

УДК 532.529.5:536.248.2

## ИЗУЧЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ АППАРАТОВ С ПОДВИЖНОЙ НАСАДКОЙ

В. П. Данько<sup>\*,\*\*</sup>, С. Н. Диянова<sup>\*</sup>, А. Г. Абазян<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Кубанский государственный технологический университет,  
350072 Краснодар, Россия

<sup>\*\*</sup> Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова,  
350002 Краснодар, Россия

E-mails: vladislav.danko@mail.ru, dsnemail1@rambler.ru, artak-1@yandex.ru

Рассмотрены гидродинамические режимы работы теплообменных аппаратов с подвижной насадкой. Получены необходимые в инженерных расчетах зависимости, которые определяют значения критической скорости, потери импульса в рабочей зоне и динамическую толщину слоя элементов насадки.

Ключевые слова: гидродинамика, теплообменный аппарат, псевдооживленный слой, холодильная система, кондиционирование воздуха.

DOI: 10.15372/PMTF20180413

В различных технологических процессах широко используются теплообменные аппараты (ТМА) с подвижной насадкой [1, 2].

Аппараты с подвижной насадкой (АПН) для пыле- и газоочистки, а также абсорбции разработаны в ряде стран: Канаде, США, Германии, Японии и др. Преимуществами АПН, определившими их широкое распространение, являются способность работать в загрязненных средах с самоочищением насадочных поверхностей и стенок корпуса; малая чувствительность характеристик аппарата к резким колебаниям расхода жидкости и скорости газа; нетребовательность к первичному распределению жидкости, что важно для промышленных АПН; возможность масштабирования; широкий диапазон рабочих нагрузок (расход жидкости  $q_{ж} \leq 200 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , скорость газа  $w_{г} \leq 8 \text{ м/с}$ ); высокая интенсивность процессов переноса в слое насадки; простота конструкции; компактность; относительно небольшие масса и стоимость аппарата [3, 4].

Определяющей характеристикой процессов теплообмена, происходящих в трехфазных потоках, является взаимодействие фаз, от которого зависит площадь межфазной поверхности. Аппараты, в которых реализуются процессы теплообмена, должны конструироваться таким образом, чтобы поверхность контакта сред была максимальной. При классификации ТМА учитываются как геометрические особенности аппарата, так и создаваемый в них гидродинамический режим. Однако основным условием при конструировании таких аппаратов является создание тонкой пленки жидкости на поверхности насадки [5–7].

Имеющиеся экспериментальные данные о взаимодействии трех фаз в ТМА различаются настолько существенно, что их использование в инженерных расчетах невозможно. Сложное поведение системы газ — жидкость — твердое тело исследуется в основном экспериментально. АПН целесообразно использовать для таких массообменных процессов, в которых основное сопротивление массоотдачи сосредоточено в газовой фазе, что характерно для процессов испарительного охлаждения в градирнях [8–13].

Целями настоящей работы являются исследование условий, при которых ТМА с подвижной насадкой можно использовать для контактной обработки газов и жидкостей, и получение значений плотности элементов насадки  $\rho_{э.н}$  и динамической высоты столба жидкости  $H_{ст}$ , а также уточненных расчетных зависимостей, описывающих процессы гидродинамики и тепломассообмена в АПН, для применения в инженерных расчетах.

Исследование процессов испарительного охлаждения воды проводилось на экспериментальном стенде с использованием различных элементов насадки [14–16]. Экспериментальный стенд представлял собой колонну цилиндрической формы, состоящую из прозрачных царг диаметром  $D_k \approx 0,2$  м и высотой  $H_k = 1,0$  м. С учетом высоты опорно-распределительной решетки высота рабочей зоны колонны составляет 0,95 м (при двухъярусном расположении насадки высота рабочей зоны каждого яруса составляет 0,45 м). В качестве элементов насадки использовались целлулоидные шары диаметром 37 мм, плотность которых варьировалась в диапазоне  $\rho_{э.н} = 100 \div 1000$  кг/м<sup>3</sup> путем частичного заполнения шаров жидкостью [17, 18].

Важнейшей характеристикой АПН является количество удерживаемой жидкости, или удерживающая способность слоя подвижной насадки  $H_{ж}$ . Данная величина определяет поверхность переноса в псевдооживленном слое насадки. Имеющиеся данные об удерживающей способности слоя подвижной насадки получены для ограниченного диапазона нагрузок, без учета влияния эффективной плотности элементов насадки  $\rho_{э.н}$ . Распределение жидкости по высоте рабочей зоны, а также толщина слоев жидкости, газа, пены, стационарного слоя определялись визуально.

В настоящей работе использовался циркуляционный метод. Различие уровней жидкости до включения аппарата и во время его работы характеризует удерживающую способность псевдооживленного слоя насадки. Для подвижной насадки в аппаратах характерны следующие режимы: стационарный; захлебывание стационарной насадки; начальное псевдооживление; развитое псевдооживление [19, 20].

Слой шаров полагался сплошной средой с заданной пористостью.

Пористость фиксированного слоя не зависит от скорости газа и расхода жидкости. Критические скорости перехода  $w_0$ ,  $w'_0$  определяются в результате анализа кривой псевдооживления, которая описывается зависимостью  $\Delta p = f(w_{г}, q_{ж})$ . Построена виброкривая  $L_a(w_{г}, q_{ж})$  при следующих параметрах: толщина статического слоя элементов насадки  $H_{ст} = 0,1$  м, диаметр элемента насадки  $d_{э.н} = 0,04$  м, плотность элемента насадки  $\rho_{э.н} = 300$  кг/м<sup>3</sup>, расход жидкости при работе установки  $q_{ж} = 15$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·ч) (рис. 1). Виброкривая описывает уровень вибрации (в децибелах) стенок колонны в зависимости от состояния слоя элементов подвижной насадки (развитость режима псевдооживления характеризуется большим значением вибрации, измеряемой с помощью датчика, прикрепленного к стенке колонны) [4, 15].

Скорость  $w_{г}$  отнесена к площади сечения колонны без учета объема насадки; рассмотрен фиксированный предварительно уплотненный слой элементов насадки, который может расширяться. Введем для скорости газа  $w_{г}^*$  следующие обозначения:  $w_{отр}$  — максимальная скорость, при которой близки кривые  $\Delta p$  для фиксированного и подвижного слоев;  $w_3$  — скорость, при которой начинается захлебывание стационарного слоя;  $w_0$ ,  $w'_0$  — скорости, при которых начинается псевдооживление “сухого” и “орошаемого” слоев насадки;

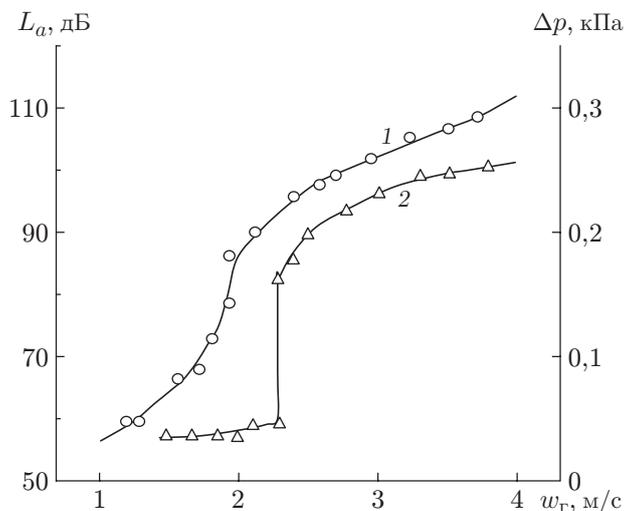


Рис. 1. Экспериментальные зависимости потери напора (1) и уровня вибрации (2) от скорости газа

$w_1$  — скорость, при которой начинается этап развитого псевдооживления и которая соответствует активному движению и перемешиванию элементов насадки;  $w_i$  — скорость, при которой начинается инверсия элементов насадки, их концентрация вблизи ограничительных поверхностей аппаратов. Этот режим быстро трансформируется в режим “верхнего” захлебывания элементов насадки, характерный для фиксированного слоя. Скорость  $w_3$  соответствует интенсивному увеличению потери напора  $\Delta p$ , неупорядоченности слоя, образованию пены над ним. В случае фиксированного слоя скорость  $w_3$  при конкретных нагрузках неизменна, в случае расширяющегося слоя  $w_3$  зависит от пористости и не может быть описана с помощью известных зависимостей. Скорость  $w_0$  — минимальная скорость газа, при которой наблюдаются устойчивые вертикальные колебания нескольких близко расположенных элементов насадки.

На рис. 1 видно, что резкому увеличению значения  $L_a$  (20 дБ или 30 %) соответствует значение критической скорости  $w'_0$ . Значение  $\Delta p$  при этой скорости меняется незначительно. Стационарному состоянию слоя соответствует практически неизменный уровень вибрации ( $L_a = 5,5w_T^{0,08}$ ). Процесс перехода элементов насадки в подвижное состояние более сложный, чем традиционно полагается. При  $w_T \simeq w'_0$  возникают неустойчивые псевдостационарные состояния элементов насадки, характеризующиеся при неизменных нагрузках периодическим движением отдельных из них (перестройка слоя, сопровождаемая изменением пористости). Время существования этих состояний составляет от нескольких десятков секунд до нескольких минут. Диапазон значений  $w'_0$  зависит от степени первичной уплотненности слоя, собственной массы элемента насадки, а также действия внешних нагрузок и вибраций. Например, для элемента насадки с плотностью  $\rho_{э.н} = 300 \text{ кг/м}^3$ , диаметром  $d_{э.н} = 0,037 \text{ м}$  скорость равна  $w'_0 = 0,4 \text{ м/с}$ .

В настоящей работе установлено, что элементы с плотностью  $\rho_{э.н} < 200 \text{ кг/м}^3$  переходят из стационарного состояния в подвижное состояние, минуя захлебывание; при  $\rho_{э.н} > 200 \text{ кг/м}^3$  псевдооживление происходит в условиях захлебывания псевдостационарного расширяющегося слоя; при  $\rho_{э.н} > 700 \text{ кг/м}^3$  эта картина сохраняется при больших значениях удерживающей способности слоя подвижной насадки  $H_{ж}$ , причем часть жидкости выносится за границы слоя в виде слоя пены толщиной  $H_{п} > 0,02 \text{ м}$ .

Влияние скорости газа и расхода жидкости на удерживающую способность слоя подвижной насадки при  $H_{ст} = 0,1 \text{ м}$  показано на рис. 2.

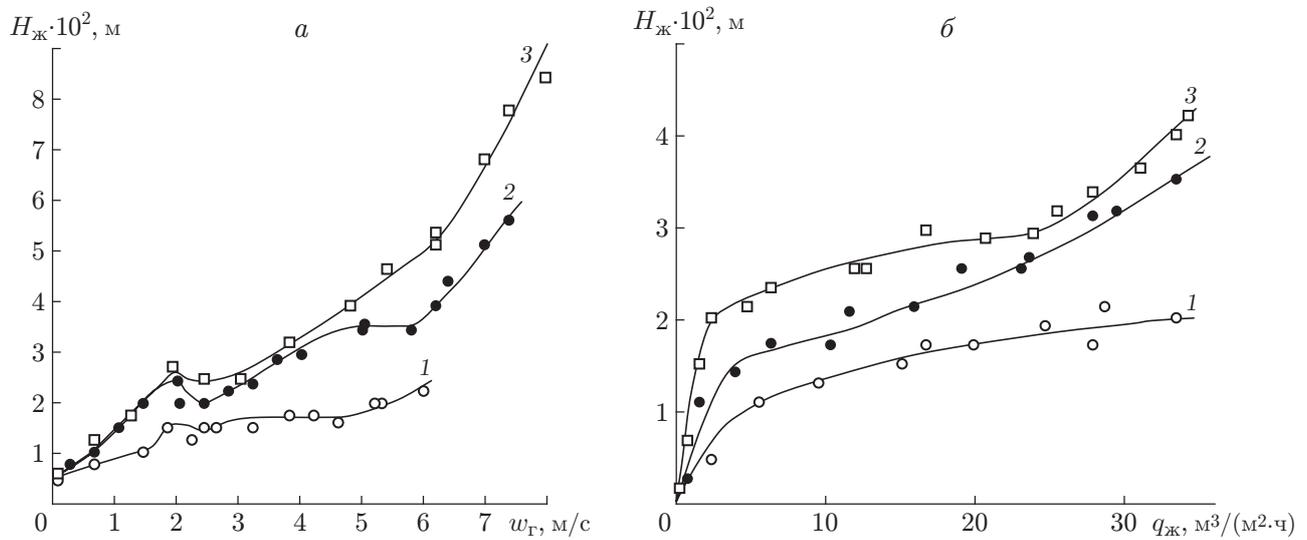


Рис. 2. Зависимости удерживающей способности слоя подвижной насадки от скорости газа (а) и расхода жидкости (б) при  $H_{\text{ст}} = 0,1$  м и различных значениях плотности элемента насадки:

1 —  $\rho_{\text{э.н}} = 100 \text{ кг/м}^3$ , 2 —  $\rho_{\text{э.н}} = 500 \text{ кг/м}^3$ , 3 —  $\rho_{\text{э.н}} = 800 \text{ кг/м}^3$

Для реализации массообменных процессов оптимальным является диапазон значений плотности  $\rho_{\text{э.н}} = 200 \div 700 \text{ кг/м}^3$ . Началу режима псевдооживления предшествует режим частичного захлебывания стационарного слоя; характер перехода определяет последующее поведение системы. Скорость, при которой начинается захлебывание, достаточно высока ( $w_3 \approx 6 \text{ м/с}$ ). При значениях скорости, меньших значения  $w_3$ , расход жидкости  $\Delta G_{\text{ж}}$  в рабочей зоне небольшой. Для указанного диапазона значений  $\rho_{\text{э.н}}$  характерны широкий диапазон значений скорости  $w_{\text{г}}$ , приемлемые значения расхода жидкости  $\Delta G_{\text{ж}}$  и небольшие значения величины  $H_{\text{ж}}$ .

Для диапазона  $\rho_{\text{э.н}} = 200 \div 700 \text{ кг/м}^3$  рассмотрим характерные режимы псевдооживления.

1. Стационарное состояние системы с характерной локальной перестройкой структуры неподвижного слоя и незначительным увеличением пористости ( $0 < w_{\text{г}} \leq 2,0 \text{ м/с}$ ). Величина  $H_{\text{ж}}$  линейно увеличивается до момента достижения значения скорости, при котором начинается псевдооживление ( $w_{\text{г}} = w'_0$ ) с прогрессирующим захлебыванием неподвижного перестраивающегося слоя.

2. Режим начального псевдооживления (переходный режим) ( $2,0 \text{ м/с} < w_{\text{г}} \leq 2,5 \text{ м/с}$ ). Наблюдается характерный пик величины  $H_{\text{ж}}$  при скорости газа  $w'_0$  (см. рис. 2,а) с последующим восстановлением предыдущего значения; система является неустойчивой, часть слоя остается неподвижной и частично перестраивается. При  $q_{\text{ж}} < 5 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  (см. рис. 2,б) в режиме развитого псевдооживления величина  $H_{\text{ж}}$  уменьшается до значений, характерных для неподвижного слоя. При данном граничном значении  $q_{\text{ж}}^*$  для градилен с подвижной насадкой происходит осушение слоя; в этом режиме их эксплуатация нецелесообразна, несмотря на большие значения времени прохождения жидкости через слой элементов насадки.

3. Режим развитого псевдооживления ( $2,5 \text{ м/с} < w_{\text{г}} \leq 6,0 \text{ м/с}$ ). Весь слой насадки является подвижным, система — однородной. Сравнение характеристик системы с характеристиками в аналогичном режиме для значений  $\rho_{\text{э.н}} < 200 \text{ кг/м}^3$  показывает, что сохраняется состояние начального захлебывания, которое с увеличением  $w_{\text{г}}$  не переходит

в развитое захлебывание вследствие расширения слоя. Это обеспечивает возможность стабильной эксплуатации АПН в режиме высоких нагрузок. Для описанного режима можно выделить диапазон значений скорости  $w_{\Gamma} \simeq 4,7 \div 6,0$  м/с, при которых  $H_{\text{ж}}$  не зависит от  $w_{\Gamma}$ . Затем величина  $H_{\text{ж}}$  вновь резко увеличивается.

4. Режим захлебывания подвижного слоя ( $6,0$  м/с  $< w_{\Gamma} \leq 8,0$  м/с). В отличие от аналогичного режима для аппаратов со стационарной насадкой возможность эксплуатации аппаратов с подвижной насадкой сохраняется.

Наиболее важными гидродинамическими характеристиками аппаратов с подвижной насадкой, необходимыми для инженерного расчета, являются критические скорости  $w'_0$ ,  $w_1$ , потери напора в рабочей зоне  $\Delta p$ , удерживающая способность слоя подвижной насадки  $H_{\text{ж}}$  и динамическая толщина слоя насадки  $H_{\text{д}}$ . Это позволяет выбрать режим работы ТМА, рассчитать высоту колонны и мощность вентилятора [19].

Для неорошаемых слоев насадки получено выражение, в котором для учета особенностей тесненного обтекания шаров потоком газа использована пористость стационарного слоя [4]:

$$\text{Re}_0 = \frac{w_0 d_{\text{э.н}}}{\nu_{\Gamma}} = \frac{Ar_{\Gamma}}{130(1 - \varepsilon_0)/\varepsilon_0^3 + \sqrt{Ar_{\Gamma}/\varepsilon_0^3}}. \quad (1)$$

С использованием уравнения (1) рассчитывается скорость  $w_0$  для слоя элементов насадки диаметром  $d_{\text{э.н}} = 35 \div 42$  мм и плотностью  $\rho_{\text{э.н}} = 90 \div 1000$  кг/м<sup>3</sup> при  $H_{\text{ст}} > d_{\text{э.н}}$ . Орошение насадки приводит к уменьшению скорости  $w_{\Gamma}^*(w'_0)$ , причем с увеличением  $\rho_{\text{э.н}}$  значение  $w'_0$  уменьшается. С учетом влияния  $q_{\text{ж}}$ ,  $\rho_{\text{э.н}}$  запишем выражение [4, 16]

$$w'_0 = \frac{4320\rho_{\text{э.н}}^{-1,21}w_0}{4320\rho_{\text{э.н}}^{-1,21} + q_{\text{ж}}^{-1,25 \cdot 10^{-4}\rho_{\text{э.н}} + 0,275}}. \quad (2)$$

Выражение (2) справедливо при  $200$  кг/м<sup>3</sup>  $\leq \rho_{\text{э.н}} \leq 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $5$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> · ч)  $\leq q_{\text{ж}} \leq 25$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> · ч). Для  $\rho_{\text{э.н}} < 200$  кг/м<sup>3</sup> зависимость  $w'_0 = f(\rho_{\text{э.н}})$  определяется большей скоростью. Значение  $w_1$  характеризует переход к режиму развитого псевдооживления, а следовательно, к однородному псевдооживленному слою [4, 17]:

$$w_1 = 1,4w_0.$$

С ростом  $\rho_{\text{э.н}}$  толщина зоны начального псевдооживления резко увеличивается, слои элементов насадки с плотностью  $\rho_{\text{э.н}} > 500$  кг/м<sup>3</sup> на практике работают только в этом режиме.

Динамическая толщина  $H_{\text{д}}$  характеризуется средним значением толщины слоя подвижной насадки, которая колеблется и определяется визуально. В устойчивом режиме эти колебания характеризуются постоянной амплитудой:

$$H_{\text{д}} = H_{\text{ст}} + H_{\text{ст}}(w_{\Gamma} - w_0)[16,2e^{-0,002\rho_{\text{э.н}} - 70d_{\text{э.н}}} + 0,007q_{\text{ж}}]. \quad (3)$$

При  $w_{\Gamma} = w'_0$  величина  $H_{\text{д}} = H_{\text{ст}}$ . С использованием формулы (3) динамическая толщина  $H_{\text{д}}$  рассчитывается также для сухого слоя подвижной насадки; эта формула справедлива при следующих значениях:  $w_{\Gamma} = w'_0 - 4,5$  м/с,  $q_{\text{ж}} \leq 25$  м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup> · ч),  $H_{\text{ст}} = 0,2 \div 0,5$  м,  $\rho_{\text{э.н}} = 90 \div 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $d_{\text{э.н}} = 0,035 \div 0,042$  м [4, 18].

Величина потерь напора газового потока  $\Delta p$  определяет мощность электродвигателя вентилятора (без учета потерь энергии на сепарацию и в коммуникациях). Традиционно используется отношение  $\Delta p/H_{\text{ст}}$ , однако основной характеристикой слоя подвижной насадки является его динамическая толщина  $H_{\text{д}}$ . Комплекс  $\Delta p/H_{\text{ст}}$  не отражает физическую картину, поскольку, например, при  $\rho_{\text{э.н}} = 1000$  кг/м<sup>3</sup> данная величина превышает

$10^4$  Па/м. Это максимальное значение соответствует массе неподвижного слоя элементов насадки, в котором полости заполнены жидкостью. При потерях, больших  $10$  Па/м, это приведет к обратному потоку, что на практике не наблюдается даже при  $w_T > 8$  м/с. Поэтому целесообразно использовать удельную динамическую потерю напора  $\Delta p/H_d$ , где

$$\Delta p = \Delta p_d H_d + g M_{\text{э.н}}/F_k; \quad (4)$$

$$\Delta p_d = 0,8 H_{\text{ст}}^{-0,65} w_T e^{1,85 \cdot 10^{-3} \rho_{\text{н}} + 1,56 \cdot 10^{-2} q_{\text{ж}} + 2,86}, \quad (5)$$

$M_{\text{э.н}}$  — масса слоя элементов насадки.

Значения  $\Delta p$ , полученные с использованием соотношений (4), (5), согласуются с экспериментальными данными со средней относительной погрешностью  $0,11$  и справедливы при  $0,05 \text{ м} \leq H_{\text{ст}} \leq 0,20 \text{ м}$ ,  $w_0 < w_T \leq 4,5 \text{ м/с}$ ,  $5 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч}) \leq q_{\text{ж}} \leq 25 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ,  $200 \text{ кг/м}^3 \leq \rho_{\text{э.н}} \leq 1000 \text{ кг/м}^3$ . При увеличении  $H_{\text{ст}}$  значение  $\Delta p_d$  уменьшается, что свидетельствует об ухудшении качества псевдооживления. Для элементов с  $\rho_{\text{э.н}} = 90 \text{ кг/м}^3$  величина  $\Delta p_d$  не зависит от  $w_T$ ; при  $w_T = w'_0$  имеет место наименьшее отличие  $\Delta p_d$  от экспериментальных значений, полученных при различных значениях плотности  $\rho_{\text{э.н}}$ . Элементам насадки с большей плотностью соответствует большее значение  $\Delta p_d$ , что согласуется с экспериментальными данными. При  $q_{\text{ж}} < 5 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  зависимость (5) перестает быть экспоненциальной.

Таким образом, аппараты с подвижной насадкой — перспективное решение колонных ТМА, обеспечивающее возможность их эксплуатации в экстремальных условиях (загрязненные среды, резкие колебания нагрузок, превышение допустимых нагрузок), а также упрощающее масштабирование. Оптимальным для реализации массообменных процессов является диапазон значений плотности  $\rho_{\text{э.н}} = 200 \div 700 \text{ кг/м}^3$ , которому соответствуют широкий диапазон значений скорости газа, приемлемые значения расхода жидкости и небольшая динамическая толщина слоя.

Получены необходимые в инженерных расчетах зависимости для определения значений критической скорости, потерь напора в рабочей зоне и динамической толщины слоя элементов насадки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Гукасян А. В.** Инновационно-ориентированная промышленная политика: проблемы, тенденции и приоритеты / А. В. Гукасян, А. А. Полиди, Г. Л. Баяндурян. Краснодар: Юг, 2013.
2. **Данько В. П.** Физические основы низкотемпературной техники и холодильной технологии / В. П. Данько, В. В. Карнаух, А. Б. Кудрин, В. Н. Радионенко. Донецк; Краснодар: Лада-принт, 2016.
3. **Pavlenko A. N., Zhukov V. E., Pecherkin N. I., et al.** Investigation of flow parameters and efficiency of mixture separation on a structured packing // *AIChE J.* 2014. V. 60, iss. 2. P. 690–705. DOI: 10.1002/aic.14298.
4. **Горин А. Н.** Тепломассообменные аппараты с подвижной насадкой для традиционных и альтернативных энергетических систем. Испарительное охлаждение, осушение и кондиционирование воздуха: теория, эксперимент, практика / А. Н. Горин, А. В. Дорошенко, В. П. Данько. Донецк: Світ книги, 2013.
5. **Cong H., Wang C., Li H., et al.** Structure optimization of structured corrugation foam packing by computational fluid dynamics method // *J. Engng Thermophys.* 2016. V. 25, N 3. P. 314–326. DOI: 10.1134/S1810232816030024.

6. **Zhang L., Li Z., Yang N., et al.** Hydrodynamics and mass-transfer characteristics analysis of vapor-liquid flow of dual-flow tray // *J. Engng Thermophys.* 2016. V. 25, N 4. P. 449–463. DOI: 10.1134/S1810232816040020.
7. **Данько В. П.** Использование альтернативных источников энергии и вторичных энергоресурсов в холодильной отрасли / В. П. Данько, А. Б. Кудрин, В. Н. Радионенко. Донецк: Ладапринт, 2015.
8. **Pavlenko A. N., Volodin O. A., Surtaev A. S.** Hydrodynamics in falling liquid films on surfaces with complex geometry // *Appl. Thermal Engng.* 2017. V. 114. P. 1265–1274.
9. **Kaiser A. S., Lucas M., Viedma A., Zamora B.** Numerical model of evaporative cooling processes in a new type of cooling tower // *Intern. J. Heat Mass Transfer.* 2005. N 2. P. 986–999.
10. **Крошилин А. Е., Крошилин В. Е.** Корректное численное моделирование двухфазного теплоносителя // *Теплоэнергетика.* 2016. № 2. С. 22–31.
11. **Поддубный И. И., Разуванов Н. Г.** Исследование гидродинамики и теплообмена при опускном течении жидкого металла в канале прямоугольного сечения в компланарном магнитном поле // *Теплоэнергетика.* 2016. № 2. С. 13–22.
12. **Shestova T. D., Markvart A. S., Lozovsky T. L., Zhelezny V. P.** Cubical equations of state for predicting the phase equilibria of poorly studied substances // *Russ. J. Phys. Chem. A.* 2013. V. 87, N 6. P. 883–891.
13. **Валуева Е. П., Пурдин М. С.** Гидродинамика и теплообмен пульсирующего ламинарного потока в каналах // *Теплоэнергетика.* 2015. № 9. С. 24–32.
14. **Imre A. R., Házi G., Horváth Á., et al.** The effect of low-concentration inorganic materials on the behaviour of supercritical water // *Nuclear Engng Design.* 2011. V. 241, N 1. P. 296–300.
15. **Данько В. П., Дорошенко А. В.** Альтернативные системы жизнеобеспечения на основе цикла с непрямой регенерацией абсорбента // *Изв. вузов. Пробл. энергетики.* 2017. Т. 19, № 5/6. С. 51–61.
16. **Danko V. P., Karnauh V. V., Titlov A. S.** Study of hydrodynamics features in the apparatuses with movable nozzle // *Сиб. журн. науки и технологий.* 2017. Т. 18, № 3. С. 499–504.
17. **Дорошенко А. В., Васютинский С. Ю., Данько В. П., Глауберман М. А.** Исследование процессов в теплообменных аппаратах с подвижной насадкой для солнечных многофункциональных систем // *Физика аэродисперсных систем.* 2012. № 49. С. 14–26.
18. **Arakelyan V. B., Danko V. P., Grigoryan R. P.** Influence of the external noise intensity on the kinetics of ligands binding to receptors. Influence of the external noise intensity on the kinetics of ligands binding to receptors // *J. Contemporary Phys.* 2017. V. 52, N 1. P. 70–76.
19. **Данько В. П., Карнаух В. В.** Исследование влияния концентрации раствора абсорбента на охлаждающую способность теплообменных аппаратов с подвижной насадкой // *Вестн. Междунар. акад. холода.* 2016. № 3. С. 73–77.
20. **Дорошенко А. В., Данько В. П., Турбовец Ю. Т.** Металлополимерные солнечные коллекторы с многоканальным абсорбером для многофункциональных энергетических систем // *Пробл. регион. энергетики.* 2012. № 2. С. 42–50.

*Поступила в редакцию 27/VII 2017 г.,  
в окончательном варианте — 4/X 2017 г.*