

Тепло- и массообменные испытания миникольцевых насадок из полимерного материала

К.т.н. Соколов А.С., к.т.н. Пушнов А.С., к.т.н. доц. Сидельников И.И.,
к.т.н. Толстикова А.В., Курбатова Е.А.
Университет машиностроения,
8-926-737-17-97, sasghm@mail.ru,
8-916-678-25-33, kurbatova-elizabeta@mail.ru

Аннотация. Проведено экспериментальное исследование миникольцевой насадки типа МКН. Показано, что она может быть полезной в ряде колонных тепло- и массообменных аппаратов.

Ключевые слова: насадочные аппараты, теплообмен, массообмен, миникольцевая насадка

Введение

Анализ насадочных колонн в сравнении с тарельчатыми показал [1, 2], что насадочные колонны имеют более низкое гидравлическое сопротивление в расчете на высоту единиц переноса, так как тарелки работают в затопленном режиме, и газу, проходящему через колонну, приходится преодолевать сопротивление, равное суммарному давлению столбов жидкости на всех тарелках. Кроме того, насадочные колонны, как известно, могут работать при более высоких нагрузках по газу и жидкости. В тарельчатых колоннах скорость газа ограничена повышением межтарельчатого уноса жидкости, который при больших скоростях значительно снижает эффективность разделения [3, 4]. Ограничение нагрузок по жидкости в тарельчатых колоннах обуславливается пропускной способностью переливов, скорость жидкости в которых не должна превышать значений, при которых начинается захват газа. Повышение жидкостной нагрузки возможно путем увеличения площади тарелок и, как следствие, пропускной способности по газу. В насадочных колоннах скорости газа при атмосферном давлении могут достигать 3,5 м/с, что позволяет значительно уменьшить диаметр насадочных колонн.

Насадочные колонны лишены присущей тарельчатым чувствительности к перекосам, что обеспечивает жесткие требования к горизонтальности последних при монтаже, и менее чувствительны к загрязнениям, вызывающим забивку отверстий в тарелках [1].

По сравнению с тарельчатыми колоннами насадочные имеют более простую конструкцию. Кроме того, насадочные колонны менее металлоемки, а стоимость их изготовления ниже [2].

Вышеперечисленные преимущества, а также создание новых эффективных насадок позволяют повысить конкурентоспособность насадочных колонн по сравнению с колоннами тарельчатого типа.

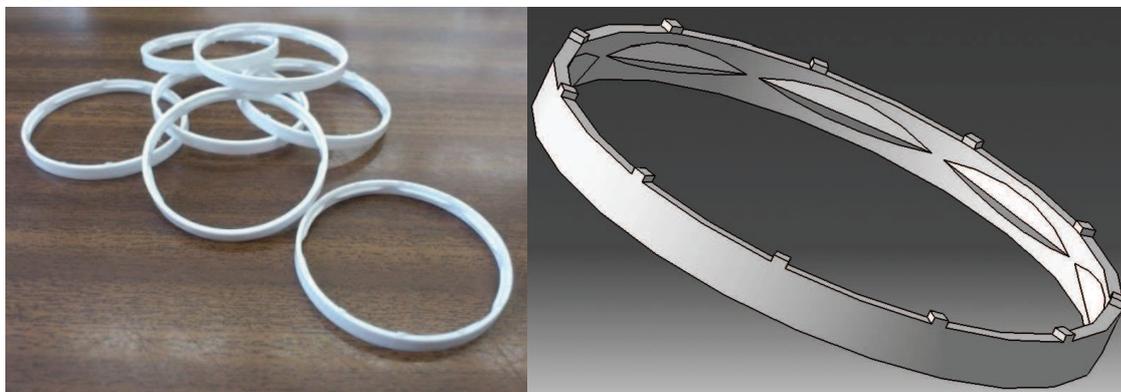


Рисунок 1. Общий вид исследуемой новой миникольцевой насадки

Основные характеристики исследуемой насадки

Нами предложена и исследована изображённая на рисунке 1 миникольцевая насадка типа МКН, элементы которой представляют собой кольцо. Внутренняя поверхность колец имеет прерывистое ребро, а на одном торце элемента насадки равномерно расположены небольшие прямоугольные выступы.

Исследуемая конструкция миникольцевой насадки типа МКН представляет собой кольцо диаметром 40 мм, высотой 3,5 мм, толщиной 1,5 мм. Высота торцевых выступов составляла 0,3 мм. Соотношение высоты элемента насадки к ее диаметру: $H/D = 0,0875$.

Характеристики исследуемой насадки в сравнении с широко распространенными в промышленности кольцами Рашига [1], миникольцами CMR [2] и насадками Ralu Ring [3] близких типоразмеров приведены в таблице 1. Из таблицы 1 видно, что исследуемая миникольцевая насадка имеет хорошо развитую удельную поверхность при достаточно высокой порозности слоя насадки.

Таблица 1.

Основные характеристики исследуемой миникольцевой насадки типа МКН в сравнении с промышленными насадками

Тип	Материал	Габаритные размеры элементов насадки, мм	Удельная поверхность, $a, \text{м}^2/\text{м}^3$	Порозность, $\varepsilon, \text{м}^3/\text{м}^3$	Насыпной вес, $\text{кг}/\text{м}^3$	Кол-во штук, шт/ м^3
Исследуемая насадка типа МКН	Полиэтилен	40x3,5x1	180	0,923	72	150000
Миникольцевая насадка CMR	Полиэтилен	38x19x1	132,5	0,91	57,5	27200
Кольца Рашига	Полиэтилен	38x38x1,2	165	0,9	99	14800
Ralu Ring	Полиэтилен	38	150	0,95	–	–

К важным преимуществам предлагаемой конструкции насадки типа МКН следует отнести простоту изготовления, относительно большую удельную поверхность, а также способность этой насадки к преимущественно горизонтальной самоориентации элементов в аппарате при загрузке «внавал». Последнее обеспечивает лучшую омываемость всей поверхности элементов насадки жидкой и газовой фазами из-за отсутствия застойных зон и тем самым интенсификацию процесса тепло- и массообмена между контактирующими фазами в широком диапазоне нагрузок по жидкости и газу при одновременно малом удельном перепаде давления на единицу высоты слоя насадки.

Описание опытного стенда

На опытном стенде мы исследовали процесс охлаждения теплого атмосферного воздуха холодной водой в колонне, заполненной насадками типа МКН. Во время опытов использовали систему: вода – воздух.

Тепло- и массообменные испытания проводили на установке, схема которой приведена на рисунке 2.

В колонне осуществлялось противоточное движение фаз. Воздух в аппарат подавался снизу. Основной аппарат установки – цилиндрическая колонна 1, выполненная из стеклянных царг внутренним диаметром $D=200$ мм. В верхней части колонны был установлен брызгоуловитель 3. Нижняя часть колонны была оснащена съемной опорно-распределительной решеткой провального типа, на которую загружалась исследуемая насадка 2.

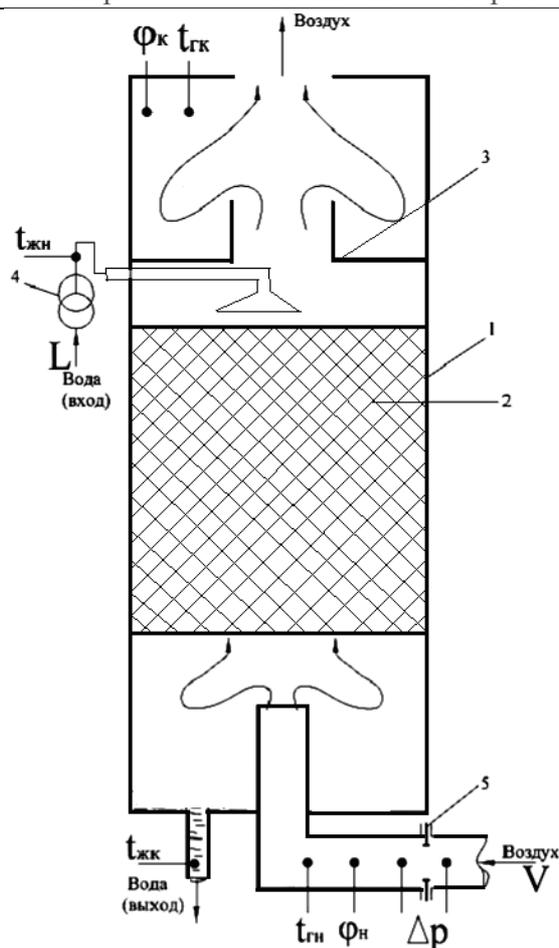


Рисунок 2. Схема опытного стенда: 1 – цилиндрическая обечайка; 2 – насадка типа МКН; 3 – брызгоотбойник; 4 – счетчик расхода воды; 5 – измерительная диафрагма

Методика массообменных испытаний

Для стационарного процесса расход компонента переносимого из одной фазы в другую определяется из основного уравнения массопередачи [8]:

$$M = K_{ум} \Delta y_{ср} F, \quad (1)$$

где M – расход переносимого из фазы в фазу компонента, кг/ч;

$\Delta y_{ср}$ – средняя движущая сила процесса;

F – поверхность контакта фаз, м²;

$K_{ум}$ – коэффициент массопередачи, характеризующий скорость переноса компонента из одной фазы в другую и являющийся величиной обратной общему сопротивлению процесса массопередачи $R_{ум}$, т.е.:

$$R_{ум} = 1 / K_{ум}.$$

Общее сопротивление процесса переноса компонента из одной фазы в другую фазу $R_{ум}$ складывается из сопротивлений, участвующих в массопередаче соответствующих фаз – газовой $r_{1м}$ и жидкой $r_{2м}$ [8]:

$$R_{ум} = r_{1м} + r_{2м}, \quad (2)$$

Уравнение (2) может быть представлено в виде [8]:

$$\frac{1}{K_{\text{ум}}} = \frac{1}{\beta_y} + \frac{A_p}{\beta_x}, \quad (3)$$

где $R_{\text{ум}} = 1/K_{\text{ум}}$, $r_{1\text{м}} = 1/\beta_y$, $r_{2\text{м}} = A_p/\beta_x$;

β_y – коэффициент массоотдачи в газовой фазе, характеризующий скорость переноса в ней компонента;

β_x – коэффициент массоотдачи в жидкой фазе, характеризующий скорость переноса в ней компонента;

A_p – коэффициент уравнения равновесия $y_p = A_p x$;

y_p и x – концентрации компонента в газовой и жидкой фазах, находящихся в равновесии.

В нашем случае для системы воздух – вода определяемый $K_{\text{ум}}$ при осуществлении процесса испарения воды в воздух равен коэффициенту массопередачи в газовой фазе β_y , так как диффузионное сопротивление в жидкой фазе равно нулю. Заметим, что изложенный способ определения β_y широко используется при обследовании контактных устройств [8].

Экспериментально $K_{\text{ум}}$ находят из уравнения (1), в котором величина F заменяется на F_{δ} (суммарную геометрическую площадь поверхности насадки) из-за практической сложности точного определения площади поверхности контакта фаз [9]:

$$K_{\text{ум}} = \frac{M}{\Delta y_{\text{ср}} F_{\delta}}, \quad (4)$$

Средняя движущая сила процесса $\Delta y_{\text{ср}}$ определяется по уравнению [8]:

$$\Delta y_{\text{ср}} = \frac{(y_{\text{рн}} - y_{\text{н}}) - (y_{\text{рк}} - y_{\text{к}})}{\ln \frac{y_{\text{рн}} - y_{\text{н}}}{y_{\text{рк}} - y_{\text{к}}}}, \quad (5)$$

где $y_{\text{н}}$ и $y_{\text{к}}$ – концентрации влаги в воздухе на входе в аппарат и на выходе из него, кг влаги/кг сухого воздуха;

$y_{\text{р}}$ – концентрация влаги в воздухе, предельно насыщенного водяными парами (условие равновесия) при данной температуре, кг влаги/кг сухого воздуха;

M – расход компонента, кг влаги/ч.

Методика теплообменных испытаний

Как известно, при контакте двух сред (в данном случае воздух – вода), кроме переноса массы, происходит перенос тепла от среды с большей температурой к среде с меньшей температурой. Тепло тратится также и на обеспечение переноса влаги (испарение) в результате массообмена между фазами. При стационарном процессе теплопередачи количество передаваемого тепла определяется по основному уравнению теплопередачи [10]:

$$Q = K_{\text{т}} \Delta t_{\text{ср}} F, \quad (6)$$

где Q – количество тепла, передаваемого от одной среды к другой;

$\Delta t_{\text{ср}}$ – средняя разность температур сред, участвующих в теплопередаче (движущая сила);

F – поверхность контакта сред;

$K_{\text{т}}$ – коэффициент теплопередачи, характеризующийся величиной, обратной общему сопротивлению процессу теплопередачи $R_{\text{т}}$.

Общее сопротивление процессу теплопередачи $R_{\text{т}}$ складывается из сопротивлений, участвующих в теплопередаче сред. В нашем случае:

$$R_{\text{т}} = r_{\text{г}} + r_{\text{ж}}, \quad (7)$$

Уравнение (7) можно представить в виде:

$$\frac{1}{K_T} = \frac{1}{\alpha_r} + \frac{1}{\alpha_{ж}}, \quad (8)$$

где $R_T = \frac{1}{K_T}$; $r_r = \frac{1}{\alpha_r}$; $r_{ж} = \frac{1}{\alpha_{ж}}$;

α_r – коэффициент теплоотдачи в газовой фазе, характеризующий скорость переноса тепла в газе;

$\alpha_{ж}$ – коэффициент теплоотдачи в жидкой фазе, характеризующий скорость переноса тепла в жидкости.

Для использованной в наших опытах системы воздух – вода $\alpha_{ж}$ в среднем в 15 – 20 раз больше значения α_r . Следовательно, $K_T \cong \alpha_r$. Таким образом, основное сопротивление процессу теплопередачи в рассматриваемом случае сосредоточено в газовой фазе воздуха.

Экспериментально значение коэффициента теплопередачи K_T можно определить на основе уравнения (6):

$$K_T = \frac{Q}{\Delta t_{\text{ср}} F_6}, \quad (9)$$

где истинная поверхность теплообмена F заменяется на F_6 (суммарная площадь поверхности насадки) из-за практической сложности точного определения площади поверхности контакта фаз.

Среднюю разность температур определяли по известному уравнению [8]:

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_m}{\ln \frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}}, \quad (1)$$

где Δt_6 и Δt_m – разности температур (соответственно, большая и меньшая) между теплоносителями на входе и выходе массообменного аппарата, °С;

Для вычисления коэффициента теплопередачи рассчитывали следующие величины:

1. Влагосодержание воздуха на входе в колонну – y_n , на выходе – y_k , $y_{рн}$ и $y_{рк}$ – равновесных влагосодержаний воздуха, соответственно на входе и выходе.

Влагосодержание воздуха y определяли по уравнению [9]:

$$y = 0,622 \frac{\varphi P_c}{B - \varphi P_c}, \quad (11)$$

где φ – относительная влажность воздуха, равная отношению фактической массы водяных паров в воздухе к максимально возможной (равновесной) при данной температуре и давлении;

P_c – давление насыщенных водяных паров, определяли по температуре воздуха, мм. рт. ст.;

B – атмосферное барометрическое давление, мм. рт. ст.

По уравнению (11) для каждого проведенного опыта определяли:

y_n – влагосодержание воздуха на входе, кг влаги/кг сухого воздуха;

y_k – влагосодержание воздуха на выходе, кг влаги/кг сухого воздуха;

$y_{рн}$ и $y_{рк}$ – соответственно равновесное влагосодержание на входе и выходе при $\varphi = 1$, кг влаги/кг сухого воздуха.

Объемный расход воздуха определяли по перепаду давления ΔP на измерительной диафрагме по уравнению:

$$V = 2\sqrt{\Delta P}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (12)$$

где ΔP – перепад давления на диафрагме, Па.

Скорость воздуха в расчете на полное сечение пустого аппарата вычисляли по формуле:

$$w = \frac{4V}{\pi \cdot 0,2^2 \cdot 3600}, \text{ м/с} \quad (13)$$

Массовый расход воздуха [6]:

$$G = V \cdot \rho_{\text{возд.}}, \text{ кг/ч}, \quad (14)$$

здесь $\rho_{\text{возд.}}$ – плотность воздуха, кг/м^3 .

Плотность воздуха определяли в зависимости от температуры и барометрического давления по формуле [9]:

$$\rho_{\text{возд.}} = 1,29 \cdot \frac{273 \cdot B}{T \cdot 760}, \quad (15)$$

здесь T – температура воздуха, К;

B – барометрическое давление, мм. рт. ст.

2. Определение расхода испарившейся воды.

Массовый расход испарившейся воды в воздух определяли по формуле [4]:

$$L_{\text{и}} = G(y_{\text{к}} - y_{\text{н}}), \text{ кг/ч}, \quad (16)$$

где G – массовый расход воздуха, кг/ч .

Уравнение теплового баланса контактных устройств имеет вид:

$$Gc_{\text{г}}t_{\text{гн}} + Lc_{\text{ж}}t_{\text{жн}} = Gc_{\text{г}}t_{\text{гк}} + (L - L_{\text{и}})c_{\text{ж}}t_{\text{жк}} + L_{\text{и}}(r_{\text{ж}} + c_{\text{п}}t_{\text{гк}}) + Q_{\text{п}}, \quad (17)$$

Левая часть уравнения (17) – сумма потоков тепла, приходящих на контактные устройства, а именно:

$Gc_{\text{г}}t_{\text{гн}}$ – поток тепла с приходящим воздухом, кДж/ч ;

$c_{\text{г}}$ – теплоемкость воздуха, равная $1,005 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$;

$Lc_{\text{ж}}t_{\text{жн}}$ – поток тепла с приходящей водой, кДж/ч ;

$c_{\text{ж}}$ – теплоемкость воды, равная $4,19 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$.

Правая часть уравнения (17) – сумма потоков тепла, уходящих с контактных устройств:

$Gc_{\text{г}}t_{\text{гк}}$ – поток тепла, уходящий с воздухом, кДж/ч ;

$(L - L_{\text{и}})c_{\text{ж}}t_{\text{жк}}$ – поток тепла, уходящий с водой, кДж/ч ;

$L_{\text{и}}(r_{\text{ж}} + c_{\text{п}}t_{\text{гк}})$ – поток тепла, уходящий с испарившейся жидкостью, кДж/ч ,

где $r_{\text{ж}}$ – удельная теплота испарения воды при средней температуре, кДж/кг ;

$c_{\text{п}}$ – теплоемкость водяного пара, равная $1,97 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$;

$Q_{\text{п}}$ – потери тепла в окружающую среду, которыми в условиях данного эксперимента пренебрегали;

L – массовый расход воды, кг/ч .

3. Определение коэффициента теплопередачи (равного коэффициенту теплоотдачи в газовой фазе).

Уравнение для вычисления коэффициента теплопередачи имеет вид:

$$K_T = \frac{Gc_F(t_{ГН} - t_{ГК})}{F_0 [(t_{ГН} - t_{ЖК}) - (t_{ГК} - t_{ЖН})] \ln \frac{t_{ГН} - t_{ЖК}}{t_{ГК} - t_{ЖН}}}, \quad (18)$$

где $t_{ГН}$ и $t_{ГК}$ – температуры воздуха на входе и выходе массообменного аппарата, °С;

$t_{ЖН}$ и $t_{ЖК}$ – температура воды на входе и на выходе с контактного устройства, °С.

На испарение влаги из потока воды при массообмене, как известно, требуется значительное количество тепла вследствие высокой величины удельной теплоты испарения воды (2493 кДж/кг при 0 °С). Тепло это переходит из потока воды вместе с испаренной влагой в воздух. Потеря тепла потоком воды должна быть скомпенсирована теплом потока воздуха при теплообменном процессе.

Результаты опытов и их обсуждение

Массообменные испытания

Обработанные в соответствии с изложенной выше методикой экспериментальные данные представлены на рисунке 3 в виде зависимости коэффициента массоотдачи K_u от скорости газа в колонне w .

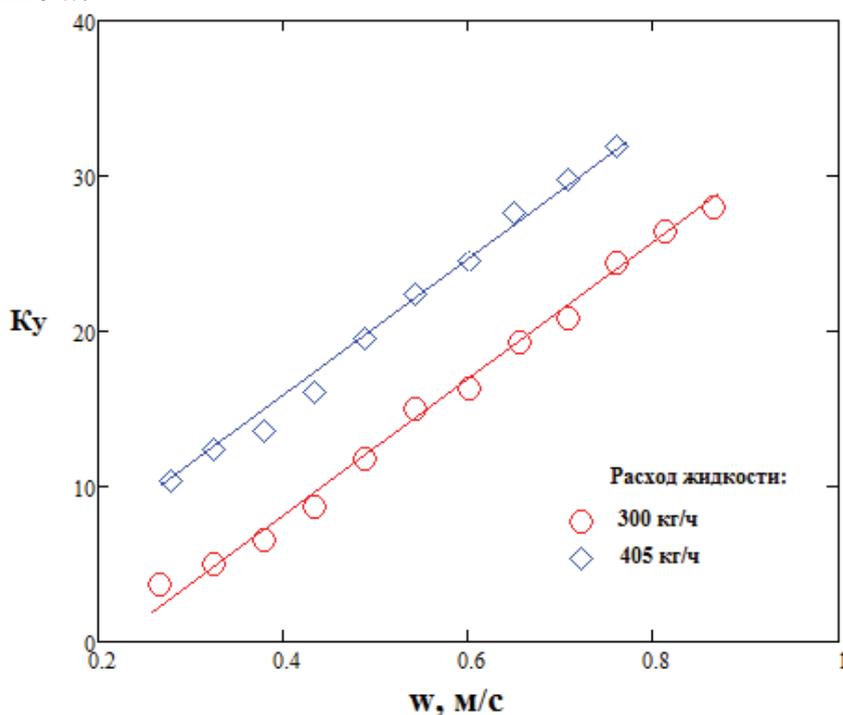


Рисунок 3. Зависимость коэффициента массоотдачи в жидкой фазе для исследуемой насадки типа МКН от скорости газа в колонне

Как и следовало ожидать, коэффициент массоотдачи K_u увеличивается с возрастанием скорости газа w от 0,3 м/с до 0,8 м/с и с увеличением плотности орошения насадки $q_{ж}$.

Теплообменные испытания

В ходе обработки экспериментальных данных по изложенной выше методике получена зависимость коэффициента теплоотдачи от скорости газа (см. рисунок 4).

Из рисунка 4 видно, что коэффициент теплопередачи возрастает с увеличением скорости газа в колонне в исследуемых пределах от 0,3 м/с до 0,8 м/с.

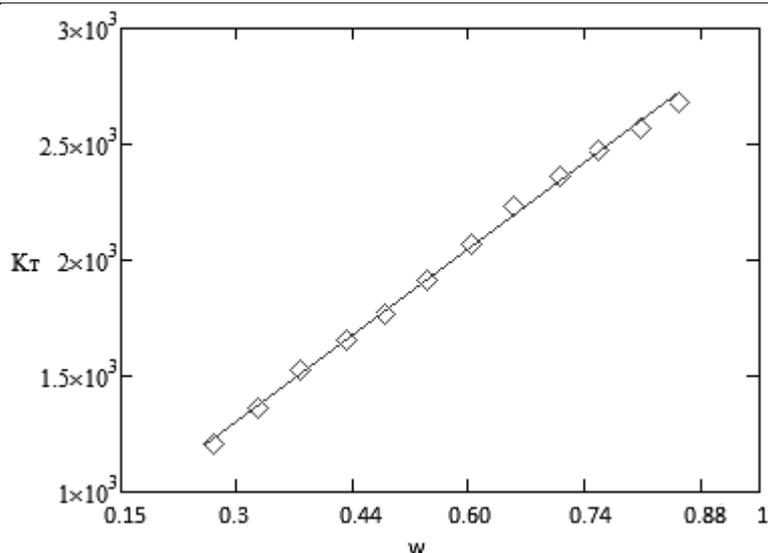


Рисунок 4. Зависимость коэффициента массопередачи для исследуемой насадки типа МКН при расходе воды 300 кг/ч от скорости газа w , м/с

Зависимости перепада температуры жидкой фазы от скорости газа в колонне представлены рисунке 5.

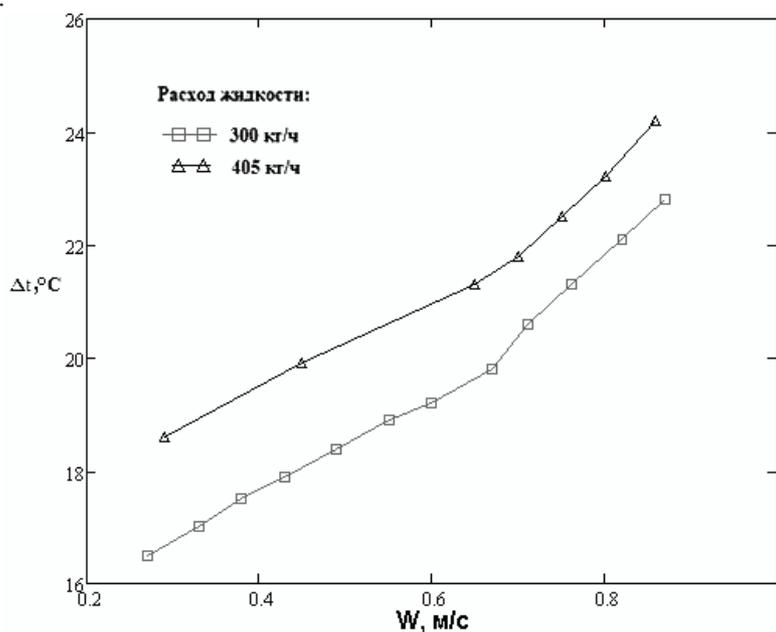


Рисунок 5. Зависимость перепада температуры жидкой фазы для исследуемой насадки типа МКН от скорости газа в колонне

Как видно из рисунка 5, для двух изученных расходов жидкости при скорости газовой фазы $w=0,7$ м/с наблюдается излом, характеризующий изменение режима течения газовой фазы. Проведенные опыты показали, что предлагаемая нами насадка типа МКН обладает высокими коэффициентами массопередачи и теплопередачи в исследованном диапазоне скоростей газа 0,2 – 1 м/с, что позволяет ее использовать для осуществления тепло- и массообменных процессов в колонных аппаратах химической технологии.

Представленные результаты теплообменных испытаний ранее не исследованной миникольцевой насадки типа МКН могут быть использованы в технологических расчетах колонных аппаратов, загруженных данной насадкой.

Литература

1. Дмитриева Г.Б., Беренгартен М.Г., Каган А.М., Пушнов А.С., Климов А.Г. Сравнение тарельчатых и насадочных контактных устройств колонных аппаратов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2007 . №1. С.9 – 10.
2. Соколов А.С. Влияние типа керамической кольцевой насадки на процесс абсорбции газов // Автореферат дисс. ...канд. техн. наук. – М.: МГУИЭ, 2009.
3. Борисов Г.С., Брыков В.П., Дытнерский Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии – М.: Химия, 1991.-496 с.
4. Рамм В.М. Абсорбция газов.- М.: Химия, 1976.-656 с.
5. Каталог компании Ningbo TianYi Chemical Industrial(T.C.I) Co., ltd
6. Chinese Journal Chemical Engineering 10 (6) 634-634 2002.
7. www.raschig.com
8. Сокол Б.А., Чернышев А.К., Баранов Д.А., Беренгартен М.Г., Левин Б.В. Насадки массообменных колонн. - М.: ИНФОХИМ, 2009. - 358 с.
9. Кутепов А.М., Баранов Д.А., Бутков В.В., Вольнец А.З., Вязьмин А.В., Жихарев А.С., Орлов В.А., Пирогова О.В., Рудов Г.Я., Сидельников И.И., Соломаха Г.П., Чепура И.В. Практикум по процессам и аппаратам химической технологии.-М.: ИЦ Академия, 2005 - 328 с.
10. Дьяконов Г.С., Фарахов М.И., Маряхин Н.Н., Ясавеев М.Х., Шигапов И.М., Лаптев А.Г. Разработка новой нерегулярной насадки и ее гидродинамические исследования // Тепло-массообменные процессы и аппараты химической технологии. Межвуз. тематич. сб. научн. тр. Казань: КГТУ, 2000. - С. 239 – 248.

Варианты оптимизации управления получением технического углерода по идеализированной модели реактора

Боровков А.Д.¹, д.т.н. проф. Цыганков М.П..²
¹Университет машиностроения,
²ЯГТУ
cigg@rambler.ru

Аннотация. Рассмотрены предельные варианты повышения эффективности процесса получения технического углерода для схем с рециркуляцией и без рециркуляции отходящего газа в реакторах. "Предельность" оценивается в смысле использования идеализированной модели, в которой не учитывается газификация углерода продуктами реакции. Для оптимизации использован экономический критерий оптимальности. Дана интерпретация полученных условий оптимального управления технологическим режимом реактора с учетом влияния этого режима на энергозатраты.

Ключевые слова: *технический углерод, реакторный процесс, задача оптимизации, математическая модель, рециркуляция, газификация, энергозатраты*

Важнейшим направлением повышения эффективности энергоемких крупнотоннажных производств, является энергосбережение. Далее рассматривается производство технического углерода, включающее энергоемкий процесс получения аэрозоля дисперсного углерода в крупнотоннажных реакторах [1]. Исследование возможностей энергосбережения нашло отражение в многочисленных работах исследователей реакторного процесса.

Схема современного многоканального реактора для производства высокодисперсных марок продукта приведена на рисунке 1. В реакторе происходит образование частиц углерода в результате термоокислительного пиролиза углеводородного сырья.