

УДК 662.472

**ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СЛОЯ ПЛАСТИКОВЫХ БУТЫЛОК, КАК ЭЛЕМЕНТОВ ВОДЯНОГО АККУМУЛЯТОРА ТЕПЛА****Имомов Шухрат Боймаматович** - доктор философии по техническим наукам (PhD),  
E-mail: [shbimomov@mail.ru](mailto:shbimomov@mail.ru) [ORCID ID 0000-0002-2112-7487](https://orcid.org/0000-0002-2112-7487)<sup>1</sup>**Аликулова Саодат Мухиддиновна** – исследователь. E-mail: [smalikulova@mail.ru](mailto:smalikulova@mail.ru)  
[ORCID ID 0000-0002-9760-6708](https://orcid.org/0000-0002-9760-6708)<sup>1</sup>**Анваров Миранбос Шерзодович** – магистрант. E-mail: [mshanvarov@mail.ru](mailto:mshanvarov@mail.ru)  
[ORCID ID 0000-0002-6150-7820](https://orcid.org/0000-0002-6150-7820)

<sup>1</sup>Каршинский институт ирригации и агротехнологий Национального исследовательского университета «Ташкентский институт инженеров ирригации и механизации сельского хозяйства»

**Аннотация.** Приведена гидродинамическая модель водяного аккумулятора тепла из пластиковых бутылок. Ряды пластиковых бутылок на решетках-стеллажах рассматриваются как неподвижные слои крупнозернистой насадки. Определены гранулометрические и гидродинамические показатели насадки из пластиковых бутылок, как теплоаккумулирующих элементов в системе солнечного отопления.

**Ключевые слова:** гидродинамическая модель, водяной аккумулятор, пластиковые бутылки, крупнозернистая насадка, гранулометрические и гидродинамические показатели, система солнечного отопления.

**Abstract.** A hydrodynamic model of a water heat accumulator made of plastic bottles is presented. The rows of plastic bottles on racks are treated as fixed layers of coarse packing. The granulometric and hydrodynamic characteristics of plastic bottle packing as heat storage elements in the solar heating system have been determined.

**Key words:** hydrodynamic model, water accumulator, plastic bottles, coarse packing, granulometric and hydrodynamic parameters, solar heating system.

Эффективность систем солнечного отопления во многом определяется тепло-гидродинамическими показателями системы аккумулирования тепла солнечной энергии. Тепло-гидродинамические показатели теплоаккумулирующей системы зависят от выбора теплоаккумулирующего материала.

В настоящее время существует большое разнообразие систем аккумулирования тепла в солнечных установках с применением различных теплоаккумулирующих материалов и элементов. В воздушных системах солнечного отопления в качестве теплоаккумулирующего материала наибольшее применение получили системы на основе гравийных насадок и водяных емкостей. Применение этих материалов определяется тепло-технологическими показателями.

Гравийные насадки конструктивно можно компоновать в объемах различной формы, в вертикальных и горизонтальных массивах, которые дают большие поверхности теплообмена. Основным недостатком гравийных насадок является низкая теплоемкость, что требует использования больших объемов.

Из всех применяемых теплоаккумулирующих материалов вода обладает наибольшей теплоемкостью. Использование воды требует применения коррозионностойких емкостей, а так же создания емкостей с большими поверхностями теплообмена.

Применение пластиковых бутылок (ПБ), заполненных водой, в качестве теплоаккумулирующих элементов позволяет совместить высокую теплоемкость воды, большие поверхности теплообмена и разнообразие компоновки гравийных насадок. Применение ПБ позволяет создать водяные аккумуляторы тепла любой емкости и конфигурации.

Использованные ПБ (как утиль) являются дешевым материалом. Помимо их промышленной утилизации, они широко используются как вторичный материал для различных целей. ПБ изготавливаются различной формы, емкости и цвета из полиэтилентерефталата (ПЭТ). Они обладают высокой прочностью, химической стойкостью, герметичны, долговечны, температура длительной эксплуатации +70 °С, не разрушаются при температуре до -60 °С [1].

Для тепло-технологического обоснования применения ПБ в теплоаккумулирующих системах солнечных установок необходима их гидродинамическая характеристика. Рассмотрим гидродинамику теплового аккумулятора (ТА) на основе ПБ в системе солнечного отопления [2]. Слой ПБ, установленных на стеллажах в ТА, рассматривается как неподвижный слой крупнозернистой насадки (дисперсный слой) [3, 4]. Перепад давления в слое ПБ будет определяться гидравлическим сопротивлением самого слоя и удерживающей решетки (стеллажа). Гидродинамика слоя ПБ рассматривается при следующих условиях (рис. 1):

1) ПБ устанавливаются вертикально на стеллажах. Такое расположение наиболее оптимально, так как создает минимальное лобовое гидравлические сопротивление и хорошее обтекание элементов насадки.

2) Направление потока воздуха (теплоносителя) перпендикулярно плоскости слоя, направлено вертикально - сверху вниз.

3) Размеры дисперсного слоя в десятки раз больше размера ПБ, поэтому влияние стенок (или отсутствия) на гидродинамику слоя не учитывается.

4) В качестве удерживающих решеток – стеллажей используется деревянная решетка.

5) Теплофизические свойства теплоносителя – воздуха принимаются постоянными.

Для определения режима течения потока теплоносителя в слое определяются гранулометрические характеристики дисперсного слоя ПБ. Для модели элемента дисперсного слоя ПБ принимается цилиндр с закругленными концами с эквивалентным объемом воды  $V_э$  равному объему ПБ  $V$ . Объем модели ПБ состоит из объема шара и цилиндра диаметром  $d$  и высотой  $h_ц$ :

$$V_э = \frac{\pi \cdot d^3}{6} + \frac{\pi \cdot d^2 \cdot h_ц}{4} \tag{1}$$

Высота цилиндрической части модели ПБ

$$h_ц = \frac{V_э - \pi \cdot d^3 / 6}{\pi \cdot d^2 / 4} \tag{2}$$

Высота эквивалентного цилиндра

$$h_э = h_ц + d \tag{3}$$

Площадь поверхности эквивалентного цилиндра

$$F_э = \pi d^2 + \pi d h_ц \tag{4}$$

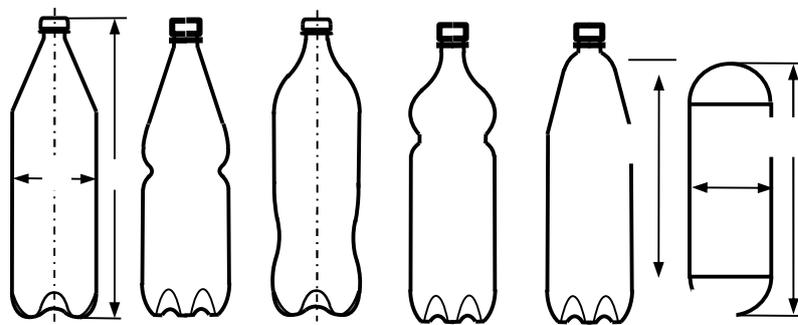


Рис. 1. Форма пластиковых бутылок ПЭТ:  
 а – различные формы ПБ, б – эквивалентный цилиндр

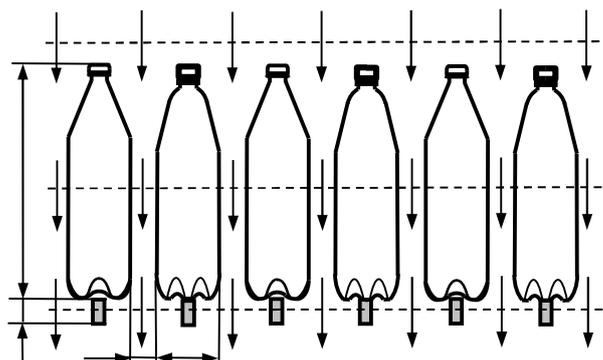


Рис. 2. Схема слоя насадки ПБ:

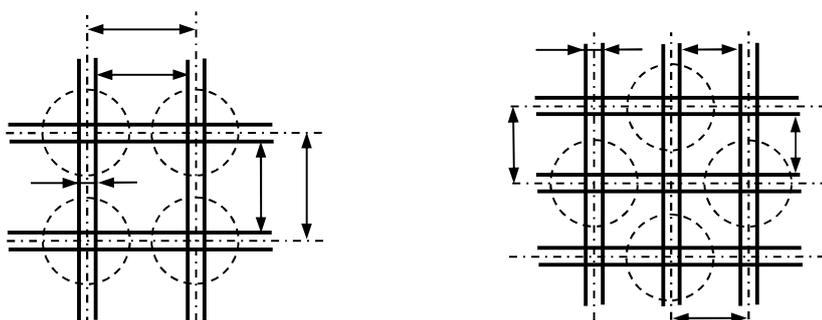


Рис. 3. Схема упаковки ПБ на решетке теллаже:  
*a* – коридорная, *б* – шахматная

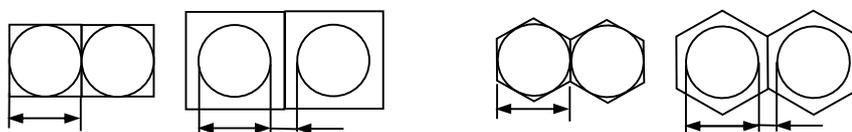


Рис. 4. Форма упаковки дисперсного слоя ПБ:  
*a* – коридорная; *б* – шахматная

Важными гранулометрическими характеристиками являются концентрация  $\chi$  и порозность  $\varepsilon$  дисперсного слоя:

$$\chi = V_s / V_n; \quad \varepsilon = 1 - \chi; \tag{5}$$

где  $V_n$  – полный объем ячейки, занимаемой ПБ, м<sup>3</sup>.

Полный объем ячейки будет зависеть от формы упаковки (рис. 4).

Концентрация при коридорной упаковке

$$\chi_k = \frac{V_s}{(d + \Delta l)^2 \cdot h}; \tag{6}$$

при шахматной упаковке

$$\chi_{sh} = \frac{V_s}{0,866(d + \Delta l)^2 h} = \chi_k / 0,866. \tag{7}$$

где  $\Delta l$  – расстояние между ПБ, м.

Предельно максимальной концентрация будет при  $\Delta l=0$ . Предельно минимальная концентрация будет определяться условием [5]:

$$\Delta l = 2 \delta_\delta; \tag{8}$$

где  $\delta_\delta$  – толщина динамического пограничного слоя, м.

Для тел несферической формы эквивалентный диаметр определяется по формуле [5, 6]

$$d_3 = \sqrt[3]{6V_3 / \pi} . \tag{9}$$

Для тел различной формы длина обтекания определяется по формуле [7]

$$L = F_3 / l_n ; \tag{10}$$

где  $l_n$  – максимальный периметр тела в минимальном сечении, м.

Формулы (9) и (10) справедливы для тел изометрической формы ( $d \approx h \approx l$ ).

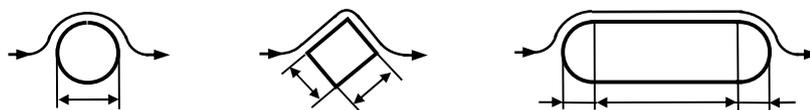


Рис. 5. Схема определения длины эквивалентной частицы:  
а – сферическая; б – несферическая, в – ПБ

Для сферических тел длина обтекания

$$L = \pi d / 2 ; \tag{11}$$

По аналогии (11) для ПБ длина обтекания

$$L = \pi d / 2 + h_{ц} . \tag{12}$$

Отклонение формы элементов насадки от сферической учитывается через фактор формы  $\psi$  и коэффициент формы  $\phi$ :

$$\psi = \pi d_3^2 / F_3 ; \quad \phi = 6 / \psi . \tag{13}$$

Условие (8) является граничным, до которого слой можно рассматривать как дисперсную упаковку (модель фильтрации), выше которого – как сумма отдельных частиц (модель обтекания).

Чем меньше  $\Delta l$ , тем плотнее упаковка и удельная масса воды теплоаккумулирующего элемента будет больше. Удельная масса воды будет максимальной при  $\Delta l=0$ .

С другой стороны, с увеличением плотности упаковки возрастает лобовое и вязкостное гидравлическое сопротивление дисперсного слоя, увеличивается тепловое и гидродинамическое взаимное влияние элементов насадки. Между элементами насадки возникают застойные зоны, которые снижают интенсивность теплообмена между воздухом и насадкой [3].

При условии (8) пограничные слои элементов насадки не влияют друг на друга, происходит их свободное омывание потоком теплоносителя.

Таким образом, с точки зрения теплообмена и гидродинамики слоя наиболее оптимальным будет условие (8). При этом дисперсный слой рассматривается как совокупность множества элементов насадки и решается внешняя задача (модель обтекания).

Толщина пограничного слоя определяется по формуле [8]:

$$\delta_0 = 4,64 d_3 / \sqrt{Re} ; \tag{14}$$

где  $d_3$  – эквивалентный диаметр, м;

$Re$  – число Рейнольдса:

$$Re = w d_3 / \nu ; \tag{15}$$

где  $w$  – скорость потока в свободном сечении, м/с;

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м<sup>2</sup>/с.

Скорость потока в слое определяется порозностью слоя

$$w_0 = w / \varepsilon ; \tag{16}$$

Режим течения в слое насадки определяется числом Рейнольдса для модели обтекания [4, 7]

$$Re = 2 w d_3 / (3 \nu \chi) ; \tag{17}$$

Для гидродинамических расчетов используются выражения, рекомендуемые для отдельно обтекаемых тел. Перепад давления для одной частицы

$$\Delta P_l = \frac{\rho \cdot w^2}{2} \xi_1 . \quad (18)$$

Суммарный перепад давления в слое насадки

$$\Delta P_o = \frac{2 \cdot h \cdot \chi \cdot \rho \cdot w^2}{\varepsilon^3 d_s} \xi_o . \quad (19)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$\xi_o$  – коэффициент гидравлического сопротивления.

Коэффициент гидравлического сопротивления слоя представляется в виде [3, 4]:

$$\xi_o = A + B/Re ; \quad (20)$$

Эта формула выражает связь между коэффициентом вязкого трения и числом Рейнольдса. Константа  $A$  отражает сопротивление в миделевом сечении в режиме  $Re > 10^3$  (лобовое сопротивление), второй член  $B/Re$  в режиме  $Re < 10^3$  по Стоксу (вязкостное сопротивление). В литературе выражения (20) приводятся для сферических тел и кусковых материалов

в режиме внешней задачи [3]

$$\xi_o = 73 + 0,28 Re / \psi ; \quad (21)$$

Формула (21) справедлива для тел изометрической формы. Первая константа справедлива для ПБ при их продольном обтекании потоком. Методом интерполяции определена вторая константа для ПБ в формуле (21)

$$\xi_o = 73 + 0,416 Re / \psi . \quad (22)$$

Решетка-стеллаж рассматривается как равномерно распределенное местное сопротивление.

Для сопряжения геометрии решетки со взаимным расположением ПБ принимается условие: для коридорной упаковки (рис. 3, а)

$$a_o = d + \Delta l ; \quad a = (d + \Delta l) - b ; \quad (23)$$

для шахматной упаковки (рис. 3, б)

$$a_o = 0,707(d + \Delta l) ; \quad a = 0,707(d + \Delta l) - b . \quad (24)$$

Скорость фильтрации потока воздуха через решетку

$$w_z = w_o / z ; \quad (25)$$

где  $z = F / F_o$  – порозность решетки;  $F = a^2$ ;  $F_o = a_o^2$ .

Перепад давления в решетке

$$\Delta P_z = \frac{\rho \cdot w_z^2}{2} \xi_z ; \quad (26)$$

$\xi_z$  – коэффициент гидравлического сопротивления решетки, определяемый по [9] при

$$Re = w d_z / \nu . \quad (27)$$

где  $d_z = F / a$  – гидравлический диаметр решетки.

Для деревянной решетки при  $25 < Re < 10^5$

$$\xi_z = A_1 / z^2 + A_2 A_3 . \quad (28)$$

$$A_1 = \varphi_1(Re, z); \quad A_2 = \varphi_2(Re); \quad A_3 = (1 + 0,707 \sqrt{1 - z} - z)^2 / z^2 .$$

По диаграмме 8-3 в [9] определяются функциональные зависимости  $A_1$  и  $A_2$  и зависимость примет вид

$$\xi_z = (1,32 + 0,02 \delta_p / d_z) / z^2 . \quad (29)$$

Суммарный перепад давления в дисперсном слое с удерживающей решеткой:

$$\Delta P = \Delta P_o + \varepsilon \Delta P_z . \quad (30)$$

В таблице 1 приведены основные гранулометрические параметры наиболее распространенных ПБ.

Таблица 1.

№ ПБ	$V, л$	$d, м$	$d_э, м$	$h, м$	$h_э, м$	$h_ц, м$	$L, м$	$\psi$	$\phi$
1	0,5	0,062	0,098	0,23	0,186	0,124	0,283	0,843	7,11
2	0,5	0,064	0,098	0,226	0,177	0,113	0,277	0,861	6,97
3	1	0,075	0,124	0,3	0,251	0,176	0,369	0,82	7,32
4	1	0,082	0,124	0,285	0,217	0,135	0,345	0,87	6,9
5	1,25	0,083	0,133	0,3	0,259	0,176	0,389	0,835	7,18
6	1,5	0,086	0,142	0,333	0,287	0,201	0,422	0,82	7,31
7	1,5	0,093	0,142	0,32	0,252	0,159	0,398	0,864	6,94

Как видно из таблицы 1, основным параметром является объем ПБ  $V$ , который определяет геометрические размеры ПБ. При равных объемах, ПБ имея различные формы, по размерам мало отличаются друг от друга. Например, ПБ №1 и №2 можно рассматривать идентичными, точно также ПБ №3 и №4, №6 и №7.

Эквивалентный диаметр  $d_э$  и длина обтекания  $L$  значительно отличаются друг от друга. Применение  $d_э$  справедливо для тел изометрической формы. При расчетах гидродинамики слоя ПБ на основе  $d_э$  получаются заниженные значения пограничного слоя (14) и как следствие получаются высокие значения гидравлического сопротивления слоя насадки (19). Поэтому при расчетах наиболее реальные гидродинамические характеристики дает использование длины обтекания  $L$ .

Рассмотрим динамику изменения гранулометрических и гидродинамических показателей насадки ПБ в зависимости от изменения скорости потока воздуха в ТА и емкости ПБ. Для расчетов приняты следующие параметры: площадь поперечного сечения ТА  $F_a=1,35 \times 1,55 \text{ м}^2$ ; расход воздуха  $G=0,076 \dots 0,33 \text{ м}^3/\text{с}$  или скорость воздуха  $w=0,036 \dots 0,16 \text{ м}/\text{с}$ .

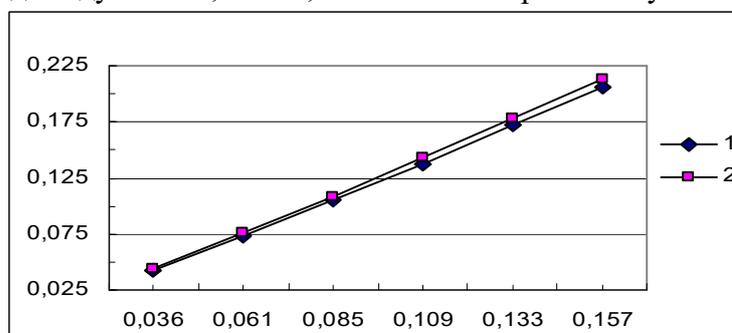


Рис. 6. Изменение скорости воздуха в слое насадки  $w_0$  в зависимости от скорости воздуха в свободном сечении  $w$  ТА:

1 и 2 – скорость воздуха в насадке  $w_0$  ПБ №1 и №7

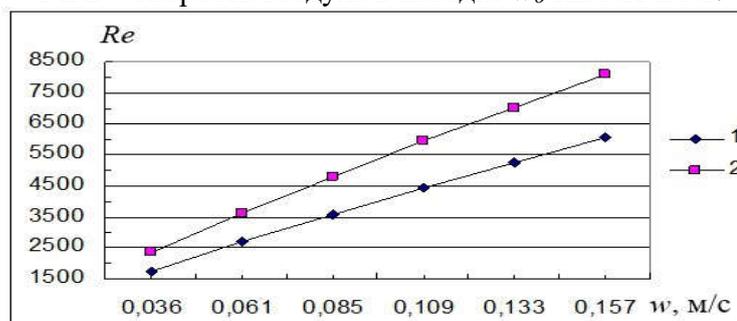


Рис. 7. Изменение числа Рейнольдса  $Re$  в слое насадки в зависимости от скорости воздуха в свободном сечении  $w$  ТА: 1 и 2 – число Рейнольдса  $Re$  в насадке ПБ №1 и №7

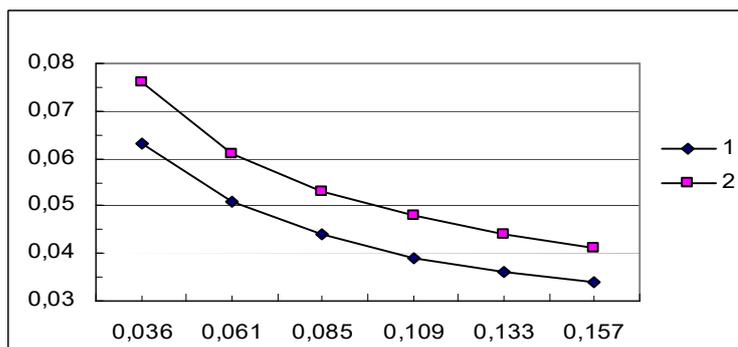


Рис. 8. Изменение расстояния между ПБ  $\Delta l$  в слое насадки в зависимости от скорости воздуха в свободном сечении  $w$  ТА: 1 и 2 – расстояние между ПБ  $\Delta l$  в насадке ПБ №1 и №7

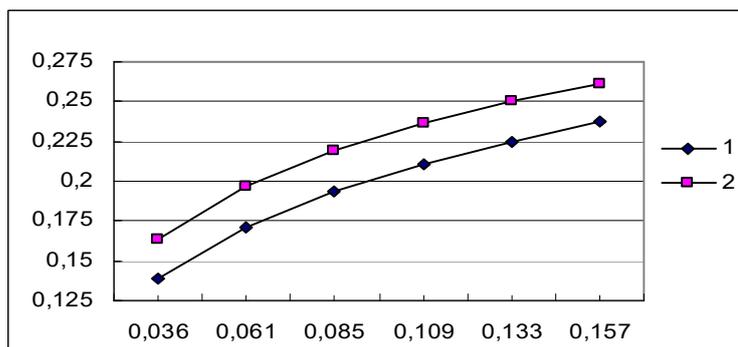


Рис. 9. Изменение концентрации ПБ  $\chi$  в слое насадки в зависимости от скорости воздуха в свободном сечении  $w$  ТА: 1 и 2 – концентрация ПБ  $\chi$  в насадке ПБ №1 и №7

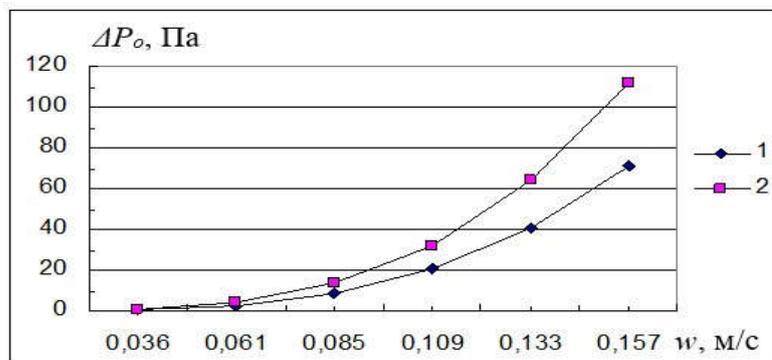


Рис. 10. Изменение потери давления  $\Delta P_o$  в слое насадки в зависимости от скорости воздуха в свободном сечении  $w$  ТА: 1 и 2 – потери давления в слое ПБ  $\Delta P$  в насадке ПБ №1 и №7

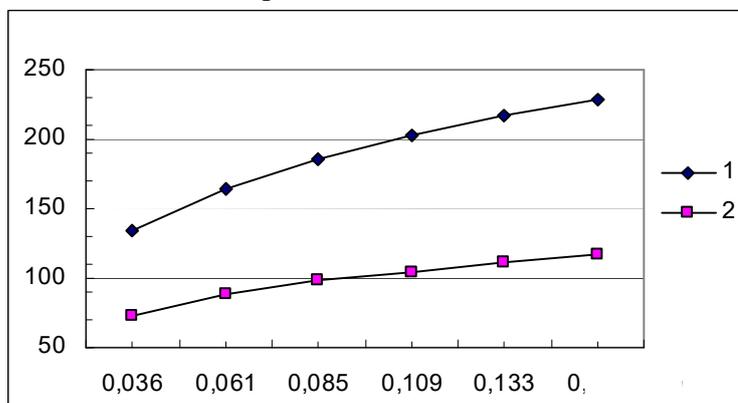


Рис. 11. Изменение числа ПБ  $n$  в слое насадки в зависимости от скорости воздуха в свободном сечении  $w$  ТА: 1 и 2 – число ПБ  $n$  в насадке ПБ №1 и №7

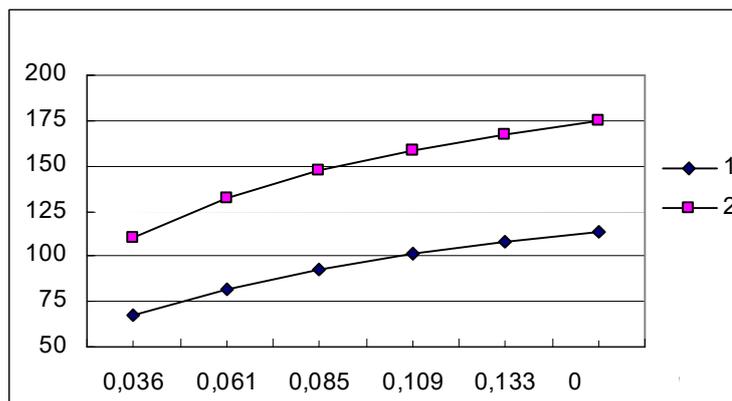


Рис. 12. Изменение массы воды  $m$  в слое насадки в зависимости от скорости воздуха в свободном сечении  $w$  ТА: 1 и 2 – масса воды  $m$  в насадке ПБ №1 и №7

На рис. 6-12 показаны графики изменения основных гранулометрических и гидродинамических параметров слоя насадки ПБ №1 и №7 в зависимости от скорости потока воздуха в свободном сечении ТА. Для других ПБ №2...№6 рассматриваемые параметры будут находиться в пределах параметров ПБ №1 и №7.

Для рассматриваемых ПБ (таблица 1) с изменением их объемов скорости потока воздуха в насадке  $w_0$  отличаются не значительно (рис. 6).

Режим течения потока воздуха в насадке практически полностью является турбулентным (рис. 7).

С увеличением скорости потока воздуха  $w$  (соответственно и  $w_0$ ) расстояние между ПБ  $\Delta l$  уменьшается (рис. 8), так как толщина пограничного слоя падает. Соответственно возрастает и концентрация ПБ в слое (рис. 9).

Увеличение объема ПБ (соответственно диаметра  $d$  и высоты  $h$ ) вызывает возрастание лобового и вязкостного сопротивления (длина обтекания) слоя насадки. Поэтому с увеличением емкости ПБ возрастает перепад давления  $\Delta P$  в слое насадки (рис. 10).

С увеличением размеров ПБ уменьшается их количество в слое (рис. 11), а общая масса воды в слое возрастает (рис. 12).

**Заключение.** Таким образом, можно сделать следующий вывод: при увеличении емкости ПБ и скорости потока (расхода) воздуха в слое насадки, а) увеличивается гидравлическое сопротивление слоя насадки, б) масса воды в слое увеличивается, интенсивность аккумулялирования тепла возрастает.

### ЛИТЕРАТУРА

- 1.Полиэтилентерефталат. Материал из Википедии. <http://wikipedia.org/wiki>, 2007.
- 2.Имомов Ш. Б., Ким В. Д. Тепловой баланс здания с системой солнечных рефлекторов, устанавливаемых с северной стороны //Гелиотехника, 2008, №3, С. 77-82
- 3.Справочник по теплообменникам. Том 1. –М.: Энергоатомиздат. 1987. -560 с.
- 4.Гольдштик М.А. Процессы переноса в зернистом слое. –Новосибирск.: ИТФ. 1984. -162 с.
- 5.Муштаев В.И., Ульянов Г.Г. Сушка дисперсных материалов.-М.: Химия. 988. -352 с.
- 6.Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. Справочное пособие. –М.: Энергоатомиздат. 1990. -366 с.
- 7.Куцакова В.Е., Богатырев А.Н. Интенсификация тепло-и массообмена при сушке пищевых продуктов. –М.: Агропромиздат. 1987. -236 с.
- 8.Гухман А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло-массообмена. - М.: Высшая школа. 1974. -328 с.
- 9.Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. –М.: Машиностроение. 1975. -558 с.