

УДК 66.021

DOI: [10.26102/2310-6018/2023.40.1.014](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.40.1.014)

Безиндикаторный информационно-измерительный метод определения параметров структуры потоков в тепло- и массообменных аппаратах

Н.А. Меренцов¹, А.Б. Голованчиков¹, А.В. Персидский^{2✉}, М.В. Топилин³

¹Волгоградский государственный технический университет,
Волгоград, Российская Федерация

²Федеральный научно-производственный центр «Титан-Баррикады»,
Волгоград, Российская Федерация

³ЛУКОЙЛ-Инжиниринг ВолгоградНИПИморнефть,
Волгоград, Российская Федерация
a-persidsky@yandex.ru ✉

Резюме. В статье предложен информационно-измерительный метод определения дифференциальной и интегральной кривых отклика и их дисперсии – центрального момента второго порядка по профилю скорости, а также по зависимости скоростного напора или высоты столба манометрической жидкости в трубке Пито-Прандтля от радиуса массообменного аппарата. Приведены расчетные зависимости для определения параметров структуры потоков на основе экспериментальных данных для ректификационной колонны по паровой фазе и кипящему раствору, а также фильтрационного течения потока газовой фазы через слой адсорбента, формулы их пересчета в *C*- и *F*- кривые отклика, дисперсии. Рассмотрены индикаторные методы определения параметров структуры потоков, основанные на импульсном или ступенчатом вводе индикаторов в поток, с последующей регистрацией изменения концентрации «меченых» частиц, молекул и ионов во времени. Рассмотрен индикаторный метод измерения параметров структуры потока жидкофазных продуктов массообмена, основанный на вводе трассера, электропроводность которого отличается от электропроводности потока-носителя, с последующей регистрацией сигнала на выходе кондуктометрической ячейкой. Приведены для сравнения индикаторные методы определения параметров структуры потоков газофазных носителей на основе ввода частиц дыма, радиоактивных изотопов, а также ионизацией газового потока на входе в рабочий объем аппарата, с последующей регистрацией сигналов и распознаванием параметров модели. Показаны преимущества предлагаемого (информационно-измерительного) метода расчета вышеназванных параметров по сравнению с индикаторным методом, связанные с выбором индикатора, его точной подачей в виде импульсного или ступенчатого сигнала на входе объекта и регистрацией на выходе, а также знанием плотностей жидкой, газовой или паровой фазы в объекте и плотности манометрической жидкости в трубке Пито-Прандтля.

Ключевые слова: структура потока, гидродинамика, газодинамика, скорость потока, профиль скорости, массообмен, тепломассообмен, ректификация, абсорбция, адсорбция, сушка.

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., Голованчиков А.Б., Персидский А.В., Топилин М.В. Безиндикаторный информационно-измерительный метод определения параметров структуры потоков в тепло- и массообменных аппаратах. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2023;11(1). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1290> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.40.1.014

Indicator-free information and measurement method for determining flow structure parameters in heat and mass exchangers

N.A. Merentsov¹, A.B. Golovanchikov¹, A.V. Persidskiy²✉, M.V. Topilin³

¹Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation

²JSC Federal Scientific and Production Centre "Titan – Barricady", Volgograd, Russian Federation

³Branch of LUKOIL-Engineering VolgogradNIPImorneft, Volgograd, Russian Federation
a-persidsky@yandex.ru ✉

Abstract. The article proposes a method for determining differential and integral response curves and their dispersion – the central moment of the second order according to the velocity profile, as well as the dependence of the velocity head or the height of the manometric liquid column in the Pitot-Prandtl tube on the radius of the apparatus. Calculated dependencies for determination of flow structure parameters are given on the basis of experimental data for distillation column by vapor phase and boiling solution, as well as equations of their conversion into C- and F- response curves, dispersions. Indicator methods for determining flow structure parameters are considered drawing on pulsed or stepped input of indicators into the flow with subsequent recording of changes in the concentration of "labeled" particles, molecules and ions over time. The indicator method of measuring parameters of the flow structure of liquid-phase mass exchange products is regarded using the input of a tracer, the electrical conductivity of which differs from the electrical conductivity of the carrier stream with subsequent registration of the signal at the output by a conductometric cell. Indicator methods for determining parameters of gas-phase carrier flows structure based on input of smoke particles, radioactive isotopes, as well as ionization of gas flow at the inlet to the engine displacement of the apparatus with subsequent recording of signals and recognition of model parameters are presented for comparison. The advantages of the proposed (information and measured) method of calculating the parameters mentioned above compared to the indicator method are shown related to the choice of the indicator, its accurate supply in the form of a pulse or step signal at the inlet of the object and registration at the outlet, as well as data on the densities of the liquid, gas or vapor phase in the object and the density of the manometric liquid in the Pitot-Prandtl tube.

Keywords: flow structure, hydrodynamics, gas dynamics, flow rate, velocity profile, mass exchange, heat and mass exchange, rectification, absorption, adsorption, drying.

Acknowledgments: the work was supported by the grant of the President of the Russian Federation MK-1287.2020.8 "Modeling control processes in mass-exchange environmental and oil and gas processing equipment".

For citation: Merentsov N.A., Golovanchikov A.B., Persidskiy A.V., Topilin M.V. Indicator-free information and measurement method for determining flow structure parameters in heat and mass exchangers. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(1). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1290> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.40.1.014 (In Russ.).

Введение

Массообменные аппараты различных конструктивных исполнений и назначений находят широкое промышленное применение в химической, нефтегазоперерабатывающей, нефтехимической, строительной, пищевой и смежных отраслях [1-9].

Методы расчета массообменных процессов (абсорбции, ректификации, экстракции) в насадочных колоннах с учетом продольной диффузии, когда одна из фаз, сплошная или дисперсная, движется в режиме идеального вытеснения, а вторая – с продольной диффузией, известны и используются при проектировании массообменных

насадочных колонн [10-11]. Также разрабатываются новые подходы к математическому моделированию массообменных систем, когда процессы протекают в условиях контактирования газо- и жидкофазных продуктов массообмена с неподвижными, движущимися и псевдооживленными слоями гранул дисперсных материалов (адсорбция, ионный обмен, сушка, каталитические реакции и др.) [12-13]. Существенные трудности возникают при экспериментальном определении параметров структуры потоков, особенно типовыми индикаторными методами.

Известный индикаторный метод определения параметров структуры потока и формы так называемых дифференциальных *C*- и интегральных *F*-кривых отклика, среднего времени пребывания и дисперсии – центрального момента второго порядка, когда в объект на вход подают импульсный или ступенчатый сигнал в виде раствора соли или кислоты, электропроводность которого отличается от электропроводности основной жидкости, а на выходе кондуктометрической ячейки регистрируют во времени выход молекул или ионов этого раствора [14-19]. Обычно такой индикатор используют в лабораторных исследованиях. Для газовых сред в качестве индикатора применяют дым и по изменению оптической плотности газа, на выходе измеряемой фотоколориметром, судят о структуре потока. Известны и другие способы индикации потока на выходе: с помощью радиоактивных изотопов [15-16], ионизации входного газового сигнала [20] и регистрации их на выходе с помощью счетчика Гейгера или кондуктометрической ячейки. Но они более сложные, дорогостоящие или небезопасные.

Общим недостатком индикаторных методов является сложность подачи точного входного импульсного или ступенчатого сигнала и неточности регистрации «меченых» молекул, ионов или частиц на выходе, связанные с их потерями внутри объекта.

Так, в ректификационной колонне применять индикаторный метод вообще сложно или даже невозможно, так как она имеет два потока жидкости: один на входе исходной жидкости на тарелку питания в середине колонны между укрепляющей и исчерпывающей частями, второй – в виде флегмы, подаваемой на орошение сверху. Индикация пара входным ступенчатым или импульсным сигналом также осложнена его конденсацией и переходом «меченой» части в жидкую кипящую фазу, а индикация жидкой кипящей фазы на входе осложнена потерями части индикатора с выходящим паром, а одно из главных требований к индикатору заключается в его полной регистрации на выходе без потерь [14-16].

Для моделирования массообменных процессов адсорбции, ионного обмена, сушки с учетом продольной диффузии в условиях фильтрационных течений газо- и жидкофазных потоков через неподвижные и движущиеся слои гранул (сорбентов, ионитов, высушиваемых материалов, катализаторов) и расчета технологических и геометрических параметров массообменного оборудования также необходимо определять параметры структуры потоков [12-13]. В подобных условиях типовые индикаторные методы определения параметров структуры потоков также являются не объективными, так как частицы индикатора (молекулы, ионы, частицы дыма...) неизбежно улавливаются в плотных слоях гранул с развитой удельной поверхностью, особенно молекулярными «ситами» (сорбентами).

Целью исследования является разработка безиндикаторного информационно-измерительного метода определения параметров структуры потоков по зависимости скорости, скоростного напора или высоты столба манометрической жидкости в трубке Пито-Прандтля от радиуса.

В монографии [18] представлены формулы для пересчета *C*-кривых отклика, полученных индикаторным методом на входной импульсный сигнал в профиль скорости. В данной работе сначала решается обратная задача определения кривых отклика по известной зависимости скорости от радиуса.

Способ определения профиля скорости с помощью трубки Пито-Прандтля хорошо известен и широко используется как в лабораторных исследованиях, так и на промышленных колонных аппаратах.

Из геометрического смысла элементарной площади под дифференциальной C -кривой отклика, соответствующей доли частиц потока, выходящего из объекта в момент времени θ за время $d\theta$:

$$Cd\theta = \frac{2\pi r v dr}{\pi R^2 v_{cp}}, \quad (1)$$

где C – дифференциальная функция отклика или нормированная концентрация индикатора, θ – безразмерное время пребывания как отношение текущего времени пребывания t к среднему τ ; v и v_{cp} – соответственно скорость потока на радиусе r и средняя скорость, м/с; r и R – соответственно радиус линии тока внутри объекта и радиус колонны (массообменного аппарата), м.

Так как безразмерное время

$$\theta = \frac{t}{\tau},$$

а

$$t = \frac{l}{v} \text{ и } \tau = \frac{l}{v_c},$$

тогда

$$\theta = \frac{v_{cp}}{v}, \quad (2)$$

а

$$d\theta = -\frac{v_{cp}}{v^2} dv. \quad (3)$$

Таким образом, C -кривая отклика с учетом формул (1), (2) и (3) как функция зависимости скорости от радиуса приобретает вид:

$$C = -\frac{2r}{R^2} v_{cp} \left(\frac{v}{v_{cp}} \right)^3 \bigg/ \left(\frac{dv}{dr} \right)$$

или в расчетном дискретном виде:

$$C = -\frac{2\Delta r}{R^2 v_{cp}^2} \frac{r_i v_i^3}{(v_i - v_{i-1})}. \quad (4)$$

Для интегральной F -функции отклика

$$F = \int_0^\theta C d\theta.$$

Из совместного решения уравнений (1) и (3) получаем:

$$F = \int_0^r r v dr / R^2 v_{cp},$$

или в расчетном виде

$$F_k = \left(\sum_{i=1}^k r_i v_i \right) / \left(\frac{\Delta r}{R^2 v_{cp}} \right) \quad (5)$$

или

$$F_k = \sum_{i=1}^k r_i v_i / \sum_{i=1}^n r_i v_i,$$

где k и n – соответственно текущее и общее число интервалов разбиения по радиусу; $\Delta r = R/n$.

Дисперсия, или центральный момент второго порядка, определяется в виде:

$$\sigma^2 = \int_0^\infty C \theta^2 d\theta - 1. \quad (6)$$

Подставляя значения $C d\theta$ из уравнения (1), а θ^2 из уравнения (2) в формулу (6), получаем уравнения зависимости дисперсии от скорости и радиуса потока:

$$\sigma^2 = \left(\int_0^\infty \frac{r dr}{v} \right) \frac{2v_{cp}}{R^2} - 1 \quad (7)$$

или в расчетном виде для дискретной экспериментальной зависимости скорости от радиуса при равных интервалах разбиения по радиусу Δr :

$$\sigma^2 = \frac{2v_{cp}\Delta r}{R^2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{r_i}{v_i} \right) - 1. \quad (8)$$

Как показали экспериментальные исследования на лабораторной экспериментальной ректификационной колонне, в которой измерялись зависимости столба манометрической жидкости – воды от скоростного напора с помощью трубки Пито-Прандтля по известной формуле:

$$\rho_m g h = \frac{\rho v^2}{2},$$

где ρ_m и ρ – соответственно плотность манометрической жидкости и плотность кипящего раствора и паровой фазы в колонне (результаты переводились в скорость потока)

$$v = \sqrt{\frac{2\rho_m g h}{\rho}}. \quad (9)$$

В формулах (4), (5) и (7) средняя скорость может быть, согласно уравнению неразрывности, записана в виде:

$$\pi R^2 v_{cp} = \int_0^R 2\pi r v dr.$$

Тогда в расчетном виде:

$$v_{cp} = \left(\frac{2\Delta r}{R^2} \right) \sum_{i=1}^n r_i v_i,$$

или с учетом уравнения (9):

$$v_{cp} = \left(\frac{2\Delta r}{R^2} \right) \left(\sqrt{\frac{2\rho_m g}{\rho}} \right) \sum_{i=1}^n (r_i \sqrt{h_i}) \quad (10)$$

Тогда уравнение (4) с учетом уравнения (9) и (10) запишется в расчетном виде для С-кривой отклика:

$$C_i = - \frac{R^2}{2\Delta r} \frac{r_i \sqrt{h_i}}{\left[\sum_{i=1}^n (r_i \sqrt{h_i}) \right]^2} \left(\sqrt{h_i} - \sqrt{h_{i-1}} \right). \quad (11)$$

Для F-кривой отклика с учетом (5):

$$F_k = \frac{\sum_{i=1}^k (r_i \sqrt{h_i})}{\sum_{i=1}^n (r_i \sqrt{h_i})} \quad (12)$$

а для дисперсии из уравнения (7) с учетом (9) и (10):

$$\sigma^2 = \left(\frac{2\Delta r}{R^2} \right)^2 \left[\sum_{i=1}^n (r_i \sqrt{h_i}) \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{r_i}{\sqrt{h_i}} \right) \right] - 1. \quad (13)$$

Экспериментальная часть

Подробная методика экспериментальных исследований, а также анализ полученных данных неравномерностей полей фильтрационных течений потока газовой фазы через слои гранул адсорбентов приведена в работе [21] и является базовой. Методика [21] основана на измерениях полей фильтрационных течений при помощи специальных термоанемометрических зондов, установленных в специализированных экспериментальных модулях с координатными устройствами. Базовая методика позволяет регистрировать поля фильтрационных течений над слоями гранул адсорбентов и в разрыве слоев с заданным угловым и радиальным шагом [21], а также требуемой точностью и детализацией экспериментальных и опытных данных.

Информационно-измерительный метод определения параметров структуры потоков, представленный в данной работе, является универсальным для широкого спектра тепло- и массообменных аппаратов (абсорбции, ректификации, экстракции, сушки, адсорбции, ионного обмена, десорбции и др.), газо- и жидкофазных каталитических реакторов, а также для других видов технологического оборудования, в которых реализуются фильтрационные течения.

Рассмотрим пример полученных экспериментальных данных и их обработки по исследованию фильтрационных течений через слои насадочных контактных устройств в ректификационной колонне (Рисунок 5) (насадка – кольца Палля 25x25x1мм) и потока газовой фазы через слой адсорбента – цеолит СаА(гранулы d=3-5мм) (Рисунок 2) (малогабаритного промышленного адсорбера). Фото исследуемых экспериментальных модулей установки приведены на Рисунке 1 и Рисунке 4.



Рисунок 1 – Фото экспериментального модуля для исследования параметров структуры потока фильтрационного течения газовой фазы через слой сорбента – цеолит CaA (гранулы $d=3-5\text{мм}$) (диаметр модуля – 200мм, высота модуля 300мм)

(Комментарий: Область применения данного адсорбента: очистка и осушка природного и нефтяного попутного газа от сероводорода (сернистых соединений), метанола, углекислого газа, меркаптанов и многое другое.)

Figure 1 – Photo of the experimental module for studying the flow structure parameters of the filtration flow of the gas phase through the sorbent layer – zeolite CaA (granules $d = 3-5\text{mm}$) (module diameter – 200mm, module height - 300mm)

(Comment: application of this adsorbent: purification and drying of natural and petroleum associated gas from hydrogen sulfide (sulfurous compounds), methanol, carbon dioxide, mercaptans and much more.)

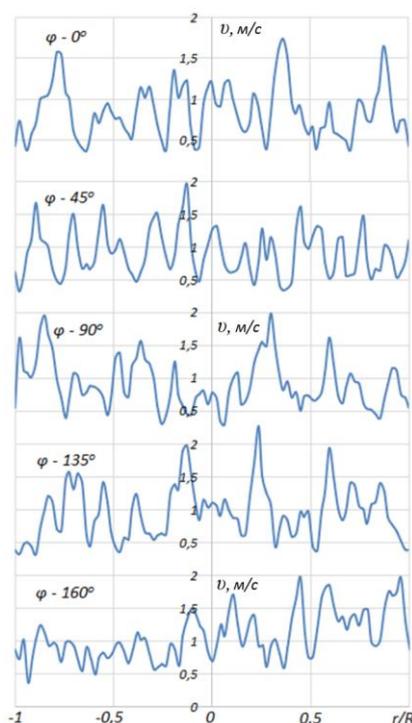


Рисунок 2 – Пример экспериментальных данных полей потока газовой фазы через слой адсорбента цеолит CaA эквивалентными диаметрами гранул $d=3-5\text{ мм}$ с угловым шагом измерения $\varphi - 45^\circ$ при фиктивной скорости газовой фазы – $0,8\text{м/с}$

Figure 2 – Example of experimental data of gas phase flow fields through layer of adsorbent zeolite CaA with equivalent diameters of granules $d = 3-5\text{mm}$ with angular pitch of $\varphi - 45^\circ$ at dummy gas phase velocity – $0,8\text{m/s}$

Также на основе обработки экспериментальных данных при помощи предлагаемой методики приведены примеры построения дифференциальных C -кривых отклика при фильтрационном течении через слой адсорбента (Цеолит CaAd=3-5мм) (Рисунок 3) и насадочный блок ректификационной колонны (насадка – кольца Палля 25x25x1мм) (Рисунок 6).

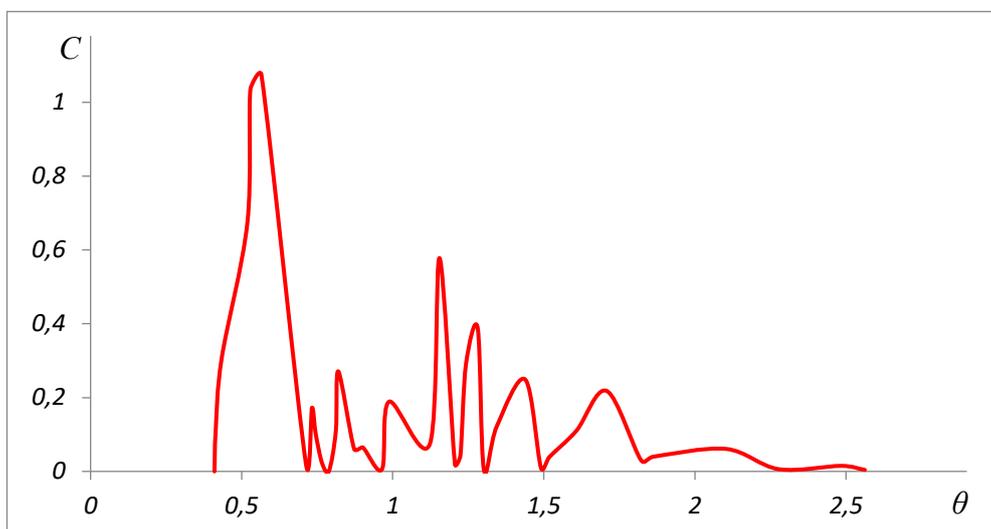


Рисунок 3 – Пример построения дифференциальной C -кривой отклика зависимости безразмерной концентрации C от безразмерного времени пребывания частиц в рабочем объеме массообменного аппарата (для адсорбента – Цеолит CaAd=3-5мм) на основе обработки экспериментальных данных полей фильтрационных течений

Figure 3 – Example of construction of a differential C -curve of dimensionless concentration C dependence response on dimensionless residence time of particles in the engine displacement of mass exchange apparatus (for adsorbent – Zeolite CaA $d = 3-5\text{mm}$) based on the processing of filtration flow field experimental data



Рисунок 4 – Фото экспериментального модуля для исследования параметров структуры потока фильтрационного течения паровой фазы через насадочный блок массообменного аппарата (для процесса ректификации) (насадка – кольца Палля 25x25x1мм)

Figure 4 – Photo of the experimental module for studying the parameters of the flow structure of the vapor phase filtration flow through the packed block of the mass exchange apparatus (for the rectification process) (packing – Pall rings 25x25x1mm)

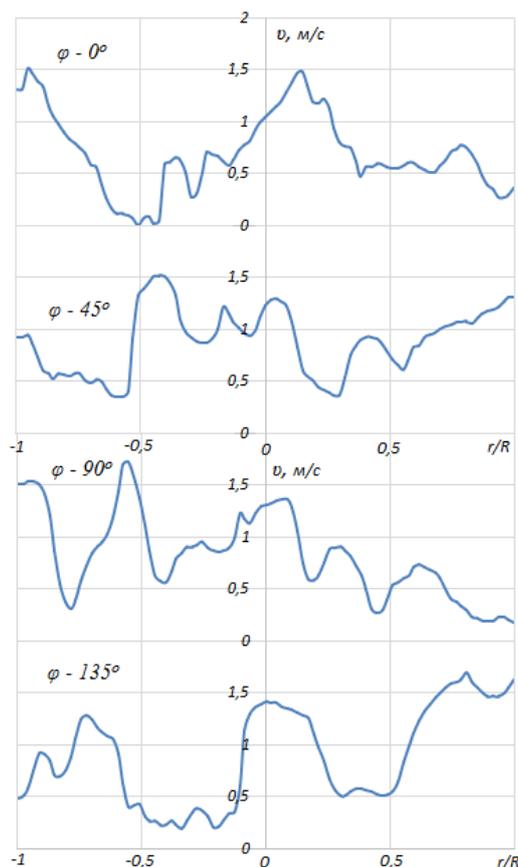


Рисунок 5 – Пример экспериментальных данных полей потока паровой фазы через слой насадочного блока (кольца Палля 25x25x1мм) с угловым шагом измерения $\varphi - 45^\circ$ при фиктивной скорости газовой (паровой фазы $v - 0,8\text{ м/с}$)

Figure 5 – Example of experimental data of the vapor phase flow fields through the layer of the packing block (Pall rings 25x25x1mm) with an angular measurement pitch of $\varphi - 45^\circ$ at a fictitious gas (vapor phase v velocity of 0,8- m/s)

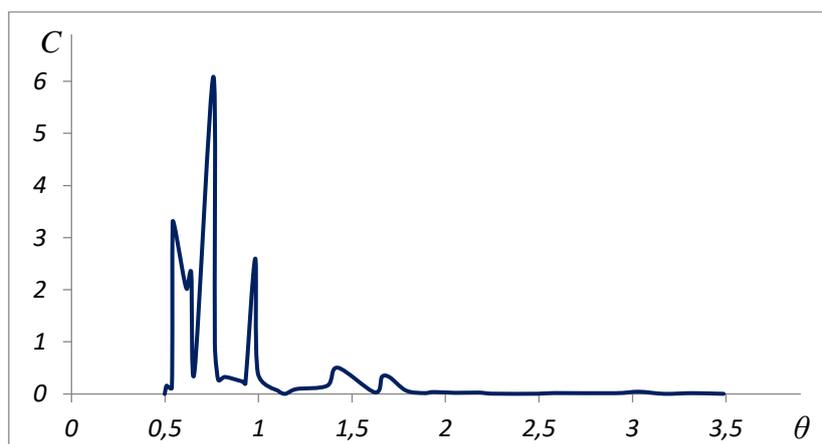


Рисунок 6 – Пример построения дифференциальной C-кривой отклика зависимости безразмерной концентрации C от безразмерного времени пребывания частиц в рабочем объеме массообменного аппарата (для насадки – кольца Палля 25x25x1мм) на основе обработки экспериментальных данных полей фильтрационных течений

Figure 6 – Example of construction of differential C -curve of dependence response of C on dimensionless residence time of particles in engine displacement of mass exchange apparatus (for packing - ring Pall 25x25x1 mm) based on processing of filtration flow field experimental data

Заключение

Диапазоны радиальных дисперсий как центральных моментов второго порядка при обработке экспериментальных данных вышеизложенной методикой для насадочного блока массообменного аппарата (кольца Палля 25x25x1мм (Рисунки 4, 5)), и чисел Пекле продольной диффузии составили $\sigma^2=0,308-0,321$ и $Pe_l=4,989-5,249$, а диапазоны диаметральных дисперсий и чисел Пекле составили $\sigma^2=0,153-0,199$ и $Pe_l=8,911-11,962$. Также рассмотрим полученные данные в ходе обработки экспериментальных данных фильтрационного течения через слой адсорбента – цеолит СаА (гранулы $d=3-5$ мм). Диапазоны радиальных дисперсий и чисел Пекле при обработке экспериментальных данных полей потока газовой фазы через слой адсорбента (цеолит СаА $d=3-5$ мм (Рисунки 1, 2)) составили $\sigma^2=0,163-0,266$ и $Pe_l=6,347-11,169$, а диапазоны диаметральных дисперсий и чисел Пекле составили $\sigma^2=0,091-0,120$ и $Pe_l=15,533-20,965$.

Полученные расчетные зависимости C - и F -кривых отклика и дисперсии C -кривой (11-13) позволяют определять вид обеих кривых отклика и дисперсии σ^2 только по зависимости высоты столба манометрической жидкости в трубке Пито-Прандтля без расчета профиля скорости и знания численных значений средней скорости, плотностей газового, парового или жидкого потока и их расходов, а также плотности самой манометрической жидкости.

Таким образом, применение нового информационно-измерительного безиндикаторного метода определения параметров структуры потоков позволяет получать необходимые данные для моделирования массообменного технологического оборудования с учетом продольной диффузии [10-13], что особенно ценно при моделировании и расчете массообменных процессов ректификации, адсорбции, ионного обмена, десорбции, сушки, а также газо- и жидкофазных каталитических реакций.

Важной особенностью предлагаемого информационно-измерительного метода является доступность определения параметров структуры потоков в разрыве слоев по высоте рабочего объема массообменного аппарата (ректификационной колонны, абсорбера, адсорбера, десорбера, аппарата сушки, реактора и др.), что крайне важно для повышения точности математического моделирования массообменных систем и оптимизации режимов их работы. Типовые индикаторные методы такими функциональными возможностями не обладают либо имеют серьезные препятствующие ограничения.

Следует также отметить, что представленная новая информационно-измерительная методика определения параметров структуры потоков с легкостью может быть автоматизирована. Она может быть реализована как при помощи измерений полей потоков термоанемометрическими методами, методами измерения давлений, оптическими методами (лазерная доплеровская анемометрия) и любыми другими доступными методами измерений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Каган А.М. и др. *Контактные насадки промышленных тепломассообменных аппаратов*. Под ред. Лаптева. Казань: Отечество; 2013.
2. 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.
3. Голованчиков А.Б., Черикова К.В., Прохоренко Н.А. Математическое моделирование колпачковой тарелки в процессах ректификации. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021;9(1). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=924>. DOI: 10.26102/2310-6018/2021.32.1.022.

4. 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.
5. Мадышев И.Н, Дмитриева О.С., Дмитриев А.В. Перспективы использования струйно-барботажных контактных устройств для повышения энергоэффективности массообменных аппаратов. *Экология и промышленность России*. 2015;19(7):36–39.
6. Меренцов Н.А., Персидский А.В., Голованчиков А.Б. Идентификация математической модели управления абсорбционными аппаратами селективной очистки газовых выбросов. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2022;10(2). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1178>. DOI: 10.26102/2310-6018/2022.37.2.024.
7. 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). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=868>. DOI: 10.26102/2310-6018/2020.31.4.022.
8. 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.
9. 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.
10. Меренцов Н.А., Голованчиков А.Б., Персидский А.В., Лебедев В.Н. *Моделирование процессов управления в экологическом массообменном оборудовании*: монография. ВолгГТУ. Волгоград; 2020. 188 с.
11. Голованчиков А.Б., Прохоренко Н.А., Меренцов Н.А. *Моделирование структуры потока в насадочных и тарельчатых ректификационных колоннах*: монография. ВолгГТУ. Волгоград; 2020. 168 с.
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. Голованчиков А.Б., Залипаева О.А., Меренцов Н.А. *Моделирование сорбционных процессов с учётом структуры потока*: монография. ВолгГТУ. Волгоград; 2018. 128 с.
14. Левеншпиль О. *Инженерное оформление химических процессов*. Москва: Химия; 1969. 621 с.
15. Кафаров В.В. *Методы кибернетики в химии и химической технологии*. Москва: Химия; 1976. 464 с.
16. Закгейм А.Ю. *Введение в моделирование химико-технологических процессов*. Москва: Химия; 1982. 288 с.
17. Тябин Н.В., Голованчиков А.Б. *Методы кибернетики в реологии и химической технологии*. Волгоград: ВПИ; 1983. 104 с.
18. Голованчиков А.Б., Дулькина Н.А. *Моделирование структуры потоков в химических реакторах*. Волгоград: ВолгГТУ; 2009. 240 с.
19. Голованчиков А.Б., Воротнева С.Б. *Моделирование гидродинамических и тепловых процессов в двухтрубном теплообменнике*. Волгоград: ВолгГТУ; 2015.

- 160 с.
20. Голованчиков А.Б., Тябин Н.В., Брифф Е.А. Пат. РФ 1813214 Способ определения структуры потока газа в аппарате (1993).
 21. Меренцов Н.А., Голованчиков А.Б., Топилин М.В., Персидский А.В. Экспериментальное определение параметров структуры потока фильтрационных течений через слои гранул адсорбентов в экологическом массообменном оборудовании. *Экология и промышленность России*. 2022;26(11):42–47. DOI: 10.18412/1816-0395-2022-11-42-47.

REFERENCES

1. Kagan A.M. et al. *Contact nozzles for industrial heat and mass transfer devices*. Ed. Laptev A.G. Kazan, Otechestvo. 2013; 454 p. (In Russ.).
2. 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. (In Russ.).
3. Golovanchikov A.B., Cherkova 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). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=924>. DOI: 10.26102/2310-6018/2021.32.1.022. (In Russ.).
4. 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. (In Russ.).
5. Madyshev I.N., Dmitrieva O.S., Dmitriev A.V. 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. (In Russ.).
6. Merentsov N.A., Persidskiy A.V., Golovanchikov A.B. Identification of a mathematical model for controlling absorption devices for selective purification of gas emissions. *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii = Modeling, optimization and information technology*. 2022;10(2). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1178>. DOI: 10.26102/2310-6018/2022.37.2.024. (In Russ.).
7. 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):31. Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=868>. DOI: 10.26102/2310-6018/2020.31.4.022. (In Russ.).
8. Golovanchikov A.B., Merentsov N.A., Kachanov A.V.. Modeling the absorption process in a packed column operating in the emulsification mode. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and industry of Russia*. 2021;25(3):24-29. (In Russ.).
9. Merentsov N.A., Persidskiy A.V., Golovanchikov A.B. Control of Mass Exchange Processes during Sorption Treatment of Gas Emissions. *Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnyye tekhnologii = 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.).
10. Merentsov N.A., Golovanchikov A.B., Persidskiy A.V., Lebedev V.N. *Modeling of management processes in environmental mass exchange equipment: monograph*. VolgaGTU. Volgograd; 2020. 188 p. (In Russ.).

11. Golovanchikov A.B., Prokhorenko N.A., Merentsov N.A. *Modeling of the flow structure in packed and poppet rectification columns*: monograph. VolgaGTU. Volgograd; 2020. 168 p. (In Russ.).
12. Merentsov N.A., Golovanchikov A.B., Persidskiy A.V., Topilin M.V. *Modeling of control processes in oil and gas processing mass exchange equipment*: monograph. VolgaGTU. Volgograd; 2021. 212 p. (In Russ.).
13. Golovanchikov A.B., Zalipaeva O.A., Merentsov N.A. *Modeling of sorption processes taking into account the flow structure*: monograph. VolgaGTU. Volgograd; 2018. 128 p. (In Russ.).
14. Levenspil O. *Engineering design of chemical processes*. Moscow: Chemistry; 1969. 621 p. (In Russ.).
15. Kafarov V.V. *Methods of cybernetics in chemistry and chemical technology*. Moscow: Chemistry; 1976. 464 p. (In Russ.).
16. Zakheim A.Yu. *Introduction to modeling of chemical processes*. Moscow: Chemistry; 1982. 288 p. (In Russ.).
17. Tyabin N.V., Golovanchikov A.B. *Methods of cybernetics in rheology and chemical technology*. Volgograd: VPI; 1983. 104 p. (In Russ.).
18. Golovanchikov A.B., Dulkina N.A. *Modeling of flow structure in chemical reactors*. Volgograd: VolgaGTU; 2009. 240 p. (In Russ.).
19. Golovanchikov A.B., Vorotneva S.B. *Simulation of hydrodynamic and thermal processes in a double-tube heat exchanger*. Volgograd: VolgaGTU; 2015. 160 p. (In Russ.).
20. Golovanchikov A.B., Tyabin N.V., Briff E.A. Pat. RF 1813214 Method for Determining Gas Flow Structure in an Apparatus (1993) (In Russ.).
21. Merentsov N.A., Golovanchikov A.B., Topilin M.V., Persidskiy A.V. Experimental Determination Of Parameters Of Flow Structure Of Filtration Currents Through Layers Of Adsorbent Granules In Ecological Mass Exchange Equipment. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2022; 26(11):42–47. DOI: 10.18412/1816-0395-2022-11-42-47. (In Russ.).

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)

Nikolay Anatolievich Merentsov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Volgograd State Technical University, 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)

Aleksandr Borisovich Golovanchikov, Doctor of Technical Sciences, Professor at Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation.

Персидский Александр Владимирович, ведущий инженер – конструктор по электроавтоматике Федерального научно-производственного центра «Титан –

Aleksandr Vladimirovich Persidskiy, Lead Engineer – Electrical Automation Designer at Federal Scientific and Production Center “Titan – Barricady”, Volgograd, Russian Federation.

Баррикады», Волгоград, Российская
Федерация
e-mail: a-persidsky@yandex.ru
ORCID: [0000-0002-6960-9039](https://orcid.org/0000-0002-6960-9039)

Топилин Михаил Владимирович, Mikhail Vladimirovich Topilin, 1st category
специалист 1 категории, ЛУКОЙЛ- specialist at LUKOIL-Engineering
Инжиниринг ВолгоградНИПИморнефть, VolgogradNIPImorneft, the Volgograd branch,
филиал в Волгограде, Волгоград, Российская Volgograd, Russian Federation.
Федерация.
e-mail: topilinmik@gmail.com
ORCID: [0000-0002-3946-1950](https://orcid.org/0000-0002-3946-1950)

*Статья поступила в редакцию 12.12.2022; одобрена после рецензирования 09.02.2023;
принята к публикации 28.02.2023.*

*The article was submitted 12.12.2022; approved after reviewing 09.02.2023;
accepted for publication 28.02.2023.*