

УДК 681.518

DOI: [10.26102/2310-6018/2022.37.2.023](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2022.37.2.023)

Управление массообменными процессами при сорбционной очистке газовых выбросов

Н.А. Меренцов¹, А.В. Персидский², А.Б. Голованчиков¹

¹Волгоградский государственный технический университет,
Волгоград, Российская Федерация

²«Федеральный научно-производственный центр «Титан-Баррикады», Волгоград,
Российская Федерация
a-persidsky@yandex.ru

Резюме. Оснащение абсорбционных аппаратов очистки газовых выбросов системами автоматического управления является наиболее эффективным и перспективным способом улучшения качества их работы и повышения энергоэффективности. Однако известные на сегодняшний день системы автоматического управления массообменными аппаратами не обладают способностью удержания крайне неустойчивого гидродинамического режима эмульгирования, при этом обладающего наивысшей эффективностью. Объектом управления системы сорбционной очистки газовых выбросов промышленных предприятий является массообменный аппарат, в котором происходит контакт очищаемого потока газовой фазы с жидким абсорбентом. Цель управления – интенсификация процессов массообмена при абсорбционной очистке газовых выбросов в условиях возмущающих воздействий и программное распознавание искомых гидродинамических режимов работы массообменных аппаратов по фактическим значениям, измеряемым в ходе процесса технологических характеристик. Построенная математическая модель основана на аппроксимации точек смежных фильтрационных кривых, на которых выявлен диапазон гидродинамического режима эмульгирования. Признаком зарождения искомого режима эмульгирования является появление «всплесков» значения индекса турбулизации по мере увеличения расхода газовой фазы. При использовании предлагаемой математической модели в реальных САУ, определяемые в ходе опытных исследований коэффициенты могут быть идентифицированы в автоматическом режиме и в последующем использоваться при расчете управляющих воздействий. Идентификацию математической модели управления на реальном массообменном аппарате предлагается производить в автоматическом режиме в ходе автокалибровки технологических параметров.

Ключевые слова: математическая модель, управление, автоматизация, массообмен, абсорбция, очистка газов, гидродинамика, индекс турбулизации, режим эмульгирования.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-1287.2020.8 «Моделирование процессов управления в массообменном экологическом и нефтегазоперерабатывающем оборудовании».

Для цитирования: Меренцов Н.А., Персидский А.В., Голованчиков А.Б. Управление массообменными процессами при сорбционной очистке газовых выбросов. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2022;10(2). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1179> DOI: 10.26102/2310-6018/2022.37.2.023

Control of mass transfer processes in sorption gas emissions cleaning

N.A. Merentsov¹, A.V. Persidskiy², A.B. Golovanchikov¹

¹Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation

²Federal Scientific and Production Centre "Titan-Barricady", Volgograd,

Russian Federation
a-persidsky@yandex.ru✉

Abstract. Equipping absorption devices for cleaning gas emissions with automatic control systems is the most effective and promising way to improve the quality of their operation and increase energy efficiency. However, the systems for automatic control of mass transfer apparatuses, known today, do not have the ability to maintain an extremely unstable hydrodynamic emulsification mode while it has the highest efficiency. The object of industrial gas emission sorption purification control system is a mass transfer apparatus where the gas phase flow being purified contacts with a liquid absorbent. The purpose of the control is to intensify the processes of mass transfer during absorption refining of gas emissions under disturbing influences and program recognition of the desired hydrodynamic modes of the mass transfer apparatus operation according to the actual values measured during the process of technological characteristics. The constructed mathematical model is based on the approximation of the points of adjacent filtration curves on which the range of the hydrodynamic emulsification mode is isolated. An indicator of the desired emulsification mode emergence is the appearance of "bursts" in the value of the turbulence index as the flow rate of the gas phase increases. When using the proposed mathematical model in real ACS, the coefficients determined during experimental studies can be identified automatically and used subsequently in the calculation of control actions. Identification of the mathematical control model on a real mass transfer apparatus is advised to be carried out automatically during auto-calibration of technological parameters.

Keywords: mathematical model, control, automation, mass transfer, absorption, gas purification, hydrodynamics, turbulence index, emulsification mode.

Acknowledgments: The research was conducted with the support of the grant of the President of the Russian Federation MK-1287.2020.8 "Modeling of control processes in mass-exchange environmental, and oil and gas processing equipment".

For citation: Merentsov N.A., Persidskiy A.V., Golovanchikov A.B. Control of mass transfer processes in sorption gas emissions cleaning. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2022;10(2). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1179> DOI: 10.26102/2310-6018/2022.37.2.023 (In Russ.).

Введение

Массообменные сорбционные процессы и аппараты различных назначений и конструктивных исполнений находят широкое применение в технологических линиях химической, нефтехимической, нефтегазоперерабатывающей, металлургической, энергетической, атомной, строительной и смежных отраслях [1-4]. Они играют особую роль в экологических процессах и оборудовании для очистки газовых выбросов и жидких сбросов промышленных предприятий [5-11]. Оснащение сорбционных аппаратов очистки газовых выбросов системами автоматического управления является наиболее эффективным и перспективным способом улучшения качества их работы и повышения энергоэффективности [12]. Это достигается за счет автоматического распознавания и устойчивого поддержания режимов работы, обеспечивающих наивысшую эффективность, интенсивность протекающих диффузионных процессов, наибольшую развиваемую и обновляемую поверхность контакта очищаемого газа с жидким абсорбентом. Однако известные на сегодняшний день системы автоматического управления массообменными аппаратами не обладают способностью удержания крайне неустойчивого гидродинамического режима эмульгирования, при этом обладающего наивысшей эффективностью. Основная причина кроется в том, что математические модели управления, используемые системами управления, не содержат методов мгновенного критериального определения текущих гидродинамических режимов в массообменном аппарате, вследствие чего не содержат и способов управления гидродинамическим режимом работы аппарата [13,14]. Таким образом, целью

исследования, рассмотренного в данной работе, является улучшение качества работы и повышение энергоэффективности систем сорбционной очистки газовых выбросов путем удержания наиболее интенсивных гидродинамических режимов их работы. Основные задачи – создание математической модели управления процессом абсорбционной очистки газов для последующего создания систем автоматизированного управления, а также алгоритмов программ идентификации математической модели и управления процессом на ее основе.

Анализ объекта управления

Объектом управления системы сорбционной очистки газовых выбросов промышленных предприятий является массообменный насадочный абсорбционный аппарат, в котором происходит контакт очищаемого потока газовой фазы с жидким абсорбентом.

Объект имеет следующие особенности:

1. Малые и сверхмалые допустимые остаточные концентрации загрязняющих веществ в исходящем газовом потоке, достичь которые при стандартных технологических и геометрических параметрах массообменных аппаратов не представляется возможным, что приводит к необходимости увеличения высоты насадочных блоков (увеличения объема насадок), как следствие увеличивает энергозатраты на протекание массообменных процессов.

2. Концентрация извлекаемого вещества в газовом потоке на входе в аппарат изменяется во времени из-за влияния технологических процессов предшествующих стадий. Типовые массообменные системы не способны реагировать на непредвиденные резкие всплески концентраций улавливаемых веществ.

3. Нестационарность условий проведения процесса очистки газов по объемным расходам газовой фазы.

4. Нестабильность объемных и поверхностных свойств насадочных контактных элементов и массообменных аппаратов, обуславливаемая изменениями поверхностных свойств насадочных элементов, засорения поверхностей и износом частей аппарата.

5. Большая инерционность по каналу управления концентрацией извлекаемых из газов вредных веществ.

Входными величинами процесса селективной очистки газа являются расход газа $Q_{вх}$, концентрация извлекаемого компонента из газового потока $C_{вх}$, давление $P_{вх}$ на входе в аппарат, температура газовой смеси на входе в аппарат $t_{вх}$, расход сорбента m_c , удельная поверхность массообмена F , определяемая как удельная поверхность пузырьков газовой фазы в режиме эмульгирования [11].

Возмущающими воздействиями являются:

- расход газовой фазы $Q_{вх}$;
- начальная концентрация извлекаемого компонента $C_{вх}$;
- давление $P_{вх}$ на входе в аппарат;
- температура газовой смеси на входе в аппарат $t_{вх}$.

В качестве управляющих величин выбраны:

- расход сорбента m_c ;
- удельная поверхность массообмена F .

Выходными величинами являются: давление газовой смеси на выходе аппарата $P_{вых}$, расход очищенного газа $Q_{вых}$, остаточная конечная концентрация извлекаемого компонента в газовом потоке $C_{вых}$.

В качестве промежуточной выходной величины, имеющей малую инерционность, введем характеристику гидродинамического режима работы массообменного аппарата,

отражающую динамику развития турбулентного потока в насадочном блоке массообменного аппарата и развитие турбулентной диффузии в развитых гидродинамических режимах – индексом турбулизации I_n , на основании которой предлагается распознавать нижние и верхние пределы спектра гидродинамических режимов (инверсия, режим эмульгирования и захлебывание насадочного блока). Более подробно анализ полных фильтрационных кривых и индексов турбулизации приведен в работах [15, 16].

На Рисунке 1 представлен анализ процесса сорбционной очистки газовых выбросов как объекта управления.

Цель управления – интенсификация процессов массообмена при сорбционной очистке газовых выбросов в условиях возмущающих воздействий и программное определение, распознавание и устойчивое поддержание искомым гидродинамических режимов по фактическим значениям величин, измеряемых в ходе технологического процесса.

Сформулируем задачу управления:

– найти управляющие величины $u = \{m_c^*, F^*\}$, при которых будет достигнут минимум критерия S с учетом возмущений $v = \{Q_{вх}, P_{вх}, C_{вх}, t_{вх}\}$ и ограничений $w = \{P_{вых}, Q_{вых}, C_{вых}\}$, где U – множество управляющих величин, V – множество возмущающих величин, W – множество выходных величин:

$$F(u, v, w) = \min_{u \in U} S,$$

$$u \in U,$$

$$v \in V,$$

$$w \in W.$$

В качестве критериев оптимальности рассмотрены:

- отклонение конечной концентрации $C_{вых}$ извлекаемого компонента в выходящем из аппарата потоке газовой фазы от заданного значения;
- конечная концентрация $C_{вых}$ извлекаемого компонента в выходящем из аппарата потоке газовой фазы;
- энергозатраты \mathcal{E} ;
- производительность Π .

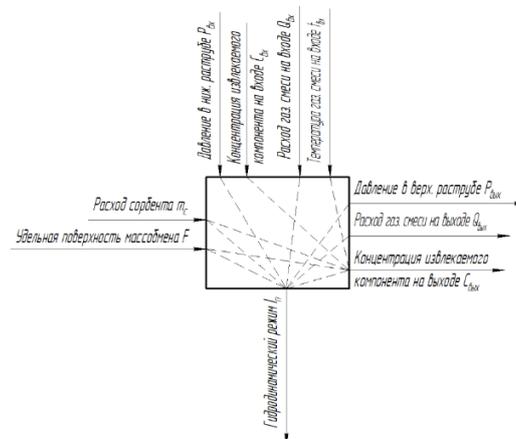


Рисунок 1 – Процесс сорбционной очистки газовых выбросов в виде объекта управления
 Figure 1 – The process of gas object sorption purification in the form of a control object

Для достижения цели управления предлагается концепция управления

массообменными процессами селективной очистки газовых выбросов, состоящая:

1) в выборе в качестве малоинерционной выходной величины показателя, характеризующего динамику развития турбулентного режима течения в насадочном блоке;

2) сведение задачи управления концентрацией извлекаемого компонента в выходящем из аппарата потоке газовой фазы к адаптивному управлению гидродинамическими режимами.

Для реализации этой концепции необходимо, чтобы математическая модель, согласно которой функционирует система управления массообменным аппаратом, устанавливала связь концентрации извлекаемого компонента с интенсивными гидродинамическими режимами в массообменном аппарате и учитывала нестационарность процесса.

Эмпирические зависимости, необходимые для построения модели адаптивного управления режимами работы массообменных аппаратов, получены с помощью модульной экспериментальной установки для исследования гидрогазодинамики и тепломассообмена в условиях фильтрационных течений через слои насадочных контактных устройств и сорбентов, а также отработки программ идентификации и управления массообменными сорбционными системами [12].

Построение математической модели процесса

Предлагаемая математическая модель основана на аппроксимации точек на семействе смежных фильтрационных кривых течения потока газовой фазы через насадочный блок при сменах режима орошения, в которых выявлен искомый гидродинамический режим эмульгирования (см. Рисунок 2).

Определение текущего гидродинамического режима осуществляется с помощью индекса турбулизации [15], выраженного из уравнения:

$$v_{\phi} = K_{mpi} \left(\frac{\Delta P}{H} \right)^{1/In_i}, \quad (1)$$

где K_{mpi} – коэффициент, учитывающий структуру порового пространства при фильтрационном течении; $1/In_i$ – показатель степени, отражающий динамику развития турбулентного потока; v_{ϕ} – фиктивная скорость фильтрации потока газовой фазы через аппарат, м/с; ΔP – гидравлическое сопротивление насадочного блока (разность давлений под и над насадочным блоком), Па; H – высота насадочного блока, м.

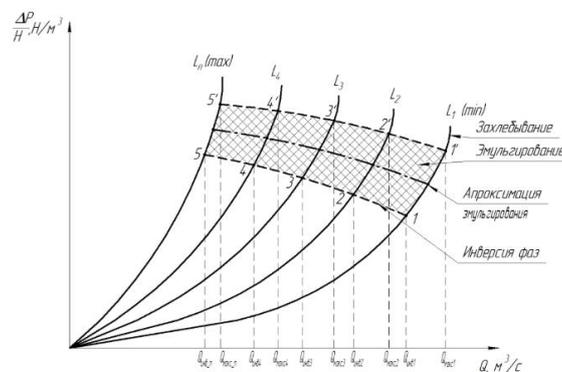


Рисунок 2 – Смежные фильтрационные кривые течения потока газовой фазы через орошаемый насадочный блок массообменного аппарата при различных плотностях орошения

Figure 2 – Adjacent filtration curves of the gas phase flow through the irrigated packing block of the mass transfer apparatus at different irrigation densities

Признаком зарождающихся гидродинамических режимов эмульгирования на фильтрационных кривых является появление «всплесков» инерционных составляющих структур фильтрационных течений, и соответствующих значений индексов турбуликации по мере увеличения расхода потока газовой фазы. Схематически принцип определения гидродинамического режима эмульгирования представлен на Рисунке 3.

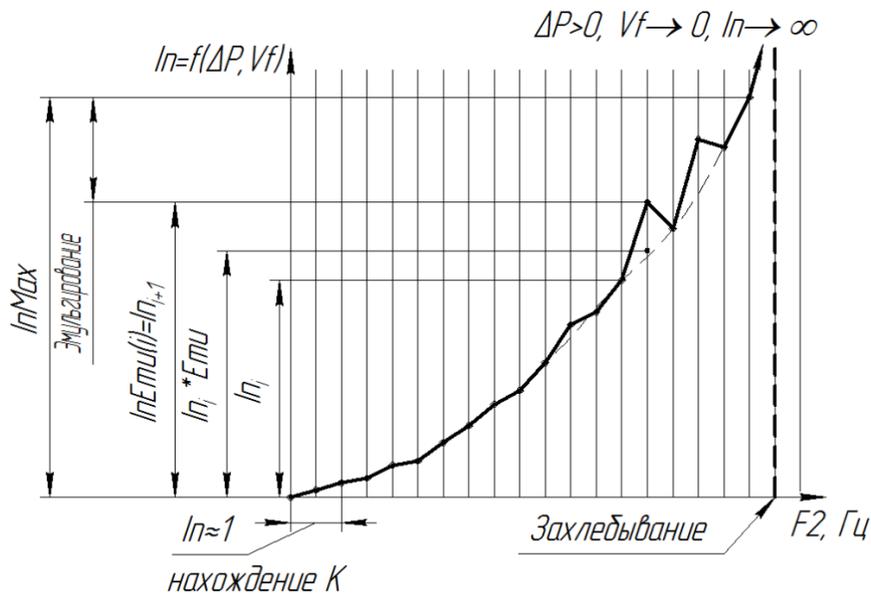


Рисунок 3 – Распознавание гидродинамических режимов по индексу турбуликации при анализе фильтрационных кривых

Figure 3 – Recognition of hydrodynamic modes by turbulence index when analyzing flow curves

Определенные при идентификации массообменной системы значения объемного расхода газа Q в точках 1, 1' ... n, n' и соответствующие им значения расхода абсорбента переносятся в систему координат соотношения величин массового расхода газа и абсорбента (см. рисунок 4), при этом:

$$\bar{Q} = \rho_2 \cdot Q ; \bar{L} = \rho_{жс} \cdot L, \quad (2)$$

где \bar{Q}, \bar{L} – массовый расход соответственно газа и жидкости, кг/с; $\rho_2, \rho_{жс}$ – плотности соответственно газа и жидкого абсорбента, кг/м³; Q, L – объемный расход соответственно газа и жидкости, м³/с;

Полученная зависимость может быть аппроксимирована функцией вида (либо другими аппроксимирующими функциями, наиболее точно отражающими диапазон полученных опытных данных, в зависимости от свойств массообменных систем):

$$\bar{L}_i = A + \frac{B}{Q_{эму_i}}, \quad (3)$$

где A, B – коэффициенты, зависящие от габаритов массообменного аппарата, конструктивных особенностей и параметров массообменной системы, структуры насадочного блока и других факторов.

Расход газа в режиме эмульгирования $\bar{Q}_{эму_i}$ можно определить как среднее значение между расходом, при котором начинается инверсивное перемешивание потоков жидкой и газовой фаз (продуктов массообмена), и расходом, предшествующим

захлебыванию аппарата $\bar{Q}_{\text{макс}_i}$:

$$\bar{Q}_{\text{эму}_i} = \frac{\bar{Q}_{\text{инв}_i} + \bar{Q}_{\text{макс}_i}}{2} \quad (4)$$

Согласно уравнению материального баланса:

$$\frac{dM_i}{dt} = \bar{L}_i(\bar{X}_к - \bar{X}_н) = \bar{Q}_{\text{эму}_i}(\bar{C}_н - \bar{C}_к), \quad (5)$$

где $\frac{dM}{dt}$ – масса вещества, которая переходит в единицу времени из одной фазы в другую, кг; \bar{L} – расход жидкости (массовый), кг/с; $\bar{Q}_{\text{эму}_i}$ – расход газа (массовый), кг/с; $\bar{X}_к, \bar{X}_н$ – относительные массовые концентрации извлекаемого вещества соответственно во входящем и выходящем жидкостном потоке, кг/кг; $\bar{C}_н, \bar{C}_к$ – относительные массовые концентрации извлекаемого вещества соответственно во входящем и выходящем газовом потоке, кг/кг.

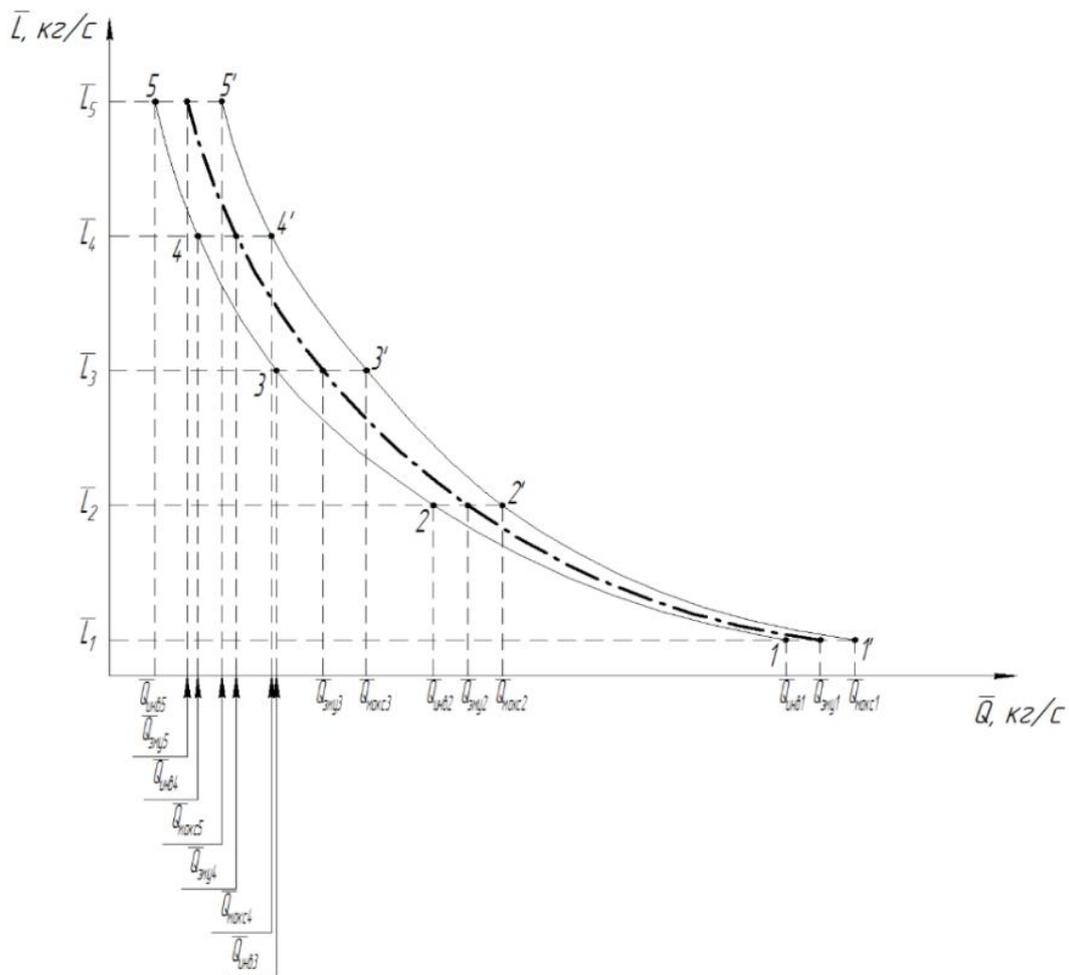


Рисунок 4 – Кривая соотношения расходов жидкой и газовой фаз для искомого гидродинамического режима (эмульгирования)

Figure 4 – The curve of the flow rate ratio of the liquid and gas phases for desired hydrodynamic modes (emulsification mode)

Следовательно:

$$\begin{cases} \bar{Q}_{\text{эму}_i} = \frac{\bar{L}_i (\bar{X}_k - \bar{X}_n)}{\bar{C}_n - \bar{C}_k} \\ \bar{L}_i = A + \frac{B}{\bar{Q}_{\text{эму}_i}} \end{cases} \quad (6)$$

Решив систему уравнений, получим зависимость расхода жидкости от заданной концентрации извлекаемого вещества в выходящем газовом потоке при заданных относительных концентрациях извлекаемого вещества во входящем и выходящем жидкостных потоках при данной структуре насадочного блока, конструктивных элементах и сопутствующих параметрах массообменного аппарата:

$$\bar{L}_i = \frac{A + \sqrt{A^2 + \frac{4B(\bar{C}_n - \bar{C}_k)}{(\bar{X}_k - \bar{X}_n)}}}{2} \quad (7)$$

Коэффициенты A и B могут быть определены по методу наименьших квадратов, а также другими методами [17].

Составим систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{d}{dA} \sum_{i=1}^n \left[\bar{L}_i - \left(A + \frac{B}{\bar{Q}_{\text{эму}_i}} \right) \right]^2 = 0 \\ \frac{d}{dB} \sum_{i=1}^n \left[\bar{L}_i - \left(A + \frac{B}{\bar{Q}_{\text{эму}_i}} \right) \right]^2 = 0, \end{cases} \quad (8)$$

где n – количество точек. Для рассматриваемой на Рисунке 4 функциональной зависимости $n=5$.

Решив систему уравнений (8), получим:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{L}_i - B \sum_{i=1}^n \frac{1}{\bar{Q}_{\text{эму}_i}}}{n}, \quad (9)$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{L}_i \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{\bar{Q}_{\text{эму}_i}} + n \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\bar{L}_i}{\bar{Q}_{\text{эму}_i}}}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{\bar{Q}_{\text{эму}_i}} \right)^2 + n \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{(\bar{Q}_{\text{эму}_i})^2}} \quad (10)$$

При использовании предлагаемой математической модели в реальных САУ эти коэффициенты могут быть определены в автоматическом режиме и в последующем использоваться при расчете управляющих воздействий.

Поскольку показаниями датчиков реальных САУ являются объемные, а не массовые величины концентраций и расхода, преобразуем уравнения (7), (9), (10) для объемных значений:

$$L_i = \frac{A + \sqrt{A^2 + \frac{4B\rho_{жс}(C_n - C_k)}{\rho_2(X_k - X_n)}}}{2\rho_{жс}}, \quad (11)$$

$$A = \frac{B \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{Q_{эму_i}} - \rho_{жс} \cdot \rho_2 \cdot \sum_{i=1}^n L_i}{n \cdot \rho_2}, \quad (12)$$

$$B = \frac{\rho_{жс} \cdot \rho_2 \cdot \sum_{i=1}^n L_i \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{Q_{эму_i}} - n \cdot \rho_{жс} \cdot \rho_2 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{Q_{эму_i}}}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{Q_{эму_i}}\right)^2 - n \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{(Q_{эму_i})^2}}, \quad (13)$$

где X_n, X_k – начальная и конечная объемные значения концентраций извлекаемого компонента в потоке жидкой фазы (абсорбента), кг/м³; C_n, C_k – начальная и конечная объемные значения концентраций извлекаемого компонента в потоке газовой фазы, кг/м³.

Тогда оптимальный объемный расход газа при найденном расходе жидкости L_i :

$$Q_i = \frac{-B}{\rho_2(A - L_i \cdot \rho_{жс})} \quad (14)$$

Для работы с датчиками реальной САУ выразим уравнение (11) через объемные значения расхода и концентрации, также введя коэффициент насыщения абсорбента $K_{НС} = X_k / C_n$:

$$L_i = \frac{A + \sqrt{A^2 + \frac{4B\rho_{жс}(C_n - C_k)}{\rho_2 \cdot K_{НС} \cdot C_n}}}{2\rho_{жс}} \quad (15)$$

где X_k – конечная объемная концентрация извлекаемого вещества в потоке жидкой фазы, кг/м³; C_n, C_k – начальная и конечная объемные концентрации извлекаемого вещества в потоке газовой фазы, кг/м³.

Идентификация представленной математической модели для экспериментальной колонны [18] и сопоставление ее результатов с полученными экспериментальными данными показывают, что полученная кривая зависимости расхода жидкости от расхода газа $L(Q)$ соответствует экспериментальной кривой при работе колонны в режиме эмульгирования $L(Q_{эму})$ (см. Рисунок 5). При этом точность идентификации математической модели возрастает с увеличением количества точек аппроксимации.

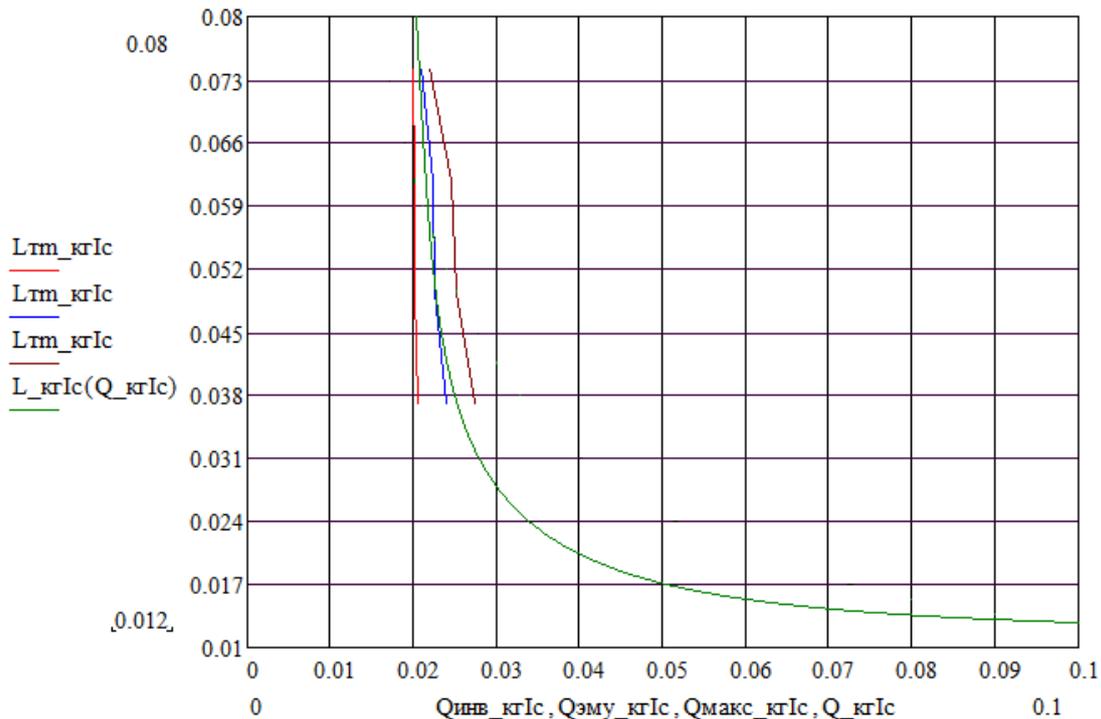


Рисунок 5 – Результат идентификации математической модели $L(Q)$ и экспериментальные данные

Figure 5 – The result of mathematical model identification and experimental data

Использование предлагаемой математической модели в системе автоматизированного управления (САУ) насадочной абсорбционной колонной обеспечивает устойчивое поддержание гидродинамического режима эмульгирования, характеризующегося наивысшей степенью турбулентной диффузии продуктов массообмена, что позволяет осуществлять работу в условиях колебаний расходов сплошной газовой фазы, уменьшать расход абсорбента и затраты на его регенерацию, сокращать время реакции массообменной системы на изменение концентрации извлекаемого компонента во входящем потоке газовой фазы и добиться более качественной селективной очистки газовых выбросов промышленных предприятий.

При создании новых систем абсорбционной очистки газов использование предлагаемой математической модели в САУ способно обеспечить устойчивое адаптивное поддержание гидродинамического режима эмульгирования, что позволит снизить объем насадочного блока до 40 % по сравнению с типовыми массообменными колоннами [11, 12]. Существенное снижение объема насадочного блока делает массообменные сорбционные системы менее инерционными, более гибкими, с точки зрения управляющих воздействий, и способно оказать существенный энерго- и ресурсосберегающий эффект.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тимонин А.С., Божко Г.В., Борщев В.Я., Гусев Ю.И. *Оборудование нефтегазопереработки, химических и нефтехимических производств*. Книга 2. Под общей ред. А.С. Тимонина. М., Инфра-Инженерия; 2019.
2. Сокол Б.А. и др. *Насадки массообменных колонн*. Под ред. Д. А. Баранова. М.: Инфохим; 2009.

3. Каган А.М. и др. *Контактные насадки промышленных теплообменных аппаратов*. Под ред. Лаптева. Казань: Отечество; 2013.
4. Голованчиков А.Б., Черикова К.В., Прохоренко Н.А. Математическое моделирование колпачковой тарелки в процессах ректификации. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021;9(1).
5. Носырев М.А., Комляшев Р.Б., Ильина С.И., Кабанов О.В. Очистка газовых выбросов от диоксида серы на промышленных предприятиях. *Экология и промышленность России*. 2018;22(8):24–27.
6. Дмитриев А.В., Мадышев И.Н., Дмитриева О.С., Николаев А.Н. Исследования диспергирования жидкости и газа в контактных устройствах с увеличенным диапазоном устойчивой работы. *Экология и промышленность России*. 2017;21(3):12–15.
7. Носырев М.А., Комляшев Р.Б., Ильина С.И. Расчет гидравлического сопротивления и удерживающей способности в абсорберах с псевдосжиженной насадкой. *Экология и промышленность России*. 2013;7:37–41.
8. Голованчиков А.Б., Прохоренко Н.А., Фоменков С.А. Разработка и численное моделирование конструкции колонны для контактирования газа с жидкостью. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2020;8(4).
9. Мадышев И., Дмитриева О., Дмитриев А. Перспективы использования струйно-барботажных контактных устройств для повышения энергоэффективности массообменных аппаратов. *Экология и промышленность России*. 2015;19(7):36–39.
10. Дмитриев А.В., Макушева О.С., Калимуллин И.Р., Николаев А.Н. Вихревые аппараты для очистки крупнотоннажных газовых выбросов промышленных предприятий. *Экология и промышленность России*. 2012;(1):4–7.
11. Голованчиков А.Б., Меренцов Н.А., Качанов А.В. Моделирование процесса абсорбции в насадочной колонне, работающей в режиме эмульгирования. *Экология и промышленность России*. 2021;25(3):24–29.
12. Меренцов Н.А., Голованчиков А.Б., Персидский А.В., Топилин М.В. *Моделирование процессов управления в нефтегазоперерабатывающем массообменном оборудовании*: монография. ВолгГТУ. Волгоград; 2021. 212 с.
13. Силаев А.А., Силаева Е.Ю., Шевчук В.П. Патент №2693785 РФ С1, МПК В01D53/14 G05D27/00. *Способ автоматического управления процессом абсорбции*. 2019.
14. Болдырев И.А., Шевчук В.П. Патент №2393912 РФ С1, МПК В01D53/14. *Способ управления процессом абсорбции*. 2009.
15. Меренцов Н.А., Балашов В.А., Голованчиков А.Б., Топилин М.В., Персидский А.В. Структура фильтрационной кривой и способы ее аппроксимации. Часть 2. Верхний предел применения закона Дарси. *Вестник Тамбовского государственного технического университета (Вестник ТГТУ)*. 2021;27(2):245–254.
16. Меренцов Н.А., Балашов В.А., Голованчиков А.Б., Топилин М.В., Персидский А.В. Структура фильтрационной кривой и способы ее аппроксимации. Часть 3. Уравнения для аппроксимации фильтрационной кривой. *Вестник Тамбовского государственного технического университета (Вестник ТГТУ)*. 2021;27(3):401–414.
17. Голованчиков А.Б., Доан М.К., Петрухин А.В., Меренцов Н.А. Сравнение точности аппроксимации экспериментальных данных методом наименьших относительных квадратов с методом наименьших квадратов. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2020;8(1).
18. Голованчиков А.Б., Балашов В.А., Меренцов Н.А. Экспериментальное исследование характеристик теплообменных насадочных устройств: учеб. пособие. ВолгГТУ. Волгоград; 2018. 94 с.

REFERENCES

1. Timonin A.S., Bozhko G.V., Borshchev V.Ya., Gusev Yu.I. *Equipment for oil and gas processing, chemical and petrochemical industries*. Book 2. Under the general editor A.S. Timonin. M., Infra-Engineering; 2019.
2. Sokol B.A. et al. *Packing of mass-exchange columns*. Ed. D.A. Baranov. M.: Infohim; 2009.
3. Kagan A.M. et al. *Contact packing of industrial heat and mass exchange apparatuses*. Under ed. Laptev. Kazan: Fatherland; 2013.
4. Golovanchikov A.B., Cherikova K.V., Prokhorenko N.A. Mathematical modeling of the cap plate in rectification processes. *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii = Modeling, optimization and information technology*. 2021;9(1).
5. Nosyrev M.A., Komlyashev R.B., Ilyina S.I., Kabanov O.V. Purification of gas emissions from sulfur dioxide at industrial enterprises. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and industry of Russia*. 2018;22(8):24–27.
6. Dmitriev A.V., Madyshev I.N., Dmitrieva O.S., Nikolaev A.N. Studies of liquid and gas dispersion in contact devices with an increased range of stable operation. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and industry of Russia*. 2017;21(3):12–15.
7. Nosyrev M.A., Komlyashev RB, Ilyina S.I. Calculation of hydraulic resistance and retention capacity in absorbers with a pseudo-liquefied packing. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and industry of Russia*. 2013;7:37–41.
8. Golovanchikov A.B., Prokhorenko N.A., Fomenkov S.A. Development and numerical modeling of the column design for gas-liquid contact. *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii = Modeling, optimization and information technology*. 2020;8(4).
9. Madyshev I., Dmitrieva O., Dmitriev A. Prospects for the use of jet-bubbling contact devices to improve the energy efficiency of mass exchangers. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and industry of Russia*. 2015;19(7):36–39.
10. Dmitriev A.V., Makusheva O.S., Kalimullin I.R., Nikolaev A.N. Vorchrev apparatus for cleaning large-tonnage gas emissions of industrial enterprises. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and industry of Russia*. 2012;(1):4–7.
11. Golovanchikov A.B., Merentsov N.A., Kachanov A.V. Modeling the absorption process in a packed column operating in the emulsification mode. *Ecology and industry of Russia*. 2021;25(3):24–29.
12. Merentsov N.A., Golovanchikov A.B., Persian A.V., Topilin M.V. *Modeling of control processes in oil and gas processing mass exchange equipment*: monograph. VolgaGTU. Volgograd; 2021. 212 p.
13. Silaev A.A., Silaeva E.Yu., Shevchuk V.P. Patent No. 2693785 of the Russian Federation C1, IPC B01D53/14 G05D27/00. *Method of automatic control of absorption process*. 2019.
14. Boldyrev I.A., Shevchuk V.P. Patent No. 2393912 RF C1, IPC B01D53/14. *Method for control of absorption process*. 2009.
15. Golovanchikov A.B., Doan M.K., Petrukhin A.V., Merentsov N.A. Comparison of the accuracy of approximation of experimental data by least relative squares with least squares. *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii = Modeling, optimization and information technology*. 2020;8(1).
16. Merentsov N.A., Balashov V.A., Golovanchikov A.B., Topilin M.V., Persian A.V. Structure of the filtration curve and methods of its approximation. Part 3. Equations for approximating the filtration curve. *Bulletin of Tambov State Technical University (Bulletin of TSTU)*. 2021;27(3):401–414.

17. Golovanchikov A.B., Doan M.K., Petrukhin A.V., Merentsov N.A. Comparison of the accuracy of approximation of experimental data by least relative squares with least squares. *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii = Modeling, optimization and information technology*. 2020;8(1).
18. Merentsov N.A., Golovanchikov A.B., Balashov V.A. Experimental study of the characteristics of heat and mass transfer packed devices: textbook. allowance. VolgGTU. Volgograd; 2018. 94 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ/ INFORMATION ABOUT AUTHORS

Меренцов Николай Анатольевич, кандидат технических наук, доцент Волгоградского государственного технического университета, Волгоград, Российская Федерация.
e-mail: steeples@mail.ru
ORCID: [0000-0002-6579-2630](https://orcid.org/0000-0002-6579-2630)

Nickolay Anatolievich Merentsov, Candidate Of Technical Sciences, Associate Professor of Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation.

Персидский Александр Владимирович, ведущий инженер – конструктор по электроавтоматике Федерального научно – производственного центра «Титан – Баррикады», Волгоград, Российская Федерация.
e-mail: a-persidsky@yandex.ru
ORCID: [0000-0002-6960-9039](https://orcid.org/0000-0002-6960-9039)

Alexander Vladimirovich Persidskiy, Lead Electrical Automation Engineer-Designer of Federal Scientific and Production center “Titan-Barricady”, Volgograd, Russian Federation.

Голованчиков Александр Борисович, доктор технических наук, профессор Волгоградского государственного технического университета, Волгоград, Российская Федерация.
e-mail: steeples@mail.ru
ORCID: [0000-0002-4576-4229](https://orcid.org/0000-0002-4576-4229)

Alexander Borisovich Golovanchikov, Doctor Of Technical Sciences, Professor of Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 13.05.2022; одобрена после рецензирования 10.06.2022; принята к публикации 28.06.2022.

The article was submitted 13.05.2022; approved after reviewing 10.06.2022; accepted for publication 28.06.2022.