

А.Ф. Сорокопуд, Н.А. Шеменова

## ВЛИЯНИЕ ТУРБУЛИЗАЦИИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ГАЗОМ НА ТЕПЛООБМЕН В РОТОРНОМ РАСПЫЛИТЕЛЬНОМ ИСПАРИТЕЛЕ

Исследовано влияние на теплообмен различных способов введения воздуха в греющую воду, подаваемую в рубашки роторного распылительного испарителя. Для ввода воздуха использовались трубки различного конструктивного исполнения. Влияние турбулизации на теплообмен оценивалось с использованием коэффициента концентрирования. Определены рациональное соотношение подачи воздуха в греющую воду и конструктивное исполнение вводной трубки.

Турбулизация, коэффициент концентрирования, роторный распылительный испаритель, теплообмен, греющая вода.

### Введение

Для более полного удовлетворения потребностей населения в продуктах питания необходимо повысить качество и увеличить объем производства консервированных продуктов, получаемых путем выпаривания. Решение этой задачи возможно только при использовании прогрессивных технологий и соответствующего аппаратного оформления.

В настоящее время для концентрирования жидких пищевых продуктов широко используются роторные выпарные аппараты, в семейство которых входит роторный распылительный испаритель (РРИ) [1], представляющий собой теплообменник, изготовленный из двух концентрических, круглых труб. В кольцевом зазоре между трубами (греющей рубашке РРИ) движется горячий теплоноситель (обычно вода). Тепловой поток передается от теплоносителя через внутреннюю стенку упариваемому продукту [2, 3].

Такой способ обогрева поверхности теплообмена отличается простотой конструкции, экономичностью (ввиду невысокой стоимости горячей воды), меньшим рабочим давлением и др. Но, несмотря на перечисленные достоинства, возможность создания высоких значений коэффициента теплопередачи ограничена. Следовательно, становится актуальной задача интенсификации теплообмена между греющим агентом и стенкой – корпусом РРИ. Решение этой задачи позволит повысить эффективность теплообмена в РРИ. В частности, в [3] отмечается, что коэффициент теплоотдачи от греющей стенки к раствору ниже, чем на контактном элементе РРИ.

Интенсифицировать теплоотдачу в греющей рубашке РРИ можно путем повышения скорости потока теплоносителя, турбулизацией потока различными завихряющими устройствами и другими способами [4]. При выборе способа турбулизации потока с целью интенсификации процесса теплообмена необходимо стремиться к минимизации энергетических затрат на прокачивание теплоносителя через греющие элементы теплообменного аппарата. С этой точки зрения наиболее подходящим представляется способ турбулизации потока жидкости струей инертного газа (воздуха), вводимой в него. Данный способ не требует каких-либо серьезных изменений в конструкции теплообменного аппарата при его модернизации, потребление энергии на инжектирование струи воздуха в поток

жидкости незначительно [1].

Но, несмотря на явную перспективность вышеуказанного метода интенсификации теплообмена, каких-либо данных по исследованию влияния степени турбулизации потока теплоносителя в греющей рубашке выпарного аппарата инжектированным в него воздухом на величину теплоотдачи в доступной литературе не найдено. Поэтому целью настоящего исследования являлась оценка влияния способов введения струи газа в поток горячей воды на интенсивность теплообмена в РРИ.

### Объекты и методы исследований

Исследования выполнены на экспериментальной выпарной установке, описанной в [5]. Роторный распылительный испаритель представляет собой цилиндрический аппарат диаметром 0,15 м, внутри которого расположен вращающийся ротор и шесть контактных элементов (КЭ). Частота вращения ротора  $90 \text{ с}^{-1}$ . КЭ состоит из распылителя, питающей тарелки и пристенного каплеотбойника. Распылитель имеет характеристики: диаметр диспергирующего устройства – 0,075 м; его высота – 0,042 м; диаметр распыливающих отверстий – 0,002 м; количество рядов отверстий – 7; количество отверстий в одном ряду – 32 (отверстия расположены в шахматном порядке); высота контактного элемента – 0,13 м. Пристенный каплеотбойник выполнен в виде набора вертикальных металлических пластин шириной 8 мм, установленных с шагом 3,5 мм под углом  $15^\circ$  к касательной, проведенной к поверхности диспергирующего устройства. В газоходах питающей тарелки установлены под углом  $15^\circ$  к горизонтали направляющие лопатки. Это позволяет направлять пар вслед за вращающимся диспергирующим устройством, т.е. пар и капли жидкости движутся на КЭ в условиях, близких к прямооттоку.

Корпус имел наружный диаметр  $D = 0,159 \text{ м}$ ; внутренний диаметр рубашки составлял  $D' = 0,219 \text{ м}$ , т.е. имело место отношение  $D'/D = 1,38$ . Греющая поверхность охватывала все шесть КЭ и состояла из двух рубашек высотой 0,256 и 0,27 м, горячая вода вводилась радиально в нижнюю часть рубашки и выводилась из верхней в условиях непрерывной циркуляции с промежуточным подогревом до нуж-

ной температуры перед поступлением в нижнюю часть рубашки [6, 7].

В качестве модельной системы использовался водный раствор поваренной соли (NaCl) с начальной концентрацией  $C_H = 8\%$  масс. Исследования проводились при подаче воздуха  $V_{\text{возд}} = (0,94 \dots 7,47) \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ , подаче продукта  $V_H = 0,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ , давлении  $P = 0,92 \text{ МПа}$ , температуре греющего агента  $T_{\text{ВН}} = 365 \dots 373 \text{ К}$ , расходе греющего агента  $V_B = 9,22 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ .

Для изменения турбулизации теплоносителя ввод воздуха в поток горячей воды осуществлялся через трубки диаметром 6 мм, с толщиной стенки 1 мм,

различного конструктивного исполнения (рис. 1). Вертикальная часть вводных трубок устанавливалась во входном патрубке диаметром 20 мм на расстоянии 120 мм от рубашки РРИ. Для варианта *a* (см. рис. 1) длина прямого участка вводной трубки, установленного по оси входного патрубка, составляла 30 мм. В остальных вариантах нижний торец вводной трубки устанавливался непосредственно на стенку патрубка. Вводные трубки по вариантам *a, z, d* имели одинаковое выходное сечение. Торцы трубок в вариантах *z, d* были заглушены.

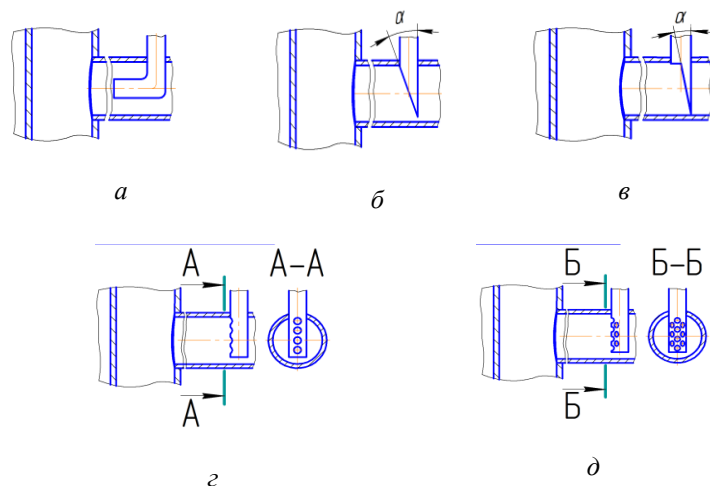


Рис. 1. Схемы устройств для ввода воздуха: *a* – трубка загнутая; *b* –  $\alpha = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ; *в* –  $\alpha = 10^\circ$ ; *z* – 4 отверстия  $\varnothing = 3 \text{ мм}$  в ряд; *d* – 10 отверстий  $\varnothing = 1,9 \text{ мм}$  в шахматном порядке

При проведении исследований эффективность теплообмена в РРИ оценивалась с использованием коэффициента концентрирования:

$$\varepsilon, \quad (1)$$

где  $V_K, V_H$  – соответственно конечный и начальный объем упариваемого продукта,  $\text{м}^3$ .

Таким образом, из (1) следует, что с уменьшением коэффициента  $\varepsilon$  эффективность теплообмена возрастает.

Степень насыщения греющей воды воздухом оценивалась через коэффициент насыщения:

$$j = ; \quad (2)$$

где  $V_{\text{возд}}, V_B$  – соответственно расход воздуха и воды,  $\text{м}^3$ .

### Результаты и их обсуждение

Анализ данных, представленных на рис. 2–4, показывает, что независимо от характера конструктивного исполнения ввода воздуха в теплоноситель при увеличении коэффициента  $j$  до  $j = 0,07$  коэффициент концентрирования снижается, а на участке с  $j = 0,07$  до  $j = 0,089$  – возрастает.

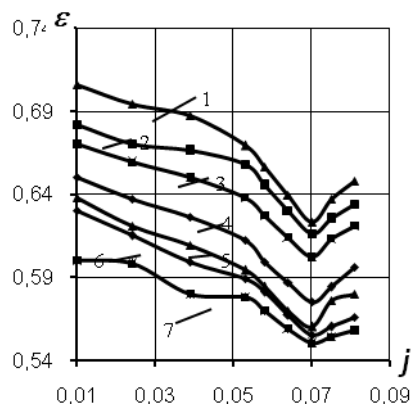


Рис. 2. Зависимость коэффициента концентрирования от коэффициента насыщения греющей воды ( $T_{\text{ВН}} = 365 \text{ К}$ ) при различных вариантах ввода воздуха: 1 – *d*; 2 – *z*; 3 – *b*,  $\alpha = 60^\circ$ ; 4 – *b*,  $\alpha = 45^\circ$ ; 5 – *b*,  $\alpha = 30^\circ$ ; 6 – *b*,  $\alpha = 15^\circ$ ; 7 – *в*,  $\alpha = 10^\circ$

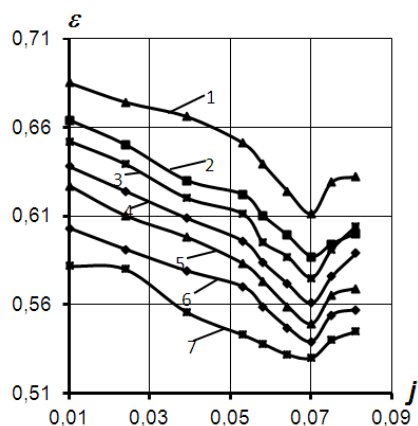


Рис. 3. Зависимость коэффициента концентрирования от коэффициента насыщения греющей воды ( $T_{гр} = 369 \text{ К}$ ) при различных вариантах ввода воздуха: 1 –  $\delta$ ; 2 –  $з$ ; 3 –  $б$ ,  $\alpha = 60^\circ$ ; 4 –  $б$ ,  $\alpha = 45^\circ$ ; 5 –  $б$ ,  $\alpha = 30^\circ$ ; 6 –  $б$ ,  $\alpha = 15^\circ$ ; 7 –  $в$ ,  $\alpha = 10^\circ$

Повышение температуры греющей воды также приводит к снижению значения коэффициента концентрирования. Наиболее эффективно процесс упаривания осуществляется при  $T_{гр} = 373 \text{ К}$ .

Процесс упаривания солевого раствора в РРИ при вводе воздуха в греющую воду через трубки по вариантам  $б$ ,  $в$  (см. рис. 1), т.е. с различным углом среза  $\alpha$ , представляет практический интерес. При этом коэффициент концентрирования  $\epsilon$  при испытанных температурах греющей воды достигает наименьших значений при угле среза  $\alpha = 10^\circ$  (рис. 1,  $в$ ). По данным [4] вариант  $а$  обеспечивает коэффициент концентрирования на 6 % выше, чем вариант  $в$  (см. рис. 1).

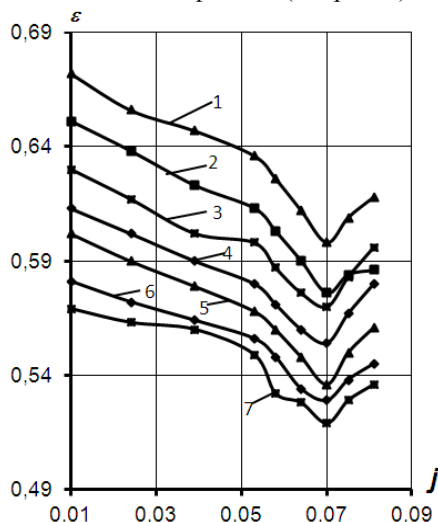


Рис. 4. Зависимость коэффициента концентрирования от коэффициента насыщения греющей воды ( $T_{гр} = 373 \text{ К}$ ) при различных вариантах ввода воздуха: 1 –  $\delta$ ; 2 –  $з$ ; 3 –  $б$ ,  $\alpha = 60^\circ$ ; 4 –  $б$ ,  $\alpha = 45^\circ$ ; 5 –  $б$ ,  $\alpha = 30^\circ$ ; 6 –  $б$ ,  $\alpha = 15^\circ$ ; 7 –  $в$ ,  $\alpha = 10^\circ$

Полученные результаты, на наш взгляд, можно объяснить следующим образом. Греющий агент (вода) в рубашках перемещается в условиях вынужденного движения. Передача тепла к стенке РРИ осуществляется в условиях конвективного теплообмена. Перенос тепла конвекцией тем интенсивнее, чем более турбулизирован весь поток жидкости и чем интенсивнее осуществляется перемешивание ее частиц. Таким образом, конвекция напрямую связана с механическим переносом тепла и существенно зависит от гидродинамических условий течения жидкости.

Введение воздуха в поток греющей воды сопровождается повышением турбулизации – воздух в потоке распределяется в виде пузырьков, что интенсифицирует процесс перемешивания теплоносителя. Положительный эффект будет сохраняться до тех пор, пока воздух будет продолжать дробиться на пузырьки. В противном случае теплоотдача ухудшается, в нашем случае при  $j > 0,07$ .

Различное конструктивное исполнение трубок ввода воздуха в поток теплоносителя обеспечивает различное распределение воздуха в виде пузырьков в потоке греющей воды. Можно утверждать, что вариант ввода  $в$  (см. рис. 1) обеспечивает более тонкое дробление воздуха и более интенсивное перемешивание теплоносителя.

#### Список литературы

1. Гриценко, В.В. Применение метода анализа размерностей для исследования процесса теплоотдачи в кольцевом канале греющей рубашки роторного распылительного испарителя / В.В. Гриценко; Рубцовский индустриальный институт (филиал) ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – Рубцовск, 2009. – 7 с. – Библиогр.: 7 назв. – Рус. – Деп. в ВИНТИ 08.07.09, № 457-В2009.
2. Сорокопуд, А.Ф. Разработка и совершенствование роторных распылительных аппаратов с целью интенсификации процессов в гетерогенных газожидкостных системах: дис. ... докт. техн. наук: 05.18.04, 05.18.12: защищена 21.05.1998 / Сорокопуд Александр Филиппович. – Кемерово, 1998. – 529 с.
3. Третьякова, Н.Г. Совершенствование технологии производства пищевых продуктов с использованием роторного распылительного испарителя: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.04, 05.18.12: защищена 19.04.2002 / Третьякова Надежда Геннадьевна. – Кемерово, 2002. – 172 с.

4. Гриценко, В.В. Совершенствование производства концентрированных плодово-ягодных экстрактов с использованием роторного распылительного испарителя: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12: защищена 19.12.2009 / Гриценко Вячеслав Владимирович. – Кемерово, 2009. – 150 с.

5. Сорокопуд, А.Ф. Концентрирование плодово-ягодных экстрактов в роторном распылительном испарителе / А.Ф. Сорокопуд, Н.Г. Третьякова, П.П. Иванов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2004. – № 7. – С. 38–40.

6. Сорокопуд, А.Ф. Определение оптимальных условий обогрева роторного распылительного испарителя / А.Ф. Сорокопуд, Н.А. Шеменова // Совершенствование существующего и разработка нового оборудования для пищевой промышленности: сб. науч. работ. – Вып. 3. – Кемерово, 2010. – С. 3–7.

7. Сорокопуд, А.Ф. Концентрирование сыворотки в роторном распылительном испарителе / А.Ф. Сорокопуд, Т.Г. Шевцова, Р.Г. Тихонов // Совершенствование существующего и разработка нового оборудования для пищевой промышленности: сб. науч. тр. – Вып. 2. – Кемерово, 2008. – С. 18–22.

ФГБОУ ВПО «Кемеровский технологический институт  
пищевой промышленности»,  
650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47.  
Тел./факс: (3842) 73-40-40  
e-mail: office@kemtipp.ru

## SUMMARY

**A.F. Sorokopud, N.A. Shemeneva**

### **THE INFLUENCE OF GAS TURBULIZATION OF HEAT-CARRIER ON HEAT EXCHANGE IN ROTARY SPRAY-TYPE EVAPORATOR**

The influence on heat exchange of various ways of introducing air in the heating water supplied in the jackets of the rotary spray-type evaporator is investigated. For air input lances of different constructions were used. The influence of turbulization on heat exchange was estimated with the coefficient of concentration. The rational parity of feeding air into heating water and the design of an inlet tube are defined.

Turbulization, coefficient of concentration, rotary spray-type evaporator, heat exchange, heating water.

Kemerovo Institute of Food Science and Technology  
47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia  
Phone/Fax: +7(3842) 73-40-40  
e-mail: office@kemtipp.ru