

Москаленко Сергей Викторович

Магистрант, 2 курса института ИнЭн

Озеров Никита Алексеевич

*кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная
теплотехника», Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Саратовский государственный
технический университет имени Гагарина Ю.А.», г. Саратов*

**ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ АДОРБЦИОННОЙ
УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ С
ПСЕВДООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ ДЛЯ РЕКУПЕРАЦИИ ПРОПАНА**

Аннотация. В статье представлены результаты научно-исследовательской работы по расчету и оптимизации адсорбционной установки непрерывного действия с псевдоожигенным слоем для рекуперации пропана из вентиляционных выбросов (5100 нм³/ч). Методом параметрического сканирования в зоне гидродинамической устойчивости оптимизирована скорость псевдоожигения по критерию минимума приведенных затрат. Установлено, что оптимальная рабочая скорость составляет 1,74 м/с, что обеспечивает баланс между металлоемкостью аппарата (диаметр 1,02 м, высота 5,80 м) и энергозатратами на привод газодувки. Тепловой баланс подтвердил термическую безопасность процесса: установившаяся температура слоя на 100 °С ниже критической температуры самовоспламенения угля. Техничко-экономическое обоснование показало высокую рентабельность проекта: чистый дисконтированный доход за 10 лет достигает 22,79 млн руб., срок окупаемости — 2,05 года. Анализ точки безубыточности подтвердил экономическую устойчивость установки к рыночным колебаниям цен.

Annotation. The article presents the results of research work on the calculation and optimization of a continuous adsorption unit with a fluidized bed for propane recovery from ventilation emissions (5100 nm³/h). Using parametric

scanning in the zone of hydrodynamic stability, the fluidization velocity was optimized according to the criterion of minimum reduced costs. It was established that the optimal operating velocity is 1.74 m/s, which ensures a balance between the metal consumption of the apparatus (diameter 1.02 m, height 5.80 m) and energy costs for the blower drive. The heat balance confirmed the thermal safety of the process: the steady-state bed temperature is 100 °C below the critical self-ignition temperature of coal. The technical and economic justification demonstrated high project profitability: the net present value over 10 years reaches 22.79 million rubles, with a payback period of 2.05 years. Break-even point analysis confirmed the economic sustainability of the unit against market price fluctuations.

Ключевые слова: псевдооживленный слой, адсорбция, рекуперация пропана, гидродинамическая оптимизация, массообмен, тепловой баланс, технико-экономическая эффективность, точка безубыточности.

Keywords: fluidized bed, adsorption, propane recovery, hydrodynamic optimization, mass transfer, heat balance, technical and economic efficiency, break-even point

Введение

Очистка промышленных газовых выбросов от летучих органических соединений (ЛОС) является одной из приоритетных задач современной промышленной экологии и теплоэнергетики. Пары пропана, присутствующие в вентиляционных выбросах предприятий нефтегазопереработки, обладают высокой взрывоопасностью (нижний предел взрываемости 2,1 % об.) и требуют эффективной утилизации [1, 2].

Традиционные адсорбционные установки периодического действия имеют существенные недостатки, связанные с непроизводительными простоями на стадии регенерации и неравномерностью степени очистки во времени [3]. Альтернативным решением является применение аппаратов непрерывного действия с псевдооживленным слоем (ПСС) адсорбента. Интенсивное турбулентное перемешивание твердой фазы в ПСС обеспечивает

выравнивание температурного и концентрационного полей, а также многократную интенсификацию коэффициентов тепло- и массоотдачи по сравнению с неподвижным слоем [4, 5].

Однако проектирование таких аппаратов требует строгого математического обоснования гидродинамических режимов. Скорость псевдоожижения является ключевым управляющим параметром, нелинейно влияющим как на капитальные (через габариты аппарата), так и на эксплуатационные (через гидравлическое сопротивление) затраты [6].

Целью данной работы является параметрическая оптимизация и комплексное технико-экономическое обоснование адсорбционной установки с ПСС для рекуперации пропана.

Объект и методы исследования

Объектом исследования является процесс адсорбционной очистки воздуха от паров пропана на активированном угле марки AP-17.

Исходные данные для расчета:

Объемный расход газовой смеси $V = 5100 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($1,417 \text{ м}^3/\text{с}$);

Давление $P = 0,1 \text{ МПа}$, температура $t = 16 \text{ }^\circ\text{C}$;

Начальная концентрация пропана $u_n = 0,029 \text{ кг/м}^3$, конечная $u_k = 0,001 \text{ кг/м}^3$;

Насыпная плотность угля $\rho_n = 470 \text{ кг/м}^3$, плотность твердой фазы $\rho_t = 1100 \text{ кг/м}^3$;

Число псевдоожижения $K_w = 1,6$.

Методология исследования включает гидродинамический расчет на основе критериев Архимеда и Лященко, построение равновесной и рабочей изотерм с использованием коэффициента аффинности, расчет числа единиц переноса (NOG) методом графического интегрирования, составление теплового баланса и дисконтирование денежных потоков (DCF) для оценки экономической эффективности.

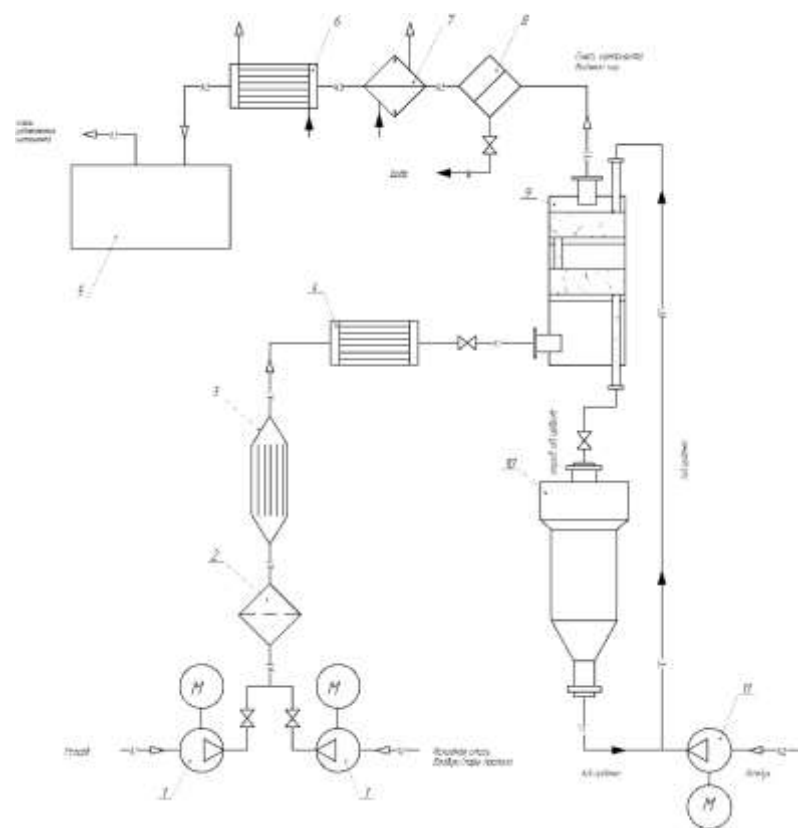


Рис. 1. Схема адсорбционной установки непрерывного действия с псевдооживленным слоем адсорбента:

1, 11 – газодувки, 2 – фильтры, 3 - огнепреградитель, 4 – холодильник исходной смеси, 5 – сборник, 6 – холодильник, 7 – конденсатор, 8 – разделитель, 9 – адсорбер, 10 - десорбер.

Принципиальная технологическая схема разработанной установки непрерывного действия представлена на рис. 1. Исходная газовая смесь от газодувки (1) проходит через рукавные фильтры (2) и огнепреградитель (3), после чего охлаждается в холодильнике (4) и поступает в адсорбер (9) с псевдооживленным слоем угля AP-17. Насыщенный адсорбент непрерывно выводится в десорбер (10), где регенерируется перегретым паром, а рекуперированный пропан конденсируется и разделяется в узле (7–8).

Результаты исследования и их обсуждение

1. Гидродинамическая оптимизация скорости псевдооживления

Диаметр адсорбера D и его высота H находятся в обратно пропорциональной зависимости от скорости газа w . Увеличение скорости

уменьшает площадь сечения и металлоемкость корпуса, но приводит к квадратичному росту гидравлического сопротивления $\Delta P_{\text{общ}}$ и, как следствие, затрат на электроэнергию [6].

Для поиска экстремума целевой функции (минимума приведенных затрат $Z_{\text{пр}}$) было выполнено параметрическое сканирование скорости w в диапазоне от 1,1 до 3,6 м/с, ограниченном условиями гидродинамической устойчивости (от $1,1 \cdot w_{\text{кр}}$ до $0,9 \cdot w_{\text{ун}}$). Результаты оптимизации представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость параметров адсорбера от скорости псевдоожижения.

w , м/с	D , м	Нап, м	n , шт	$\Delta P_{\text{общ}}$, Па	N , кВт	$Z_{\text{пр}}$, млн руб./год
1,1	1,30	5,0	9	18531	32	15,21
1,74	1,02	5,8	11	22313	39	14,78
3,6	0,7	7,4	15	29877	52	15,40

Примечание: n – число тарелок; N – мощность газодувки.

Анализ таблицы 1 показывает, что минимум приведенных затрат ($Z_{\text{пр}} = 14,78$ млн руб./год) достигается при $w_{\text{опт}} = 1,74$ м/с. При этой скорости критерий Рейнольдса $Re = 356,55$, а действительная порозность слоя $\varepsilon_d = 0,49$, что подтверждает развитие устойчивого кипящего слоя. Принятые параметры: диаметр $D = 1,02$ м, полная высота $Нап = 5,80$ м.

2. Массообмен и теплотехнический анализ

Интенсивность массообмена в ПСС оценивалась через коэффициент массоотдачи β_u . Расчет по критериальному уравнению Нуссельта показал, что при $w = 1,74$ м/с коэффициент β_u составляет $16,67 \text{ с}^{-1}$. Сравнение с аппаратами с неподвижным слоем демонстрирует интенсификацию массопереноса в 3,5–5,9 раза. Общее число единиц переноса, найденное методом графического интегрирования, составило $NOG = 3,44$, что гарантирует заданную степень очистки 96,55 %.

Поскольку адсорбция пропана на угле AP-17 экзотермична (теплота адсорбции $\Delta H_{\text{адс}} = 680$ кДж/кг), критически важным является анализ термической безопасности. Уравнение теплового баланса имеет вид:

$$Q_{\text{адс}} = Q_{\text{погл}} + Q_{\text{пот}} - Q_{\text{унос}}$$

Расчет показал, что максимальный адиабатический разогрев слоя составляет $\Delta T_{\text{max}} = 14,2$ К. Установившаяся температура слоя не превышает $30,2$ °С ($303,3$ К). Критическая температура самовоспламенения угольной пыли составляет ~ 150 °С. Таким образом, запас термической безопасности превышает 100 °С, что исключает риск локального перегрева и возгорания в расчетном режиме. Дополнительный отвод тепла не требуется, процесс саморегулируется.

3. Технико-экономическая эффективность и устойчивость проекта

Экономическая оценка выполнена для горизонта расчета $T = 10$ лет при норме дисконта $E = 0,1$ и темпе инфляции $i = 0,07$.

Капитальные затраты (CAPEX) на изготовление оборудования (адсорбер, десорбер, газодувки, КИПиА, монтаж) составляют $7,33$ млн руб. (в ценах 2025 г.).

Структура годовых эксплуатационных затрат (OPEX), totaling $14,04$ млн руб./год, имеет следующий вид:

Фонд оплаты труда с отчислениями: $53,87$ %;

Затраты на пар для десорбции: $24,94$ %;

Электроэнергия: $13,07$ %.

Доходная часть формируется за счет реализации рекуперированного пропана. Годовая масса уловленного продукта составляет $1000,74$ т. При базовой цене 18000 руб./т годовая выручка $V_{\text{п}} = 18,01$ млн руб.

Интегральные показатели эффективности:

Чистый дисконтированный доход (ЧДД): $+22,79$ млн руб.;

Индекс доходности (ИД): $3,11$ руб./руб.;

Дисконтированный срок окупаемости (Ток.д): $2,05$ года.

Для оценки рисков была проведена проверка точки безубыточности. Критическая цена реализации пропана, при которой прибыль до налогообложения равна нулю, рассчитана по формуле:

$$C_{\text{тб}} = \frac{I_{\text{т.год}}}{m_{\text{проп.год}}} = \frac{14,04}{1000,74 \cdot 10^6} \approx 14030 \text{ руб/т}$$

Маржа безопасности проекта составляет 22 %. Это означает, что установка остается рентабельной даже при падении рыночных цен на сжиженный углеводородный газ (СУГ) на 22 % от базового значения. Анализ чувствительности показал, что проект наиболее устойчив к колебаниям тарифов на электроэнергию (коэффициент чувствительности $k_{\text{ч}} = -0,09$), но требует мониторинга конъюнктуры рынка пропана ($k_{\text{ч}} = +1,51$).

Заключение

Выполнена параметрическая оптимизация адсорбционной установки непрерывного действия с псевдоожженным слоем. Установлено, что оптимальная скорость псевдоожжения $w = 1,74$ м/с обеспечивает минимум приведенных затрат за счет баланса между диаметром аппарата (1,02 м) и мощностью газодувки (39 кВт).

Критериальное обобщение подтвердило высокую интенсивность тепло- и массообмена в ПСС (коэффициент теплоотдачи $\alpha_1 = 88,65$ Вт/(м²·К)).

Тепловой баланс доказал термическую безопасность процесса: температура слоя стабилизируется на уровне 30,2 °С, что на 120 °С ниже критической температуры самовоспламенения адсорбента.

Экономический расчет показал высокую инвестиционную привлекательность проекта: ЧДД = 22,79 млн руб., срок окупаемости 2,05 года. Запас экономической прочности (22 %) гарантирует устойчивость установки к рыночным колебаниям цен на рекуперлируемый продукт.

Внедрение разработанной установки позволит предотвратить ежегодный выброс более 1000 т пропана в атмосферу, обеспечив соответствие строгим экологическим нормативам при одновременном получении коммерческой выгоды.

Литература

1. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учебное пособие для вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков; под ред. П. Г. Романкова. – Ленинград: Химия, 1987. – 576 с.
2. Родионов, А. И. Техника защиты окружающей среды: учебное пособие / А. И. Родионов, В. Н. Клушин, Н. С. Торочешников. – Москва: Химия, 1989. – 496 с.
3. Серпионова, Е. Н. Промышленная адсорбция газов и паров / Е. Н. Серпионова. – Москва: Химия, 1969. – 392 с.
4. Кельцев, Н. В. Основы адсорбционной техники / Н. В. Кельцев. – Москва: Химия, 1984. – 592 с.
5. Фролов, В. Ф. Лекции по курсу «Процессы и аппараты химической технологии»: учебное пособие / В. Ф. Фролов. – Санкт-Петербург: Химиздат, 2008. – 352 с.
6. Плановский, А. Н. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии: учебник для вузов / А. Н. Плановский, П. И. Николаев. – Москва: Химия, 1987. – 496 с.