

УДК 621.928.46.97

УТОЧНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОМАССОБМЕНА В ПУЗЫРЯХ, ФОРМИРУЮЩИХСЯ НА ОТВЕРСТИЯХ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ РЕШЕТОК ПЕННЫХ И ЦЕНТРОБЕЖНО- БАРБОТАЖНЫХ АППАРАТОВ

М.И. ШИЛЯЕВ, А.В. ТОЛСТЫХ, Е.М. ХРОМОВА

Томский государственный архитектурно-строительный университет

Проведено уточнение моделей процесса тепломассообмена в пенных и центробежно-барботажных аппаратах, разработанных ранее авторами, при учете стефанова потока при повышенных влагосодержаниях обрабатываемого газа.

1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ АППРОКСИМАЦИИ СКОРОСТИ ГАЗА У ПОВЕРХНОСТИ ПУЗЫРЯ

В работе [1] рассмотрены и смоделированы для невысоких влагосодержаний обрабатываемого газа процессы тепломассообмена, протекающие на внутренних поверхностях сферических и цилиндрических пузырей, формирующихся на круглых и щелевых отверстиях газораспределительных решеток пенных (ПА) (рис. 1, *a*) и центробежно-барботажных (ЦБА) (рис. 1, *b*) аппаратов. Результаты численного расчета поверхностных коэффициентов тепло- и массоотдачи (α и β), проведенные на основе модели для цилиндрических пузырей, и данные экспериментов [2] сопоставлены между собой и установлена их согласованность, однако,

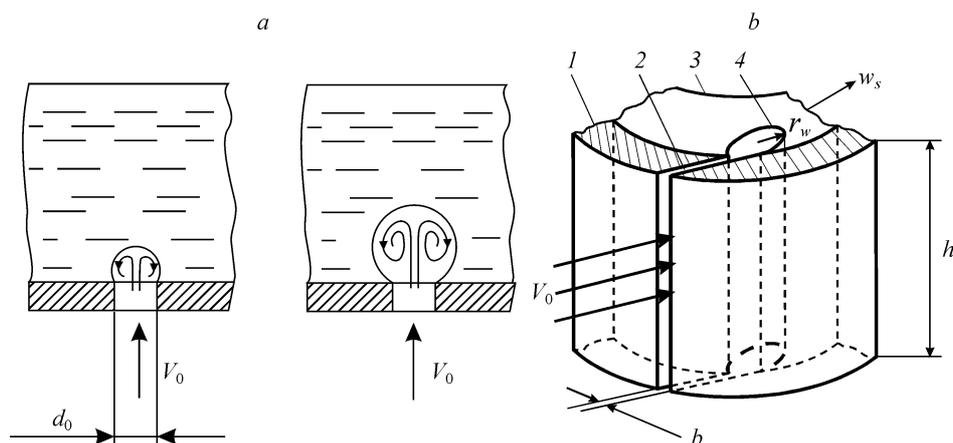


Рис. 1. Схема формирования паровоздушного сферического (*a*) и цилиндрического (*b*) пузырей на отверстиях газораспределительных решеток.

1 — завихритель ЦБА, 2 — тангенциальное щелевое отверстие, 3 — центробежно-барботажный слой, 4 — цилиндрический пузырь.

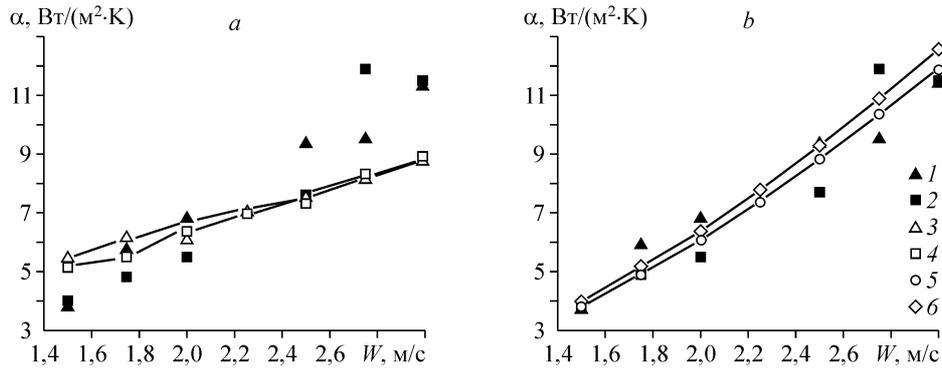


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплоотдачи α от средней расходной скорости воздуха W . Данные экспериментов по тепломассообмену в ЦБА [2]: $t_{в0} = 62-44$ (1), $46-43$ (2) °С, $d_{в0} = 0,0093$ (1), $0,0048$ (2) кг/кг с.в.; расчет по модели при $V_s = kV_0$ (а), eV_0^a (b): $t_{в0} = 62-44$ (3, 5), $46-43$ (4, 6), $d_{в0} = 0,0093$ (3, 5), $0,0048$ (4, 6) кг/кг с.в.

как видно из рис. 2, а и 3, а, весьма грубая. Коэффициенты α и β , в соответствии с методикой обработки опытных данных [2], вычислялись по формулам

$$\alpha = Q/S\Delta\bar{T}, \quad \beta = G_{п}RT_c/S\Delta pM_{п}, \quad (1)$$

где $Q = c_{св}\rho_{св}WS(T_{в0} - T_{вк})$ при $c_{св}$, $\rho_{св}$ — теплоемкость и плотность воздуха, поступающего в ЦБА, W — среднерасходная скорость воздуха перед решеткой, S — площадь газораспределительной решетки, $T_{в0}$, $T_{вк}$ — температуры влажного воздуха внутри пузыря в начальный и в конечный (отрыв) моменты времени его формирования на отверстии; $\Delta\bar{T}$ — среднелогарифмический температурный напор между воздухом и центробежно-барботажным слоем [2]; $G_{п} = G_{св}(d_{в0} - d_{вк})$ — массовый расход конденсирующихся на поверхности пузыря водяных паров, если $d_{в0} > d_{вк}$ (или испаряющейся влаги с его поверхности, если $d_{в0} < d_{вк}$), $d_{в0}$ и $d_{вк}$ — влагосодержания водяных паров внутри пузыря в начальный и в конечный моменты времени его формирования, $G_{св}$ — массовый расход сухого воздуха; R — универсальная газовая постоянная; $M_{п}$ — молекулярная масса водяных паров ($M_{п} = 18$ кг/кмоль);

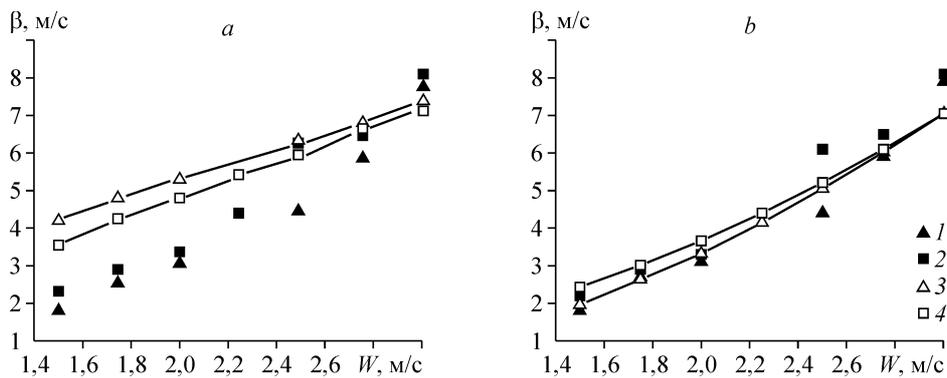


Рис. 3. Зависимость коэффициента массоотдачи β от среднерасходной скорости воздуха W . Данные экспериментов по тепломассообмену в ЦБА [2]: $t_{в0} = 62-44$ (1), $46-43$ (2) °С, $d_{в0} = 0,0093$ (1), $0,0048$ (2) кг/кг с.в.; расчет по модели при $V_s = kV_0$ (а), eV_0^a (b): $t_{в0} = 62-44$ (3), $46-43$ (4), $d_{в0} = 0,0093$ (3), $0,0048$ (4) кг/кг с.в.

T_c — абсолютная температура газожидкостного слоя, равная некоторому среднему значению, найденному из осредненной температуры паровоздушной смеси по времени существования пузыря на отверстии и температуры жидкости; $\Delta \bar{p}$ — среднелогарифмическая разность парциальных давлений водяного пара на входе и выходе из слоя [2].

Результаты расчетов, проведенных в предположении, что среднюю скорость газа вблизи поверхности пузыря можно определить в соответствии с [3] как

$$V_s = kV_0 \quad (2)$$

(V_0 — скорость воздуха в отверстии газораспределительной решетки, k_b — коэффициент, значение которого при расчетах для ЦБА принималось $k_b = 0,005$, для ПА $k_b = 0,003$), показали, что при относительно небольших скоростях воздуха расчетный коэффициент β существенно превышал экспериментальные значения, а коэффициент α отличался от экспериментальных данных при скорости воздуха перед решеткой $W > 2,5$ м/с.

При использовании вместо соотношения (2) двухпараметрической зависимости вида

$$V_s = eV_0^q \quad (3)$$

($e = 4,2 \cdot 10^{-5}$, $q = 2,1$) можно добиться не только качественного, но и количественного лучшего согласования данных расчета и эксперимента. На рис. 2, 3 показаны примеры расчетов коэффициентов теплообмена и массообмена по модели [1] с использованием зависимостей (2) (см. рис. 2, а, 3, а) и (3) (см. рис. 2, б, 3, б) соответственно.

Аналогичную аппроксимацию вида (3) можно принять и для сферических пузырей, формирующихся на круглых отверстиях решеток ПА, и точнее описать коэффициенты тепло- и массообмена. Однако опытных данных для этих коэффициентов в зависимости от скорости парогазового потока перед решеткой в литературе не найдено, вследствие чего константы аппроксимации e и q для ПА не представляется возможным определить. Для решения этого вопроса требуется проведение специального эксперимента.

2. ВЛИЯНИЕ СТЕФАНОВА ПОТОКА НА СТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОМАССООБМЕНА В ПУЗЫРЯХ, ФОРМИРУЮЩИХСЯ НА ОТВЕРСТИЯХ РЕШЕТОК БАРБОТАЖНЫХ АППАРАТОВ, ПРИ БАРБОТИРОВАНИИ ВОЗДУХА С ВЫСОКИМ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЕМ

Исследование конденсационного эффекта улавливания субмикронной пыли в мокрых пылеуловителях [4] показало, что для создания замкнутой системы расчета процессов пылеулавливания в ПА и ЦБА необходимы модели тепломассообмена, учитывающие перенос дополнительного количества влаги стефановским течением при барботировании газов с повышенным влагосодержанием. Например, для расчета отношений коэффициентов полного проскока с учетом конденсационного эффекта (K_Σ) и без него ($K_{\Sigma 0}$) в [4] была получена зависимость от перепада влагосодержания (Δd) за период формирования пузыря до его отрыва от отверстия

$$K_\Sigma / K_{\Sigma 0} = e^{-3/2(\rho_{св0}/\bar{\rho}_{пс})\Delta d}, \quad (4)$$

где $\rho_{св0}$ — плотность сухого воздуха на входе в аппарат, $\bar{\rho}_{пс}$ — среднее значение плотности пара у поверхности пузыря за время его формирования на отверстии решетки, $\Delta d = d_{в0} - d_{вк}$, K_Σ — коэффициент полного проскока пыли через аппарат

при суммарном воздействии конденсационного эффекта и инерционных сил на частицы внутри пузырей, $K_{\Sigma 0}$ — коэффициент полного проскока пыли через аппарат сухих частиц при воздействии на частицы только инерционных сил (коэффициент проскока определяется как отношение концентрации пыли на выходе из аппарата к концентрации пыли на его входе).

Результаты расчетов характеристик процессов тепло- и массообмена, протекающих на внутренней поверхности пузырей, образующихся на решетках барботажных аппаратов, и приведенные в [1], [5], получены без учета поправки на влияние стефанова потока и не могут быть распространены на режимы работы ПА или ЦБА, предусматривающие тепловлажностную обработку газов с высоким начальным влагосодержанием.

Для того, чтобы оценить вклад стефанова потока в процессы конденсации и испарения, протекающие внутри пузырей, в модели [1], [5] была внесена поправка в виде дополнительного множителя $K_{ст}$ [6], увеличивающего эмпирический коэффициент конвективного массообмена воды и влажного воздуха [7]:

$$K_{ст} = 1 + (P_{пв} + P_{пг}) / 2B,$$

где $P_{пв}$ — парциальное давление водяного пара, осредненное по всему объему пузыря, $P_{пг}$ — давление насыщенных водяных паров у поверхности пузыря, B — барометрическое давление.

Было установлено, что превышение значений локальных коэффициентов теплоотдачи на внутренней поверхности формирующихся пузырей без учета поправки на стефанов поток над значениями соответствующих коэффициентов, рассчитанных с учетом данной поправки при скорости подачи воздуха под газораспределительную решетку 1,5 м/с, составляет для сферических пузырей 5 % при $d_{в0} = 0,2$ кг/кг с.в. и 9 % при $d_{в0} = 0,5$ кг/кг с.в., а при скорости 3 м/с — 5,7 % и 13 % соответственно.

Для цилиндрических пузырей при скорости подачи воздуха под газораспределительную решетку 1,5 м/с превышение значений коэффициентов теплоотдачи составляет 6,2 % при $d_{в0} = 0,2$ кг/кг с.в. и 15% при $d_{в0} = 0,5$ кг/кг с.в., а при скорости 3 м/с — 6,3 % и 15,4 % соответственно.

Влияние стефанова потока на коэффициенты массо- и теплопереноса значительно усиливается с увеличением начального влагосодержания в барботируемом газе. Изменение относительного коэффициента массоотдачи ($\beta_{Лст} / \beta_L$)

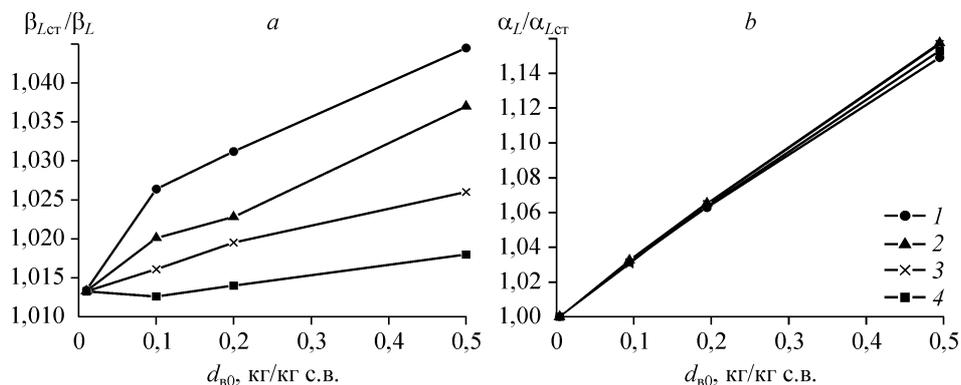


Рис. 4. Зависимости отношений коэффициентов массоотдачи (a) и теплоотдачи (b) с учетом $\beta_{Лст}$ и $\alpha_{Лст}$ и без учета β_L и α_L стефанова потока в цилиндрическом пузыре от начального влагосодержания $d_{в0}$ при $t_{в0} = 80$ °C, $t_{ж} = 10$ °C: $W = 1,5$ (1), 2,0 (2), 2,5 (3), 3,0 (4) м/с.

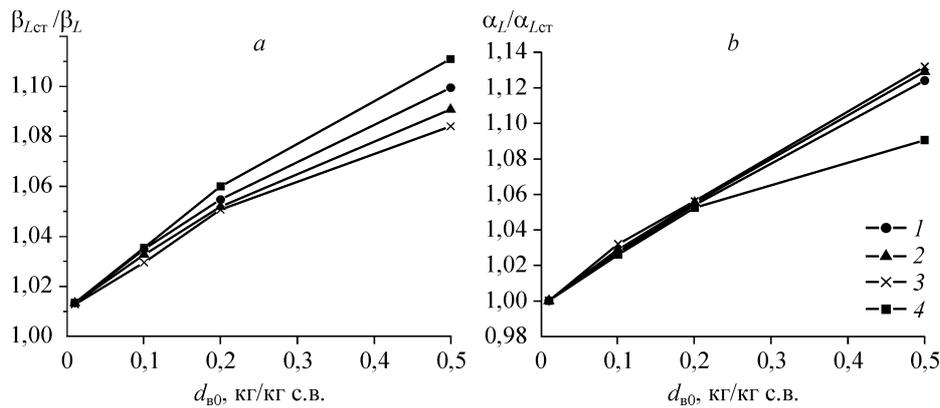


Рис. 5. Зависимости отношений коэффициентов массоотдачи (а) и теплоотдачи (b) с учетом $\beta_{Lст}$ и $\alpha_{Lст}$ и без учета β_L и α_L стефанова потока в сферическом пузыре от начального влагосодержания $d_{в0}$ при $t_{в0} = 80$ °С, $t_{ж} = 10$ °С $W = 1,5$ (4), 2,0 (1), 2,5 (2), 3,0 (3) м/с.

и теплоотдачи ($\alpha_L/\alpha_{Lст}$) в цилиндрических пузырях (ЦБА) показано на рис. 4. На рис. 5 приведены аналогичные результаты для сферических пузырей (ПА).

3. ПАРАМЕТРЫ НЕСТАЦИОНАРНОГО ГАЗОЖИДКОСТНОГО СЛОЯ В ПА ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯХ ПАРОВАЗОВОЙ СМЕСИ

Учет коэффициента K_c в двухтемпературной (нестационарной) модели [5] позволил выяснить, что стефанов поток не вносит существенных перемен в значения температуры газожидкостного слоя ПА. На рис. 6, а показано изменение температуры жидкости в пенном слое при подаче воздуха с невысоким начальным влагосодержанием ($d_{в0} = 0,004$ кг/кг с.в.). В этом случае преобладает испарение, массоперенос происходит в направлении жидкость-газ. Очевидно, что количество теплоты, поступающее из газа в охлаждающую жидкость, оказывается недостаточным для преодоления потерь тепла на испарение, поэтому с течением времени происходит незначительное уменьшение температуры жидкости в слое, которое не превышает 2 % от первоначального значения.

Процесс роста температуры жидкости в слое иллюстрирует график рис. 6, b), который получен в результате расчета параметров газожидкостного слоя по двухтемпературной модели при подаче воздуха с высоким начальным влагосодержанием ($d_{в0} = 0,5$ кг/кг с.в.). Теперь определяющая роль принадлежит процессам конденсации, реализующимся на внутренней поверхности формирующихся пузырей. Процессы массо- и теплообмена действуют в одном направлении (газ-жидкость) и взаимно усиливают друг друга, это и является причиной значительного изменения

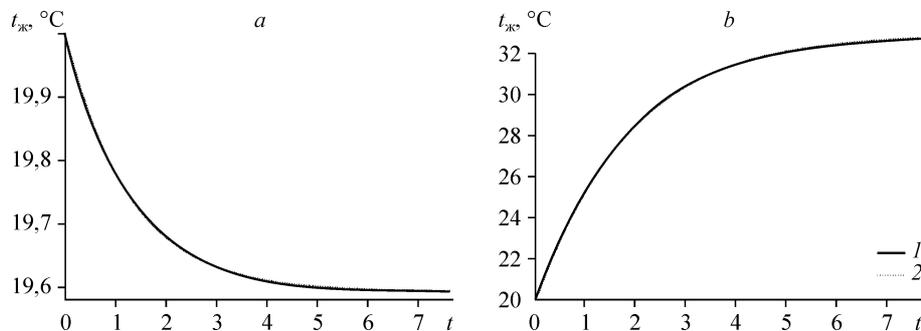


Рис. 6. Изменение температуры жидкости в пенном слое, $t_{в0} = 90$ °С, $t_{ж0} = 20$ °С; $d_{в0} = 0,004$ (а), 0,5 (b) кг/кг с.в.: без поправки (1), с поправкой (2) на стефанов поток.

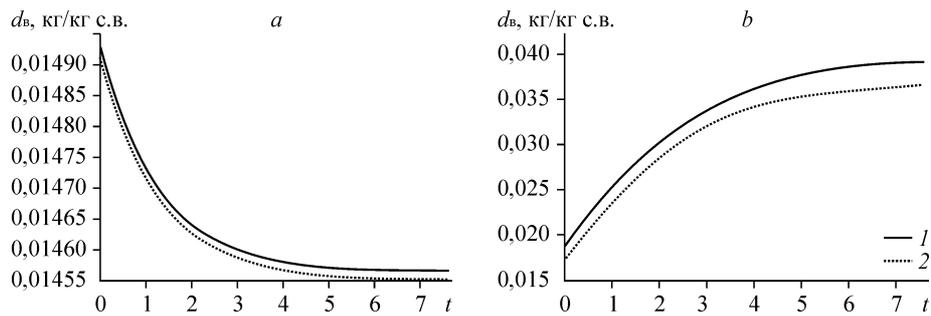


Рис. 7. Изменение влагосодержания в пенном слое, $t_{в0} = 90$ С, $t_{ж0} = 20$ С; $d_{в0} = 0,004$ (а), 0,5 (б) кг/кг с.в.: без поправки (1), с поправкой (2) на стефанов поток.

температуры жидкости. Как уже было отмечено, стефанов поток не вносит существенных перемен в тепловой баланс газожидкостного слоя ПА, однако его влияние сказывается на значениях влагосодержания воздуха, прошедшего обработку в пенном слое.

Как видно на рис. 7, а, при малом начальном влагосодержании подаваемого воздуха влагосодержание на выходе из слоя, определенное с поправкой на стефанов поток, незначительно превышает аналогичные значения, вычисленные без учета поправки. При высоких начальных влагосодержаниях в подаваемом воздухе, в случае преобладания конденсации, стефанов поток вносит более значимые изменения в количество сконденсировавшейся влаги (рис. 7, б). Уменьшение влагосодержания на выходе из пенного слоя с течением времени (см. рис. 7, а) или его увеличение (см. рис. 7, б) связано, соответственно, с падением температуры жидкости в слое в случае малых начальных влагосодержаний (см. рис. 6, а) и с ее ростом в случае высоких начальных влагосодержаний (см. рис. 6, б), т. к. влагосодержание в воздухе, прошедшем обработку в пенном аппарате, из-за высокой интенсивности тепломассообменных процессов достигает равновесного значения, которое определяется температурой уходящего воздуха.

ВЫВОДЫ

В работе показано, что использование в моделях двухпараметрического представления скорости парогазового потока у поверхности пузырей, формирующихся на отверстиях газораспределительных решеток барботажных аппаратов, существенно улучшает сходимость теории и опытных данных.

Анализ влияния стефанова потока на тепломассообменные характеристики газожидкостного слоя показал, что оно существенно зависит от величины входного влагосодержания. Следовательно, расчет процесса пылеулавливания субмикронных частиц, ориентированный на высокую степень газоочистки в барботажных аппаратах, которая может быть обеспечена только при значительных перепадах влагосодержания, нужно вести с использованием моделей тепломассообмена, учитывающих стефанову поправку.

ИНДЕКСЫ

св — сухой воздух,
с.в. — сухой воздух в размерностях $d_{в0}$ и $d_{вх}$,
в0 — внутренний по отношению к пузырю,
начальное значение соответственно,
к — конечное значение,

п — пар,
с — слой, (T_c — температура слоя),
s — поверхность,
ст — стефанов,
пв — пар, внутренний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шияев М.И., Толстых А.В., Деренок А.Н., Хромова Е.М. Моделирование тепломассообмена при формировании пузырей в барботажных аппаратах // ТОХТ. — 2003. — Т. 37, № 6. — С. 575–583.
2. Шияев М.И., Дорохов А.Р. Тепломассообмен в центробежно-барботажном аппарате // Изв. вузов. Строительство. — 1998. — № 1. — С. 60–66.
3. Шияев М.И., Дорохов А.Р., Нечаев П.Г. О механизме улавливания пыли в пенных аппаратах // Изв. вузов. Строительство. — 1997. — № 4. — С. 108–115.
4. Шияев М.И., Шияев А.М., Толстых А.В., Хромова Е.М. Конденсационные механизмы улавливания тонкодисперсной пыли в пенных аппаратах и полых форсуночных скрубберах // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды: Материалы III Международной научной конференции 14–17 сентября 2004 г. — Волгоград: ВолГАСУ, 2005. — С. 169–177.
5. Шияев М.И., Толстых А.В., Деренок А.Н., Хромова Е.М. Двухтемпературная модель тепломассообмена при формировании пузырей на отверстиях газораспределительных решеток барботажных аппаратов // Теплофизика и аэромеханика. — 2003. — Т. 11, № 1. — С. 127–136.
6. Амелин А.Г. Теоретические основы образования тумана при конденсации пара. — М.: Химия, 1966. — 254 с.
7. Нестеренко А.В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха. — М.: Высшая школа, 1971. — 324 с.

Статья поступила в редакцию 22 июля 2005 г.