

УДК 66.015.23

**Н.А. Войнов<sup>1</sup>, С.М. Воронин<sup>2</sup>, О.П. Жукова<sup>1</sup>, С.А. Ледник<sup>1</sup>**<sup>1</sup>Сибирский государственный технологический университет<sup>2</sup>Сибгипробiosiнтез

Войнов Николай Александрович родился в 1952 г., окончил в 1976 г. Ленинградский технологический институт им. Ленсовета, доктор технических наук, профессор кафедры машин и аппаратов промышленных технологий Сибирского государственного технологического университета. Имеет более 300 печатных работ в области тепло- и массопереноса в газожидкостных системах.

E-mail: voynov@siberianet.ru



Воронин Сергей Михайлович родился в 1953 г., окончил в 1975 г. Сибирский технологический институт, кандидат технических наук, директор Сибгипробiosiнтеза. Имеет около 30 печатных работ в области газожидкостных процессов.

Тел.: 8(391) 2- 42-06-33



Жукова Ольга Петровна родилась в 1962 г., окончила в 1984 г. Кемеровский государственный университет, кандидат технических наук, доцент кафедры машин и аппаратов промышленных технологий Сибирского государственного технологического университета. Имеет более 50 печатных работ в области газожидкостных процессов.

E-mail: zhukovolga@yandex.ru



Ледник Сергей Александрович родился в 1986 г., окончил в 2009 г. Сибирский государственный технологический университет, аспирант СибГТУ. Имеет 2 печатные работы в области тепло- и массопереноса в газожидкостных системах.

E-mail: ledniksergey@mail.ru



## РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ КОНТАКТНЫХ СТУПЕНЕЙ БРАЖНЫХ КОЛОНН

Представлены результаты исследования и внедрения контактных ступеней с колпачковыми и прямоточно-вихревыми контактными устройствами в промышленной бражной колонне; показано что наиболее эффективным вариантом являются вихревые контактные ступени с профилированными тангенциальными каналами.

*Ключевые слова:* бражная колонна, вихревая тарелка, колпачковая тарелка, гидравлическое сопротивление, коэффициент массоотдачи, эффективность.

Бражные ректификационные установки используются при получении этилового спирта на основе гидролизата древесины. Основным их отличием от действующих в технологической линии ректификационных колонн является большая (до 180 м<sup>3</sup>/ч) производительность по жидкости и сравнительно низкая (2 ... 8 % об. ) концентрация этанола в бражке, что обуславливает высокий расход пара (до 60 % от его общего потока) [6]. Кроме того, высокое содержание в рабочей жидкости лигнино-гуминовых веществ вызывает их осаждение в процессе ректификации на поверхности контактных ступеней.

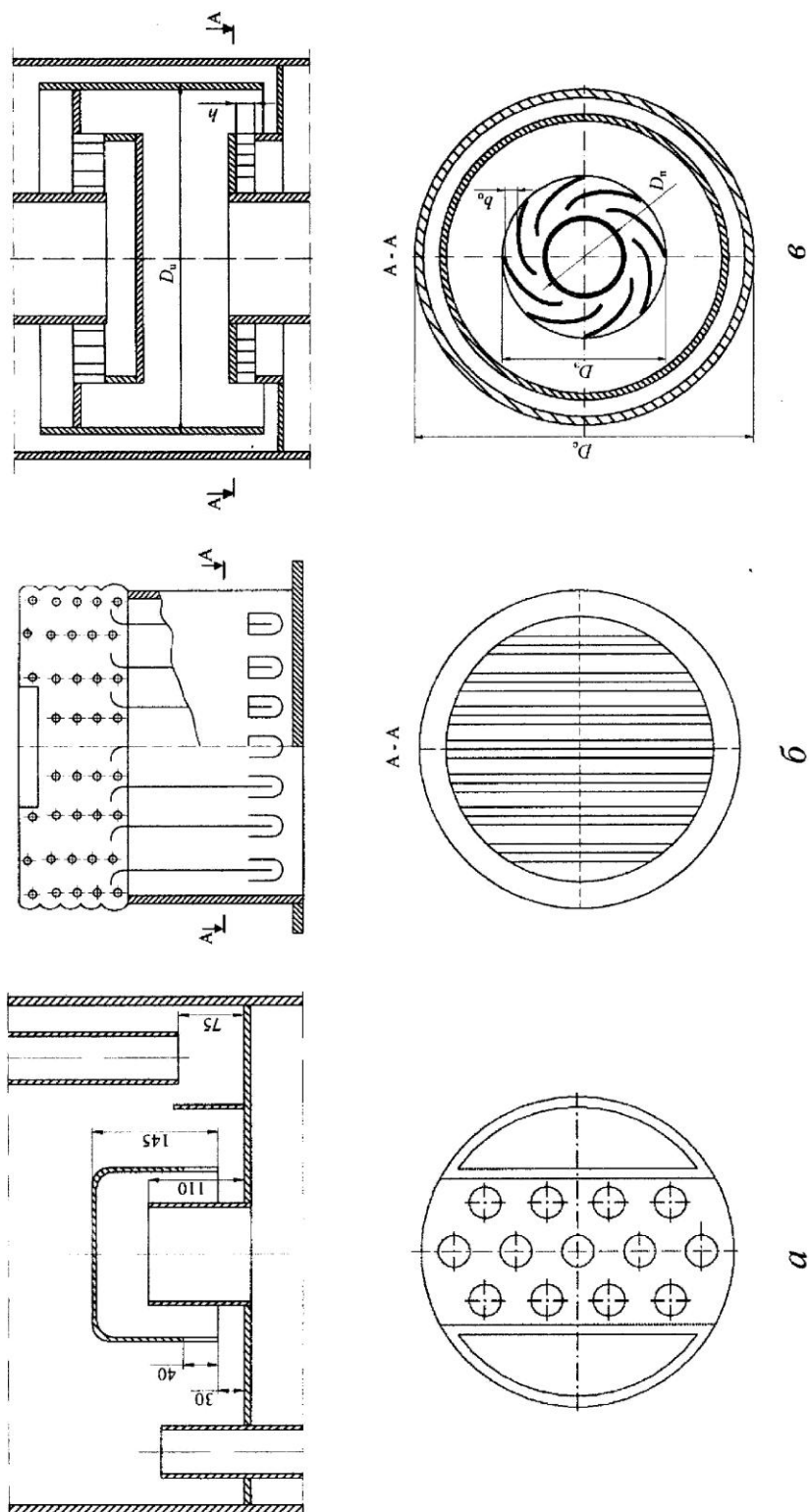


Рис. 1. Схемы контактных ступеней: а – колпачковой; б – пленочной; в – вихревой

Наиболее часто используются в промышленности тарелки с колпачковыми контактными устройствами, основные преимущества которых – высокая надежность при эксплуатации и отсутствие потерь продукта при останове колонны.

Стандартные колпачковые тарелки выполняются с большим количеством контактных устройств. Например, при диаметре колонны 2,6 м на ступени размещается 120 колпачков, что приводит к снижению производительности аппарата по жидкости, усложняет очистку и ремонт колпачков. В этой связи на Красноярском биохимическом заводе были внедрены [2, 3] две бражные колонны диаметром 2,6 м с 24 тарелками (две из них сепарационные) колпачкового типа (рис. 1, а), каждая из которых содержит по 13 колпачков диаметром 380 мм. Диаметр газового патрубка, рассчитанный из условия обеспечения скорости пара в них 10 м/с, был принят равным 260 мм. Площадь сечения сегментного перетока – 1,3 м<sup>2</sup>, периметр слива – 3,0 м, межступенчатое расстояние (для выполнения монтажа колпачков через люк-лаз) – 0,6 м. При начальной концентрации этанола в бражке от 2,0 до 3,6 % об. концентрация этанола в спиртовом конденсате составила 25...29 % об., расход пара на 1 м<sup>3</sup>/ч бражки – 128 кг/ч.

В начальный период эксплуатации бражных колонн с колпачковыми устройствами (рис. 1, а) производительность по бражке равнялась 120 м<sup>3</sup>/ч. Однако вследствие уменьшения периметра слива из-за накопления отложений в зазоре между корпусом аппарата и сегментным перетоком производительность колонны снизилась до 80 м<sup>3</sup>/ч по бражке без существенного изменения ее эффективности.

Установка в бражной колонне трех ступеней с 13 пленочными контактными устройствами [3] (рис. 1, б) диаметром 260 мм и высотой 150 мм позволила выявить, что вследствие интенсивного накопления отложений на полотне тарелки и забивания каналов ввода жидкости данные устройства не пригодны для ректификации смесей, включающих дисперсные взвешенные частицы. В этой связи длительная эксплуатация бражных колонн возможна только при отсутствии застойных зон на контактных ступенях и интенсивном перемешивании жидкости, например, путем диспергирования ее паром.

Большими перспективами при конструировании бражных колонн обладают вихревые контактные устройства, в которых пар, проходя через каналы завихрителя, приобретает вращательное движение и за счет этого интенсивно дробится на мелкие пузырьки, образуя в жидкости развитую межфазную поверхность при отсутствии застойных зон и низком брызгоуносе.

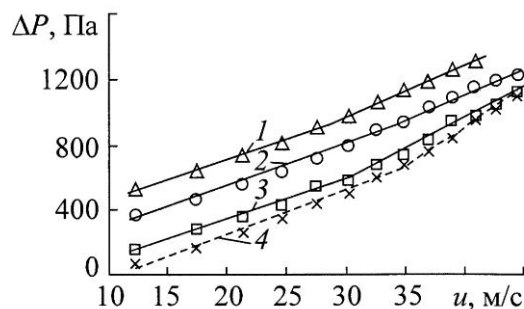
Наиболее предпочтительны вихревые устройства с тангенциальными завихрителями [1]. Компоновка такой тарелки, представленная на рис. 1, в, отличается простотой конструкции, высокой производительностью по жидкости из-за доступного достижения требуемого периметра слива и сечения перетоков, отсутствием застойных зон, большим расходом пара по сечению аппарата (до 6 м/с) по причине интенсивной сепарации капель в поле центробежных сил.

Разработана и исследована конструкция тарелки с тангенциальным завихрителем при  $D_c = 200$  мм;  $D_3 = 110$  мм;  $b_0 = 10$  мм;  $h = 5$  мм; количестве каналов  $n = 8$  шт. (рис. 1, в).

Сопротивление вихревой контактной ступени, представленное графически на рис. 2, подчиняется зависимости

$$\Delta P = \xi \frac{\rho_r u^2}{2} + \rho_{ж} g H \left( 1 - \varphi \right) \quad (1)$$

Рис. 2. Зависимость сопротивления вихревой (1–3) и сухой 4 ступеней ( $n = 8$  шт.,  $h = 5$  мм,  $b_0 = 10$  мм,  $D_3 = 110$  мм): 1 – высота жидкости на ступени 87 мм; 2 – 59 мм; 3 – 30 мм (1–3 – экспериментальные точки; пунктирная линия – сопротивление сухой ступени; сплошные линии – расчет  $\Delta P$  по уравнению (1))

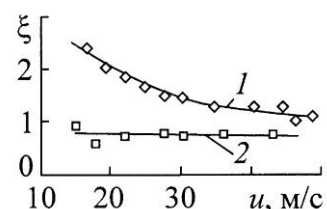


где  $\xi$  – коэффициент сопротивления сухой ступени;  
 $\rho_r$  – плотность газа,  $\text{кг/м}^3$ ;  
 $u$  – средняя расходная скорость газа на выходе из каналов, м/с;  
 $\rho_{ж}$  – плотность жидкости,  $\text{кг/м}^3$ ;  
 $H$  – высота газожидкостного слоя на ступени, м;  
 $\phi$  – газосодержание.

Значения коэффициента сопротивления, входящие в уравнение (1), приведены на рис. 3. Как установлено, наличие плавных обтекаемых кромок у профилированных пластин завихрителя позволяет существенно снизить величину  $\xi$  по сравнению с завихрителями с параллельными каналами и плоской обтекаемой кромкой [1].

Газосодержание  $\phi$  вихревой ступени в исследуемом диапазоне технологических параметров составило 0,4...0,7. При кольцевом режиме газожидкостного слоя на ступени  $\phi$  зависит от скорости газа в каналах завихрителя и снижается с увеличением уровня жидкости  $H$  на ступени. Использование уравнения (1) для расчета сопротивления вихревой ступени позволяет определить  $\Delta P$  с относительной погрешностью 0,1.

Рис. 3. Зависимость коэффициента сопротивления вихревых ступеней  $\xi$  от скорости газа  $u$  в узком сечении канала ( $D_3 = 110$  мм,  $h = 5$  мм,  $b_0 = 10$  мм): 1 –  $n = 4$  шт.; 2 – 8 шт. (1, 2 – экспериментальные точки)



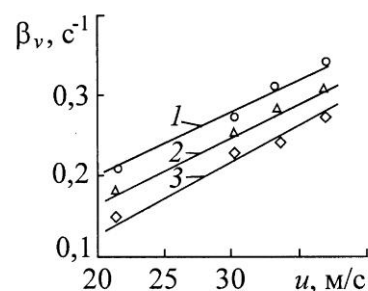
Для оценки эффективности контактной ступени были проведены измерения концентрации кислорода в обескислороженной жидкости на вихревой ступени и рассчитаны объемные коэффициенты массоотдачи:

$$\beta_v = \ln[(1 - (c/c^*)/A)]/\tau, \quad (2)$$

где  $A$  – коэффициент, определяемый из начальных условий при  $c = c_n$ ;  
 $c$  – концентрация растворенного кислорода в жидкости,  $\text{кг/м}^3$ ;  
 $c^*$  – равновесная концентрация кислорода в жидкости,  $\text{кг/м}^3$ ;  
 $\tau$  – время насыщения, с.

Влияние скорости газа в каналах и уровня жидкости на ступени на коэффициент массоотдачи представлено на рис. 4.

Рис. 4. Зависимость коэффициента массоотдачи  $\beta_v$  от скорости газа  $u$  в каналах ( $D_3 = 110$  мм,  $h = 5$  мм,  $b_0 = 10$  мм,  $n = 8$  шт.): 1 –  $H/h = 64$ ; 2 – 80; 3 – 96 (1–3 – экспериментальные точки)



Исходя из полученных значений коэффициента массоотдачи, удельной межфазной поверхности в кольцевом режиме  $a = (800 \dots 1200) \text{ м}^{-1}$  и условия, что при низких концентрациях этанола на ступени основное сопротивление массопереносу сосредоточено в жидкой фазе, были рассчитаны [4] числа единиц переноса:

$$N_{oy} = \frac{\beta a m}{G_{\Pi}}, \quad (3)$$

где  $\beta$  – поверхностный коэффициент массоотдачи, м/с;

$m$  – масса жидкости на ступени, кг;

$G_{\Pi}$  – расход пара, кг/с,

а также определена эффективность вихревой ступени по модели идеального перемешивания [5]:

$$E_y = \frac{N_{oy}}{1 + N_{oy}}, \quad (4)$$

которая составила 0,7...0,9.

На основании проведенных расчетов разработаны рабочие чертежи бражной колонны с вихревыми контактными ступенями; установлено, что основными преимуществами вихревой контактной ступени являются ее высокая производительность по пару и возможность обеспечения интенсивного перемешивания жидкости на тарелке.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Войнов Н.А., Жукова О.П., Николаев Н.А. Гидродинамика вихревой ступени с тангенциальными завихрителями //ГОХТ. 2010. Т. 44, № 2. С.1–8.
2. Войнов Н.А. Процесс ферментации кормового белка на гидролизате в пленочных аппаратах; способы интенсификации и методы расчета. Красноярск, 1995. 375 с.
3. Воронин С.М. Повышение экологичности процессов переработки растительного сырья. Красноярск, 1997. 30 с.
4. Закономерности массопереноса на многоэлементных контактных ступенях прямоточно-вихревых аппаратов / Н.И. Савельев [и др.] //Химия и хим. технология. 1983. Т. 25, № 1. С. 107–110.
5. Рамм В.М. Абсорбция газов. М.: Химия, 1976. 655 с.

6. Холькин Ю.И. Технология гидролизных производств. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 496 с.  
N.A. Voinov<sup>1</sup>, S.M. Voronin<sup>2</sup>, O.P. Zhukova<sup>1</sup>, S.A. Lednik<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Siberian State Technological University

<sup>2</sup>Sibciprobiosintez

7

### **Introduction and Investigation Results for Contact Stages of Brew Columns**

The results of contact stages investigation with bubble cap and vortex contact devices in the industrial brew column are provided. Contact stages with tangential swirlers are established to be the most efficient variant.

Keywords: brew column, vortex plate, bubble cap plate, hydraulic resistance, mass delivery coefficient, efficiency.

---

---