

Подальші дослідження будуть спрямовані на пошук ефективних стабілізаторів полімерної сірки, які входять до складу охолоджувального середовища в конденсаторах змішування.

**Список літератури:** 1. Яворський, В.Т. Технологія сірки і сульфатної кислоти [Текст]: підручник / В.Т. Яворський. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2010. – 404 с. 2. Знак, З.О. Масштабування процесу плазмохімічного перероблення сірководню на установках різної потужності [Текст] / З.О. Знак, В.Т. Яворський // Восточно-европейский журнал передовых технологий. -2006. -№ 4/3 (22). - С. 76-79. 3. Знак, З.О. Одержання полімерної сірки при охолодженні продуктів плазмохімічного розкладу сірководню в поверхневому конденсаторі [Текст] / З.О. Знак, В.Т. Яворський, Р.Р. Оленич // Вопросы химии и химической технологии. -2005. -№3. -С. 66-69. 4. Знак, З.О. Моделювання процесу одержання полімерної сірки внаслідок плазмохімічного перероблення сірковмісних сполук [Текст] / З.О. Знак // Экологические технологии и ресурсосбережение. -2006. -№ 5. - С.44-48.

*Поступила в редколлегию 01.12.2010*

**УДК 66.021+66.048**

**Е. В. МАНОЙЛО**, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПИ», г. Харьков  
**В. Ф. МОИСЕЕВ**, канд. техн. наук, профессор, НТУ «ХПИ», г. Харьков

### **УНОС ЖИДКОЙ ФАЗЫ В ЦЕНТРОБЕЖНОМ АППАРАТЕ**

Виявлено основні закономірності, що впливають на віднесення рідкої фази у відцентровому тепло- масообмінному апараті. Проведено якісний аналіз основних джерел віднесення рідкої фази. Експериментально вивчений вплив робочих параметрів – щільності зрошення, швидкості газу, числа оборотів ротора на величину сумарного віднесення рідкої фази. Також розглянута зміна величини сумарного віднесення рідкої фази при використанні різних контактних пристроїв і сепаратора-відбійника в газоході, через який відводять газову фазу.  
Ключевые слова: центробежный тепло-массообменный аппарат, брызгоунос, гидродинамика

Выявлены основные закономерности, влияющие на унос жидкой фазы в центробежном тепло- массообменном аппарате. Проведен качественный анализ основных источников уноса жидкой фазы. Экспериментально изучено влияние рабочих параметров – плотности орошения, скорости газа, числа оборотов ротора на величину суммарного уноса жидкой фазы. Также рассмотрено изменение величины суммарного уноса жидкой фазы при использовании различных контактных устройств и сепаратора-отбойника в отводящем газоходе.  
Ключевые слова: центробежный тепло-массообменный аппарат, брызгоунос, гидродинамика

Basic conformities to law, influencing on taking away of liquid phase in centrifugal masstransfer vehicle, are exposed. The analysis of basic sources of taking away of liquid phase is conducted. Influence of operating parameters - closenesses of irrigation, gas speed, number of turns of rotor on the size of the total taking away of liquid phase is experimentally studied. The change of size of the total taking away of liquid phase is also considered at the use of different contact devices and separation device in gas output.  
Keywords: centrifugal masstransfer vehicle, taking away of liquid phase, hydrodynamics

Известно, что увеличение скорости движения фаз в массообменных устройствах приводит к резкому возрастанию коэффициента массообмена.

но одновременно сопровождается ростом потерь продукта за счет уноса. Мало изученность данного вопроса не позволяет достаточно широко и эффективно использовать центробежный эффект в массообменных аппаратах. Очевидные преимущества принудительной закрутки потоков, такие как снижение габаритов массообменных аппаратов, при росте производительности, снижение уноса и увеличение эффективности массообмена делают решение данной задачи актуальным.

Анализ данных по гидродинамике распыленной жидкости и гидродинамике удара капель о преграду позволил выделить следующие основные источники уноса жидкой фазы на контактном элементе:

- мелкодисперсные капли, унесенные потоком газа (пара) из факела распыленной жидкости;
- мелкодисперсные капли, образовавшиеся при взаимодействии капель факела между собой;
- вторичные капли, образовавшиеся при ударе капель факела о пластинки контактного устройства.
- мелкодисперсные капли, образовавшиеся при взаимодействии капель факела и вторичных капель между собой.

Исследование отдельных источников уноса жидкой фазы позволит установить вклад каждого из них в суммарную величину уноса жидкости и обоснованно подойти к описанию явления, определив основные направления снижения уноса на контактном элементе центробежного тепло-массообменного аппарата.

На первом этапе представляется целесообразным провести аналитическое исследование всех перечисленных выше источников уноса [1].

Величина уноса жидкой фазы за счет первого источника может быть определена следующим образом

$$e_1 = \sum_{i=1}^k e_{1i} = \rho_{ж} \sum_{i=1}^k Q_i P_i = \rho_{ж} \sum_{i=1}^k Q_i \int_0^{d_{max,i}} f dd_i \quad (1)$$

Учитывая нормальное распределение капель по размерам в факеле распыленной жидкости, получено экспериментальное уравнение для определения величины уноса жидкой фазы

$$e_1 = \sum_{i=1}^{k_c} \int_0^{d_{max}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}S} \exp\left[-\frac{(d_{max} - d_1)^2}{2S^2}\right] Q_c dd_i \quad (2)$$

где  $e_1$  - унос жидкой фазы за счет первого источника, кг/с;  $f$  - функция распределения размеров капель в факеле;  $d_{max}$  - максимальный диаметр капли, уносимой с контактного элемента из факела, образованного одним рядом отверстий, м;  $Q$  - производительность одного ряда отверстий распылителя, м<sup>3</sup>/с;  $Q_c$  - производительность части распылителя высотой  $H$ ; м<sup>3</sup>/с;  $H$  - высота сепарирующей части факела, м;  $S$  - среднеквадратичное отклонение;

Производительность распылителя определяли по данным работы [2], средний размер диспергированных капель - по данным [3]; капли в факеле распыленной жидкости отвечают нормальному закону распределения со

среднеквадратическим отклонением  $S = 0,6$  [3]. Для описания движения капель в факеле на контактном элементе воспользуемся математической моделью движения одиночной сферической капли в прямоугольной системе координат, жестко связанной с контактными элементами. Движение такой капли определяется центробежной силой тяжести и силой сопротивления газовой (паровой) фазы. Сила Архимеда мала, ею пренебрегаем.

Математическая модель движения капли на оси координат согласно второму закону Ньютона будет иметь вид

$$\begin{aligned} m \frac{dU_x}{d\tau} &= -\zeta F \frac{(U_x - U_{\dot{a}x})^2}{2} \rho_{\dot{a}} \\ m \frac{dU_y}{d\tau} &= -\zeta F \frac{(U_y - U_{\dot{a}y})^2}{2} \rho_{\dot{a}} \\ m \frac{dU_z}{d\tau} &= -\zeta F \frac{(U_z - U_{\dot{a}z})^2}{2} \rho_{\dot{a}} \end{aligned} \quad (3)$$

Проекция скорости газового потока на оси  $X$ ,  $Y$ , и  $Z$  зависят от расположения капли относительно стенок контактного устройства и угла  $\gamma$  установки направляющих лопаток.

$$\begin{aligned} U_{zx} &= U_{xy} \sin \theta, \\ U_{zy} &= U_{xy} \cos \theta, \\ U_{zz} &= U_z \sin \gamma. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь  $U_{\dot{a}x} = U_{\dot{a}} \cos \gamma$  - горизонтальная составляющая скорости газа.

Подставив (4) в (3), получим систему простых дифференциальных уравнений, описывающих положение и скорость капли в свободном объеме контактного элемента:

$$\begin{aligned} \frac{dX}{d\tau} &= U_x & \frac{dU_x}{d\tau} &= -\zeta F \frac{(U_x - U_{\dot{a}} \cos \gamma \sin \theta)^2}{2m} \rho_{\dot{a}} \\ \frac{dY}{d\tau} &= U_y & \frac{dU_y}{d\tau} &= -\zeta F \frac{(U_y - U_z \cos \gamma \cos \theta)^2}{2m} \rho_z \\ \frac{dZ}{d\tau} &= U_z & \frac{dU_z}{d\tau} &= -\zeta F \frac{(U_z - U_z \sin \gamma)^2}{2m} \rho_z \end{aligned} \quad (5)$$

где  $U$  - скорость капли, м/с;  $U_{\dot{a}}$  - скорость газа, м/с;  $X, Y, Z$  - оси координат, м;  $\gamma$  - угол установки направляющих лопаток в контактном устройстве, град;  $\theta$  - угол между радиусом до капли и осью  $X$ , град;  $\zeta$  - коэффициент сопротивления среды;  $F$  - площадь сечения капли, м<sup>2</sup>;  $\rho_r, \rho_{ж}$  - плотность газа и жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $m$  - масса капли, кг;

Полученную систему дифференциальных уравнений решали методом Рунге-Кутты. Начальные условия выбирали так, чтобы в момент распада струи капля вылетала параллельно оси  $X$ . При этом скорость капли определяли по формулам, предложенным в [3].

При определении коэффициента сопротивления среды движению капли учитывали объемную концентрацию капель в факеле [4]

$$\zeta = C(1 - \beta)^{4,7}$$

где  $C$  - коэффициент сопротивления одиночной капли;  $\beta$  - объемная концентрация капель в факеле;

В области развитой турбулентности капля принимает форму, близкую к эллипсоиду с соотношением полуосей 4х6; для таких капель  $C = 0,6$  [5].

Вероятность соударения капель в факеле из-за изменения траектории мелкодисперсных капель (второй источник уноса) оценивали с использованием вероятностного метода [6]. Суть метода заключается в определении вероятности (без столкновений) пробега капель одного потока некоторого расстояния в среде капель другого потока. Размер мелкодисперсных капель, долетевших из предыдущего единичного факела до последующего по направлению движения воздуха, и скорость капель в момент встречи определяли с использованием системы дифференциальных уравнений (5). Мишенями мелкодисперсным каплям из предыдущего факела служили капли размером больше 0,2 мм, которые остаются в объеме единичных факелов.

Анализ полученных результатов показал, что вероятность столкновений капель в факеле составляет 40 - 60% и увеличивается по мере снижения скорости газа. Однако при этом количество и размер мелкодисперсных капель, долетевших из предыдущего единичного факела в последующий, уменьшается. Оценка дисперсного состава по числу Вебера показывает, что происходящие столкновения не могут привести к его заметному изменению, поскольку доля мелкодисперсных капель в факеле распыленной жидкости не превышает 0,5 % от их общего числа. Это позволяет сделать вывод, что столкновения капель в факеле не оказывают существенного влияния на унос жидкой фазы в центробежном тепло- массообменном аппарате.

Для снижения количества вторичных капель, образовавшихся при ударе капель факела о пластинки контактного устройства (третий источник). Из данных [7] следует, что в условиях такого удара на поверхности сепарируется до 95% ударяющейся в виде капель жидкости. При этом диаметр выбитых с поверхности капель увеличивается в 1,5-2,5 раза, что существенно снижает вероятность их уноса газом.

Вероятность столкновения капель факела и вторичных капель (четвертый источник уноса жидкой фазы) оценивали аналогично второму источнику уноса с использованием вероятностного метода. Анализ полученных данных показал, что вероятность столкновения капель факела и вторичных капель достаточно высокая: 65 - 99%. Оценка результатов столкновений по числу Вебера [7] показывает, что происходит частичное разбиение вторичных капель с образованием осколков, которые уносятся потоком газа на сепаратор-отбойник.

Таким образом, унос жидкой фазы за счет первого источника можно определить аналитически. Оценить остальные источники можно лишь качественно; при том четвертый источник оказывает более существенное влияние на суммарное значение уноса жидкости по сравнению со вторым и третьим. Из этого следует, что строго аналитически определить суммарную величину уноса жидкости на контактном устройстве центробежного тепло-

массообменного аппарата с противоточным газо-жидкостным потоком не представляется возможным.

Цель экспериментальных исследований настоящей работы - определить суммарное значение уноса жидкой фазы и выявить доли источников. Эта информация необходима при разработке обоснованной методики расчета уноса жидкой фазы на контактном элементе центробежного тепло- массообменного аппарата с противоточным газожидкостным потоком. Это позволит создавать и совершенствовать подобные аппараты.

Количество унесенной с контактного элемента жидкости определяли сепарационным методом, который основан на улавливании уносимых капель жидкости в вынесенном сепараторе-каплетбойнике. Это позволяет отделять не менее 99,3% уносимой из аппарата жидкости при максимальных скоростях воздуха, а с уменьшением скорости эффективность сепарации возрастает до 99,8%.

Экспериментальные исследования уноса жидкой фазы проводились на установке, показанной на рис. 1.

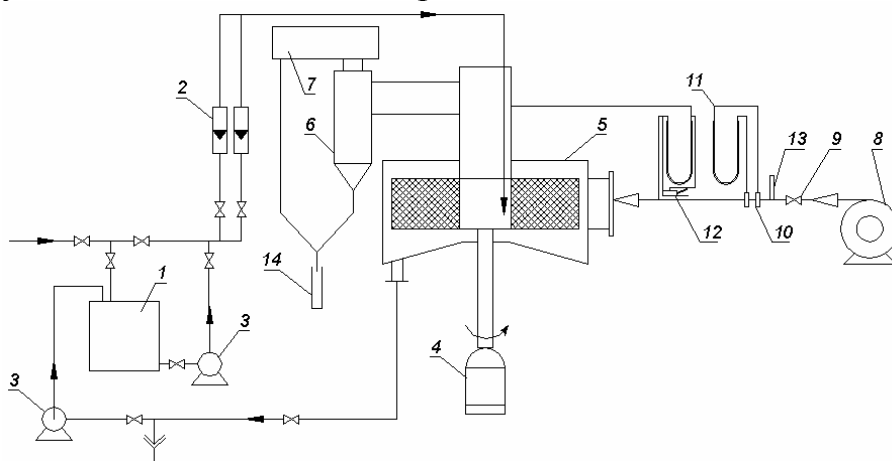


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для изучения уноса жидкой фазы

1 – емкость, 2 – ротаметры, 3 – насосы, 4 – электродвигатель, 5 - аппарат, 6, 7 – центробежный и объемный сепараторы, 8 – газодувка, 9 – задвижка, 10 – диафрагма, 11 – дифманометр, 12 – микроманометр, 13 – термометр, 14 – мерный стакан

газа 0,5-3,5 м/с, число оборотов ротора 1000-10000 об/мин.

В качестве жидкой фазы использовалась вода, газообразной фазой был воздух. Величина относительного уноса жидкой фазы определялась по формуле

$$e = \frac{L_0}{L} 100\%$$

где  $L_0$  - объем уносимой жидкости, м<sup>3</sup>/ч,  $L$  - объем поступающей в аппарат жидкости, м<sup>3</sup>/ч.

На рис.2 изображены величины относительного уноса жидкой фазы от скорости газа в аппарате для различных чисел оборотов и на рис. 3 зависимости

При этом изучались различные конструкции контактных устройств. Наружный диаметр контактного устройства был 200 мм, внутренний диаметр контактного устройства – 60 мм. Высота насадочного слоя 50 мм. Изучалось влияние на унос жидкости основных рабочих параметров в пределах их изменения: плотность орошения 0,5-15 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч, скорость

уноса жидкой фазы от плотности орошения. Как следует из рис. 2 величина уноса растет с увеличением скорости газа и числа оборотов ротора, что объясняется увеличением силы гидродинамического воздействия на капли со стороны газового потока и уменьшением размеров капель при повышении частоты вращения ротора.

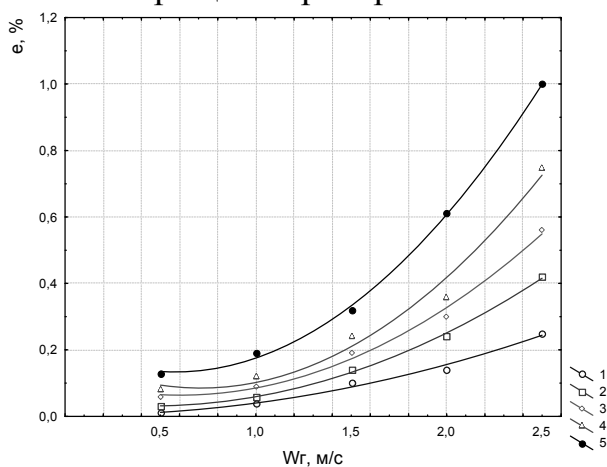


Рис. 2. Зависимость величины относительного уноса жидкой фазы от скорости газа в аппарате.  $Q = 6 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ , пластинчатый контактный элемент. 1 -  $n = 1000$  об/мин, 2 – 3000 об/мин, 3 – 5000 об/мин, 4 – 7000 об/мин, 5 – 9000 об/мин

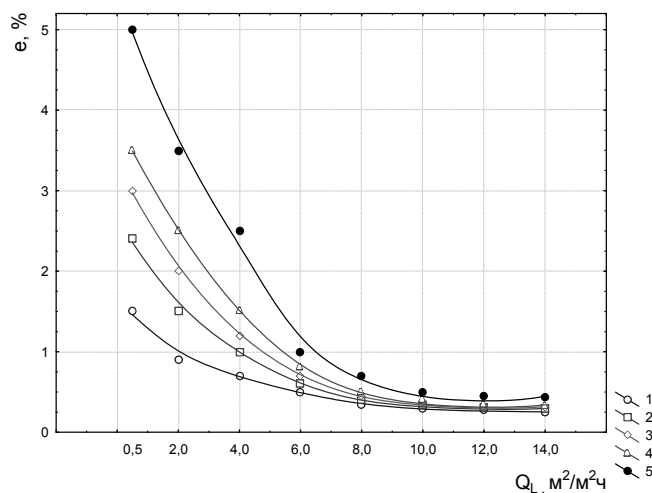


Рис. 3. Зависимость величины относительного уноса жидкой фазы от плотности орошения.  $W_G = 2 \text{ м/с}$ , пластинчатый контактный элемент.  $n$ , об/мин: 1 – 1000; 2 – 3000; 3 – 5000; 4 – 7000; 5 – 9000

Согласно рис. 3 при увеличении плотности орошения величина относительного уноса жидкости заметно снижается. Это можно объяснить тем, что с увеличением плотности орошения увеличиваются толщины жидкостной пленки на внутренних поверхностях контактного устройства аппарата. Это приводит к снижению количества брызг, образующихся при ударе летящих с большой скоростью капель о поверхности пленок. Как показали расчеты, снижение уноса жидкой фазы происходит до достижения жидкостной пленкой толщины порядка 3 мм. При дальнейшем увеличении ее толщины (плотности орошения) такого явления не наблюдается, унос жидкости остается постоянным.

Для определения влияния конструктивных характеристик контактных устройств на величину суммарного уноса жидкой фазы было проведено исследование трех различных конструкций. Были исследованы радиальный, сетчатый и пластинчатый типы контактных устройств.

Эксперименты показали, что наименьший унос жидкой фазы обеспечивает пластинчатый контактный элемент. Дальнейшие исследования по уносу жидкости проводили с его использованием. Дополнительно было изучено влияние наличия сепаратора-каплеотбойника из сетки в виде регулярного блока высотой 50 мм в газоотводящем патрубке на величину суммарного уноса жидкости.

Наличие сепаратора-каплеотбойника снижает унос жидкой фазы в среднем на 90 %, а при низких скоростях газа позволяет практически

исключить его. В результате сравнительных испытаний используемая конструкция сепаратора подтвердила свою высокую эффективность отделения жидкой фазы от выходящего газового потока.

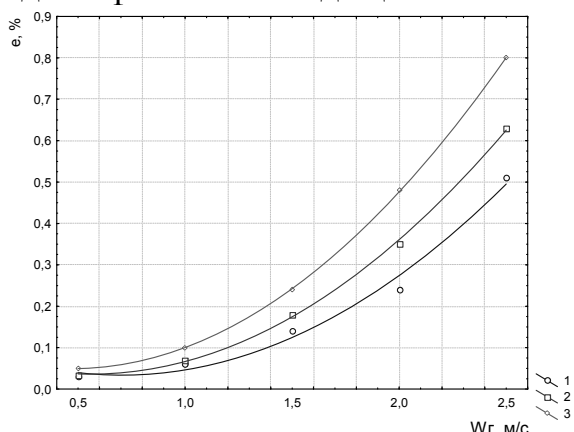


Рис. 4. Зависимость величины относительного уноса жидкой фазы от скорости газа в аппарате для различных контактных устройств.  $Q = 6 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ ,  $n = 3000 \text{ об/мин}$ . 1 – пластинчатый; 2 – радиальный; 3 – сетчатый

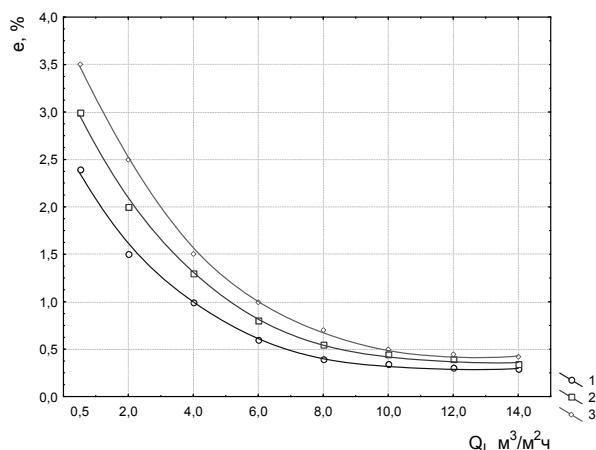


Рис. 5. Зависимость величины относительного уноса жидкой фазы от плотности орошения для различных контактных устройств.  $W_G = 2 \text{ м/с}$ ,  $n = 3000 \text{ об/мин}$ . 1 – пластинчатый; 2 – радиальный; 3 – сетчатый

Результаты эксперимента обобщены в виде эмпирической зависимости, связывающей величину относительного уноса жидкой фазы с указанными параметрами

$$e = 2,3 \cdot 10^{-5} W_{\dot{a}}^{2,54} Q_L^{-1,48} n^{1,4} \quad (6)$$

Среднее относительное отклонение рассчитанных по (6) и опытных значений не превышает 15 %.

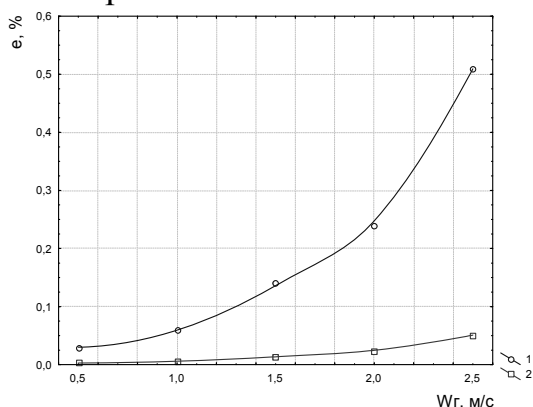


Рис. 6. Зависимость величины относительного уноса жидкой фазы от скорости газа в аппарате при наличии и отсутствии сепаратора каплеотбойника для пластинчатого контактного устройства.  $Q = 6 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ ,  $n = 3000 \text{ об/мин}$ . 1 – без каплеотбойника ; 2 – с каплеотбойником

кольцевое пространство между распределителем жидкости и внутренней поверхностью контактного устройства.

При проведении химико-технологических процессов в системах газ-жидкость возникает необходимость расчета допустимой скорости газа в аппарате, исходя из величины допустимого относительного уноса жидкой фазы. Для центробежных аппаратов получена расчетная зависимость вида

$$W_{\dot{a}} = 160 \cdot e^{0,36} Q_L^{0,53} n^{-0,65} \quad (7)$$

В центробежном тепло-массообменном аппарате наиболее "опасной" зоной для уноса жидкости является

Скорость газа здесь максимальная, а капли жидкости еще не достигли насадки, где им сообщается дополнительное вращательное движение и тем самым увеличивается действующая на них центробежная сила, препятствующая уносу жидкости из аппарата газовым потоком.

Было установлено, что помимо влияния скорости газа и плотности орошения на появление уноса жидкости существенным образом влияет поле центробежных сил. Также можно предположить, что физические свойства системы будут оказывать существенное влияние на возникновение критических явлений и как результата уноса жидкости. С увеличением вязкости и поверхностного натяжения происходит, смещение области критических явлений в сторону больших значений плотности орошения.

**Список литературы:** 1. Сорокопуд А.Ф., Исследование брызгоуноса в роторном распылительном аппарате [Текст] / А.Ф. Сорокопуд, Е. А. Федоров // ТОХТ – 2001. – т. 35, № 3. С. 321–326. 2. Трошкин О.А. Расчет пропускной способности вращающегося цилиндра с отверстиями в боковой стенке [Текст] / О.А.Трошкин, Ю.И.Макаров, А.А. Плановский.// Химическое и нефтяное машиностроение. – 1972. – №4. – С.640-645. 3. Трошкин О.А. Распад струи, вытекающей из отверстия в стенке вращающегося цилиндра [Текст] / О.А.Трошкин, А.А. Плановский, Ю.И.Макаров // ТОХТ. – 1972. – т. 6, № 4. – с. 640-648. 4. Пажи Д.Г.. Основы техники распыливания жидкостей [Текст] / Д.Г.Пажи, В.С. Галустов – М. : Химия, 1984 – 315 с. 5. Волынский М.С. Деформация и дробление капель в потоке газа [Текст] / М.С. Волынский, А.С. Липатов // Инженерно-физический журнал – 1970. – т.18, № 5. – С. 838-847. 6. Зайцев А.И. Ударные процессы в дисперсно-пленочных системах [Текст]/ А.И. Зайцев, О.Д. Бытев – М. : Химия, 1994 – 421 с. 7. Взаимодействие капель с поверхностью пластины [Текст] / Сб. научных работ Московского энергетического института / Теплоэнергетика и энергомашиностроение. – М., 1976. – с. 263

*Поступила в редколлегию 25.11.2010*

**УДК 631.3:636.085.55**

**В.І. ПІСКУН**, зав. лабораторії механізації, Інститут тваринництва НААН України, м. Харків

**Ю.В. ЯЦЕНКО**, аспірант, Інститут тваринництва НААН України, м. Харків

### **АПРОБАЦІЯ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА КОМБІКОРМІВ ТА БВМД В УМОВАХ ГОСПОДАРСТВА**

Наведено результати апробації технології. Продуктивність - по 1 тонні лівої та правої частини лінії, модуль помелу комбікормів склав 2,3 - 2,4 мм., точність дозування вагового дозатора з тензодатчиком - 0,1 кг, якість змішування - 95,0 %. Використання запропонованої технології виробництва комбікормів та БВМД дає змогу знизити питомі капітальні вкладення на 41,8 %, та питомі виробничі витрати на 32,3 % .

Ключові слова: технологія, продуктивність, точність дозування, якість змішування, питомі витрати.

Приведено результаты апробации технологии. Продуктивность – по 1 тонне левой и правой части линии, модуль помола - 2,3 - 2,4 мм, точность дозирования весового дозатора с тензодатчиком – 0,1 кг., качество смешивания – 95%. Использование предложенной