

Структурная модель движения газового потока в колонных аппаратах с насадкой

Александр Пушнов,

Екатерина Петрашова

*Московский государственный
университет инженерной экологии,
Старая Басманная, д. 21/4,
105066 Москва, Россия
E-mail: petrashova86@list.ru*

Предлагается поликанальная структурная модель движения газового потока в колонных аппаратах с нерегулярной насыпной насадкой. На базе предлагаемой модели, с помощью уравнений потери напора давления для двух выделенных специфических зон аппарата и при наличии информации о величине средней порозности слоя насадки в этих зонах, получены соотношения, оценивающие среднеинтегральные удельные расходы потока для зон аппарата.

Ключевые слова: насадка, гидравлическое сопротивление, аэродинамика, аппарат с насадкой, поля скоростей, порозность

1. ВВЕДЕНИЕ

Возможность учета реальной гидродинамической обстановки в слое насадки напрямую связана с интенсификацией процессов тепло- и массообмена в колонных аппаратах. Важное значение имеет анализ структурных и газодинамических особенностей вблизи стенок аппарата, где из-за повышенной рыхлости укладки элементов насадки возникают условия для байпасирования определенной части потока, оно может негативно сказаться на технологическом процессе. Учет реальной газодинамической обстановки в слое насадки при выполнении технологических расчетов насадочных аппаратов предлагается осуществить с помощью поликанальной структурной модели движения газового потока. Предлагаемая модель базируется на исследовании реальной структуры слоя насыпной насадки, загруженной в колонный аппарат.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СЛОЯ НАСАДКИ

Группа авторов [1] предложили полуэмпирическую формулу для расчета средней порозности слоя шаров, цилиндров и колец Рашига. При этом в работе [1] вся площадь аппарата разбивается на две зоны – пристенную со средней интегральной порозностью и зону ядра (центральную зону). Ширина пристенной зоны принимается равной половине диаметра частицы. Экспериментально полученное в работе [2] распределение порозности слоя

насадки колец Рашига размером $5 \times 5 \times 1$ мм в пристенной области аппарата диаметром 40 мм ($D/d = 8$) имеет вид синусоиды, затухающей от стенки аппарата к его центру (рис. 1). Из графика, представленного на рис. 1, видно, что пристенная зона с более рыхлой укладкой элементов насадки занимает 0,6 диаметра насадки – d ($\delta_{gmt} = 0,6 d$).

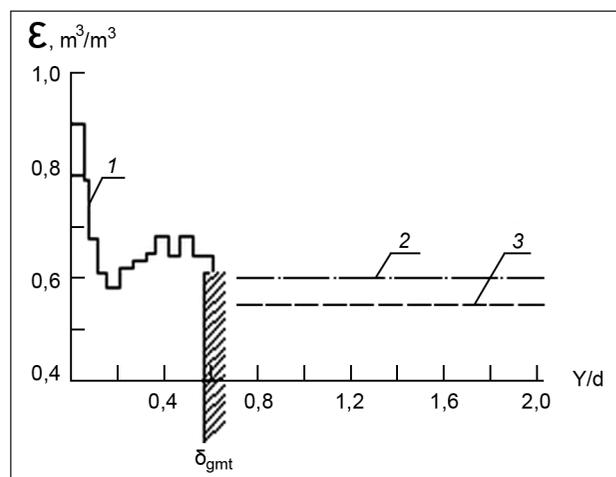


Рис. 1. Распределение порозности по поперечному сечению аппарата с насадкой в виде медных колец Рашига.

Диаметр аппарата $D = 40$ мм, размер колец $5 \times 5 \times 1$ мм ($D/d = 8$).

Обозначения: 1 – кривая локальной порозности вблизи стенки аппарата; 2 – $\epsilon_0 = 0,6$ – средняя порозность по аппарату; 3 – ϵ_α – порозность в центральной части аппарата; δ_{gmt} – ширина геометрической пристенной области

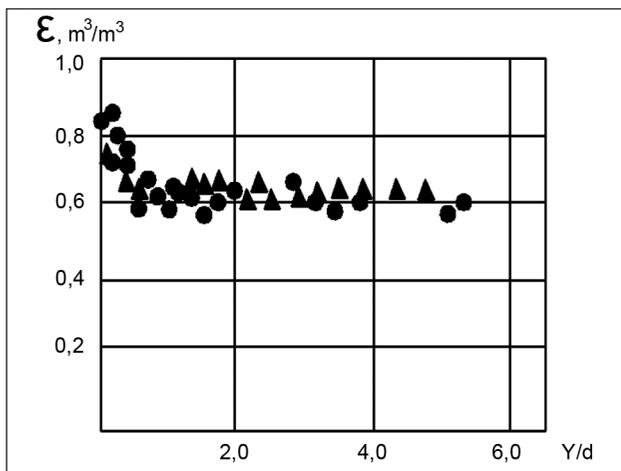


Рис. 2. Зависимость распределения порозности по поперечному сечению аппарата с керамической насадкой в виде колец Рашига и седла Берля.

● – седла Берля; ▲ – кольца Рашига

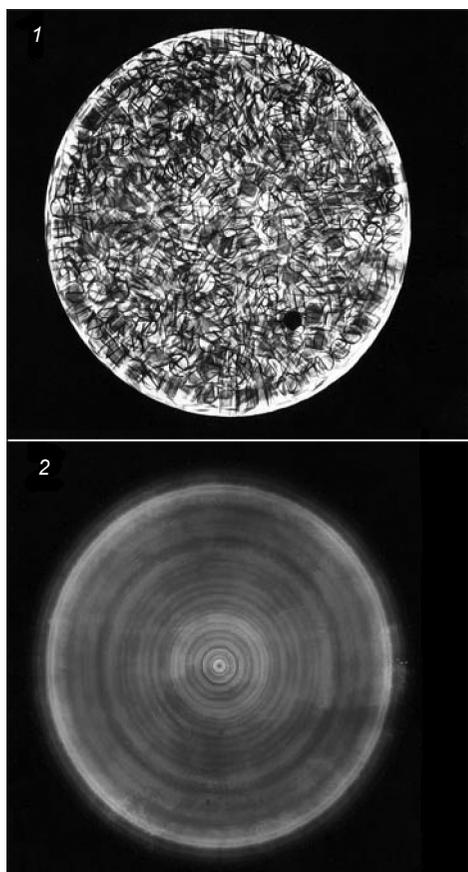


Рис. 3. Рентгенограммы слоя металлической насадки типа N1. 1 – рентгенограмма, полученная без вращения пленки; 2 – рентгенограмма, полученная с вращением пленки

На рис. 2 представлены опытные данные работы [3] по распределению порозности слоя насадки из колец Рашига и седла Берля из керамики.

На рис. 3 приведены опытные данные по распределению локальной порозности, полученные методом рентгенографии в аппарате диаметром 120 мм с метал-

лическими кольцевыми насадками типа N1 размером $10 \times 10 \times 1$ мм. Методика измерения локальной порозности методом рентгенографии изложена в работе [4]. Внешний вид кольцевой насадки типа N1 представлен на рис. 4. Высота слоя насадки в наших опытах составляла $H = 90$ мм. На рентгенограмме слоя насадки хорошо видны коаксиальные кольца различной темноты, соответствующие различным значениям локальной порозности (рис. 3).

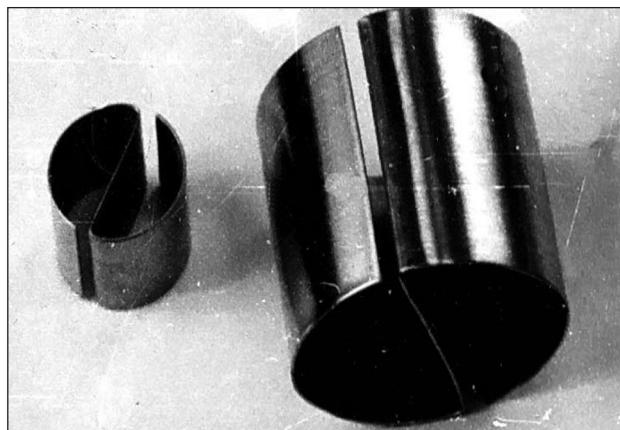


Рис. 4. Внешний вид кольцевой насадки типа N1

3. МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ГАЗОВОГО ПОТОКА В СЛОЕ НАСАДКИ

Из анализа результатов опытов, представленных на рис. 3 (рентгенограммы, полученной с вращением пленки), следует, что структуру слоя насадки в цилиндрическом аппарате вполне можно считать совокупностью квазиканалов, имеющих различную порозность. При этом движение газового потока в слое нерегулярной насадки обоснованно можно представить как движение через совокупность коаксиальных труб с различным гидравлическим сопротивлением, обусловленным различными величинами средней порозности и коэффициента извилистости. Для каждой характерной зоны слоя насадки, имеющей данную величину среднеинтегральной порозности данной зоны, соответствует локальное значение среднеинтегральной скорости.

Все это дает основание ввести для колонных аппаратов с насадкой локальные числа Рейнольдса, для каждой из характерных зон аппарата с насадкой.

Предлагаемая поликанальная структурная модель аппарата с насадкой представлена на рис. 5.

Как видно из представленной схемы, выделяются две характерные зоны – центральная и пристенная с различной структурой укладки элементов насадки. Каждая из выделенных зон имеет свою величину среднеинтегральной порозности – ε_{pz} и ε_{cz} и, соответственно, величину среднеинтегрального расхода – W_{pz} и W_{cz} и соответствующие локальные числа Рейнольдса – Re_{decz} и Re_{depz} .

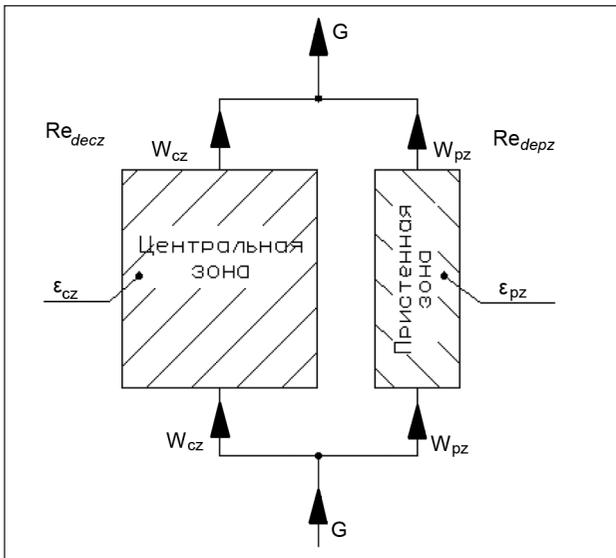


Рис. 5. Поликанальная структурная модель аппарата с насадкой

При этом общий расход G определяется:

$$G = W_{cz} + W_{pz} \quad (1)$$

Локальные числа Рейнольдса, для каждой из характерных зон, определяются:

- для центральной зоны

$$Re_{decz} = \frac{W_0 \cdot decz}{\vartheta \cdot \varepsilon} \quad (2)$$

- для пристенной зоны

$$Re_{depz} = \frac{W_0 \cdot depz}{\vartheta \cdot \varepsilon} \quad (3)$$

Схема движения потока газа в двух характерных зонах иллюстрируется рис. 6.

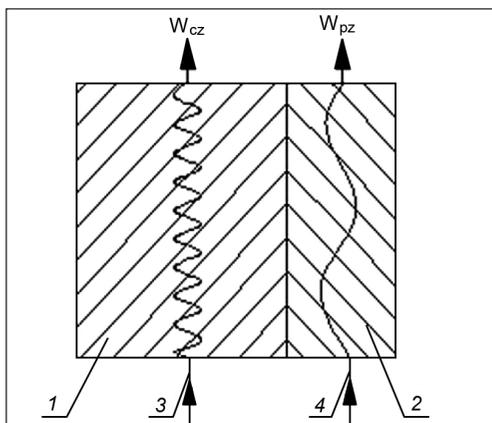


Рис. 6. Схема движения газового потока в различных зонах аппарата с насадкой.

1 – центральная зона; 2 – пристенная зона; 3 – траектория движения газового потока в центральной зоне аппарата с насадкой; 4 – траектория движения газового потока в пристенной зоне аппарата с насадкой

Вследствие различной порозности движение газового потока в характерных зонах аппарата с насадкой определяется различной величиной извилистости. Численно величина коэффициента извилистости k может быть определена из соотношения вида [5]:

$$k = (1 + S_m \cdot N^{\frac{2}{3}})^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Опытные значения величины S_m для различных насадочных тел приведены в работе [5].

Поликанальная структурная модель движения газового потока в колонных аппаратах с нерегулярной насадкой представлена на рис. 7. Ширина геометрической пристенной зоны – δ_{gmt} меньше по сравнению с гидродинамической пристенной зоной – δ_{gdm} за счет эффекта растекания газового потока по фронту слоя насадки. Этот эффект относительно аппаратов с зернистым слоем подробно обсуждается в работах [4, 6].

4. ПРОФИЛИ СКОРОСТИ В СЛОЕ НЕРЕГУЛЯРНОЙ НАСАДКИ

На рис. 8–10 представлены экспериментальные профили скорости, полученные авторами в слое насадок N1, колец MS и колец Рашига, и их модельная аппроксимация. Там же показана процедура усреднения удельных расходов W_{pz} и W_{cz} методом графического интегрирования по выделенным характерным зонам аппарата с насадкой в соответствии с предлагаемой поликанальной моделью движения газового потока в слое насыпной насадки. Из результатов графического интегрирования видно, что пристенная область в аппаратах с исследованными насадками находится в пределах от 2 де до 2,5 де.

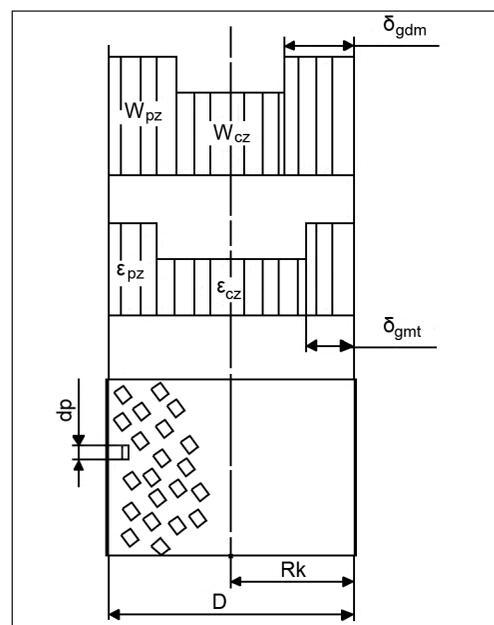


Рис. 7. Поликанальная структурная модель движения газового потока в колонных аппаратах с нерегулярной насадкой

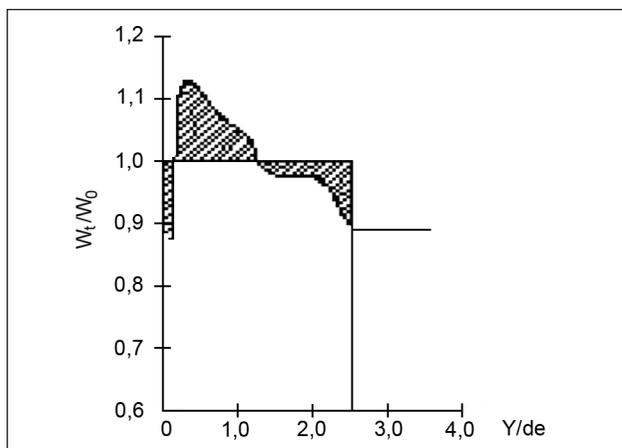


Рис. 8. Модель профиля скорости в аппарате с насадкой в виде колец MS. Величина среднеинтегральных удельных расходов по отдельным зонам: $W_{\alpha} = 0,89$, $W_{\beta} = 1,0$

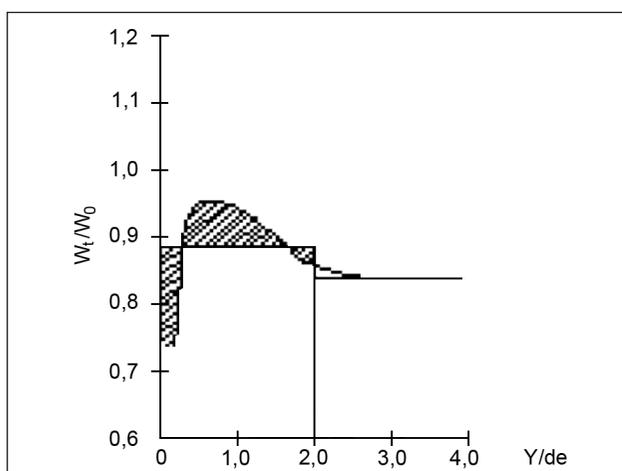


Рис. 9. Модель профиля скорости в аппарате с насадкой в виде колец Рашига. Величина среднеинтегральных удельных расходов по отдельным зонам: $W_{\alpha} = 0,93$, $W_{\beta} = 0,99$

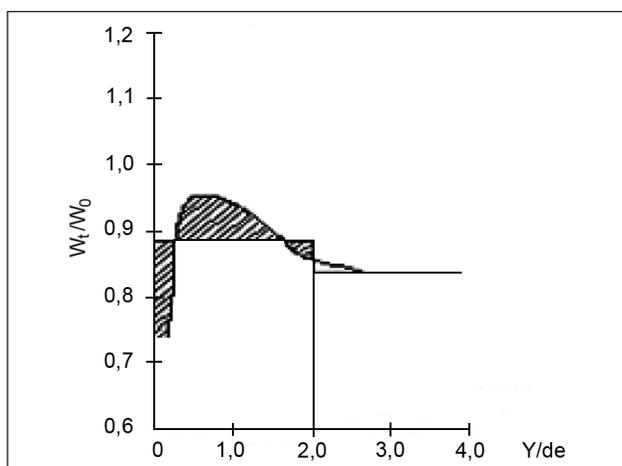


Рис. 10. Модель профиля скорости в аппарате с насадкой в виде колец N1. Величина среднеинтегральных удельных расходов по отдельным зонам: $W_{\alpha} = 0,84$, $W_{\beta} = 0,88$

5. ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ ПОТЕРЕЙ НАПОРА В СЛОЕ НАСАДКИ И ПОЛЕМ СКОРОСТЕЙ ГАЗОВОГО ПОТОКА В АППАРАТЕ

В работе [7], где анализируется влияние неоднородности порозности зернистого слоя на газораспределение в многотрубных аппаратах на основании известных соотношений для расчета величины потери напора – ΔP в зернистом слое, получено следующее соотношение, устанавливающее взаимосвязь между скоростью потока и порозностью слоя в двух параллельно работающих трубках с различной величиной порозности зернистого слоя в них:

$$\frac{W_1}{W_2} = \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}\right)^2 \cdot \left(\frac{1-\varepsilon_2}{1-\varepsilon_1}\right)^2. \quad (5)$$

Здесь индексы 1, 2 относятся к двум различным трубкам с зернистым слоем.

Из формулы (3) следует, что неоднородность порозности зернистого слоя весьма существенно влияет на газораспределение в отдельных трубках. Так, изменение отношения $\varepsilon_1 / \varepsilon_2$ всего на 5 % приводит к изменению отношения W_1 / W_2 на 25 %.

Используя идеи, развиваемые в работах [2, 4, 7–9], на базе предлагаемой нами поликанальной структурной модели движения потока в аппаратах с нерегулярной насадкой можно получить расчетные соотношения для оценки реального распределения среднеинтегральных удельных расходов газового потока в двух характерных зонах аппаратов с насадкой. Воспользуемся для этой цели, например, уравнением для расчета потери напора в зернистом слое, предложенным Гельпериним и Каганом [10], для зерен различной формы:

$$Eu_m = \frac{100}{Re_{de}} + 0,9. \quad (6)$$

Модифицированный критерий Эйлера и критерий Рейнольдса, отнесенный к эквивалентному диаметру канала, рассчитываются по формулам:

$$Eu_m = \frac{\Delta P}{H} \cdot \frac{\varepsilon^2}{\rho \cdot W_0^2 \cdot S}, \quad (7)$$

$$Re_{de} = \frac{W_0 \cdot de}{\vartheta \cdot \varepsilon}, \quad (8)$$

$$de = \frac{4\varepsilon}{S}. \quad (9)$$

По аналогии с неподвижным зернистым слоем удельную поверхность насадки можно рассчитать по формуле:

$$S = \varphi (1-\varepsilon). \quad (10)$$

Для определения фактора формы φ воспользуемся для простоты вывода шаровой насадкой, у которой фактор формы рассчитывается по формуле:

$$\Phi = \frac{6}{de}. \quad (11)$$

После преобразований выражение (6) с учетом формулы (11) имеет вид:

$$\frac{\Delta P}{H} = 900 \frac{\vartheta \cdot \rho \cdot (1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^2} \cdot W_0 \cdot \left[1 + 0,006 \frac{W_0 \cdot de}{\vartheta \cdot (1-\varepsilon)} \right]. \quad (12)$$

В соответствии с предложенной поликанальной моделью для двух выделенных характерных зон аппарата с насадкой пристенной (pz) и центральной (cz) вследствие неразрывности потока имеет место следующее равенство:

$$\Delta P_{pz} = \Delta P_{cz} = \Delta P. \quad (13)$$

С учетом равенства (13) уравнение (12) для каждой из выделенных двух характерных зон аппарата с насадкой будет иметь следующий вид:

- в пристенной зоне (pz):

$$\frac{\Delta P}{H} = 900 \frac{\vartheta \cdot \rho \cdot (1-\varepsilon_{pz})^2}{\varepsilon_{pz}^2 \cdot de^2} \cdot W_{pz} \cdot \left[1 + 0,006 \frac{W_{pz} \cdot de}{\vartheta \cdot (1-\varepsilon_{pz})} \right]; \quad (14)$$

- в центральной зоне (cz):

$$\frac{\Delta P}{H} = 900 \frac{\vartheta \cdot \rho \cdot (1-\varepsilon_{cz})^2}{\varepsilon_{cz}^2 \cdot de^2} \cdot W_{cz} \cdot \left[1 + 0,006 \frac{W_{cz} \cdot de}{\vartheta \cdot (1-\varepsilon_{cz})} \right]. \quad (15)$$

Учитывая, что $Re_{de} = \frac{W_0 \cdot de}{\vartheta}$, после соответствующих алгебраических преобразований уравнений (14) и (15) получаем распределение скоростей:

$$\frac{W_{pz}}{W_{cz}} = \left[\frac{(1-\varepsilon_{cz}) \cdot \varepsilon_{pz}}{(1-\varepsilon_{pz}) \cdot \varepsilon_{cz}} \right]^2 \cdot \frac{1 + 0,006 Re_{de} \cdot \frac{1}{(1-\varepsilon_{cz})} \cdot \frac{W_{cz}}{W_0}}{1 + 0,006 Re_{de} \cdot \frac{1}{(1-\varepsilon_{pz})} \cdot \frac{W_{pz}}{W_0}}. \quad (16)$$

При $Re_{de} \rightarrow 0$ вторым членом правой части уравнения (16) можно пренебречь. В этом случае получим выражение, аналогичное полученному в [7] для двух параллельно работающих трубок с различной порозностью зернистого слоя в них, а именно:

$$\frac{W_{pz}}{W_{cz}} = \left[\frac{(1-\varepsilon_{cz}) \cdot \varepsilon_{pz}}{(1-\varepsilon_{pz}) \cdot \varepsilon_{cz}} \right]^2. \quad (17)$$

Полученное уравнение (17) позволяет расчетным путем оценить величину соотношения реальных среднеинтегральных удельных расходов газового потока в пристенной и центральной зонах аппарата с нерегулярной насыпной насадкой любого типа по известным величинам средней порозности в указанных зонах.

Для практического использования уравнения (17) необходима информация по ε_{pz} и ε_{cz} . Что касается величины ε_{cz} , то для аппаратов, в которых отношение $D/d > 8$ (10) можно принимать $\varepsilon_{cz} \approx \varepsilon_0$ [12]. Близость величин ε_{cz} и ε_0 хорошо иллюстрируется опытными данными Sonntag [2], приведенными на рис. 1.

При определении средних по всему аппарату значений ε_0 можно использовать эмпирическую формулу Аэрова [11]:

$$\varepsilon_0 = 0,39 + \frac{0,068}{D/d} + \frac{0,542}{(D/d)^2}. \quad (18)$$

Опытные данные по ε_{pz} для насадок шаровой формы приводятся в работе [6]. Там же показано, что в диапазоне отношений D/d от 5 до 22 наибольшие отклонения величины ε_{pz} от среднего значения в аппарате – ε_0 для слоя насадки шаровой формы приходится на область аппарата шириной (1–2) de насадки от стенки, т. е. на область δ_{gmt} . Ширина гидродинамической пристенной зоны с повышенным удельным расходом газового потока для шаровых элементов в работе [4] оценивается в (2–3) de насадки от стенки аппарата. Выше было показано (см. рис. 8–10), что в слое насыпной насадки кольцевой формы ширина пристенной зоны составляет (2–2,5) de .

5. ВЫВОДЫ

На основе анализа закономерностей геометрической структуры аппаратов с насадкой, а также распределения полей скорости газового потока в насадочных слоях предложена поликанальная структурная модель движения газового потока в колонных аппаратах с насыпной насадкой. На основании обработки собственных экспериментальных данных по полям скорости в слое насадки трех типов N1, MS и колец Рашига произведена оценка ширины пристенной зоны. На базе разработанной поликанальной структурной модели получены соотношения, позволяющие определить среднеинтегральные удельные расходы газового потока для выделенных зон аппарата. Предложено использовать локальные числа Рейнольдса для оценки аэродинамической обстановки в характерных зонах аппарата с насадкой.

Условные обозначения

- S_m – средняя площадь элемента насадки, m^2 ;
- N – число элементов насадки в единице объема слоя, m^{-3} ;
- Eu_m – модифицированный критерий Эйлера;
- Re_{de} – критерий Рейнольдса, отнесенный к эквивалентному диаметру канала;
- de – эквивалентный диаметр канала;
- ρ – плотность газа, $kg \cdot c^2/m^4$;
- ϑ – кинематическая вязкость газа, m^2/c ;
- ε – порозность, m^3/m^3 ;
- $S = \Phi \cdot (1-\varepsilon)$ – удельная поверхность зерен, m^2/m^3 ;
- D – диаметр аппарата, m ;
- d – диаметр насадки, m ;
- Φ – фактор формы, m^{-1} .

Поступило 10 04 2010

Принято 11 10 2010

Литература

1. Сосна М. Х., Мейтин И. В., Завелев Е. Д., Семенов В. П. Расчет средней порозности зернистого слоя. *Химическая промышленность*. 1976. № 7. С. 557–558.
2. Sonntag G. Einfluss des Luckenvolumens auf den Druckverlust in gasdurchstromten Fullkorpersaule. *Chemie-Ing.-Techn.* 1960. N 5. P. 317–329.
3. Roblee L. H. S., Baird R. M., Tierney J. W. Radial porosity variations in packed beds. *American Institute of Chemical Engineering Journal*. 1958. Vol. 4. N 4. P. 460–464.
4. Пушинов А. С. *Газораспределение в контактных и адсорбционных аппаратах с неподвижным зернистым слоем*. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва: ГИАП, 1987. 150 с.
5. Сергеев С. П. *Аэродинамика и равномерное распределение потока в реакторах с неподвижным зернистым слоем. Аэродинамика химических реакторов с неподвижными слоями катализатора*. Новосибирск: Наука, 1985. С. 131–143.
6. Пушинов А. С., Наумов Ю. Б., Каган А. М., Гельперин И. И., Пищик Л. Я. Влияние структуры укладки зерен шаровой формы в цилиндрических аппаратах на газораспределение в них. *Теплоэнергетика*. 1986. № 8. С. 70–72.
7. Пушинов А. С. Влияние неоднородности порозности зернистого слоя на газораспределение в многотрубных аппаратах. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2005. № 8. С. 9–10.
8. Наумов Ю. Б., Гельперин И. И., Пушинов А. С., Новикова Н. И., Новиков Э. А., Каган А. М. Двухзонная модель аппаратов с неподвижным зернистым слоем. *Химическая промышленность*. 1986. № 8. С. 463–465.
9. Пушинов А. С., Беренгартен М. Г., Рябушенко А. С. Возможности совершенствования аэродинамики градиентен. *Химическая промышленность*. 2007. Т. 84. № 8. С. 382–402.
10. Гельперин И. И., Каган А. М. Развитие аэродинамических исследований неподвижного зернистого слоя. *Химическая промышленность*. 1984. № 12. С. 741–746.
11. Аэров М. Э., Тодес О. М., Наринский Д. А. *Аппараты со стационарным зернистым слоем*. Ленинград: Химия, 1979. 176 с.

Aleksandr Pušnov, Ekaterina Petrašova

STRUKTŪRINIS DUJŲ SRAUTO JUDĖJIMO KOLONINIULOSE SU ĮKROVA APARATULOSE MODELIS
S a n t r a u k a

Pateikiamas daugiakanalės struktūros dujų srauto judėjimo koloniniuose aparatuose su nereguliaria įkrova modelis. Remiantis pateikiamu modeliu, panaudojant skysčio slėgio praradimo lygtis dviejose specifinėse aparato su įkrova zonose bei žinant įkrovos porėtumo juse dydį, gautos priklausomybės, įvertinančios vidutinį integralinį dujų debetą atskirose aparato zonose.

Raktažodžiai: įkrova, hidraulinis pasipriešinimas, aerodinamika, aparatas su įkrova, greičių laukas, porėtumas

Alexandr Pushnov, Ekaterina Petrashova

STRUCTURAL MODEL OF GAS STREAM MOVEMENT IN COLUMNED DEVICES WITH PACKING
S u m m a r y

A polychannel structural model of gas stream movement in columned devices with an irregular bulk packing is offered. On the basis of this model, using the pressure loss equations in two specific zones of the device with packing in the presence of information on the size of the average fenestration packing layer in the specified zones, the parities are obtained allowing to estimate the mean integral specific expenditures of gas stream for the allocated zones of the device with packing.

Key words: packing, hydraulic resistance, aerodynamics, the device with packing, fields of speeds, fenestration