4. Висновки

У такий спосіб на експериментальному стенді представлялася можливість визначати товщину плівки, густину зрошення, витрату через розподільний пристрій, реологічні характеристики робочих рідин.

Список літератури: 1. *Буевич, Ю.А.* Течение и тепломассообмен в тонкой пленке на волнистой поверхности [Текст] / Ю. А. Буевич, О. В. Кудымов О.В. // Инж. физ. журн. — 1982. — Т.42, №4. — С. 564-573. **2.** *Воронцов, Е. Г.* Экспериментальное исследование гидродинамики и теплоотдачи орошающей пленки жидкости при ее гравитационном течении по вертикальной поверхности теплообмена [Текст] : автореф. дис. канд. техн. наук. — К., 1967. — 26 с.**3**. *Тананайко, Ю. М.* Методы расчета и исследования пленочных процессов [Текст] : учеб. / Ю. М. Тананайко, Е. Г. Воронцов; К. : Техника, 1975. — 312 с. **4**. *Коваленко, В.Ф.* Гравітаційна течія аномально в'язких рідин по конічних поверхнях [Текст] : автореф. дис. канд. техн. наук : В. Ф. Коваленко; [Нац. Ун-т буд-ва і архіт.]. — К. , 2001. — 20 с.**5.** *Коваленко, В. Ф.* О некоторых закономерностях течения жидкостных пленок на конических поверхностях [Текст] / В. Ф. Коваленко, Яхно О. М. // Гидравлика и гидротехника. — 1998. — вып. 59. — с.27-32.

Поступила в редколлегию 01.04.2012

УДК 661.321

В.В. ШМЕЛЬКОВ, асп., НТУ «ХПИ», Харьков,
М.А. ЦЕЙТЛИН, докт. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ», Харьков,
В.Ф. РАЙКО, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ», Харьков

СОСТАВ КОНДЕНСАТОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ГАЗОВ ДИСТИЛЛЯЦИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ СОДЫ

Розглянуто утворення конденсатів в процесах охолоджування газів у виробництві кальцинованої соди. Результати обстеження промислових апаратів покладено в основу одержання формул для розрахунку хімічного складу конденсатів і їх температури залежно від параметрів технологічного режиму.

Рассмотрено образования конденсатов в процессах охлаждения газов в производстве кальцинированной соды. Результаты обследования промышленных аппаратов положены в основу получения формул для расчета химического состава конденсатов и их температуры в зависимости от параметров технологического режима.

Condensates formation in the process of gas cooling in the soda ash production was examined. The results of industrial apparatus survey was used as a basis for obtaining formulas for calculating the chemical composition of the condensates and their temperature in dependence on the parameters of the technological mode.

В производстве кальцинированной соды по аммиачному методу в результате охлаждения технологических газов образуются значительные количества конденсатов, содержащих аммиак и аммонийные соли карбонатной кислоты. Удаление и повторное использование аммиака из этих конденсатов связано со значительными затратами из-за потребления большого количества все дорожающих энергоресурсов. Поэтому актуальным представляется поиск направлений сокращения количества конденсатов и использования оставшихся в производстве без удаления аммиака. Однако решению этих задач должно предшествовать выяснение зависимостей объема и состава образующихся

конденсатов от условий ведения технологического процесса и примененной аппаратуры.

Аммиак-содержащие конденсаты в производстве кальцинированной соды образуются на стадиях дистилляции и кальцинации в процессе охлаждения газов. На стадии дистилляции, вначале, в рекуперативном теплообменнике, носящем название «конденсатор дистилляции» (КДС), охлаждаемый газ передает свою теплоту поступающему на регенерацию маточному раствору, так называемой «фильтровой жидкости» (ФЖ). Затем, газ охлаждается в холодильнике газа дистилляции (ХГДС) водой. На стадии кальцинации, конденсаты образуются в результате охлаждения водой газов, полученных при прокаливании (кальцинации) гидрокарбоната натрия.

Вопросам работы аппаратуры для охлаждения газов дистилляции посвящена обширная литература, из которой следует выделить фундаментальную работу [0], где, в частности, на основании материальных балансов рассчитаны количества конденсатов, образующихся в КДС – 483 кг/т соды и ХГДС – 187 кг/т соды. Что касается конденсатов, образующихся на стадии кальцинации, то их количество в монографии [0] оценено в 484 кг/т соды.

Следует отметить, что все перечисленные данные привязаны к оптимальному технологическому режиму ведения соответствующих процессов и вполне конкретным типам аппаратов, существовавших на момент написания цитированных работ. К сожалению, в силу различных причин режимы работы аппаратов дистилляции и кальцинации часто отличаются от оптимальных. Кроме того, появились новые типы аппаратов и на одном предприятии порой эксплуатируются несколько разных конструкций, выполняющих однотипные задачи. Целью настоящей работы было создание методики расчета химического состава конденсатов на основании параметров технологического режима фиксируемых регламентными средствами контроля процесса.

Такая методика необходима, как для расчета материальных балансов, так и для определения термодинамических характеристик участвующих в процессе потоков, важных при нахождении баланса теплоты. Проблемой для их составления является получение данных о составах образующихся флегм. Дело в том, что расчет состава достаточно громоздкая и сложная процедура, основанная на знании тепло- и массообменных характеристик холодильников. К тому же, учитывая разброс этих характеристик, определяющийся конструкцией аппаратов, сроком их службы и другими трудно учитываемыми факторами, результат получается весьма приблизительным.

Наиболее надежным путем решения задачи расчета состава является обобщение результатов обследования аппаратов установленных на действующих предприятиях содовой промышленности. На содовых заводах Украины и стран СНГ на стадии дистилляции[1] в настоящее время эксплуатируются одинаковые ХГДС, так называемой «бочечной» конструкции [0], и три различных конструкции КДС. Одна из них (наиболее распространенная) аналогична ХГДС и представляет собой горизонтальные пучки труб, размещенные один над другим в

[1] Принятое в содовом производстве название стадии регенерации аммиака из маточной (фильтровой) жидкости, образующейся после отделения от нее на фильтрах продукта – гидрокарбоната натрия.

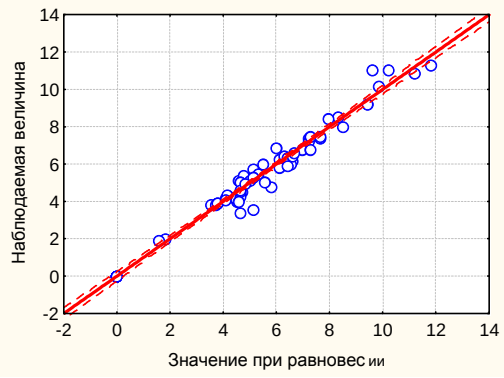
прямоугольном корпусе (далее для краткости КДС-ТБ). Жидкость движется внутри труб, а газ снаружи перекрестно по отношению к трубам. Вторая конструкция – вертикальный кожухотрубчатый теплообменник с пленочным движением жидкости внутри труб [0] (далее – КДС-ТТ). Третья конструкция (далее – КДС-ТК) принципиально отличается от первых двух тем, что газ охлаждается в аппарате прямого контакта (АПК) циркулирующим конденсатом [0]. Последний, в свою очередь, снижает свою температуру в выносном теплообменнике отдавая теплоту фильтровой жидкости.

Были обобщены результаты обследования всех перечисленных типов аппаратов. Средний состав фильтровой жидкости, поступавшей на стадию дистилляции, и интервалы его варьирования представлен в табл. 1. Как видно из этой таблицы, состав варьировался в относительно узких пределах, что обуславливало и относительное постоянство состава газа дистилляции, а следовательно позволяло предполагать (что и подтвердилось на практике) отсутствие влияния этого фактора на составы флегм.

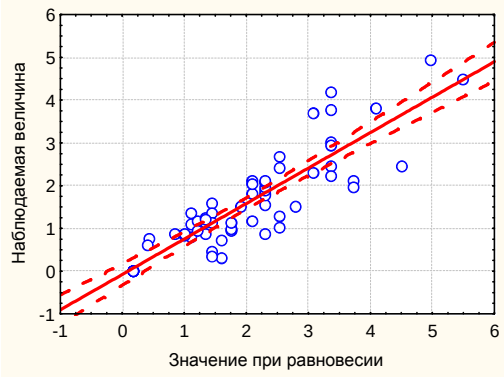
Таблица 1. Состав фильтровой жидкости

Вещество	Концентрация, кмоль/м^3	Границы изменения	
		нижняя	верхняя
Прямой титр	1,33	1,21	1,46
NH_3 общий	4,52	4,17	4,79
Cl^-	4,31	4,16	4,52
CO_2	0,902	0,814	0,975

В процессе обследования, в частности, проверялось высказанное в работе [0] предположение о том, что конденсат на выходе из соответствующего холодильника находится в равновесии с поступающим на охлаждение газом при температуре конденсата. Подтверждение справедливости такого предположения позволило бы определять состав по известным [0] данным о равновесии в системе $NH_3 – CO_2 – H_2O$.



а



б

Рис. 1. Корреляция между наблюдаемыми мольными концентрациями (кмоль/м^3) аммиака (а) и диоксида углерода (б) во флегме и равновесными их значениями при температуре флегмы.

Указанная проверка проводилась путем нахождения степени корреляции между составом флегмы, определенным по графическим данным о равновесии, и

фактически наблюдаемым ее составам по результатам обследований.

На рис. 1 «а» и «б» приведена такая корреляция в графической форме. Как видно из графика на рис. 1 «а» корреляция между равновесными и наблюдаемыми концентрациями аммиака весьма высока и характеризуется коэффициентом корреляции R = 0,98. Корреляция данных по диоксиду углерода заметно хуже (R = 0,88), что может быть объяснено, как относительно низкой точностью результатов, получаемых в промышленных экспериментах, так и большей, чем для аммиака, погрешностью определения равновесной концентрации CO_2 в области составов газа, характерных для работы ХГДС и КДС.

Несмотря на разброс точек, они группируются относительно сплошной линии, соответствующей равенству наблюдаемых и равновесных значений концентрации. Таким образом, можно считать, что предположение о том, что конденсат на выходе из соответствующего холодильника находится в равновесии с поступающим на охлаждение газом, можно считать подтвержденным.

Следующей задачей является определение температуры конденсата, зависящей, в основном, от технологического режима работы аппарата и его конструкции. Результаты экспериментального исследования этой зависимости представлены на рис. 2. Из графика видно, что температура конденсата и температура входящего в аппарат газа коррелированны, что легко объяснить конструкцией аппарата. Конденсат и газ в аппарате движутся в противотоке. Поскольку при этом образовавшийся конденсат перед выходом из аппарата контактирует с входящим газом, то в КДС-ТБ и КДС-ТТ температура конденсата зависит от баланса интенсивности теплообмена с газом с одной стороны, и с фильтровой жидкостью (в КДС) или охлаждающей водой (в ХГДС), с другой. Здесь и далее под теплообменом с газом понимается сумма «сухого» – за счет разности температур, и «мокрого» – за счет теплоты конденсации и абсорбции, теплообмена. В КДС-ТК, где встроенные поверхности охлаждения отсутствуют, температура конденсата определяется,главным образом, интенсивностью теплообмена с газом и в меньшей степени – температурой охлажденного конденсата, подаваемого на орошение аппарата.

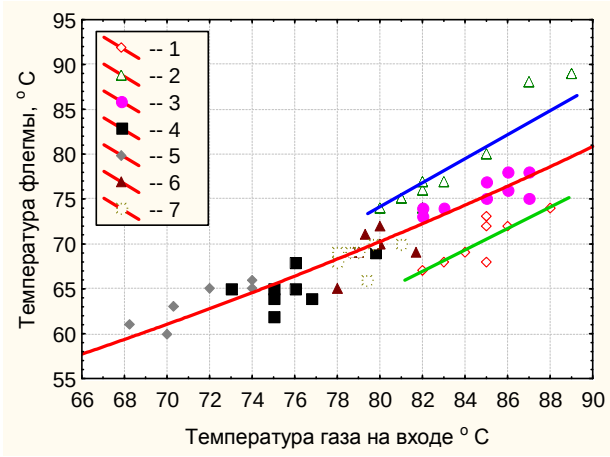


Рис. 2. Зависимость температуры флегмы от температуры газа на входе в аппарат:1 – КДС-ТБ; 2 – КДС-ТК; 3 – КДС-ТТ; 4 – ХГДС-1; 5 – ХГДС-2; 6 – ХГДС-3; 7 – ХГДС-4.

Сказанное можно подтвердить анализом данных, приведенных на рис. 2. Так в КДС-ТБ, где скорость газа, а, следовательно, и интенсивность теплообмена с ним минимальны, температура конденсата (точки 1) при прочих равных также

меньше, чем у других аппаратов. Самая высокая температура конденсата в аппарате КДС-ТК, где, как указывалось, конденсат в процессе взаимодействия с газом не охлаждается.

Что касается ХГДС, то при обследовании четырех этих аппаратов, работавших в разных температурных режимах, значимых различий в зависимости температуры конденсата от температуры поступающего газа не выявлено.

Следует отметить, что в процессе работы было проверено также влияние на температуру конденсата таких факторов, как давление газов, нагрузка аппаратов по фильтровой жидкости и ее состав. Как оказалось, значимая корреляция между этими величинами отсутствует. Что касается отсутствия влияния нагрузки, то полученный результат легко объясняется тем, что ее увеличение ведет к пропорциональной интенсификации теплообмена конденсата, как с газом, так и с охлаждающей жидкостью. Влияние же давления газа и состава фильтровой жидкости, как и ожидалось, не удалось выявить из-за весьма узкого допустимого диапазона варьирования этих факторов в условиях действующего производства.

Экспериментальные данные по зависимости температуры конденсата от температуры охлаждаемого газа в интервале значений последней от 68 до 89 °С были обобщены в виде следующей эмпирического уравнения:

$$t_к = a_0 + a_1 t_г + a_2 t_г^2 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

где $t_к$ и $t_г$ – температуры конденсата и газа, соответственно, ºС.

Значения коэффициентов a_i уравнения (1) и оценки точности приведены в табл. 2. В качестве оценок точности использован коэффициент детерминации (R^2) и среднеквадратическаое отклонение (СКО).

Полученные результаты позволяют, зная температуру газа поступающего в аппарат (фиксируется регламентными средствами контроля), найти температуру конденсата, а по ней и составу охлаждаемого газа определить состав конденсата. Для последней процедуры можно использовать диаграммы из монографии [1]. К сожалению, указанная монография является библиографической редкостью. Кроме того, графическое представление не подходит для расчетов с использованием ЭВМ.

Таблица 2.Коэффициенты уравнения

Аппарат	Коэффициенты			Оценки точности	
	a_0	a_1	a_2	R^2	СКО, °С
ХГДС и КДС-ТТ	394	-9,7	0,070	0,91	1,2
КДС-ТБ	-33	1,22	–	0,83	1,5
КДС-ТК	579	-13,6	0,091	0,88	1,3

Известные (см., например [0; 0]) аппроксимации данных о равновесии в системе $NH_3 – CO_2 – H_2O$ представляют собой весьма сложные эмпирические формулы, решенные в явной форме относительно концентраций компонентов в газе. Их громоздкость обусловлена стремлением авторов описать всю область существования указанной выше системы. Нас же интересует весьма узкий диапазон концентраций, характерный для аппаратов охлаждения газов содового

производства, а также задача обратная, поставленной в цитированных работах, а именно: определение состава конденсата по температуре и составу газа. Решению этой задачи могут помочь эмпирические зависимости концентрации аммиака и диоксида углерода от параметров, полученные в результате математической обработки результатов обследования аппаратов охлаждения газов дистилляции.

Исследовалось влияние нагрузки аппаратов по фильтровой жидкости, ее состава, давления в аппарате и температуры конденсата на его состав. Оказалось, что значимое влияние на состав конденсата оказывает только его температура. Так, в частности, для мольной концентрации углеаммонийных солей в конденсате в пересчете на диоксид углерода получено следующее уравнение:

$$[CO_2] = 10^{5081/(273+t_к)-14,6} \qquad (2)$$

Оценки точности уравнения (2) в интервале значений температуры конденсата от 60 до 89 °С составляют: $R^2 = 0,91$, СКО = 0,4 моль/дм^3

Общая мольная концентрация аммиака в конденсате может быть рассчитана по уравнению

$$[NH_3] = 11,2 + 1,50\,[CO_2] - 0,112\,t_к \qquad (3)$$

Оценки точности уравнения (3) в интервале значений температуры конденсата от 60 до 89 °С и концентраций CO_2 от 0,2 до 5 моль/дм^3 составляют: $R^2 = 0,96$, СКО = 0,7 моль/дм^3

Было также установлено, что мольное отношение концентраций диоксида углерода и аммиака в конденсате также коррелированно с температурой конденсата и может быть рассчитано по формуле

$$[CO_2] / [NH_3] = 1,0 - 0,0985\,t_к \qquad (4)$$

Оценки его точности в том же интервале температур, что и для уравнений (2) и (3) – $R^2 = 0,86$, СКО = 0,03

Результаты исследования позволяют рекомендовать следующую последовательность расчета состава конденсата. Вначале рассчитывается температура флегмы по уравнению(1), затем концентрация диоксида углерода по уравнению (2) и, наконец концентрация аммиака по уравнению(3).

В процессе обследования работы КДС была также найдена зависимость концентрации углеаммонийных солей в пересчете на диоксида углерода в фильтровой жидкости, нагретой в КДС, от ее температуры и состава. Этот показатель, как и все предыдущие важен для расчета материального и теплового баланса КДС.

Как оказалось на эту концентрацию, кроме температуры, влияет также суммарная концентрация в фильтровой жидкости свободного аммиака и аммиака, связанного в углеаммонийные соли. Эта суммарная величина с высокой степенью точности равна общей щелочности жидкости или иначе «прямому титру» (П.Т.). Обработка экспериментальных данных позволила получить следующее уравнение для расчета мольной концентрации CO_2 в фильтровой жидкостью:

$$[CO_2] = 2,85 + 664/(t_ф - 301) + 0,544\,[П.Т.]^{0,5}, \qquad (1)$$

где $t_ф$ – температура фильтровой жидкости, °С; [П.Т.] – мольная концентрация общей щелочности фильтровой жидкости, моль/дм^3.

В интервале температур фильтровой жидкости от 50 до 80 °С и общей щелочности от 1,1 до 1,6 моль/дм^3 коэффициент детерминации уравнения (1) составляет 0,96 и СКО = 0,05 моль/дм^3.

Результаты исследования найдут применение в расчетах материальных и тепловых балансов и, в частности, для определения объемов образующихся конденсатов в ряде аппаратов для охлаждения газов и нагрева технологических жидкостей в содовом и смежных производствах.

Список литературы: 1. *Микулин Г.И.* Дистилляция в производстве соды. / *Г.И. Микулин, И.К. Поляков.*– М., Л.: Госхимиздат, 1956.– 348 с. **2.** *Зайцев И.Д.* Производство соды./ *И.Д. Зайцев, Г.А. Ткач, Н.Д. Стоев.*– М.: Химия, 1986.–312 с. **3.** *Цейтлин М.А.* Изучение технологических параметров работы конденсатора дегазации в производстве хлористого аммония. / *М.А. Цейтлин, В.А. Турчин, В.П. Чайка* // Сб. научн. тр. «Химия и технология производств в содовой промышленности». – Харьков: НИОХИМ, 1983.– Т. 58. – С. 58-62. **4.** *Цейтлин М.А.* Физическое моделирование процессов охлаждения парогазожидкостных систем на сегментных контактных устройствах./ *М.А. Цейтлин, А.Т. Гареев, В.Ф. Райко* // Сб. научн. тр. «Экология и ресурсосбережение».– Харьков: ХГПУ, 1997.– Т.2.– С. 28-31. **5.** *Турчин В.А.* Изучение технологических параметров работы конденсатора дегазации в производстве хлористого аммония. / *В.А Турчин, М.А. Цейтлин, В.П. Чайка* // Сб. научн. тр. «Химия и технология производств в содовой промышленности». – Харьков: НИОХИМ, 1983.– Т. 58. – С. 54-57. **6.** *Ткач Г.А.* Моделирование десорбционных процессов содового производства. / *Г.А. Ткач, В.Д. Смоляк.*– Л.: Химия, 1973.– 208 с.

Поступила в редколлегию 04.04.2012

УДК 621.43.056

Г.Б. ВАРЛАМОВ, докт.техн.наук, проф., прорект, НТУ «КПИ», Киев,
Ю.Н. КАМАЕВ, канд.техн.наук, доц., НТУ «КПИ», Киев,
П.О. ПОЗНЯКОВ, асп., инж, НТЦ «ЭКОТЭС», Киев,
Д.Н. ЮРАШЕВ, маг., НТУ «КПИ», Киев

МОДЕРНИЗАЦИЯ ГОРЕЛОЧНОЙ СИСТЕМЫ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ДН80 С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРУБЧАТОЙ ТЕХНОЛОГИИ ГАЗОСЖИГАНИЯ

Стаття присвячена питанням аналізу процесу розробки і випробувань нової конструкції пальникової системи сучасного вітчизняного газотурбінного двигуна ДН80 на основі трубчастої технології спалювання газу.
Ключові слова: газотурбінний двигун, камера згорання, трубчаста технологія спалювання газу, екологічна безпека

Статья посвящена вопросам анализа процесса разработки и испытаний новой конструкции горелочной системы современного отечественного газотурбинного двигателя ДН80 на основе трубчатой технологии сжигания газа.
Ключевые слова: газотурбинный двигатель, камера сгорания, трубчатая технология сжигания газа, экологическая безопасность