

УДК 66.074.48:661.56

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ВОЛЬФРАМ- ВАНАДИЕВОГО БЛОЧНОГО СОТОВОГО КАТАЛИЗАТОРА НА СТА- ДИИ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ГАЗОВ ОТ ОКСИДОВ АЗОТА В ПРОИЗВОДСТВЕ НЕКОНЦЕНТРИРОВАННОЙ АЗОТНОЙ КИСЛОТЫ

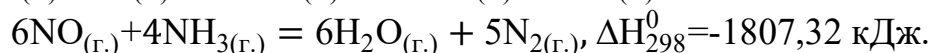
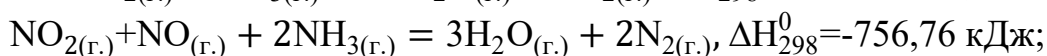
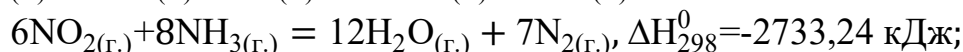
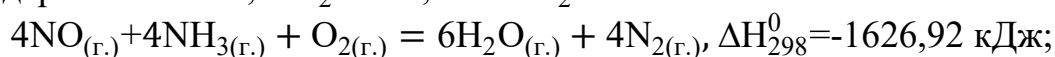
Иванов А.И., студент гр. ХНб-221, IV курс
Научный руководитель: Золотухина Н.А., к.х.н., доцент
Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева, г. Кемерово

Производство азотной кислоты является одним из экономически значи-
мых многотоннажных производств Российской Федерации. На момент 2024
года отечественные предприятия произвели 51475 тонн концентрированной
азотной кислоты [1]. Отрасль продолжает развиваться: так, компания «Меле-
зовские минеральные удобрения» планирует до конца 2026 года запустить
обновленный агрегат неконцентрированной азотной кислоты, что увеличит ее
производственные мощности на 50% [1]. Общий мировой объем рынка азот-
ной кислоты в 2025 году оценивается в 30,84 млрд долларов США (по дан-
ным Fortune Business Insights). Аналитики Research Nester оценивают объем
рынка концентрированной азотной кислоты в 2025 году в 27,2 млрд долларов
с прогнозом роста до 28,3 млрд в 2026 году [2].

В производстве неконцентрированной азотной кислоты возникает ряд
проблем, одной из которых является выброс оксида азота (II) (NO) и оксида
азота (IV) (NO₂) в окружающую среду. Данные вещества относятся к третье-
му классу опасности [3]. Вместе с отходящими газами в атмосферу также по-
падает оксид азота (I) (N₂O) – парниковый газ, выброс тонны которого экви-
валентен выбросу 273 тонн углекислого газа [5].

Существует два основных подхода к решению проблемы выбросов ок-
сидов азота NO_x: высокотемпературное каталитическое восстановление
(ВКВ) и селективное каталитическое восстановление (СКВ). ВКВ характери-
зуется большими значениями температуры проведения процесса при
 $t_{\text{очистка}}^{\text{ВКВ}} \in [705 \div 730^\circ\text{C}]$, необходимостью использования значительного избытка
восстановителя – природного газа и наличием в процессе дорогостоящего
алюмопаладиевого катализатора. Современным методом очистки отходящих
газов от оксидов азота является СКВ метод, в котором используются более
активные каталитические системы, позволяющие проводить процесс при
температурах 250-300°C. Преимущество метода также заключается в исполь-
зовании аммиака как восстановителя, потребность в котором может быть
полностью удовлетворена за счет собственных производственных мощностей
предприятия [5]. Так, например, на КАО «Азот» данный метод применяется
на агрегате АК-500 и в схеме отдувки азотной кислоты цеха гидроксиламин-

сульфата. Процесс СКВ описывается следующими основными реакциями “стандартного” СКВ, NO₂-СКВ, NO/NO₂-СКВ и NO-СКВ соответственно [5]:



В последние годы наблюдается устойчивый рост интереса к применению сотовых катализаторов в СКВ [8]. Их ключевыми преимуществами является способность сочетать низкое гидравлическое сопротивление с каталитической активностью. В данной работе рассмотрена эффективность замены гранулированного катализатора АВК-10М на стадии очистки отходящих газов от оксидов азота производства неконцентрированной азотной кислоты КАО “Азот” на V-W блочный сотовый.

Для расчета гидравлического сопротивления слоя катализаторов были предварительно определены необходимые значения, представленные в таблице 1 и 2.

Таблица 1

Характеристики катализаторов СКВ

Характеристика	Катализатор	
	АВК-10М	V-W
Удельная поверхность S, м ² /м ³	450	1100
Эквивалентный диаметр пор d _э , м	0,006	0,002
Критерий Рейнольдса Re	113,678	37,893
Порозность слоя катализатор ε	0,4	0,915

Физические свойства газовой смеси при рабочих условиях (t = 300°C, P = 1 атм.) определялись по правилу аддитивности с учетом ее состава. Плотность рассчитывалась с помощью уравнения состояния идеального газа, а расчет динамической вязкости проводили методом Герца-Хиршфельдера для многокомпонентных газовых смесей [9].

Таблица 2

Свойства газовой смеси, поступающей на очистку

Характеристика газовой смеси, поступающей на очистку	Значение
Плотность при температуре процесса ρ, кг/м ³	0,597
Динамическая вязкость при температуре процесса μ, Па·с	3,151·10 ⁻⁵
Скорость газа по сечению реактора ω, м/с	1
Высота слоя катализатора h, м	1
Давление P, кПа	101,325
Температура газовой смеси t, °C	300

Значение гидравлического сопротивления гранулированного цилиндрического катализатора АВК-10М было рассчитано по формуле Эргуна (1).

$$\Delta P = h \left(150 \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\mu \cdot \omega^2}{d_s^2} + 1,75 \cdot \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot \frac{\rho \cdot \omega^2}{d_s} \right) \quad (1)$$

Гидравлическое сопротивление для блочного сотового катализатора определено по уравнению Дарси-Вейсбаха, а коэффициент трения по формуле ламинарного коэффициента трения (формулы 2 и 3).

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{h}{d_s} \cdot \frac{\rho \cdot \omega^2}{2} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (3)$$

По итогам расчётов гидравлическое сопротивление для слоя гранулированного катализатора составило $\Delta P_{\text{АВК-10М}} = 2370,938$ Па, а для сотового - $\Delta P_{\text{V-W}} = 252,083$ Па. Следовательно, замена катализатора приведёт к уменьшению гидравлического сопротивления на прокачку газовой смеси в 9,4 раза, уменьшению расхода электроэнергии тягодутьевых устройств на 13559,317 кВт·ч, экономии 109016,910 рублей в год (или 545084,550 рублей за 5 лет стандартной работы катализатора до его замены) и сохранению степени очистки 0,97-0,99 (расчёт был проведён с учётом 330 рабочих дней в году при непрерывном производстве и значении тарифа электроэнергии в 8,04 руб. за кВт·ч с учётом 22% НДС [10]).

Список литературы

1. Рынок азотной кислоты в России 2017–2024 гг. Цифры, тенденции, прогноз [Электронный ресурс] // ТК-Solutions. — URL: <https://tk-solutions.ru/russia-gynok-azotnoy-kisloty> (дата обращения: 09.03.2026).
2. «Мелеузовские минеральные удобрения» инвестируют в развитие производства 1 млрд рублей [Электронный ресурс] // Fertilizer Daily. — 2025. — 25 июня. — URL: <https://www.fertilizerdaily.ru/20250625-meleuzovskie-mineralnye-udobreniya-investiruyut-v-razvitiye-proizvodstva-1-mlrd-rublej/> (дата обращения: 09.03.2026).
3. Объем рынка концентрированной азотной кислоты, прогноз роста до 2035 года [Электронный ресурс] : аналит. отчет / Research Nester. — 2025. — 30 сент. — URL: <https://www.researchnester.com/ru/reports/concentrated-nitric-acid-market/4913> (дата обращения: 09.03.2026).
4. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания : утв. постановлением Главного гос. санитарного врача РФ от 28.01.2021 № 2 : введ. в действие с 01.03.2021. — Москва, 2021. — 458 с.
5. 7SM. The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks and Climate Sensitivity : Supplementary Material // Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / [P. Forster et al. ; eds.: V. Masson-Delmotte et al.]. — Cambridge ; New York : Cambridge University Press, 2021.

6. Ильин, А. П. Производство азотной кислоты : учебное пособие / А. П. Ильин, А. В. Кунин. — Санкт-Петербург : Лань, 2021. — 256 с.
7. Мытарева, А. И. Селективное каталитическое восстановление NO_x аммиаком на композитных катализаторах : диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук : специальность 02.00.15 «Кинетика и катализ» / А. И. Мытарева ; науч. рук. А. Ю. Стахеев ; Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт органической химии им. Н. Д. Зелинского Российской академии наук. — Москва, 2017. — 152 с.
8. Lai, J.-K. A Perspective on the Selective Catalytic Reduction (SCR) of NO with NH_3 by Supported $\text{V}_2\text{O}_5\text{--WO}_3/\text{TiO}_2$ Catalysts / J.-K. Lai, I. E. Wachs // ACS Catalysis. — 2018. — Vol. 8, № 8. — P. 6537–6551.
9. Hirschfelder, J. O. Molecular Theory of Gases and Liquids / J. O. Hirschfelder, C. F. Curtiss, R. B. Bird. — New York : John Wiley & Sons, 1954. — 1219 p.
10. Тарифы для юридических лиц [Электронный ресурс] // Энергосбытовая компания Кузбасса (ООО «ЭСКК»). — URL: <https://eskk.ru/tarif/urlica/> (дата обращения: 18.03.2026).