

УДК 66.074.3

Райко В.Ф., Дассуки М.Э., Цейтлин М.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАСКАДНОГО КОНТАКТНОГО УСТРОЙСТВА

Актуальность и постановка задачи. Традиционной проблемой, возникающей при поиске вариантов утилизации низкопотенциальной теплоты, в частности, отходящих дымовых газов, является отсутствие потребителей этой теплоты и (или) высокая стоимость оборудования. Одно из направлений снижения капиталоемкости – применение скрубберов (теплообменников прямого контакта) для нагрева или концентрирования технологических жидкостей. В производстве кальцинированной соды теплоту отходящих дымовых газов, например, дымовых газов теплоисточника (ТЭЦ или котельной) можно использовать для концентрирования стока – дистиллерной суспензии. Ее жидкая часть представляет собой раствор, содержащий в сумме до 15 % хлоридов кальция и натрия, а твердая (до 40 г/л) – представлена непрореагировавшими остатками извести (гидроксид кальция, карбонат и силикаты кальция, песок). Необходимость упаривания этого стока возникает в случае переработки с получением концентрированного раствора хлорида кальция. Упаривание способствует также сокращению объема стоков. Возможность использования для этой цели дымовых газов обусловлена тем, что в настоящее время их выбрасывают в атмосферу с относительно высокой температурой (150...180 °С) и далекими от насыщения по влаге.

Следует отметить, что конструкции скрубберов, применяемых обычно (см., например [1]) для нагрева или концентрирования светлых жидкостей в прямом контакте с газами, не подходят для упаривания дистиллерной суспензии. Причина заключается в том, что растворенный в суспензии в незначительных количествах сульфат кальция при концентрировании образует на внутренних устройствах аппаратов плотные отложения гипса, которые достаточно быстро блокируют работу теплообменника.

Опыт содового производства показывает, что для работы с дистиллерной суспензией хорошо подходят провальные тарелки с крупными отверстиями [2], однако они имеют относительно высокое гидравлическое сопротивление, что может служить препятствием для применения в утилизаторе теплоты сбросных топочных газов. Перспективными представляются каскадные полочные и тарельчатые аппараты. Они имеют относительно низкое гидравлическое сопротивление и при этом обеспечивают хорошие тепло- и массообменные характеристики, как при конденсации паров [3], так и при охлаждении и концентрировании жидкостей [4], однако неустойчиво работают с суспензиями. Интерес представляет конструкция каскадного аппарата, сочетающая в себе достоинства оборудования этого типа с возможностью работать с суспензией, образующей плотные отложения. Контактным элементом в этой конструкции является система из конической воронки и расположенного над ней тела, образованного из двух конусов, соединенных основаниями [5] (далее для краткости будем называть эту деталь конусным телом). Испытанная в работе с дистиллерной суспензией и показавшая хорошие результаты эта конструкция, тем не менее, оказалась не технологичной в изготовлении и обслуживании, так как конусное тело сложно жестко установить, а полость, внутри него забивается отложениями, которые невозможно очистить.

Естественным представляется, пожертвовав обтекаемостью, упростить описанную выше конструкцию за счет удаления одного (нижнего) из двух конусов, образующих конусное тело. Далее такой упрощенный контактный элемент будем называть кон-

тактным элементом с одиночным конусом (КЭОК).

Цель. Работа, результаты которой изложены в настоящей статье, была выполнена с целью выяснить, как повлияет изменение конструкции на гидравлическое сопротивление орошаемого контактного элемента. Исследование выполнялось на установке, которая состояла из собственно экспериментального аппарата, комплекта вспомогательного оборудования, обеспечивающего его работу и приборов для измерения расходов газа и воды, а также перепадов давлений. Экспериментальный аппарат состоял из царги основания, на которую с помощью фланцев монтировались одна на другую две плексигласовые царги диаметром 0,5 и высотой 0,35 м. Поверх царг устанавливалась крышка. Во фланцевых разьемах (между царгой основанием и плексигласовой царгой, между двумя плексигласовыми царгами, между верхней царгой и крышкой) монтировались экспериментальные контактные устройства. То есть в опытах с каждым видом этих устройств их устанавливалось по 3. На рис. 1 представлены эскизы контактных элементов, подвергавшиеся исследованию. Соответственные размеры элемента с конусным телом и с одним конусом были одинаковыми, поэтому показаны только для одного из них. Далее контактный элемент с конусным телом для краткости будем называть КЭКТ, а провальную тарелку с крупной перфорацией – ПТКП.

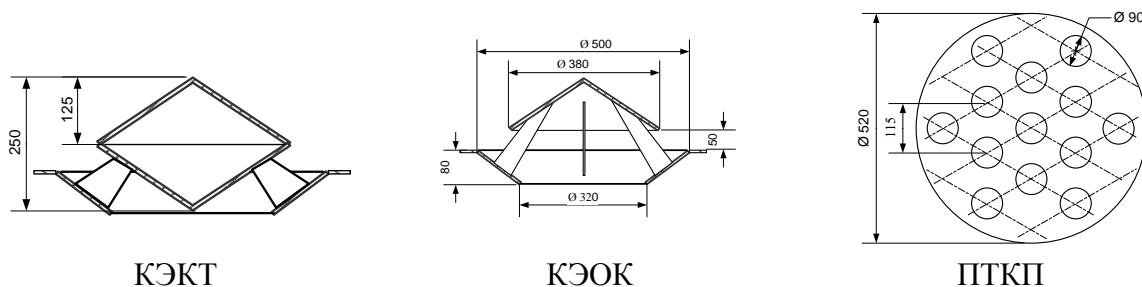


Рисунок 1 – Исследованные контактные элементы

Размеры контактных элементов выбраны таким образом, чтобы доля свободного сечения (отношение площади сечения для прохода газа к площади поперечного сечения царг) не была меньше 40 %. Такой выбор, с одной стороны, обеспечивает максимальное сечение для прохода газа (то есть минимизирует гидравлическое сопротивление), а с другой – обеспечивает перекрытие конусных элементов с воронками в КЭКТ и КЭОК с тем, чтобы исключить стекание жидкости, минуя контактные элементы, даже в отсутствии потока газа. В частности, суммарное свободное сечение отверстий ПТКП составляет 42 %, отверстие для входа газа в контактный элемент (нижнее отверстие воронки) – 41 % и кольцевой зазор между конусом и стенками царги на выходе газа из контактного элемента – 42%. Из этих же соображений (обеспечение доли свободного сечения не менее 40 %) выбраны расстояния между конусом и воронкой и между контактными элементами в аппарате (последнее определяется высотой царг).

ПТКП в этом исследовании использовалась, как эталон для сравнения. Для нее имеются обширные данные, как по гидродинамике, так и по тепло- и массопередаче, причем, как для лабораторных, так и для промышленных масштабов исполнения. Эту информацию можно использовать при переходе к проектированию аппарата промышленного масштаба с КЭОК.

Исследование проводилось в интервале скоростей газа, отнесенных к полному сечению опытного аппарата, от 0,2 до 5 м/с. Далее скорость газа в полном сечении аппарата будем обозначать буквой w . Что касается плотности орошения, то в исследова-

ниях колонной аппаратуры ее обычно измеряют в единицах расхода, отнесенных к полному сечению аппарата (эту величину далее будем обозначать l). В опытах ее изменяли в интервале от $0,2 \cdot 10^{-3}$ до $5 \cdot 10^{-3}$ м³/м²·с. В то же время режимы течения жидкости по деталям контактного элемента удобно характеризовать плотностью орошения отнесенной к единице длины периметра. В нашем случае – периметра конуса или нижнего отверстия расположенной под ним воронки. Эту величину будем обозначать буквой f .

Однофазное течение жидкости. В этой части исследования рассматривались только КЭКТ и КЭОК, так как гидродинамические режимы провальных тарелок хорошо изучены (см. например, [1, 2]).

При плавном увеличении расхода жидкости она сначала (то есть при малых расходах) не полностью смачивает поверхность верхнего конуса и стекает только по отдельным частям его периметра. По мере увеличения расхода жидкости течение захватывает все большую поверхность и, наконец, вода начинает стекать достаточно равномерно (по крайней мере, по визуальной оценке) по всему периметру.

Следует отметить, что по мере стекания жидкости на нижние контактные элементы ее распределение становится более равномерным. Однако при относительно небольших скоростях газа, пока не наблюдается заметное взаимодействие газа и жидкости (ниже будет указана граница такого режима) плотность орошения, соответствующую началу полного смачивания конуса, можно считать минимально допустимой для этого типа контактных устройств. В наших опытах она составляла $(0,9 \pm 0,1) 10^{-3}$ м³/м²·с. Соответствующая величина f в случае КЭКТ и КЭОК составляла $(0,15 \pm 0,01) 10^{-3}$ м³/м·с. При этой плотности орошения вода стекает с края конуса отдельными струями, которые практически сразу дробятся на отдельные капли. Так же ведет себя поток, стекающий из отверстия воронки, расположенной под конусом.

По мере увеличения расхода воды струи, стекающие с конуса, начинают объединяться и, наконец, при $f = (0,7 \pm 0,1) 10^{-3}$ м³/м·с (что соответствует $l = 4,3 \cdot 10^{-3}$ м³/м²·с) сливаются в одну сплошную завесу, которая приобретает колоколообразную форму. Для струй, стекающих из отверстия в воронке, режим объединения в сплошную завесу наступает раньше, примерно, при $f = (0,4 \pm 0,1) 10^{-3}$ м³/м·с, что заставляет предполагать, что величина f , при которой струи объединяются в завесу, зависит от кривизны поверхности.

Отличие в течении жидкости по КЭКТ и КЭОК при подаче орошения в отсутствие расхода воздуха имеет незначительные различия. Собственно оно заключается лишь в том, что практически при любых режимах вода смачивает нижний конус КЭКТ и стекает с его вершины по оси нижней воронки. В КЭОК такая струя, естественно, отсутствует.

Однофазное течение газа. Режимы обтекания сухих (не орошаемых) контактных элементов газом не столь очевидны, как в случае течения жидкости и их изучение требует специальной техники. Некоторое представление о течении газа через насадку или контактный элемент может дать его гидравлическое сопротивление. Полученные нами экспериментальные данные по зависимости гидравлического сопротивления (Δp_c) сухих (не орошаемых) КЭКТ, КЭОК и ПТКП от скорости воздуха были обработаны в виде обычного для таких случаев уравнения:

$$\Delta p_c = aw^b. \quad (1)$$

Оказалось, что для всех исследованных контактных элементов коэффициент $b = 2$. Причем анализ графиков зависимости Δp_c от w , построенных в логарифмических координатах показал, что экспериментальные точки достаточно точно ложатся на прямую

линию и сколько-нибудь заметных изломов графика или каких-либо особых точек не наблюдается. Это свидетельствует об отсутствии смен режимов течения воздуха.

Контактные элементы, как и ожидалось, различались по абсолютной величине гидравлического сопротивления при одинаковых скоростях воздуха. Наименьшее сопротивление было у ПТКП ($a = 1,6$). У КЭКТ и КЭОК эта величина была более, чем в 2 раза большей (для КЭКТ $a = 3,6$, а для КЭОК $a = 3,4$). Сам факт того, что сопротивление КЭКТ и КЭОК значительно больше, чем у ПТКП не был непредвиденным. Ведь каждый из этих элементов содержит, по крайней мере, 2 сужения воздушного потока (на входе в воронку и между краем верхнего конуса и стенкой царги), в то время как ПТКП имеет только одно сужение в отверстиях. Иными словами, КЭКТ и КЭОК соответствует как бы две ПТКП. Дополнительные потери напора в КЭКТ и КЭОК вызывает изменение направления потока воздуха, которое происходит дважды за время прохождения одного контактного элемента. Следует надеяться, что эти обстоятельства обеспечат исследуемым контактными элементами преимущества по интенсивности массопередачи в сравнении с ПТКП, однако проверка этого выходит за рамки данной статьи.

На первый взгляд показалось удивительным, что сопротивление более обтекаемого КЭКТ было, хотя и незначительно, но выше, чем КЭОК. Объяснением этому, по-видимому, является то, что потери по длине в канале образованном воронкой и нижним конусом КЭКТ, самое узкое сечение которого (между поверхностью нижнего конуса и кромкой меньшего отверстия воронки) составляет 63 % от свободного сечения аппарата, превышают потери на поддержание вихря под конусом КЭОК.

Двухфазная система. Режимы двухфазного течения исследовались при двух значениях плотности орошения: $0,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ (начало полного смачивания верхнего конуса КЭКТ и КЭОК) и $4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ и при плавном изменении скорости газа от нуля до 5 м/с. Следует отметить, что визуально режимы течения жидкости мало менялись с изменением плотности орошения, что лишь подтверждает то, что гидродинамические режимы, наблюдаемые на орошаемых контактных элементах, определяются, главным образом, скоростью газа, так как именно газ является основным источником энергии, обеспечивающей создание и развитие межфазной поверхности. Некоторые отличия наблюдаются лишь при малых скоростях газа. Так при $l = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$, то есть в условиях, когда жидкость стекает с края конуса в виде отдельных струй, при скоростях газа менее 0,1 м/с (здесь и далее скорость газа относится к полному сечению аппарата) визуально влияние газа на течение жидкости не фиксируется. По мере увеличения скорости струи начинают отклоняться в сторону движения газа, однако характер их течения не меняется вплоть до скоростей 0,8–1 м/с. В отличие от этого, при $l = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$, когда в отсутствии расхода газа жидкость течет сплошной завесой, подача газа сразу же приводит к разрушению этой завесы, которая сначала (при небольших скоростях газа) начинает слегка колебаться, то разрываясь, то объединяясь, а затем, с ростом скорости газа, разрывается на отдельные струи.

При скоростях газа более 1 м/с поведение жидкости при обеих исследованных плотностях орошения становится примерно одинаковым. В интервале скоростей от 1 до 2–2,5 м/с струи дробятся на все более мелкие капли, которые начинают уноситься потоком воздуха и при скоростях газа более 2,5 м/с в пространстве между контактными элементами образуются слои из брызг жидкости, которые сепарируются в пространстве под воронкой и стекают вдоль стенки аппарата. Скорость газа, при которой наступает переполнение верхней тарелки аппарата (скорость «захлебывания») зависит от плотности орошения, снижаясь с ростом последней, и наступает при 3,9–4,1 м/с для КЭОК и при 3,7–3,9 м/с для КЭКТ. Более низкая скорость захлебывания для КЭКТ, по-видимому, объясняется отсутствием сепарации жидкости, захваченной газом с нижнего

края воронки. Эта жидкость увлекается потоком газа в конический канал между коническим телом и воронкой и сток жидкости прекращается. В КЭОК брызги жидкости, сорванные с края воронки, двигаясь по инерции, попадают в пространство под конусом, где сепарируются и стекают вниз. Поэтому захлебывание наступает только тогда, когда брызги измельчаются настолько, что полностью выносятся потоком газа.

«Захлебывание» ПТКП наступало при скоростях газа 3,2–3,8 м/с, то есть даже меньших, чем у КЭКТ. Причем эта скорость в большей степени зависит от плотности орошения. Объяснение этому можно видеть в отсутствии, в отличие от КЭКТ и КЭОК, зон сепарации брызг. У КЭОК их две (под воронкой и под конусом), а у КЭКТ – одна. В этих зонах капли могут укрупняться, что препятствует их уносу. На ПТКП жидкость распыляется потоком газа на краях отверстий тарелки на мелкие капли. Пенные слои, в которых капли могли бы укрупняться, на тарелках со свободным сечением более 35 %, как известно из литературы (см., например [6]), и, как подтвердили наши опыты, не образуются. Поэтому мелко диспергированная жидкость беспрепятственно уносится на тарелку, расположенную выше. Это, в конечном счете, и приводит к захлебыванию.

Следует отметить, что также как и на ПТКП, на КЭКТ и КЭОК при всех наблюдавшихся режимах пенный слой не возникал. То есть сплошной фазой при всех скоростях газа и плотностях орошения оставался воздух, а дисперсной фазой – жидкость.

Смену гидродинамических режимов при изменении скорости газа можно наблюдать по изменению наклона графика зависимости гидравлического сопротивления орошаемой тарелки от скорости газа, вычерченного в логарифмических координатах. Такие графики для КЭКТ и КЭОК приведены на рис. 2. Для сравнения там же приведены графики сопротивления неорошаемых контактных устройств (линия 3).

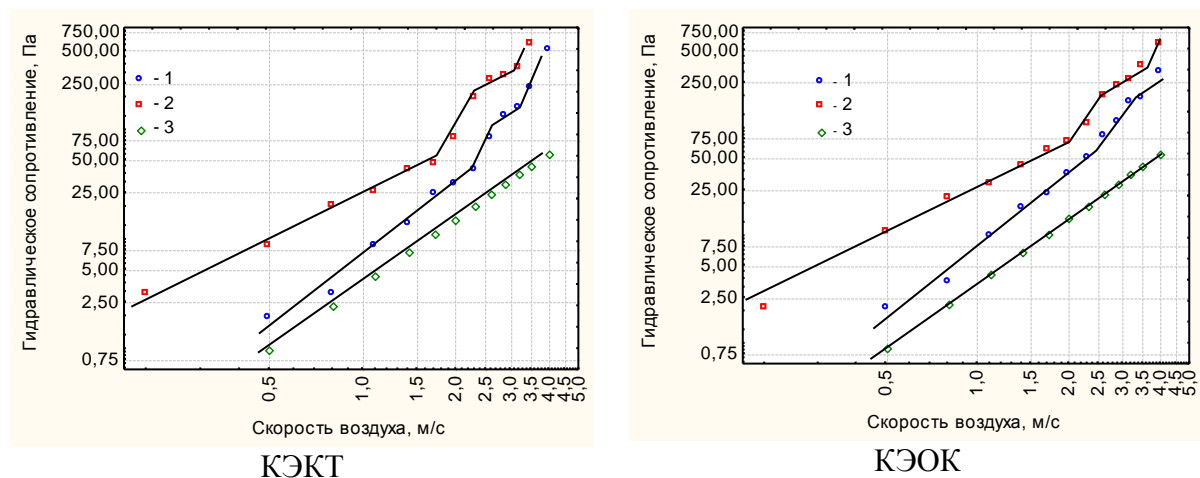


Рисунок 2– Гидравлическое сопротивление контактных элементов
Плотность орошения: 1– $0,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$; 2 – $4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$; 3 – нет орошения

Из графиков видно, что для обоих контактных элементов в исследованном диапазоне плотностей орошения общий характер изменения гидравлического сопротивления с ростом скорости газа одинаков. На графиках можно выделить 4 участка. Первый, при скоростях воздуха до 2–2,5 м/с, характеризуется ростом сопротивления по закону близкому к квадратичному. Характерно, что при небольших плотностях орошения, сопротивление с увеличением скорости воздуха растет быстрее, чем у неорошаемой тарелки (наклон кривой 1 больше, чем кривой 3). При больших же плотностях орошения (кривая 2) нарастание сопротивления более медленное (наклон кривой 2 меньше, чем кривой 3). Это легко объяснить отсутствием сплошной завесы воды при

$l = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ и, следовательно, достаточным свободным сечением для прохода воздуха. При $l = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ сплошная водяная завеса, стекающая с контактного элемента, не оставляет место для прохода воздуха, газ должен ее разрушать, на что тратится дополнительная энергия. С ростом же расхода воздуха и разрывом завесы на отдельные струи ситуация для прохода воздуха улучшается и складываются условия, близкие к наблюдаемым при малых плотностях орошения.

Второй участок, в интервале скоростей газа от 2 до 3 м/с, характеризуется резким нарастанием сопротивления. Это обусловлено наблюдаемым визуальным захватом и уносом струй жидкости, стекающей по периферии конуса из отверстия воронки. В результате увеличивается количество жидкости, удерживаемой контактным элементом, и, соответственно, его сопротивление. Характерно, что этот режим на обоих исследованных контактных элементах возникает при одинаковых скоростях газа, что объясняется равенством соответственных сечений. В то же время наклон кривых на втором участке у КЭОК несколько меньше, чем у КЭКТ. По-видимому, это является следствием наличия у КЭОК двух зон сепарации и меньшим, вследствие этого, количеством удерживаемой жидкости. В пользу такого объяснения говорит также и то, что, если на первом участке сопротивление КЭКТ несколько меньше, чем КЭОК, то на остальных участках ситуация меняется на обратную.

Третий участок, при скоростях от 2,5 до 3,5 м/с у КЭКТ и от 2,5 до 4 м/с у КЭОК характеризуется замедлением нарастания сопротивления, по-видимому, вследствие баланса количества уносимой и сепарируемой жидкости.

Наконец, четвертый участок, при котором сопротивление опять резко нарастает, обусловлен «захлебыванием» контактного элемента.

Несмотря на наличие изломов, результаты опытов по изучению зависимости гидравлического сопротивления (Δp_{op}) от скорости газа и плотности орошения удовлетворительно описываются относительно простым степенным уравнением:

$$\Delta p_{op} = a_1 w^{b_w} l^{b_l} . \quad (2)$$

Значения коэффициентов этого уравнения a_1 , b_w , и b_l , полученные обработкой экспериментальных данных с использованием методов нелинейного оценивания, а также показатели, характеризующие его точность, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Коэффициенты и характеристики точности уравнения (2)

Контактный элемент	a_1	b_w	b_l	Стандартная ошибка, Па	Доля объясненной вариации, %
КЭКТ	7,74	2,70	0,50	18	97
КЭОК	7,54	2,62	0,38	10	98
ПТКП	4,71	2,45	0,55	23	95

Что касается ПТКП, то из-за большого разброса экспериментальных точек нам не удалось выявить каких-либо особых участков на кривой изменения гидравлического сопротивления орошаемой тарелки с ростом скорости газа. В целом, полученные результаты хорошо согласуются с данными работы [7]. Сопоставляя их с результатами исследования гидравлического сопротивления орошаемых КЭКТ и КЭОК можно сказать, что эти контактные элементы обладают в 1,5–1,9 раза большим сопротивлением, чем ПТКП, причем различие между контактными элементами уменьшается с увеличе-

нием плотности орошения и с уменьшением скорости газа.

Выводы. Таким образом, сравнение гидродинамических характеристик контактных элементов, пригодных для работы с суспензиями, вызывающими образование отложений на внутренних устройствах аппарата, показало следующее. Существенных различий между контактными элементами с конусным телом (КЭОК) и одиночным конусом (КЭКТ), как по характеру возникающей на них газожидкостной системы, так и по гидравлическому сопротивлению нет. При этом первый из них имеет более простую конструкцию и меньшую металлоемкость. Обе конструкции имеют гидравлическое сопротивление в 1,6–1,9 раза большее, чем одна противоточная тарелка с перфорациями большого диаметра (ПТКП), но, поскольку и КЭОК, и КЭКТ эквивалентны двум ПТКП, можно говорить, что они оказывают меньшее сопротивление проходу газа. Кроме того, гидродинамические режимы КЭОК и КЭКТ отличаются от ПТКП большей стабильностью и воспроизводимостью.

Литература

1. Тарат Э.Я., Балабеков О.С., Балгов Н.П. и др. Интенсивные колонные аппараты для обработки газов жидкостями.– Л.: Ленинградский университет, 1976.– 240 с.
2. Фрумин В.М. Гидродинамика противоточных тарелок крупной перфорации в десорберах содового производства // Вестник Харьковского гос. политехн. ун-та.– Харьков: ХГПУ.– 2000.– Вып.83.– С. 44–45
3. Егоров Н.Н. Охлаждение газа в скрубберах.– М.: Росхимиздат, 1954.– 142 с.
4. Цейтлин М.А., Цейтлин Л.М., Гареев А.Т. Математическое моделирование процесса контактного охлаждения газа, содержащего пар охлаждающей жидкости и неконденсирующиеся компоненты // Вестник ХГПУ – Харьков: ХГПУ, 1997.– Т.2 , № 8.– С. 46–52.
5. Авт. свид. СССР № 288877 кл. В 01 d 3/26 /О.И. Прокопов «Прямоточная колонна для скоростного массообмена» заявл. 26.11.69, опубл. 08.02.71
6. Лукьянченко Т.В. Исследование процесса испарительного охлаждения воды на крупнодочечатых тарелках // Интенсификация технологических процессов и аппаратов содового и смежных производств: Труды, т. 60 / НИОХИМ, – Харьков, 1985. – С. 9–13.
7. Эстефане П.Х. Гидродинамические характеристики провальных тарелок с крупной перфорацией и большим свободным сечением / П.Х. Эстефане, В.Ф. Райко, М.А. Цейтлин // Вестник национального технического университета «ХПИ». – 2007.– № 30.– С. 78–82.

УДК 66.074.3

Дасуки М.Е., Райко В.Ф., Цейтлин М.А.,

ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАСКАДНОГО КОНТАКТНОГО ПРИСТРОЮ

Досліджено залежності гідравлічного опору від швидкості газу та гідродинамічні режими течії рідини та газу по контактним елементам, що являють собою пари з конусного елемента та лійки по яких рідина стікає каскадом. Отримано рівняння для обчислення гідравлічного опору сухого та зрошуваного контактного елемента. Результати порівняно з відомими даними щодо опору провальних тарілок із крупними отворами.

стаття надійшла до редакції 26.08.2008 р.