

УДК 536.423.4

**Безродный М.К., Костюк А.П., Голянд Н.Н., Барабаш П.А.***Национальный технический университет Украины «КПИ»***КОНТАКТНЫЙ ТЕПЛОМАССООБМЕН В ПРОТОЧНОМ БАРБОТАЖНОМ СЛОЕ.****Часть 2. Массоотдача**

В роботі наведені результати експериментальних досліджень масовіддачі при супутньому русі замкнених пароповітряних включень і охолоджуючої води в вертикальних каналах в умовах проточного барботажного шару. Отримана узагальнююча залежність для цього процесу переносу.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований массоотдачи при спутном движении замкнутых паровоздушных включений и охлаждающей воды в вертикальных каналах в условиях проточного барботажного слоя. Получена обобщающая зависимость для этого процесса переноса.

The paper presents the results of experimental study of mass transfer at cocurrent flow of closed vapor-air inclusions and cooling water in the vertical tubes in the conditions of bubbling layer flow. The generalizing dependence for this process of transfer is obtained.

$d$  – диаметр, влагосодержание парогазовой смеси;

$D$  – коэффициент диффузии;

$G$  – массовый расход;

$R$  – универсальная газовая постоянная;

$t, T$  – температура;

$V$  – объемный расход;

$W$  – скорость;

$\beta$  – коэффициент массоотдачи;

$\delta$  – постоянная Лапласа;

$\varepsilon$  – объемное содержание компоненты в парогазовой смеси;

$\mu$  – коэффициент динамической вязкости, молекулярный вес;

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости;

$\rho$  – плотность;

$\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения;

$\varphi$  – относительная влажность;

ПГС – парогазовая смесь.

**Индексы нижние:**

1 – тяжелая фаза;

2 – легкая фаза;

возд – воздух;

вх – входной;

вых – выходной;

п – пар;

с – сухой.

**Введение**

В первой части серии из двух статей [1], посвященной теплоотдаче при охлаждении парогазовой смеси (ПГС) в проточном барботажном слое (динамический двухфазный слой с отличными от нуля скоростями легкой и тяжелой фаз), отмечалась актуальность этой задачи для высокоэффективных контактных утилизаторов теплоты уходящих газов различных энергоустановок.

Отмечалось также и состояние вопроса по исследованию процессов, протекающих в рассматриваемой системе. В частности, указывалось на отсутствие в литературе сведений как по коэффициентам переноса от газовых

включений к жидкости, так и по характерным для этого случая особенностям гидродинамики для двухфазной среды. Правда, указывалось, что некоторые пробелы в гидродинамических исследованиях, относящиеся к вопросам организации проточного барботажного слоя (влияние геометрических параметров устройства и скорости подачи газа на структуру слоя, характерные режимы течения проточного слоя), были восполнены авторами в более ранних работах [2,3].

Краткое описание экспериментальной установки и методики проведения экспериментов также приведено в [3] и в первой части этой работы. Здесь укажем только диапазоны из-

менения основных режимных параметров при проведении опытов. Объемная плотность орошения изменялась в пределах  $Q_m = (1,097...33,5) \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ ; влагосодержание газа на входе в установку  $d_2 = 52...288 \text{ г}/(\text{кг с. в.})$ ; то же в конце рабочего участка  $d_1 = 18...182 \text{ г}/(\text{кг с. в.})$ ; относительная влажность ПГС на входе в установку  $\varphi_1 = 6,5...28 \%$ ; то же в конце рабочего участка  $\varphi_2 = 90...100 \%$ ; приведенные скорости ПГС  $W_{\text{вх}} = 1,45...15,2 \text{ м/с}$  и жидкости  $W_1 = 0,0014...0,033 \text{ м/с}$ ; объемное содержание пара в ПГС на входе в установку  $\varepsilon_{\text{п}} = 0,062...0,307$ ; критерий Бонда  $Bo = d_{\text{тр}}/\delta = 8,57...15,29$ ; диффузионный критерий Прандтля  $Pr_D = 0,678...0,707$ ; критерий Рейнольдса для ПГС  $Re_{\text{ПГС}} = 2800...14150$ ; температура «сухого» термометра для ПГС на входе в установку  $t_{2\text{с}} \leq 105 \text{ }^\circ\text{C}$ . Указанные диапазоны изменения параметров обеспечивали снарядный и переходный режимы течения двухфазного потока вплоть до начала перехода к кольцевому режиму [2].

Небаланс тепловых потоков на рабочей высоте трубы со стороны воды и паровоздушной смеси при проведении опытов не превышал 10 %.

### Средний коэффициент массоотдачи

Экспериментальные средние значения коэффициентов массоотдачи  $\beta$  определялись по формулам:

$$\beta = \bar{\beta}_p \frac{R}{\mu_{\text{H}_2\text{O}}} T, \quad \bar{\beta}_p = \frac{j_{\text{п}}}{P_{\text{по}} - P_{\text{пв}}}, \quad j_{\text{п}} = \frac{\Delta G_{\text{к}}}{S},$$

$$S = \pi d_{\text{тр}}^2 / 4, \quad \Delta G_{\text{к}} = (d_1 - d_2) G_{\text{с.возд}}. \quad (1)$$

Парциальное давление водяного пара в ПГС вдали от межфазной поверхности  $P_{\text{п.о}}$  принималось равным среднеарифметической сумме парциальных давлений пара для температур «сухого» термометра на входе и выходе смеси из рабочего участка  $t_{2\text{свх}}$  и  $t_{2\text{свых}}$ . Величина среднего парциального давления пара на поверхности воды  $P_{\text{п.в}}$  определялась, с достаточной точностью [3], по температуре воды в конце рабочей высоты канала  $t_{1\text{ввых}}$ .

Проанализируем, как и при рассмотре-

нии интенсивности теплоотдачи, влияние на опытный средний коэффициент массоотдачи (при охлаждении ПГС в проточном барботажном слое, организованном в трубах разных диаметров) трех основных режимных параметров: приведенной скорости ПГС на входе в рабочий участок  $W_{\text{вх}} = V_{2\text{вх}}/(\pi d_{\text{тр}}^2/4)$ ; объемной плотности орошения водой  $Q_m = V_1/(\pi d_{\text{тр}})$  и относительной влажности ПГС на входе в рабочий участок  $\varphi$ .

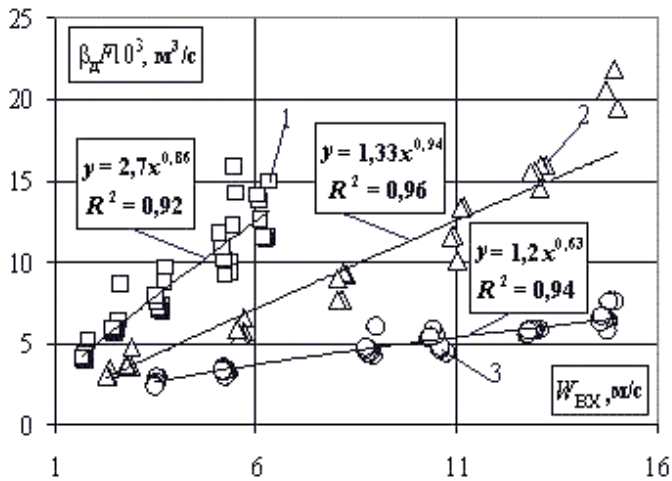
На рис. 1 представлена зависимость произведения действительных величин среднего коэффициента массоотдачи  $\beta_d$  и межфазной поверхности  $F(\beta_d F)$  от значений  $W_{\text{вх}}$ . По сути,

$$\text{как следует из (1), } \beta_d F = \frac{\Delta G_{\text{к}} RT}{(P_{\text{по}} - P_{\text{пв}}) \mu_{\text{H}_2\text{O}}} = \beta S.$$

Видно, что опытные значения  $(\beta_d F)$  с увеличением  $W_{\text{вх}}$  существенно растут и расслаиваются по величине  $d_{\text{тр}}$ . Это расслоение можно объяснить, по-видимому, более значительным развитием межфазной поверхности двухфазного потока при более высоких значениях диаметра канала. Напомним, что число  $Bo$ , характеризующее, в определенном смысле, способность двухфазного потока формировать или разрушать границу раздела (режим течения газовых включений) [4], изменялось в диапазоне, выходящем за предел существования чисто снарядного режима течения. Иными словами, в данном случае, бóльший канал имеет бóльшую возможность для развития (дробления крупных включений) межфазной поверхности.

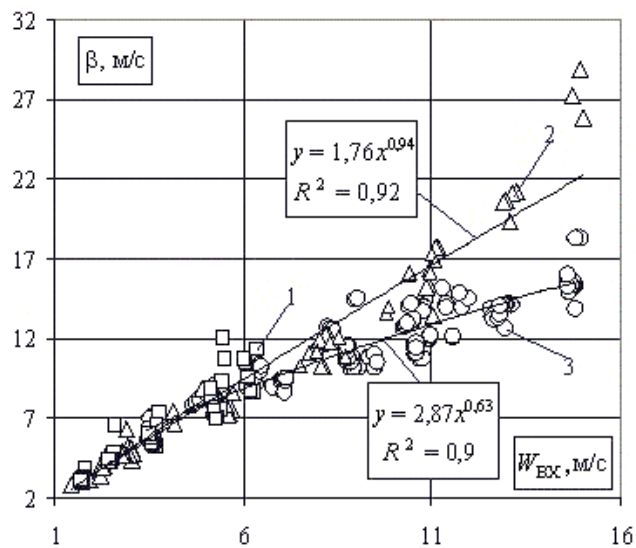
При экспериментальном исследовании процессов переноса в аппаратах, в которых действительную величину межфазной поверхности практически определить невозможно, широко используется прием, когда коэффициенты переноса при обработке данных относятся к характерному поперечному геометрическому сечению системы (см., например, [5]).

Если соответствующие величины  $\beta_d F$  разделить на соответствующие значения  $S$ , то получим расслоение величин  $\beta$ , показанное на рис. 2.



**Рис. 1. Влияние величины  $W_{ex}$  на  $\beta_0 F$ ,  $\phi_1 \approx 16\% = const$ :**

- 1 – опытные данные при  $d_{mp} = 0,041$  м;
- 2 – опытные данные при  $d_{mp} = 0,0315$  м;
- 3 – опытные данные при  $d_{mp} = 0,023$  м.



**Рис. 2. Влияние величины  $W_{ex}$  на  $\beta$ :**

- 1 – опытные данные при  $d_{mp} = 0,041$  м;
- 2 – опытные данные при  $d_{mp} = 0,0315$  м;
- 3 – опытные данные при  $d_{mp} = 0,023$  м.

Видно, как и в случае конвективной теплоотдачи [1], доминирующее влияние  $W_{ex}$  на  $\beta$ . Заметно также сужение (по сравнению с данными, приведенными на рис. 1) переменного расслоения значений коэффициента мас-

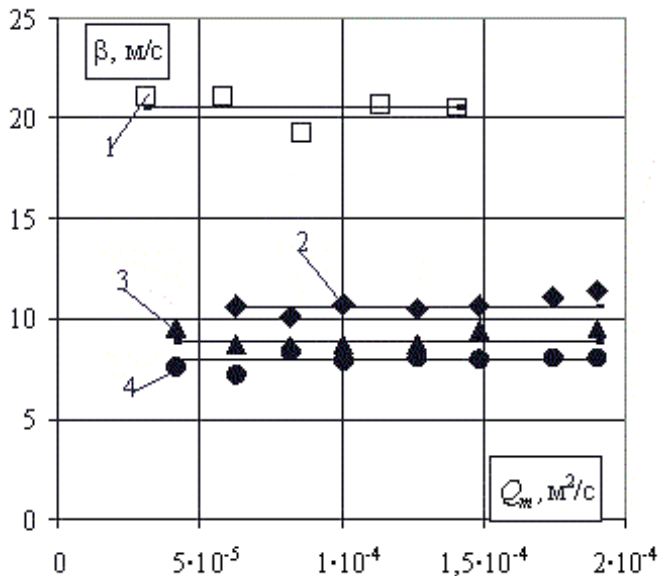
соотдачи по величине диаметра канала, которое фактически начинается с  $W_{ex} > 6$  м/с (для  $d_{тр} = 0,023$  и  $0,0315$  м; для канала с  $d_{тр} = 0,041$  м опытные данные получены для значений  $W_{ex} \leq 6,5$  м/с из-за ограничения по производительности компрессора). Некоторое отличие в процессах переноса теплоты [1] и массы заключается в различных значениях показателей степеней функций, аппроксимирующих опытные данные (соответственно для труб с  $d_{тр} = 0,0315$  и  $0,023$  м разница между этими показателями составляет  $0,11$  и  $0,24$ ). Такое уменьшение этих показателей для массоотдачи, по-видимому, объясняется влиянием процесса уноса капель с межфазной поверхности в объем газовых включений, интенсивность которого с увеличением  $W_{ex}$  растет [6]. При этом, образующиеся капли жидкости быстро прогреваются до температуры точки росы для ПГС (из-за своих относительно малых размеров) и испаряются, уменьшая при этом интенсивность основного процесса – массоотдачи при конденсации водяных паров из паровоздушной смеси.

Совершенно аналогично, как и в процессе конвективной теплоотдачи [1], влияет на процесс массоотдачи объемная плотность орошения  $Q_m = V_1 / (\pi d_{тр}^2)$  (рис. 3). Видно, что коэффициент  $\beta$  практически не зависит от  $Q_m$ .

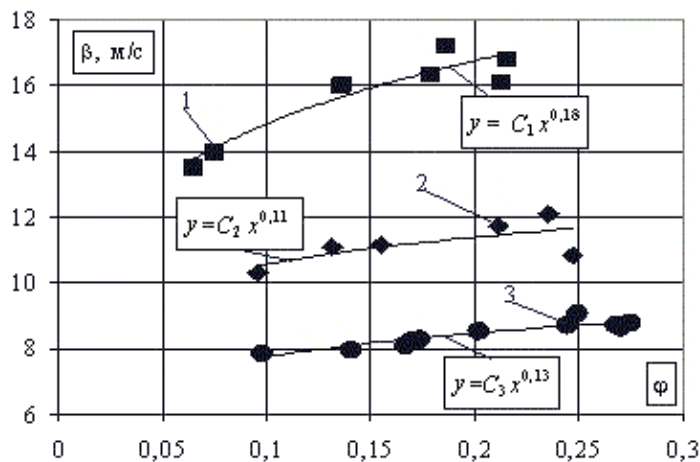
Также аналогично протекают процессы передачи теплоты и массы при рассмотрении зависимости среднего коэффициента массоотдачи  $\beta$  от начальной величины относительной влажности паровоздушной смеси на входе в рабочий участок  $\phi$  (рис. 4). Здесь также просматривается рост  $\beta$  при увеличении  $\phi$ . Только средняя степень влияния  $\phi$  здесь ниже и равна  $n \approx 0,15$  против  $0,18$  для конвективной теплоотдачи [1].

Ранее в [1] уже отмечалось, что для процессов массопереноса, определяемых диффузионным сопротивлением в газовой фазе, критериальные обобщающие уравнения получаются (с учетом того, что в наших опытах  $Pr_D \approx const$ , а  $\beta \sim \phi^n$ ) в виде [7]:

$$Nu_D = A Re^n \phi^m. \quad (2)$$



**Рис. 3. Влияние  $Q_m$  на  $\beta$  при разных значениях величины  $W_{ex}$ ,  $\varphi_1 \approx 16\% = const$ :  
 1 –  $W_{ex} \approx 13$  м/с,  $d_{mp} = 0,0315$  м; для маркеров  
 2...4  $d_{mp} = 0,023$  м; 2 –  $W_{ex} \approx 8,7$  м/с;  
 3 –  $W_{ex} \approx 7$  м/с; 4 –  $W_{ex} \approx 5,1$  м/с.**



**Рис. 4. Влияние  $\varphi$  на коэффициент  $\beta$  при различных значениях величины  $W_{ex}$ :  
 1 –  $W_{ex} \approx 10,5$  м/с,  $Q_m = 14,1 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с  
 ( $d_{mp} = 0,0315$  м); 2 –  $W_{ex} \approx 8,5$  м/с, то же;  
 3 –  $W_{ex} \approx 5$  м/с,  $Q_m = 19,2 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с  
 ( $d_{mp} = 0,023$  м).**

Однако, анализ экспериментальных данных, приведенных на рис. 1 и 2, показал, как и в случае конвективной теплоотдачи, непри-

годность использования в числах подобия в качестве характерного линейного масштаба величины внутреннего диаметра трубы. Таким масштабом, как считают авторы, может быть величина, характеризующая отношение в потоке сил поверхностного натяжения и динамического напора [8]:

$$L = \frac{\sigma}{\rho_2 W_{BX}^2} \quad (3)$$

Тогда, критерий Рейнольдса и диффузионное число Нуссельта соответственно принимают вид:

$$Re_L = \frac{W_{BX} L}{\nu_2} = \frac{\sigma}{\nu_2 \rho_2 W_{BX}}, \quad (4)$$

$$Nu_{DL} = \frac{\beta L}{D} = \frac{\beta \sigma}{D \rho_2 W_{BX}^2} \quad (5)$$

На рис. 5 в координатах  $Nu_{DL}/\varphi^{0,15} = f(Re_L)$  представлена зависимость экспериментального среднего числа  $Nu_{DL}$  от критерия Рейнольдса  $Re_L$ .

Видно, что степенная линия тренда довольно удовлетворительно (с достоверностью 0,96) аппроксимирует все опытные данные. Причем отклонения опытных точек от аппроксимирующего графика не превышает  $\pm 25\%$  для интервала изменения числа  $Re_L \approx 420 \dots 2400$ , что соответствует изменению  $W_{BX} \approx (7 \dots 1,45)$  м/с. При  $Re_L < 420$  ( $W_{BX} > 7$  м/с) указанное отклонение составляет уже  $\pm 35\%$ . Это обстоятельство отражает, по-видимому, интенсификацию процесса уноса капель и начало перехода к кольцевому режиму течения двухфазной среды [2]. Процесс конвективной теплоотдачи оказался консервативней к такому качественному изменению режима течения [1], что и неудивительно, учитывая то обстоятельство, что усиливающийся унос капель, по-видимому, меньше влияет, в отличие от процесса массоотдачи, на качественное изменение поля температур теплоносителей.

Обращает на себя внимание иная степень аппроксимирующей функции при  $Re_L$ , равная 1,23 против 1 для процесса конвективной теплоотдачи [1]. Это означает, что для



рассматриваемых процессов переноса аналогия в их протекании не соблюдается.

Ранее авторами [3] приводилось сравнение данных по интенсивности массоотдачи в проточном барботажном слое с данными работы [9], в которой исследовалась массоотдача при конденсации водяных паров из влажного воздуха на плоской вертикальной стене. Отмечалось, что безразмерный коэффициент массоотдачи, полученный при исследовании обсуждаемой задачи более чем на порядок превышает значения, полученные в [9].

Для более или менее корректного сравнения в [3] опытные значения среднего коэффициента массоотдачи относились к поверхности условного цилиндра (при числе  $Bo = d_{тр}/\varphi \leq 12$  [3] режим течения газовых включений преимущественно снарядный [4]) с высотой, равной длине рабочего участка и сечением, равным доли поперечного сечения канала, занятой ПГС (для чего по [8,10] оценивалась величина среднего истинного объемного паросодержания на рабочем участке).

Используя такой подход, на рис. 6 приведены зависимости  $\beta = f(Q_m)$  для рассматриваемой задачи и для случая конденсации водя-

ных паров из ПГС при спутном восходящем потоке ее газового ядра и пленки жидкости, текущей по внутренней поверхности вертикальной трубы небольшого диаметра [11]. На этом рисунке для опытных точек 1...6 [11] значения  $W_{вх}$  изменялись в пределах 15,4...47 м/с,  $\varphi_1 \approx 11\%$ , а  $t_{2c} \approx 105^\circ\text{C}$ . Для проточного барботажного слоя (точки 7)  $W_{вх} = 5,1$  м/с,  $\varphi_1 \approx 16\%$ ,  $t_{2c} = 101,9...105,7^\circ\text{C}$  (рис. 3).

Видно, что в указанном диапазоне изменения режимных параметров проведения опытов для этих двух случаев организации движения фаз характерны различные особенности протекания процесса массоотдачи. Для проточного барботажного слоя характерным является уже отмеченная выше (рис. 3), автомодельность коэффициента массоотдачи от плотности орошения. Напротив, для случая спутного движения газового ядра и жидкостной пленки характерным является существенное влияние величины  $Q_m$  на интенсивность массоотдачи. По-видимому, увеличение расхода жидкости в пленке ведет к большей турбулизации ее верхности и связанному с этим росту процесса массообмена.

Заметное превышение значений коэффи-

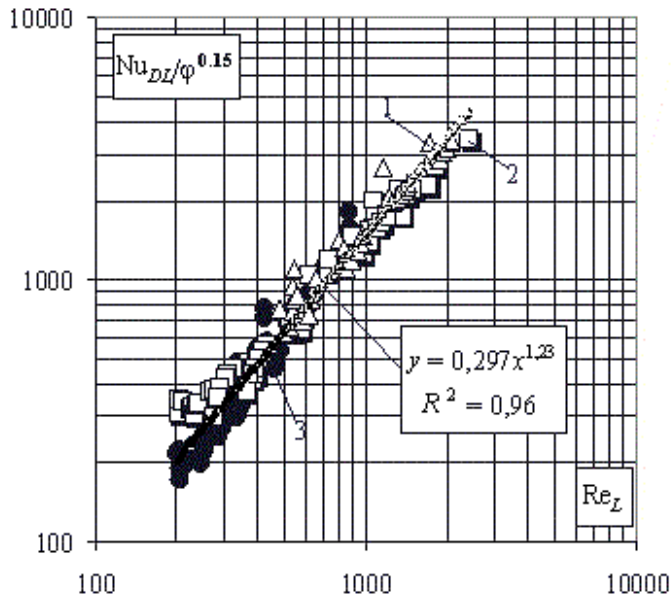


Рис. 5. Обобщение экспериментальных данных по массоотдаче: 1 –  $d_{mp} = 0,041$  м; 2 –  $d_{mp} = 0,0315$  м; 3 –  $d_{mp} = 0,023$  м.

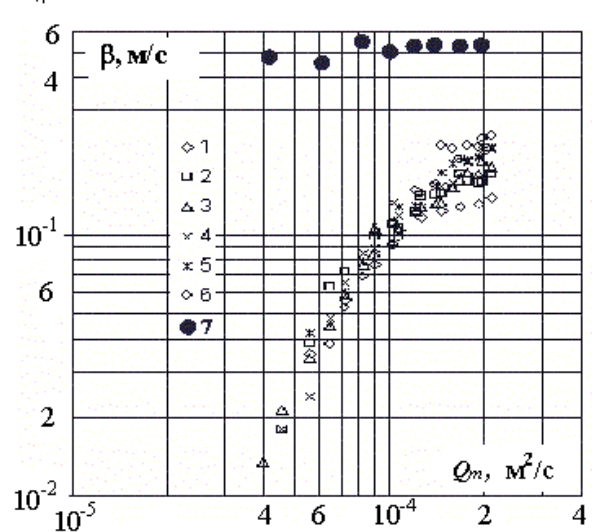


Рис. 6. Сравнение опытных значений  $\beta = f(Q_m)$  для проточного барботажного слоя (точки 7) и для восходящего потока газового ядра и пленки жидкости (точки 1...6).

циента массоотдачи для случая проточного барботажного слоя (по сравнению с [11]) можно объяснить реализацией этого процесса на начальном участке движения теплоносителей при небольших значениях  $H/d_{\text{тр}} = 2,44 \dots 4,35$  (в отличие от случая спутного движения газа и пленки жидкости, где эти значения на порядок больше), а также уже отмечавшимся выше отрицательным влиянием уноса капель жидкости с поверхности пленки, который для случая спутного движения фаз гораздо интенсивнее через существенно большее значение величины  $W_{\text{вх}}$  (в 3...8 раз).

Эти факты, собственно, являются экспериментальным подтверждением эффективности предложенной в работе [12] схемы утилизационной установки на базе организации движения теплоносителей в виде проточного барботажного слоя.

Таким образом, интенсивность массоотдачи для рассматриваемой задачи в диапазоне изменения режимных параметров, указанных в начале статьи, может определяться по следующей зависимости (рис. 5):

$$\text{Nu}_{DL} = \frac{\beta L}{D} = \frac{\beta \sigma}{D \rho_2 W_{\text{вх}}^2}. \quad (6)$$

### Выводы

В результате проведенных исследований:

1. Были получены зависимости среднего коэффициента массоотдачи от основных режимных параметров: начальной приведенной скорости ПГС, объемной плотности орошения водой и начальной относительной влажности ПГС. Показано доминирующее и заметное влияния на интенсивность массоотдачи величин соответственно начальной приведенной скорости ПГС и начальной относительной влажности ПГС. По отношению к объемной плотности орошения водой величина среднего коэффициента массоотдачи оказалась автоматической.

2. Впервые получена обобщающая зависимость (6) для расчета среднего коэффициента массоотдачи, пригодная для создания ме-

тодики расчета контактных проточно-барботажных утилизаторов теплоты.

3. Было установлено отсутствие, в результате сопровождающего передачу теплоты и массы уноса капель, аналогии в развитии этих процессов. Очевидно, что испарение этих капель нарушает подобие полей движущих сил – поля температур и поля парциальных давлений пара в ПГС.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Безродный М.К., Костюк А.П., Голяд Н.Н., Барабаш П.А.* Контактный тепломассообмен в проточном барботажном слое. Часть первая. Теплоотдача // Промышленная теплотехника. – 2011. – Т. 33. № 6. – С. 39 – 45.
2. *Безродный М.К., Барабаш П.А., Назарова И.А., Костюк А.П.* Гидродинамика проточного барботажного слоя в вертикальном канале // Промышленная теплотехника. – 2009. – Т. 31. № 4. – С. 27 – 33.
3. *Безродный М.К., Голяд М.Н., Барабаш П.О., Голубев О.Б., Назарова И.О., Костюк О.П.* Тепло- і масовіддача при охолодженні парогазової суміші в проточному барботажному контактному апараті // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. Вип. 1. Дніпропетровськ. – 2009. – С. 34 – 45.
4. *Безродный М.К., Пиоро И.Л., Костюк Т.О.* Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах. Теория и практика. – 2-е издание, дополненное и переработанное. – Киев: Факт, 2005. – 704 с.
5. *Тарат Э.Я. и др.* Пенный режим и пенные аппараты. – Л.: Химия, 1977. – 304 с.
6. *Уоллис Г.* Одномерные двухфазные течения. – М.: Мир, 1982. – 440 с.
7. *Кафаров В.В.* Основы массопередачи. – М.: Высшая школа, 1972. – 496 с.
8. *Кутателадзе С.С., Накоряков В.Е.* Тепломассообмен и волны в газожидкостных системах. – Новосибирск: Наука, 1984. – 301 с.
9. *Семейн В.М.* Теплоотдача влажного воздуха при конденсации пара // Теплоэнергетика. – 1956. – № 4. – С. 11–15.

10. Омар Х., Похвалов Ю.Е. Гидродинамика и структура двухфазного потока при барботажном режиме в трубах небольшого диаметра // Теплоэнергетика. – 2006. – № 4. – С. 74 – 77.

11. Безродный М.К., Назарова И.А., Хавин С.А. Тепломассообмен при конденсации водяных паров из парогазовой смеси в восходящем потоке с пленкой жидкости // Промышленная теплотехника. – 2003. – № 4. – С. 26 – 30.

12. Деклараційний патент на корисну модель №22852 України, МПК F24H 6/00. Нагрівник текучої рідини. Безродний М.К., Назарова І.О., Костюк О.П. Власник Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут". – № u2006 13907; заявл. 27.12.2006; опубл. 25.04.2007., Бюл. № 5.

*Получено 23.03.2011 г.*