

М.В. Михайловер. – Обзоры современной проблемы химии и химической промышленности // – М.: НИИТЭХИМ, 1980. – Вып. 11. – 48 с.

7. Шапошников В.В. Технология охлаждающей воды и проблемы ее оптимального технологического и общехозяйственного использования / В.В. Шапошников. –// Химическая технология. – 1979. – № 4. – С. 3 – 9.

8. Крюков Н.П. Аппараты воздушного охлаждения / Н.П. Крюков. – М.: Химия, 1983. – 168 с.

9. Галустов В. Повышение эффективности систем охлаждения оборотной воды / В. Галустов, А. Чуфаровский. – М.: Информ. бюл. по водному хозяйству СЭВ, 1985. – № 1/33. – С. 27 – 30.

УДК 661.41:661.321

**В.Ф. Райко канд. техн. наук, М.А. Цейтлин докт. техн. наук (НТУ «ХПИ»),  
В.А. Панасенко докт. техн. наук (ГУ «НИОХИМ»)**

### **ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНТАКТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С БОЛЬШИМ СВОБОДНЫМ СЕЧЕНИЕМ**

*Досліджено гідравлічний опір та гідродинамічні режими течії рідини та газу по контактних елементах, що являють собою пари з конусного елемента та лійки, по яких рідина стікає каскадом. Результати порівняно з експериментальними даними щодо опору провальних тарілок із великими отворами. Отримано рівняння для обчислення гідравлічного опору зрошуваних контактних елементів.*

*Исследованы гидравлическое сопротивление и гидродинамические режимы течения жидкости и газа по контактными элементам, представляющим собой пары из конусного элемента и воронки, по которым жидкость стекает каскадом. Выполнено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными по провальным тарелкам с крупными отверстиями. Получены уравнения для расчета гидравлического сопротивления орошаемых контактных элементов.*

*Hydraulic resistance and hydrodynamic regime of a liquid and gas streams on the contact elements which are a pair from conical element and funnel was investigated. Comparison of the received results with the data for fall-through plates with large openings was executed. The equations for hydraulic resistance calculation irrigated contact elements are received.*

Ключевые слова: гидравлическое сопротивление, гидродинамический режим, контактный элемент, скорость газа, пенный слой, скорость «захлебывания».

Одним из направлений использования вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) содового производства является упаривание растворов, таких как рассол или дистиллерная жидкость, в прямом контакте с топочными газами или воздухом. Однако, выбор контактных элементов для проведения этих процессов весьма ограничен из-за образования отложений и инкрустаций. В содовой промышленности в настоящее время используются так называемые провальные (противоточные) тарелки с перфорацией в виде отверстий [1]. Несмотря на невысокие массообменные характеристики, недостаточное поперечное перемешивание жидкости и относительно высокое гидравлическое сопротивление эти тарелки нашли применение в процессе дистилляции, так как, наряду с простотой конструкции, обладают важным положительным свойством –

возможностью длительное время работать в условиях обрастания плотными гипсовыми инкрустациями. Гидродинамика этих тарелок достаточно полно изучена в работах [1, 3].

В попытке преодолеть недостатки провальных тарелок, в частности, снизить гидравлическое сопротивление, было предложено увеличить долю свободного сечения и диаметр отверстий в них. Анализ представленных в работе [2] результатов исследования гидродинамических свойств таких тарелок, показывает, в частности, что гидродинамические режимы этих, впрочем, как и обычных провальных тарелок, весьма неустойчивы. Это выражается в большом разбросе величин гидравлического сопротивления при одинаковых значениях плотности орошения и скорости газа.

Для целей утилизации ВЭР 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, 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, а контактный элемент с ним – КЭКТ. Испытанная в работе с дистиллерной суспензией и показавшая хорошие результаты эта конструкция, тем не менее, оказалась нетехнологичной 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 контактным элементом с одиночным конусом (КЭОК).

Работа, результаты которой изложены в настоящей статье, была выполнена с целью сравнить в условиях единой методики гидродинамику КЭКТ, КЭОК и провальной тарелки с крупной перфорацией (ПТКП). 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 плексигласовые царги диаметром 0,5 и высотой 0,35 м. Во фланцевых разъемах между царгами монтировались экспериментальные контактные устройства. В опытах с каждым видом этих устройств их устанавливалось по 3. На рис. 1 представлены эскизы контактных элементов, подвергавшиеся исследованию.

Размеры всех контактных элементов выбраны таким образом, чтобы доля их свободного сечения составляла порядка 40 %. Такой выбор для КЭКТ и КЭОК обеспечивает перекрытие конусных элементов с воронками. В то же время несколько опытов было проведено с ПТКП, имевшей долю свободного сечения 30 %.

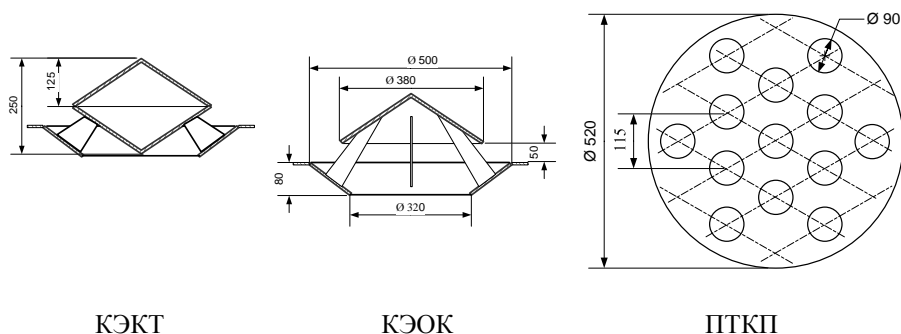


Рис. 1. Исследованные контактные элементы.

Исследование проводили на системе раствор хлорида натрия (рассол)-воздух. Рассол подавался в установку при комнатной температуре. Массовая концентрация NaCl в рассоле составляла  $308 \text{ кг/м}^3$  ( $105,3 \text{ н.д.}$ )<sup>2</sup>, плотность –  $1200 \text{ кг/м}^3$ , вязкость при  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $1,33 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ . В опытах варьировали скорость воздуха ( $w$ ) в диапазоне от  $0,2 \text{ м/с}$  до  $5 \text{ м/с}$ . Плотность орошения ( $l$ ) менялась в интервале от  $0,4 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{с}$  до  $5 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{с}$ .

Изучение гидродинамики орошаемых контактных элементов с конусными телами показало, что визуально режимы течения жидкости по ним мало менялись с изменением плотности орошения. Некоторые отличия наблюдались лишь при малых скоростях газа. Так, при  $l = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{с}$  в условиях, когда жидкость стекает с края конуса в виде отдельных струй и скоростях газа менее  $0,1 \text{ м/с}$  (здесь и далее скорость газа относится к полному сечению аппарата), визуально влияние газа на течение жидкости не фиксировалось. По мере увеличения скорости струи начинали отклоняться в сторону движения газа, однако, характер их течения не менялся вплоть до скоростей от  $0,8 \text{ м/с}$  до  $1 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{с}$ . В отличие от этого, при  $l = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{с}$ , когда в отсутствие 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 скорости газа более  $1 \text{ м/с}$  поведение жидкости при обеих исследованных плотностях орошения становится примерно одинаковым. В интервале скоростей от  $1 \text{ м/с}$  до  $2,5 \text{ м/с}$  струи дробятся на все более мелкие капли, которые начинают уноситься потоком воздуха и при скоростях газа более  $2,5 \text{ м/с}$  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  $3,9\text{--}4,1 \text{ м/с}$  для КЭОК и при  $3,7\text{--}3,9 \text{ м/с}$  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

<sup>2</sup> н.д. – нормальное деление, принятая в содовой промышленности единица концентрации равная, в частности, для NaCl  $0,05 \text{ мол/дм}^3$

вниз. Поэтому захлебывание наступает только тогда, когда брызги измельчаются настолько, что полностью выносятся потоком газа.

Что касается ПТКП, то ее «захлебывание» наступало при скорости газа 3,2-3,4 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.

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.

В процессе исследования выявились некоторые особенности гидродинамических процессов на ПТКП, которые не нашли отражения в известных публикациях и требуют специального рассмотрения. В первую очередь, следует отметить, что в нашем исследовании наблюдались систематические отклонения экспериментальных значений сопротивления от рассчитанного по материалам работы [2] и, во вторую, об отмеченных выше существенно меньших скоростях газа, приводящих к «захлебыванию» аппарата в сравнении с известными из литературы. Дело в том, что обычно (см., например [1]) считают, что провальные тарелки, в особенности, со свободным сечением, превышающим 30 %, могут работать без «захлебывания» до скорости газа в полном сечении аппарата 4 м/с и даже более. В нашем же исследовании она, как уже указывалось, оказалась ниже. При этом выяснилось, что при установке в аппарат тарелок с меньшим сечением, пенный слой образуется только на одной – двух (напомним, что в аппарат устанавливалось 3 тарелки), в то время, как на остальных имеет место режим смоченной тарелки (то есть пенный слой отсутствует). Причем при постоянных расходах газа и жидкости пенный слой может «перескакивать» с тарелки на тарелку – исчезать на одной из них и появляться на другой.

Кстати, это обстоятельство (наличие пенного слоя только на одной – двух тарелках) и является, по нашему мнению, причиной отмечавшихся отклонений опытных значений гидравлического сопротивления от расчета. Экспериментальные данные, положенные в основу расчетных зависимостей, приведенных в работе [2], получены при испытании одиночной тарелки. В наших же опытах сопротивление тарелки определялось, как потеря давления в аппарате, деленная на число тарелок. Очевидно, что, если пенный слой присутствует не на всех тарелках, то среднее сопротивление одной тарелки, полученное таким образом, будет ниже, чем при испытании одиночной тарелки.

Что касается снижения скорости «захлебывания», то причину этого следует искать в уносе брызг. Явление это становится заметным при скорости газа в полном сечении аппарата, превышающей 1,5 м/с. При проведении опытов на одиночной тарелке унос брызг приводит к снижению фактической плотности орошения, и «захлебыванием» такой тарелки считается режим, при котором сток с нее полностью прекращается. В стенде, использовавшемся при проведении описанных здесь опытов, имелся сепаратор, который возвращал всю унесенную газом жидкость в аппарат. Результатом стала повышенная, в сравнении с одиночной тарелкой, плотность орошения. При этом «захлебывание» наступает даже при незначительной разнице между объемами поступающей в аппарат жидкости и стекающей с нижней тарелки, то есть задолго до полного прекращения стока с нее. Снижению скорости «захлебывания» способствовало и отсутствие пенных слоев на некоторых тарелках что приводит к повышению брызгоуноса с них. Последнее обусловлено тем, что мелкие капли, образующиеся при прохождении газа через отверстия в тарелке, не улавливаются пенным слоем и уносятся на тарелку, расположенную выше.

Однако сам факт отсутствия слоев на некоторых тарелках, в то время как на других он присутствовал, и тем более, «перескакивание» слоев с тарелки на тарелку не может быть объяснено только повышенным брызгоуносом. Чтобы разобраться в этом, был выполнен ряд опытов с одиночной тарелкой при плотности орошения  $3 \text{ м}^3/\text{м}^2\cdot\text{с}$ . В этих опытах скорость газа повышалась и понижалась монотонно и очень плавно. Регистрировалось сопротивление тарелки и визуально оценивалась высота пенного слоя на ней.

График изменения гидравлического сопротивления тарелки представлен на рис. 2. Как видно из графика в диапазоне существования пенного слоя сопротивление тарелки при подъеме скорости меньше, чем при снижении. Наблюдается явление гистерезиса (зависимости сопротивления тарелки от истории изменения скорости газа), то есть при одинаковых значениях скорости сопротивление тарелки и высота пенного слоя на ней могут иметь два значения: меньшее при подъеме скорости и большее при снижении.

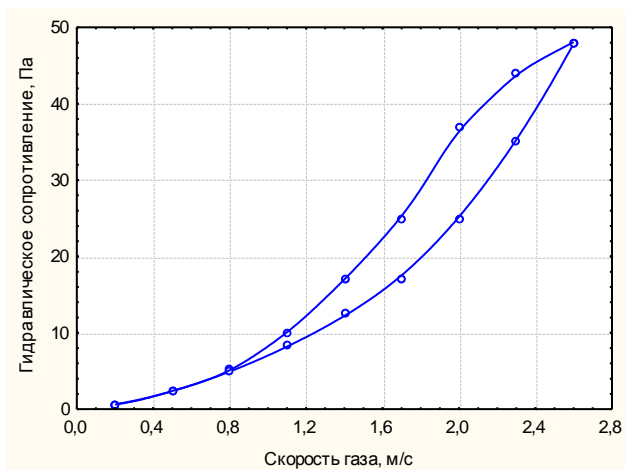
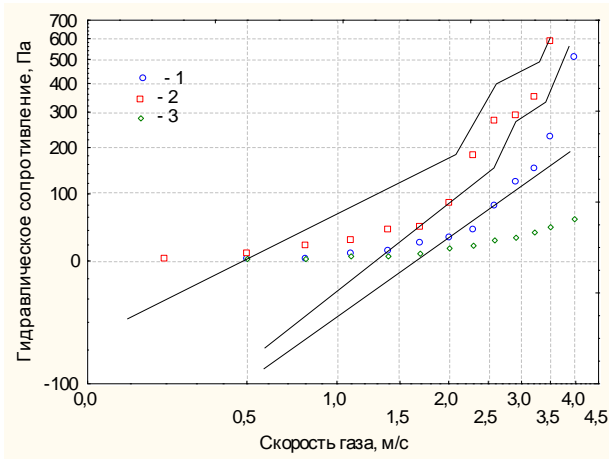


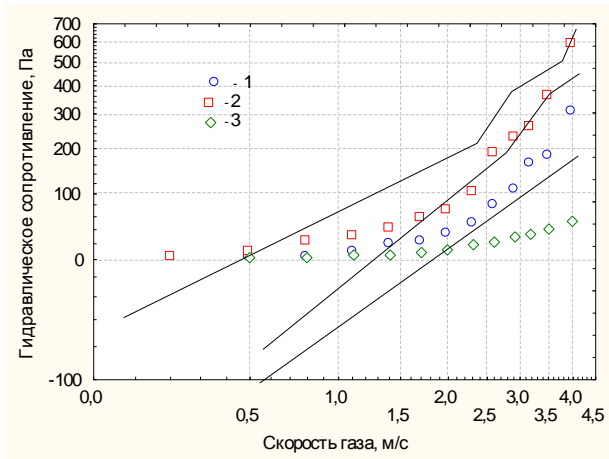
Рис. 2. Зависимость гидравлического сопротивления ПТКП от скорости газа

Что важно для объяснения интересующих нас фактов, так это то, что в диапазоне скоростей от  $0,8 \text{ м/с}$  до  $1,4 \text{ м/с}$  при подъеме скорости газа слой пены на тарелке отсутствует, а при снижении он имеется. Видимо этим и объясняется отсутствие слоев на отдельных тарелках в аппарате, где их установлено несколько. Найденные нами явления гистерезиса высоты пенного слоя и гидравлического сопротивления тарелки могут объяснить значительные расхождения имеющихся в литературе данных на этот счет и отмеченный, например, в статье [3] большой разброс результатов параллельных опытов по измерению сопротивления тарелки.

Возвращаясь к обсуждению гидродинамики контактных элементов с конусными телами следует отметить, что 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 КЭЖТ и КЭОК приведены на рис. 3. Для сравнения там же приведены графики сопротивления неорошаемых контактных устройств (линия 3).



КЭКТ



КЭОК

Рис. 3. 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 газа 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 м/с до 3 м/с, характеризуется резким нарастанием сопротивления. Это обусловлено наблюдаемым визуально захватом и уносом струй жидкости, стекающей по периферии конуса и 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 м/с до 3,5 м/с у КЭКТ и от 2,5 м/с 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 ( $\Delta p_{op}$ ) от скорости газа и плотности орошения удовлетворительно описываются относительно простым степенным уравнением:

$$\Delta p_{op} = a_1 w^{b_w} l^{b_l}.$$

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.

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. Сопоставляя результаты измерения гидравлического сопротивления орошаемых КЭКТ и КЭОК с ПТКП, можно сказать, что контактные элементы с конусными телами обладают в 1,5-1,9 раза большим сопротивлением, чем ПТКП, причем это различие уменьшается с увеличением плотности орошения и с уменьшением скорости газа.

Таблица

#### Коэффициенты и характеристики точности уравнения

Контактный элемент	$a_1$	$b_w$	$b_l$	Стандартная ошибка, Па	Коэффициент детерминации, %
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

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. Ткач Г.А. Моделирование десорбционных процессов содового производства. / Г.А. Ткач, В.Д. Смоляк – Л.: Химия, 1973. – 208 с.
2. Лукьяненко Т.В. Исследование процесса испарительного охлаждения воды на крупнодарчатых тарелках // Сборник научных трудов Государственного научно-исследовательского и проектного института основной химии (НИОХИМ). Серия: Интенсификация технологических процессов и аппаратов содового и смежных производств. – Харьков, 1985. – Т.60. – С. 9 – 13.
3. Фрумин В.М. Гидродинамика противоточных тарелок крупной перфорации в десорберах содового производства // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». – Харьков: ХГПУ, 2000. – Вып. 83.– С. 44 – 45.
4. Егоров Н.Н. Охлаждение газа в скрубберах. – М. : Росхимиздат, 1954. – 142 с.
5. Авт. свид. СССР 288877, МКИ В 01 d 3/26. Прямоточная колонна для скоростного массообмена / О.И. Прокопов (СССР). Заявл. 26.11.69. Оpubл. 08.02.71.

УДК 661.833.532:66.048.54:621.187.3

**В.И. Алексеев, канд. техн. наук; Е.А. Сивакова, В.А. Левицкий**  
(ТУ «НИОХИМ»); **А.В. Алексеев** (УкрНИИгаз)

#### **Образование инкрустаций на теплообменных поверхностях и примесей в продукте при выпаривании сульфат-хлоридных растворов в производстве сульфата натрия**

*Обговорено результати аналізу накипу з греючих камер першого корпусу випарних батарей, що працюють під тиском. З урахуванням наявних даних про можливість утворення при підвищеній температурі складних з'єднань, обумовлених наявністю домішок кальцію і магнію в системі  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}||Cl, SO_4^{2-}, H_2O$ , зроблено висновок про ймовірність утворення на теплообмінних поверхнях крім інкрустацій сульфату натрію також вантгоффіту, глауберіту та гіпсу. Для підвищення ступеня вилучення сульфату натрію з розчинів методом доупарювання скидного фугату та запобігання при цьому інкрустацій гіпсу рекомендовано очищення його від кальцію та магнію, або видалення з нього сульфату у вигляді мірабіліту методом охолоджувальної кристалізації.*

*Обсуждены результаты анализа накипи с греющих камер первых корпусов выпарных батарей, работающих под давлением. С учетом имеющихся данных о возможности образования при повышенной температуре сложных соединений, обусловленных наличием примесей кальция и магния в системе  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}||Cl, SO_4^{2-}, H_2O$ , сделан вывод о вероятности образования на теплообменных поверхностях кроме инкрустаций сульфата натрия также вант*