A.V., Mamaev D.A. Application of a mathematical package for the development and visualization of a solution to the problem of analytical geometry with a parameter // Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer technologies, control, radio electronics. – 2025. – Т. 25, No. 3. – P. 16-25.
5. Tugashova L.G., Gapontsev A.D. Application of technological modeling programs in problems of managing oil treatment processes // System analysis in science and education. – 2023. – No. 2. – P. 36-44.
6. Erypalova M.N. The influence of nonstationarity of the control object on the parameters of steady-state self-oscillations / M. N. Erypalova, V. F. Bekker, A. V. Zatonsky, Yu. P. Kirin // News of higher educational institutions. Volga region. Technical Sciences. – 2008. – No. 4(8). – P. 50-57.