

## РОЗДІЛ 2

## ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 536.248.2:532.529.5

**А. В. Дорошенко, В. А. Гончаренко, А. Н. Цапушел, Ю. И. Демьяненко**

Одесская национальная академия пищевых технологий, ул. Канатная, 112, Одесса, 65039, Украина

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРО-АЭРОДИНАМИКИ И ТЕПЛОМАС-СОБМЕНА В АППАРАТАХ С ПОДВИЖНОЙ ПСЕВДООЖИЖЕННОЙ НАСАДКОЙ**

Разработаны схемные решения тепло-массообменных аппаратов с подвижной псевдоожигенной насадкой «газ-жидкость-твердое тело» для испарительного охлаждения сред (испарительные охладители воды – градирни и охладители воздуха) и многофункциональных солнечных систем тепло-хладоснабжения и кондиционирования воздуха, основанных на открытом абсорбционном цикле с непрямою регенерацией абсорбента. В осушительном и охладительном контурах солнечных систем также используются тепло-массообменные аппараты с подвижной насадкой. Решения для тепло-массообменных аппаратов с подвижной насадкой «газ-жидкость-твердое тело» разработаны в нескольких основных вариантах, в частности, с возможностью размещения теплообменника непосредственно в объеме псевдоожигенного слоя насадки: испарительные охладители воздуха непрямого типа (ННОг) и испарительные охладители жидкости (ННОж) охладительного контура солнечных систем; абсорбер-осушитель воздушного потока и десорбер-регенератор осушительного контура солнечных систем. Выполнен цикл экспериментальных исследований особенностей псевдоожигения подвижной насадки как для варианта со свободным подвижным псевдоожигенным слоем насадки, так и в варианте с размещением теплообменника непосредственно в объеме псевдоожигенного слоя насадки. Исследовалось влияние высоты стационарного слоя элементов насадки, геометрических параметров опорно-распределительной решетки, начальных параметров воздушного потока, поступающего в тепло-массообменный аппарат. На основе цикла теоретических и экспериментальных исследований выработаны практические рекомендации по определению оптимальных геометрических параметров основных элементов аппаратуры и режимных параметров работы тепло-массообменных аппаратов в автономном режиме и в составе солнечных абсорбционных систем.

**Ключевые слова:** тепло-массообменный аппарат – псевдоожигенный слой насадки – испарительный охладитель – градирня – охладитель воздуха непрямого типа – абсорбер – десорбер – солнечная система – холодильная система – система кондиционирования воздуха

**О. В. Дорошенко, В. А. Гончаренко, А. Н. Цапушел, Ю. И. Демьяненко**

Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ТА ТЕПЛОМАСОБМІНУ В АПАРАТАХ З РУХОМОЮ ПСЕВДОЗРІДЖЕНОЮ НАСАДКОЮ**

Розроблено схемні рішення тепло-масообмінних апаратів з рухомою псевдозрідженою насадкою «газ-рідина-тверде тіло» для випарного охолодження середовищ (випарні охолоджувачі води – градирні та охолоджувачі повітря) та багатофункціональних сонячних систем тепло-холодопостачання і кондиціонування повітря, заснованих на відкритому абсорбційному циклі з непрямою регенерацією абсорбенту. В осушувальних і охолоджувальному контурах сонячних систем також використовуються тепло-масообмінні апарати з рухомою насадкою. Рішення для тепло-масообмінних апаратів з рухомою насадкою «газ-рідина-тверде тіло» розроблені в декількох основних варіантах, зокрема, з можливістю розміщення теплообмінника безпосередньо в обсязі псевдозрідженого шару насадки: випарники охолоджувачі повітря непрямого типу (ННОг) і випарні охолоджувачі рідини (ННОж) охолоджуючого контуру сонячних систем; абсорбер-осушувач повітряного потоку і десорбер-регенератор осушуючого контуру сонячних систем. Виконано цикл експериментальних досліджень особливостей псевдозрідженої рухомої насадки як для варіанту з вільним рухомим псевдозрідженим шаром насадки, так і у варіанті з розміщенням теплообмінника безпосередньо в обсязі псевдозрідженого шару насадки. Досліджувався вплив висоти стаціонарного шару елементів насадки, геометричних параметрів опорно-розподільчих ґрат, початкових параметрів повітряного струму, що надходить в тепло-масообмінний апарат. На основі циклу теоретичних і експериментальних досліджень вироблені практичні рекомендації щодо визначення оптимальних геометричних параметрів основних елементів апаратури і режимних параметрів роботи тепло-масообмінних апаратів в автономному режимі і в складі сонячних абсорбційних систем.

**Ключові слова:** тепло-масообмінний апарат – псевдозріджений шар насадки – випарний охолоджувач – градирня – охолоджувач повітря непрямого типу – абсорбер – десорбер – сонячна система – холодильна система – система кондиціонування повітря



This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из серьезных проблем, характеризующей надежность открытых систем (испарительных водо- и воздухоохладителей) и солнечных теплоиспользующих абсорбционных систем является опасность отложений на рабочих поверхностях тепло-массообменной аппаратуры, при работе на водных растворах, жидких сорбентов [1, 3-4, 5-7]. Накопленный ранее в ОГАХ опыт использования трехфазных псевдооживленных насадочных слоев для организации работы тепло-массообменных аппаратов (ТМА) может быть использован для решения этой задачи (аппараты осушительного и охладительного контуров солнечных холодильных систем). В работе, наряду с новыми экспериментальными данными, были использованы теоретические и экспериментальные материалы, полученные ранее в ОГАХ при создании воздухоохладителей и вентиляторных градирен с подвижной насадкой, а также значительный и многолетний опыт инженерной реализации таких аппаратов в энергетических системах, в холодильной технике и системах оборотного водоснабжения [1].

## I. РАЗРАБОТКА ТЕПЛОМАСОБМЕННЫХ АППАРАТОВ С ПОДВИЖНОЙ НАСАДКОЙ

Ранее в ОГАХ разрабатывались и исследовались ТМА с подвижной насадкой (ПН) для автономного использования в холодильной технике а также в осушительном и охладительном контурах солнечных многофункциональных систем [1, 5-7]. Все ТМА разрабатывались как аппараты прямого типа с непосредственным контактом взаимодействующих потоков газа и жидкости. В настоящем исследовании продолжено развитие этих работ в направлении создания ТМА с ПН непрямого типа [8], что существенно расширяет возможности испарительных водоохладителей (градирен ГПН) и воздухоохладителей (НИО), а также солнечных холодильных систем (СХС) или систем кондиционирования воздуха (ССКВ), однако требует разработки новых решений, как для ТМА обоих контуров, так и для солнечных систем в целом (в осушительном контуре солнечных систем на такой основе разработаны решения для абсорбера-осушителя АБР и десорбера-регенератора ДБР [8]).

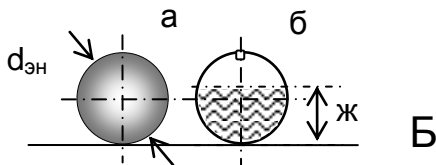
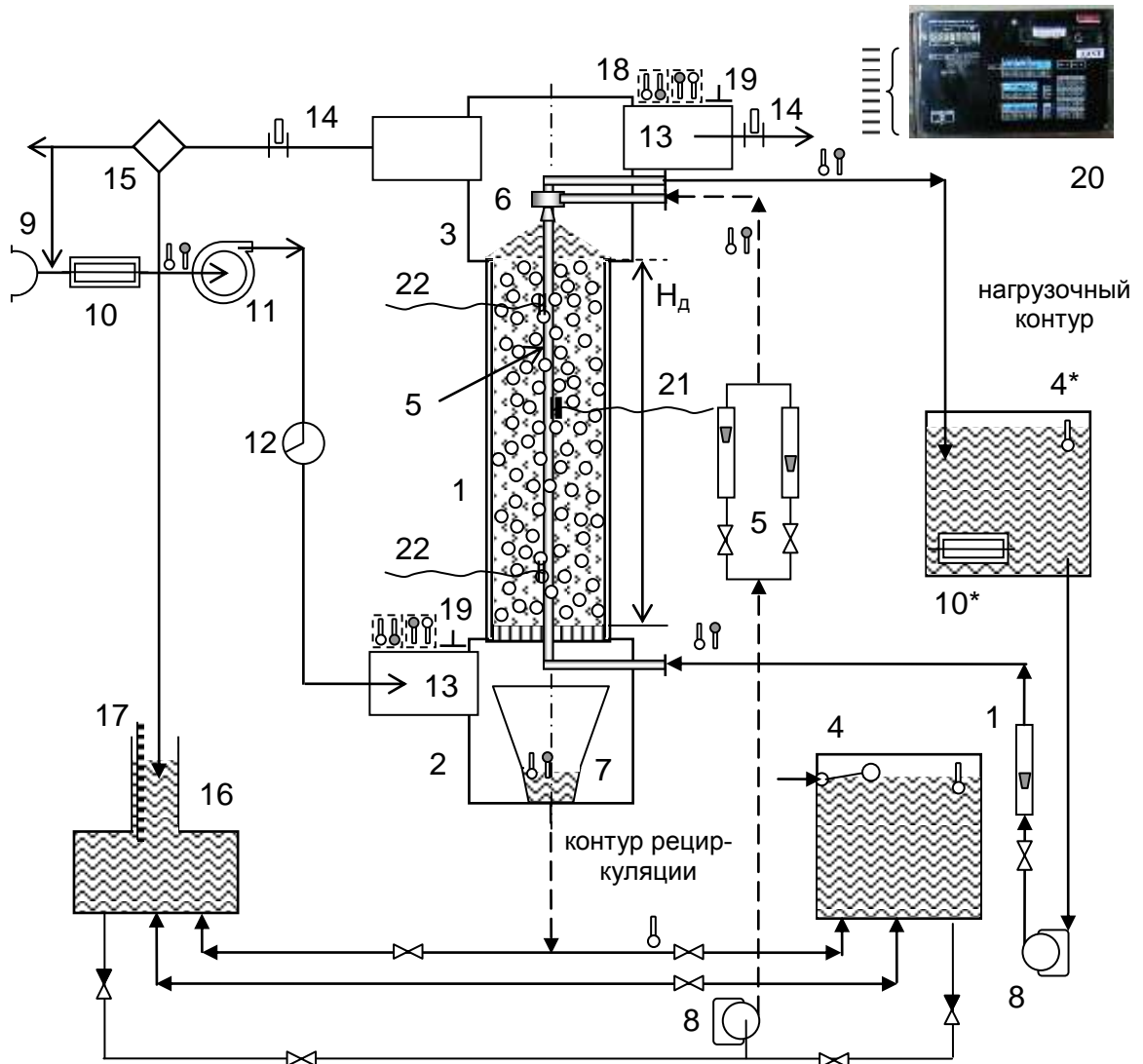
Авторами [8] были разработаны испарительные воздухоохладители непрямого типа НИОг и испарительные водоохладители НИОж в двух основных вариантах: с размещением подвижного слоя насадки над теплообменником-распределителем воздушных потоков и с непосредственным размещением многоканального теплообменника в объеме подвижной насадки ПН, то есть с расчленением объема псевдооживленной насадки ПН. Здесь речь идет о режимах псевдооживления насадочного слоя «газ-жидкость-твердое тело» в ограниченном объеме, что требует специального изучения особенностей основных режимов псевдооживления. Подвижный слой ПН, обеспечивая интенсификацию процессов тепло-массообмена и самоочищаемость рабочих поверхностей, будет оказывать и интенсифицирующее воздействие на

процессы передачи или отвода тепла от основных «продуктовых» каналов НИОг или НИОж. Новые решения для НИОг и НИОж (автономные охладители сред или ТМА охладительного контура солнечных систем) и для абсорбера-осушителя АБР и десорбера-регенератора ДБР осушительного контура требуют проведения дополнительного обстоятельного изучения поведения подвижного насадочного слоя в ограниченном объеме.

## II. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проведены на стенде (рис. 1), предназначенном для изучения процессов гидроаэродинамики трехфазного псевдооживленного (п/о) слоя насадки «газ-жидкость-твердое тело» и испарительного охлаждения воды в градирне в вариантах ГПН с п/о насадочным слоем и ГПНдв (испарительный водоохладитель непрямого типа НИОж), в варианте с расположенными внутри слоя ПН теплообменными элементами. Стенд включает колонну (1) цилиндрической формы, диаметром  $D_k \approx 200$  мм и высотой рабочей зоны колонны  $H_{pz} = 0,95$  м. Обозначения к рис. 1: 1 – колонна (рабочий участок); 2, 3 – распределительные камеры; 4, 4\* – жидкостные баки; 5 – блок ротаметров; 6 – распределитель жидкости; 7 – сборник жидкости; 8 – насос; 9 – забор воздуха; 10, 10\* – нагреватели воздуха и воды; 11 – вентилятор; 12 – расходомер; 13 – камеры статического давления и измерительные участки; 14 – регулятор расхода; 15 – сепаратор капельной влаги; 16 и 17 – измерительные емкость и линейка; 18 – блок ртутных термометров и термометров сопротивления; 19 – отбор давления; 20 – измерительный комплекс; 21 – датчик виброметра; 22 – термометр сопротивления; 23 – теплообменный элемент (в составе охладителя НИОж).

Внутри колонны размещены опорно-распределительная решетка ОРР со слоем подвижной насадки ПН и водораспределитель (6) с варьруемым расположением по высоте колонны. Величины  $f_{opp} = 65-85\%$  и  $H_{ст} = 50 - 160$  мм изменялись в ходе экспериментов дискретно. Внутри колонны, в объеме п/о слоя насадки размещался набор теплообменных элементов (23). В соответствии с этим колонна включала два водяных контура: контур рециркуляции воды, непосредственно контактирующей с воздушным потоком, и контур в котором внутри теплообменника движется охлаждаемая вода. Сепаратор капельной влаги вертикального типа (15) обеспечивал возврат уносимой воздушным потоком жидкости в систему и измерение ее количества. Стенд оборудован дополнительным баком (16) с узкой горловиной, на которой установлена вертикальная цилиндрическая труба с измерительной линейкой (17) для измерения задержки жидкости  $H_{ж}$  (удерживающей способности слоя ПН). Возможности стенда: расходы теплоносителей и теплофизические параметры изменялись в диапазонах:  $w_r = 1,5-7$  м/с,  $q_{ж} = 5-35$  М<sup>3</sup>/(М<sup>2</sup> ч),  $t_r$  до 50°C,  $\phi_r = 30-90\%$ , начальная температура жидкости  $t_{ж}^1$  до 40 °С.



Элементы подвижной насадки:  
 а – цельный шар из вспененного полипропилена,  $d_{эН} = 40,1 \text{ мм}$ ;  $\rho_{эН} = 248 \text{ кг/м}^3$ ;  
 б – полый целлулоидный шар, частично заполненный водой,  $d_{эН} = 37,1 \text{ мм}$ ;  $\rho_{эН} = 90 - 1000 \text{ кг/м}^3$

Основная часть опытов проведена при:  
 $D_{кп} = 0,2 \text{ м}$ ;  $H_{кп} = 1,0 \text{ м}$ ;  $H_{рз} = 0,95 \text{ м}$ ;  
 ЭН: – полый целлулоидный шар, частично заполненный водой,  
 $d_{эН} = 37,1 \text{ мм}$ ;  $\rho_{эН} = 300 - 600 \text{ кг/м}^3$ ;  
 $H_{ст} \sim 0,1 - 0,16 \text{ м}$ ;  
 ОРР:  $H_{орр} = 0,05 \text{ м}$ ,  $f_{орр} = 65 - 85\%$ ;  
 Режимные параметры:  
 $w_r = 1,5 - 7 \text{ м/с}$ ,  $q_{ж} = 5 - 35 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$ ;  $t_r$  до  $50^\circ\text{C}$ ,  $\varphi_r = 30 - 90\%$ ; начальная температура жидкости  $t_{ж}^1$  до  $40^\circ\text{C}$

**Рисунок 1** – Принципиальная схема экспериментального стенда для изучения характеристик трехфазных псевдооживленных слоев насадки («газ-жидкость-твердое тело») и процессов тепло-массообмена при испарительном охлаждении воды в НИОЖ. Обозначения приведены в тексте статьи.

Важнейшей характеристикой аппаратов с подвижной насадкой ПН является количество удерживаемой жидкости (КУЖ), или задержка  $H_{ж}$ . Эта величина определяет поверхность переноса в псевдооживленном слое насадки (ПКФ). Известны следующие экспериментальные методы определения  $H_{ж}$ : 1) метод взвешивания; 2) отсечки орошения; 3) по поглощению радиоактивного излучения; 4) внесения возмущения в поток; 5) циркуляционный. В работе, как и в более раннем исследовании [1], был использован циркуляционный метод, основанный на принципе сохранения количества жидкости при работе по замкнутому контуру. Жидкость подается в аппарат из калиброванной емкости (16) и в нее же сливается. Разница между уровнями жидкости до включения аппарата и во время его работы пропорциональна удерживающей способности псевдооживленного слоя насадки. Во время работы уровень в емкости меняется также из-за уноса жидкости и ее испарения. Разработанная методика позволяла учесть эти составляющие и определить реальную задержку жидкости. На противоточной системе вода-воздух предварительно было показано, что зависимость падения уровня жидкости в сливном баке (калиброванной емкости 16) после включения аппарата, обусловленного уносом и испарением, можно экстраполировать прямой линией при стационарном режиме работы и определить задержку по падению уровня в начальный момент времени. Жидкость, удержанную в сепарационной зоне, определяли методом отсечки: при  $w_r$  до 4 м/с и  $q_{ж}$  до 40 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>ч) ее количество составляет менее 25% от всей жидкости, удерживаемой в аппарате. Точность эксперимента, определяемая по максимальной погрешности средств измерения, колебалась от  $\pm 30\%$  при малых значениях удерживающей способности ( $H_{ж} \sim 0,5 \cdot 10^{-2}$  м) до  $\pm 3$  при больших ( $H_{ж} \sim 7 \cdot 10^{-2}$  м). Для малых значений задержки жидкости была проведена статистическая оценка точности по большому числу экспериментальных точек: границы погрешности результатов измерений находятся в пределах  $\pm 8 - 12\%$ , с доверительной вероятностью 0,95.

В опытах использовали полые целлулоидные шары, величина  $\rho_{эн}$  варьировалась последовательным частичным заполнением водой полых шаров (в контрольных партиях, рис. 1Б). На основании ранее полученных результатов [1-2, 5-7] в настоящем исследовании величина  $\rho_{эн}$  была принята в оптимальном диапазоне значений ( $\rho_{эн} = 300 - 600$  кг/м<sup>3</sup>), обеспечивающем выход на режим развитого п/о. На рис. 2-5 приведены основные результаты, позволившие сформулировать оптимальные конструктивные и режимные параметры для ТМА с п/о слоем насадки. Можно сделать вывод о существенно более сложном протекании процессов в трехфазной системе, чем предполагалось ранее, в частности, о влиянии  $\rho_{эн}$  (рис. 2):

1.  $\rho_{эн}^I$  ( $\rho_{эн} < 200$  кг/м<sup>3</sup>), – «легкие» элементы (по данным работ [1, 6-7]). Система переходит в устойчивое псевдооживленное состояние с незначи-

тельным накоплением жидкости в стационарном слое. Характерные особенности: малые значения задержки жидкости в слое ПН ( $H_{ж}$ , рис. 5А и Б), причем задержка жидкости мало изменяется с ростом  $w_r$ ; резкое возрастание с увеличением  $w_r$  динамической высоты слоя ЭН –  $H_d$  (рис. 4А), а, следовательно, высоты рабочей зоны и общей высоты аппарата.

2.  $\rho_{эн}^{II}$  (200-700 кг/м<sup>3</sup>). Началу псевдооживления предшествует частичное захлебывание стационарного слоя; характер перехода системы в подвижность определяет все последующее поведение системы. Характерные особенности: значительно большее значение  $H_{ж}$ ; снижение динамической высоты слоя  $H_d$  в сопоставимых условиях. Скорость начала захлебывания аппарата  $w_3$  достаточна велика ( $\approx 6$  м/с, рис. 2); унос жидкости  $\Delta G_{ж}$  из рабочей зоны невелик до значений  $w_3$ .

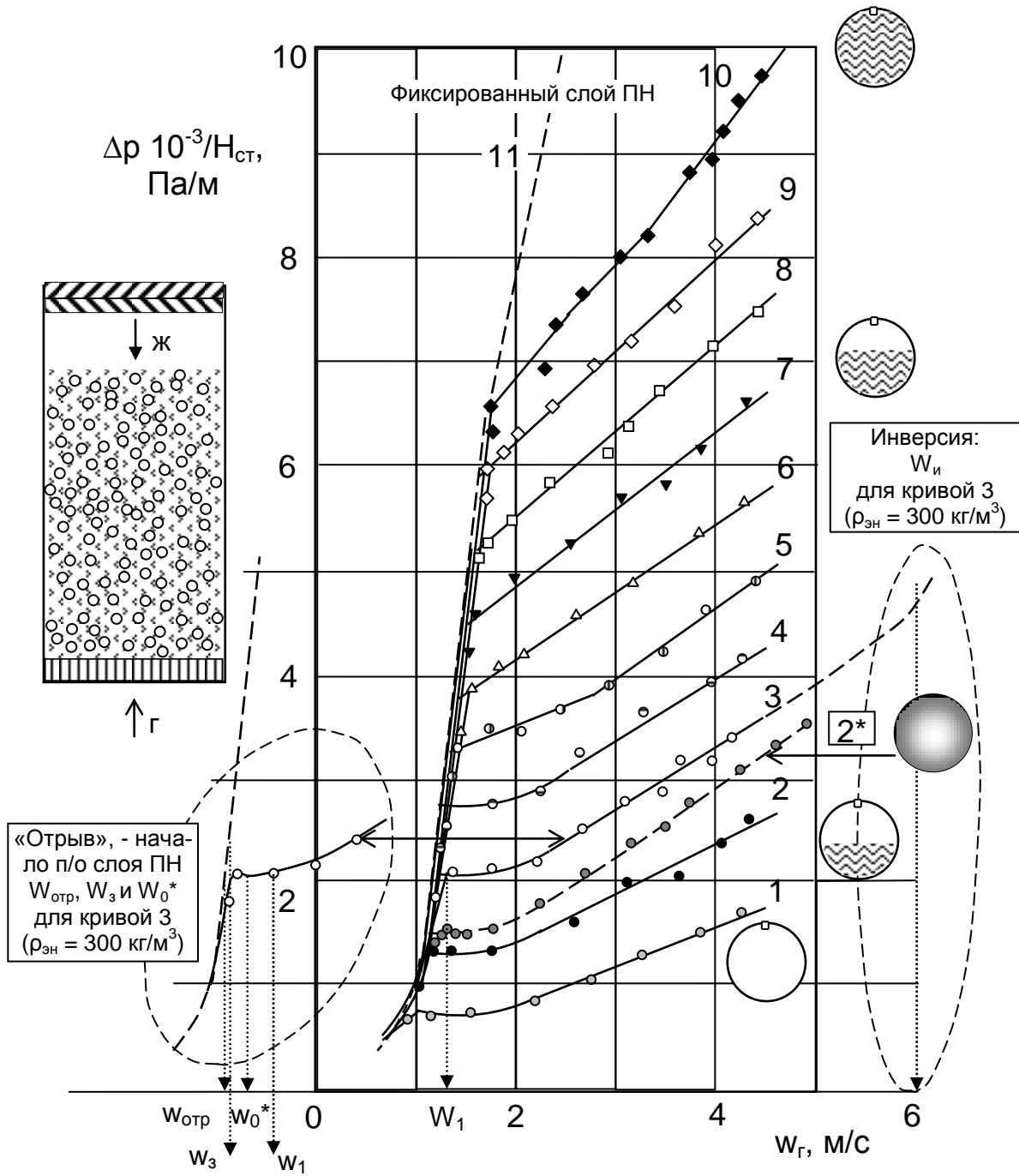
3.  $\rho_{эн}^{III}$  ( $\rho_{эн} > 700$  кг/м<sup>3</sup>), – «тяжелые» элементы (по данным работ [1, 6-7]). Картина переходных процессов в целом аналогична вышеописанной. Характерные особенности: дальнейший рост  $H_{ж}$ , но ему сопутствует перераспределение общей массы жидкости за счет ее выноса из слоя насадки в расположенный над ней пенный слой; резкий рост уноса жидкости  $\Delta G_{ж}$  при  $w_r > w_3$  (рис. 5В).

Таким образом, предпочтительным для реализации представляется диапазон  $\rho_{эн}^{II}$  (200 – 700 кг/м<sup>3</sup>), отличающийся широким рабочим участком по  $w_r$ , приемлемыми значениями уноса жидкости и сравнительно небольшой динамической высотой слоя. Этот вывод относится к обоим вариантам градиент, как ГПН со «свободным» слоем ПН, так и ГПНдв (НИОж) с расположенными внутри подвижного слоя насадки теплообменными элементами. Применительно к этой зоне рассмотрим характерные режимы псевдооживления:

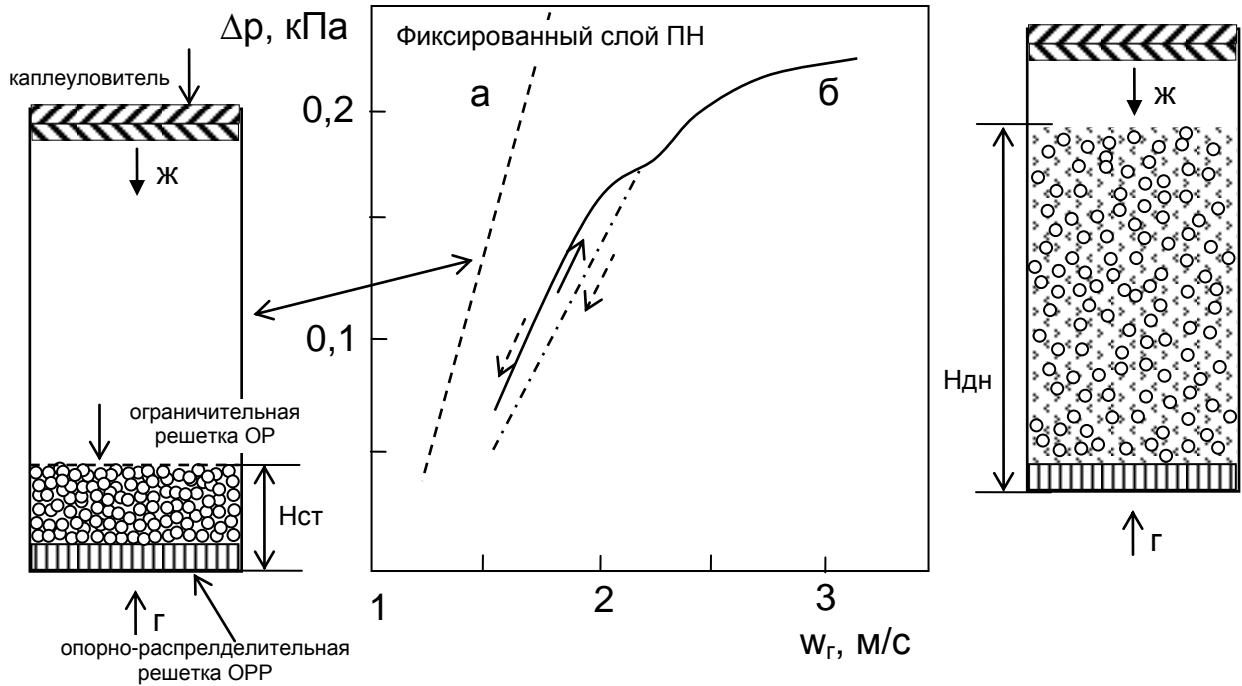
1.  $0 < w_r \leq 2,0$  м/с. Стационарное состояние системы с характерной локальной перестройкой структуры неподвижного слоя и некоторым ростом порозности слоя ПН. Линейный рост  $H_{ж} = f(w_r)$  вплоть до скорости начала псевдооживления  $w_0^*$  с прогрессирующим захлебыванием перестраивающегося неподвижного слоя (рис. 5А).

2.  $2,0 < w_r \leq 2,5$  м/с. *Режим начального псевдооживления* (переходный режим). Отмечается характерный пик  $H_{ж}$  при скорости газа  $w_0^*$  (рис. 5А), с последующим восстановлением до предшествующего значения; система неустойчива, часть слоя остается неподвижной и имеет место его перестройка.

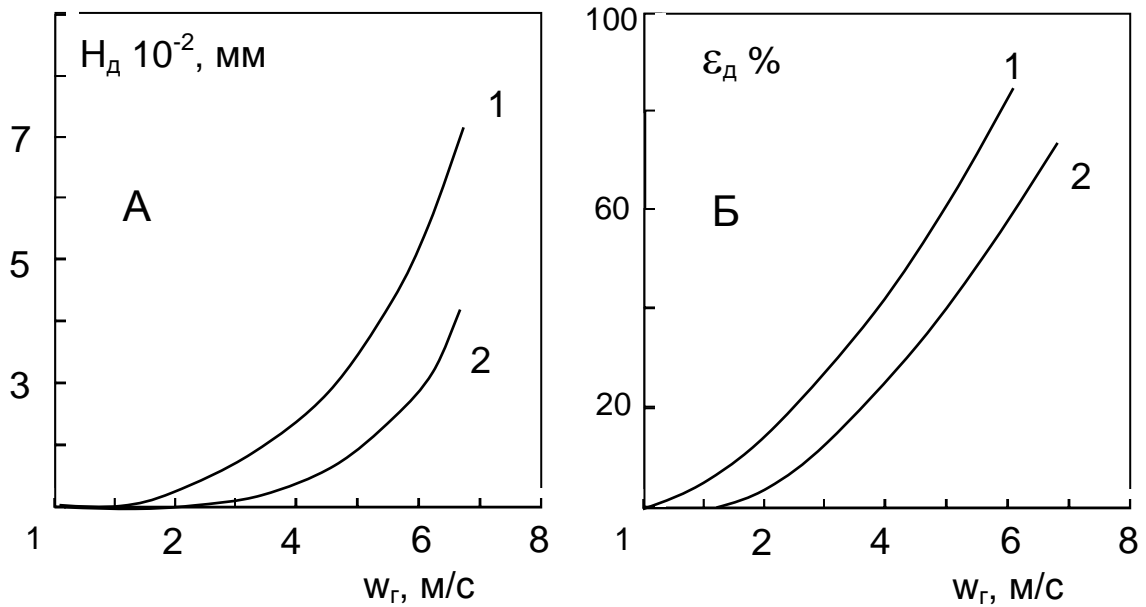
3.  $2,5 < w_r \leq 6,0$  м/с. *Режим развитого псевдооживления*. Весь слой насадки подвижен, система однородна (гомогенна). Сравнение характеристик системы с аналогичным режимом для зоны  $\rho_{эн}^I$  показывает, что новый характер перехода в подвижность сказался на поведении системы в целом: поддерживается состояние начального захлебывания, которое, однако, с ростом  $w_r$  не развивается далее в развитое захлебывание, благодаря компенсирующему механиз-



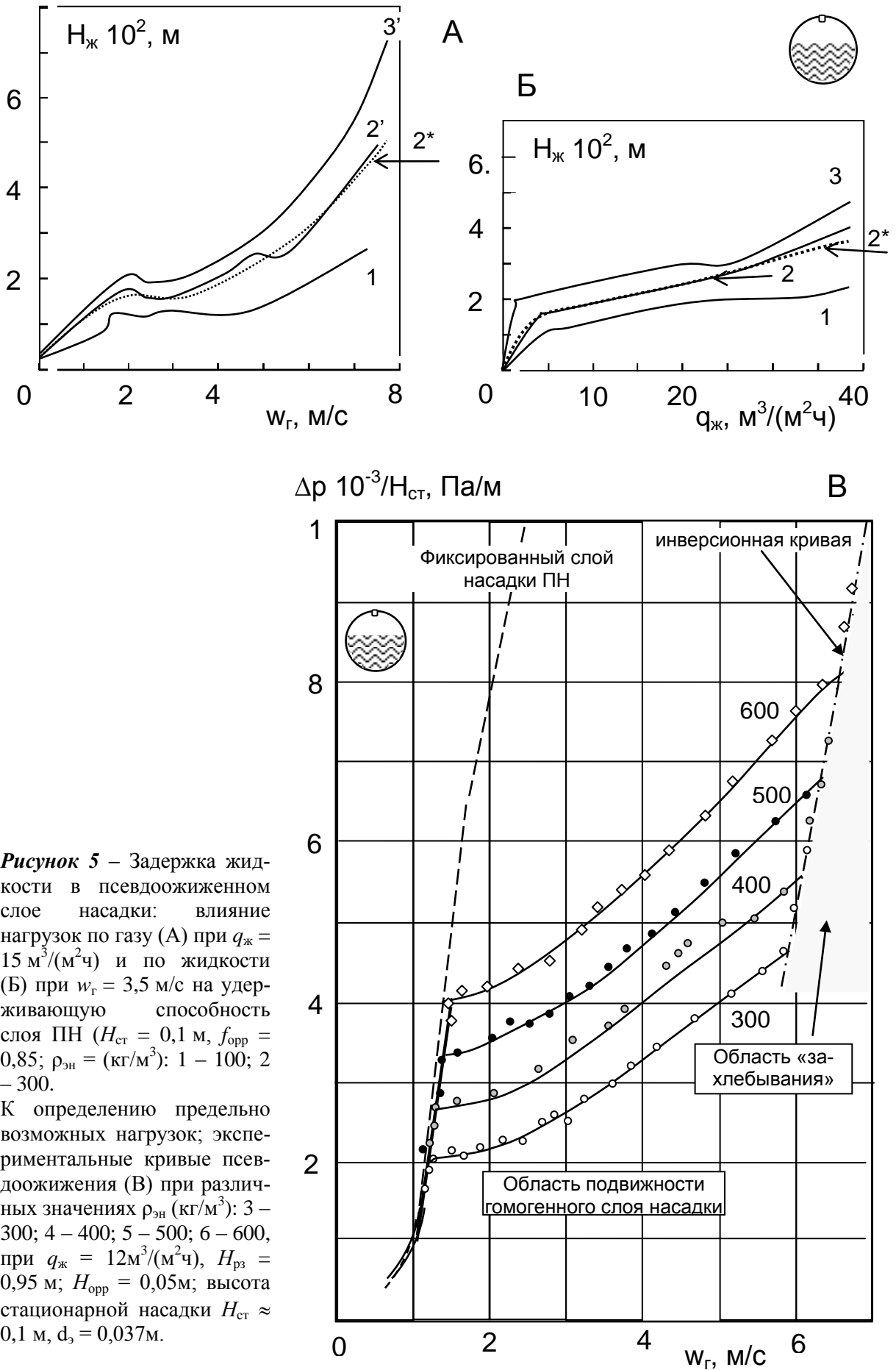
**Рисунок 2** – Экспериментальные кривые псевдоожижения при различных значениях  $\rho_{эн}$  (кг/м<sup>3</sup>): 1 – 90; 2 – 200; (2\* – элементы из вспененного полипропилена с величиной  $\rho_{эн} = 250 \text{ кг/м}^3$  и диаметром  $d_{эн} = 0,04 \text{ м}$ ) 3 – 300; 4 – 400; 5 – 500; 6 – 600; 7 – 700; 8 – 800; 9 – 900; 10 – 1000, при  $q_{ж} = 15 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ,  $H_{рз} = 0,95 \text{ м}$ ;  $H_{орп} = 0,05 \text{ м}$ ;  $H_{ст} \approx 0,1 \text{ м}$ ;  $f_{орп} = 85\%$ ;  $d_{эн} = 0,037 \text{ м}$  (---) – фиксированный слой



**Рисунок 3** – Петли гистерезиса (б); стрелками показан прямой (нагрузка) и обратный (разгрузка) ход процесса.



**Рисунок 4** – А – Изменение динамической высоты псевдооживленного слоя насадки от  $w_{\Gamma}$  (А);  
 Б – Динамическая порозность подвижного псевдооживленного трехфазного слоя насадки  
 (при  $H_{ст} = 0,1\text{ м}$ ,  $f_{орп} = 0,75$ ;  $\rho_{эп} = (\text{кг/м}^3)$ : 1 – 300; 2 – 600)



**Рисунок 5** – Задержка жидкости в псевдооживленном слое насадки: влияние нагрузок по газу (А) при  $q_{ж} = 15 м^3/(м^2ч)$  и по жидкости (Б) при  $w_{г} = 3,5 м/с$  на удерживающую способность слоя ПН ( $H_{ст} = 0,1 м$ ,  $f_{орр} = 0,85$ ;  $\rho_{эп} = (кг/м^3)$ : 1 – 100; 2 – 300.

К определению предельно возможных нагрузок; экспериментальные кривые псевдооживления (В) при различных значениях  $\rho_{эп} (кг/м^3)$ : 3 – 300; 4 – 400; 5 – 500; 6 – 600, при  $q_{ж} = 12 м^3/(м^2ч)$ ,  $H_{рз} = 0,95 м$ ;  $H_{орр} = 0,05 м$ ; высота стационарной насадки  $H_{ст} \approx 0,1 м$ ,  $d_3 = 0,037 м$ .



му расширения слоя. Такая своеобразная ситуация поддерживающегося в широком диапазоне  $w_T$  начального захлебывания обеспечивает возможность устойчивой эксплуатации аппаратов с ПН в этом режиме высоких нагрузок (рис. 2 и 5).

В пределах описываемого режима можно выделить участок  $w_T \cong 4,7 - 6,0$  м/с, где зависимость  $H_{ж} = f(w_T)$  практически отсутствует. Участок этот предшествует новому резкому возрастанию  $H_{ж}$  (рис. 5Б). Фактически это предыдущий режим с резким возрастанием составляющей захлебывания. Условно назовем его режимом захлебывания подвижного слоя, отметив существенное отличие от аналогичного режима при стационарной насадке. Если в последних режим захлебывания означает практическую невозможность дальнейшей эксплуатации (трансформация противотока в обращенный прямоток), то применительно к аппаратам с ПН работоспособность сохраняется, благодаря наличию пропускной способности аппарата по жидкости и достаточно высокой интенсивности протекания процессов, характерной для этого режима. Известную аналогию можно усмотреть в ранее развитых, применительно к стационарным насадочным слоям, представлениях о режиме «эмальгирования» в работах А.В. Кафарова (ссылка по работе [1]).

Отметим высокую поперечную равномерность распределения материальных потоков, характерную для ПН, что представляет принципиально важный момент при масштабировании ТМА, то есть решении наиболее трудной задачи инженерного характера. Впервые, в рамках настоящего исследования, были изучены такие важные вопросы, как: гистерезисные явления (рис. 3) и изменение динамической высоты слоя ПН (рис. 4А); влияние параметров ОРР (живого сечения и высоты ОРР) на поведение слоя; в конечном итоге, в качестве оптимального рекомендовано значение  $f_{орр} = 75\%$ ; влияние высоты ОРР на поведение слоя; в конечном итоге, в качестве оптимального рекомендовано значение  $h_{орр} = 0,1$  м; влияние высоты стационарной насадки  $H_{ст} = 0,1$  и  $0,16$  м; выполнено изучение характера режима «захлебывания» ПН на высоких нагрузках по газовому потоку и выстроена инверсионная кривая (рис. 5В), что обеспечивает возможность конкретизации рабочего диапазона нагрузок (результат получен для достаточно высоких значений плотностей орошения  $q_{ж} = 12$  м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>ч); исследована задержка жидкости в псевдооживленном слое насадки: влияние нагрузок по газу на удерживающую способность слоя ПН (данные на рис. 5 А и Б; на этом рисунке линия 2\* соответствует ЭН из вспененного полипропилена с величиной  $\rho_{эн} = 250$  кг/м<sup>3</sup> и диаметром  $d_{эн} = 0,04$  м.; в период 1980-2002 гг. в ОГАХ были разработаны и выпускались на ряде заводов страны типоразмерные ряды градирен ГПН и воздухоохладителей ВПН для холодильной и криогенной техники и систем кондиционирования воздуха на основе таких ЭН [1]).

#### Тепломассообмен в аппаратах на основе ПН.

В качестве естественного предела охлаждения воды в градирне принято рассматривать температуру воз-

духа по мокрому термометру на входе в аппарат  $t_m^1$ . На выходе из аппарата, в качестве предельного рассматривают состояние насыщенного воздуха, имеющего температуру поступающей на охлаждение воды  $t_{ж}^1$  (воздух с энтальпией  $h_{г}^{2*}$ ). Реально процесс в ГРД определяется и величиной соотношения контактирующих потоков газа и жидкости [1]. Степень охлаждения воды  $E_{ж}$  и степень использования воздуха  $E_{г}$ :

$$E_{ж} = \frac{(t_{ж}^1 - t_{ж}^2)}{(t_{ж}^1 - t_{м}^1)}, \quad E_{г} = \frac{(h_{г}^2 - h_{г}^1)}{(h_{г}^{2*} - h_{г}^1)},$$

$$E_{ж} = f(l = G_{г}/G_{ж}, t_{ж}^1, t_{м}^1), \quad E_{г} = f(l = G_{г}/G_{ж}, t_{ж}^1, t_{м}^1), \quad \Lambda = l/l_{ид}$$

Чем выше, при данном  $E_{ж}$ , степень использования воздуха  $E_{г}$ , тем ниже расход энергии на привод вентилятора водоохладителя и ниже удельные энергозатраты. Соотношение расходов контактирующих потоков  $l = G_{г}/G_{ж}$ ; величина  $l_{ид}$  – относительный минимальный расход воздуха. Когда  $l = l_{ид}$  и  $F = \infty$ , на обоих концах градирни устанавливаются состояния термодинамического равновесия. Условия эксплуатации градирни характеризуются *характеристическим числом*  $\Lambda$  [1].

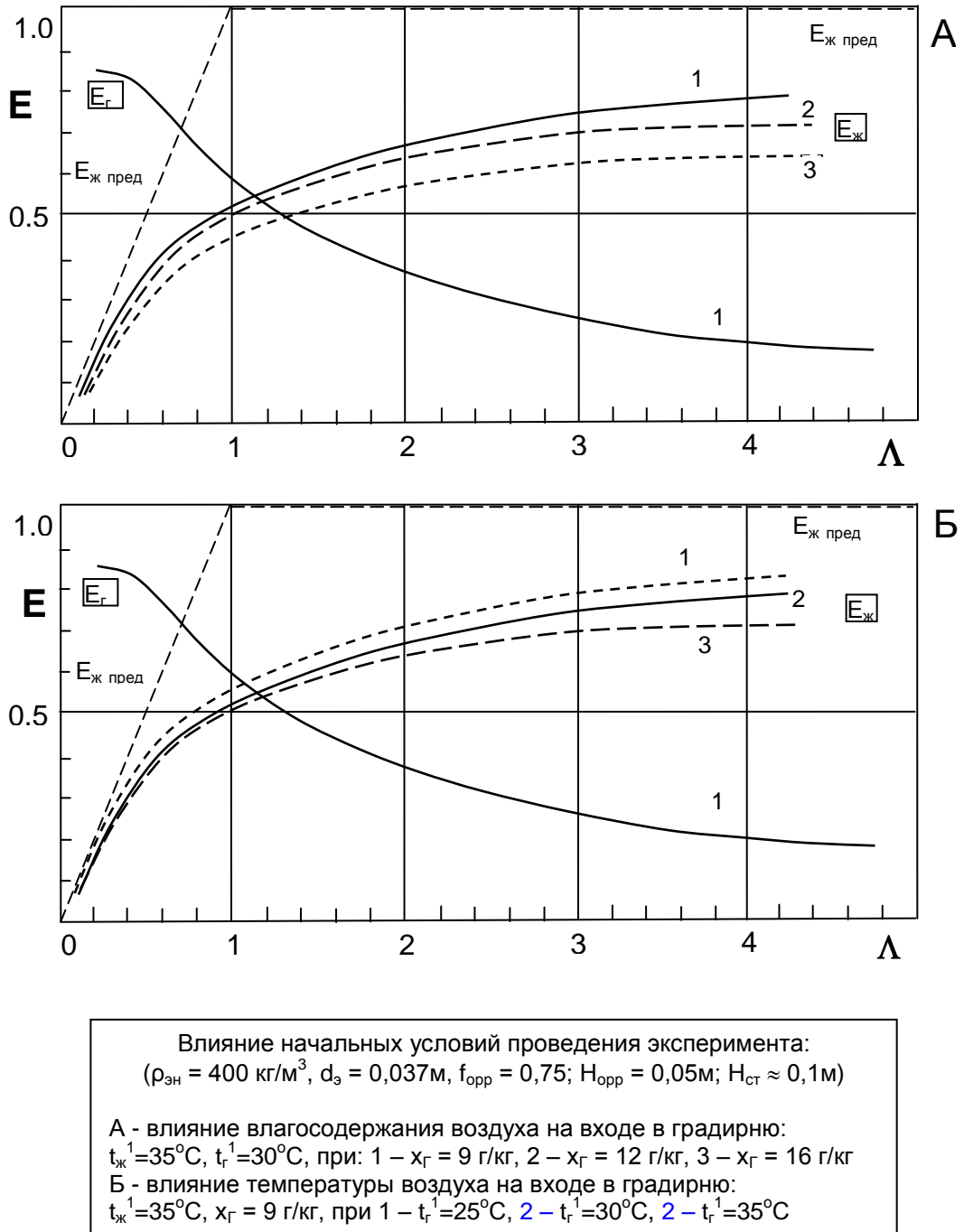
На рис. 6 представлено влияние начальных параметров воздушного потока на эффективность процесса  $E_{ж}$ . Видна значительная зависимость величины  $\Lambda_{опт}$  от влагосодержания воздуха. Оптимальное значение соотношения потоков газа и жидкости составляет  $l = G_{г}/G_{ж} = 1.1-1.2$ , при этом эффективность охлаждения воды составляет в среднем, в зависимости от величины  $\Lambda$ , диапазон значений 0,5-0,8. Отметим, что ранее, в опытах с ГРД с насадкой из теплопроводного материала – алюминиевой фольги [1] величина  $\Lambda$  составляла в среднем 0,8-1,0, при несколько более высоком значении эффективности. Полученные экспериментальные данные могут быть представлены в виде:

$$E_{ж} = c(1 - e^{-1.1 \Lambda}), \quad E_{г} = c(1 - e^{-1.1 \Lambda}) \Lambda^{-1},$$

где величина  $c \approx 0.85$  (ранее в работе [1] для насадок из полимерного материала мипласта получено  $c \approx 0.83$ , для насадок из алюминиевой фольги  $c \approx 0.9$ ). Некоторое снижение эффективности при переходе на подвижный трехфазный слой насадки обусловлено снижением величины реальной поверхности тепло-массообмена (фиксируется по величине задержки жидкости в слое насадки).

На рис. 7 приведено сравнение полученных результатов с опытными данными по работе Seetharama K.N., Varier K.V.S. Performance of a fluidized bed cooling tower [4]. Следует отметить, что реальные данные по теоретическому и экспериментальному изучению процессов аэродинамики и тепло-массообмена в подвижных трехфазных слоях немногочисленны и чаще всего соотношены с малыми значениями определяющего размера элементов ПН. Работа [4] посвящена изучению характеристик испарительных









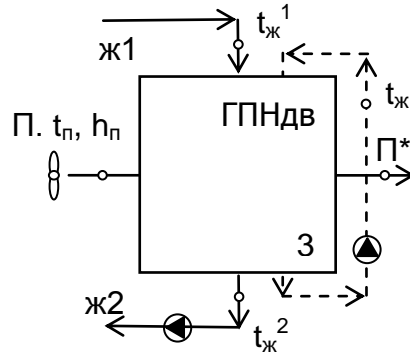
**Рисунок 6** – Эффективность процесса охлаждения воды в градирне ГПН как функции характеристического числа  $\Lambda$ .

А – Влияние начального влагосодержания наружного воздуха.

Б – Влияние температуры наружного воздуха.

Configuration	Density (kg/m <sup>3</sup> )	V/A (cm)	Code (in graph)
 Sphere	83.741	0.423	B <sub>1</sub>
 Cup-shape	15.086	0.115	B <sub>2</sub>
 V-shape	12.342	0.258	B <sub>3</sub>
 S-shape	13.105	0.152	B <sub>4</sub>

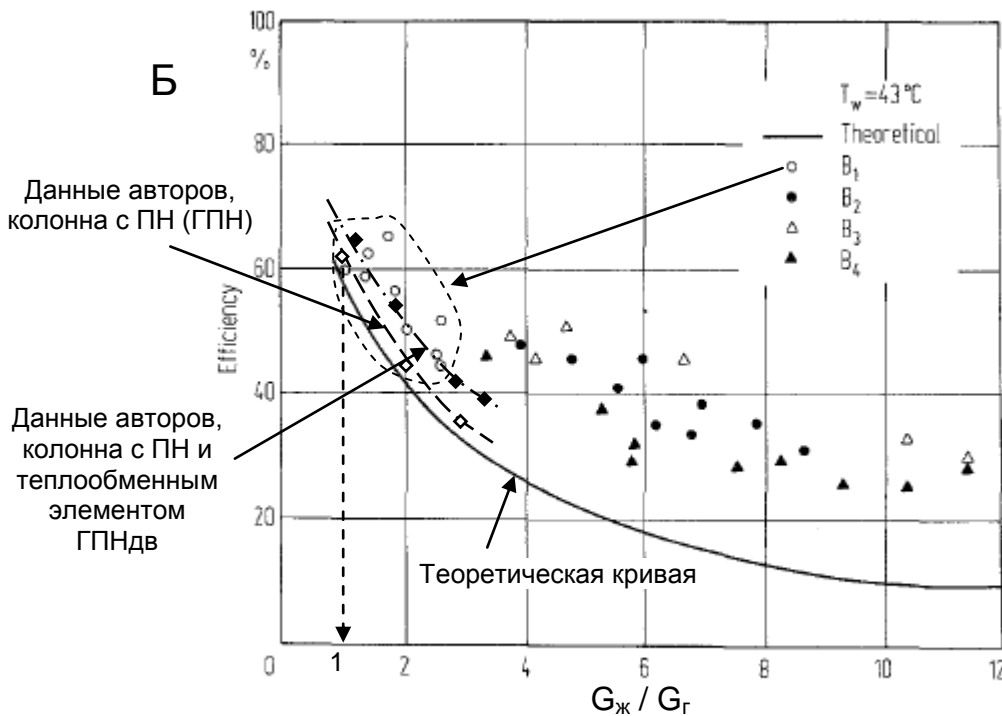
А



Водоохладитель непрямого типа НИОЖ,  
(двухконтурная градирня ГПНДв)  
Indirect evaporative cooler IECsw  
предел охлаждения – температура мокрого  
термометра наружного воздуха

Конфигурация элемента насадочного  
слоя, материал и основные свойства [4]

Б



Влияние соотношения контактирующих потоков на эффективность градирни ГПН

**Рисунок 7** – Сравнение рабочих характеристик градирен с подвижной насадкой ГПН по данным работы Seetharama K.N., Varier K.V.S. [4] и по данным настоящего исследования.

А – Схема экспериментального стенда [4];

Б – Типы и характеристики насадочных элементов в работе [4];

В – Эффективность водоохладителя ГПН:

Данные работы [4] получены для условия  $t_{ж1} = 43^\circ\text{C}$ ;

Данные авторов получены для условия  $t_{ж1} = 35^\circ\text{C}$  для колонны с ПН (◇)  
и колонны с размещенным в объеме ПН теплообменным элементом (◆)

водоохладителей на основе подвижной псевдооживленной насадки. Элементы насадки имели различную форму, при этом именно сферические (позиция В<sub>1</sub>) имели диаметр  $d_{эн} = 0,037\text{м}$ , при эффективной плотности  $\rho_{эн} \approx 90 \text{ кг/м}^3$  и  $H_{ст} = 0,1\text{м}$ . Теоретическая кривая на рис. 7Б соответствует представлениям об «идеальной» модели водоохладителя. Видно, что наши данные и результаты работы [4] в интервале соотношений  $G_{ж} / G_{г} = 1-2$  достаточно близки, причем наши результаты хорошо соответствуют теоретической кривой. Для варианта ГПНДв (НИОж) получены более высокие значения эффективности процесса, что связано с интенсификацией теплообмена при соударении элементов насадки со стенками трубок теплообменника. Для величины  $l^* = G_{ж} / G_{г} = 1$  получено самое высокое значение степени охлаждения воды  $E_{ж} = 60\%$ . Все остальные типы насадочных элементов по работе [4] соответствуют очень большим отношениям  $l^*$  и, соответственно, низким значениям эффективности процесса  $E_{ж} \approx 23-43\%$ , что связано, по-видимому с низкими значениями задержки жидкости в подвижном слое насадки и невысокой степенью гомогенности слоя «газ-жидкость-твердое тело». Вопрос о влиянии формы ЗН должен быть рассмотрен дополнительно.

## V. ВЫВОДЫ

1. Разработаны схемные решения солнечных систем на основе открытого абсорбционного цикла с непрямою регенерацией абсорбента и использованием теплообменников аппаратов в виде подвижных насадочных слоев в осушительном и охлаждающем контурах систем; впервые разработаны ТМА с ПН непрямого типа, что существенно расширяет возможности солнечных холодильных систем (СХС или ССКВ) [8];

2. На основе выполненного цикла экспериментальных исследований разработаны рекомендации для определения оптимальных геометрических и режимных параметров колонных ТМА с ПН (абсорберов, десорберов и испарительных охладителей газа и жидкости непрямого типа);

3. Оптимальным для реализации процессов является значение  $H_{ст} \approx 0,1-0,2\text{м}$  (при  $H_{ст} < 0,1\text{м}$  элементов насадки в слое оказывается недостаточно для создания равномерного п/о слоя и имеет место каналообразование, связанное с «проскоком» газа через слой и раздельным течением материальных потоков; при  $H_{ст} > 0,2\text{м}$ . имеет место непроизводительный рост приведенных затрат и окончательное решение определяется реальностями реализуемых процессов теплообмена);

4. Режим развитого псевдооживления, оптимальный с точки зрения реализации рабочих процессов в аппаратах, соответствует диапазону  $\rho_{эн} = 300...600 \text{ кг/м}^3$  (размер и форма элемента насадки ЭН: – форма шарообразная; тип элемента цельный;

материал ЭН вспененный полипропилен; диаметр ЭН – 30-50мм);

5. Рабочими нагрузками для ТМА с ПН являются: скорость движения газового потока (в расчете на «пустое» сечение колонны):  $2,5 < w_{г} \leq 6,0 \text{ м/с}$ ; плотность орошения насадки  $q_{ж} \geq 15 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$  (область значений  $q_{ж} < 8-10\text{м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$  соответствует «осушенному» состоянию слоя (недостаточная задержка жидкости в слое ПН) и для процесса испарительного охлаждения воды не может быть рекомендована);

6. Величина характеристического числа  $\Lambda = l/l_{ид} = 0,5-11,0$  [5-8], соотношение потоков газа и жидкости  $l = G_{г}/G_{ж} = 1,0$  (в этом диапазоне отмечается высокая устойчивость процессов теплообмена в широком диапазоне нагрузок и малая чувствительность к их колебанию; ограничения по нагрузкам обусловлены только уровнем энергозатрат)

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Дорошенко А.В., Глауберман М.А.** Альтернативная энергетика, Солнечные системы теплохладоснабжения, Одесса, ОНУ им. Мечникова, 2012, 447 с.
2. **A. Grandov, A. Doroshenko. I. Yatskar.** Cooling Towers with fluidized beds for contaminated environment. Int. J. Refrig. Vol. 18, No. 8, pp. 512-517, 1995.
3. **N. Sisupalan, K.N. Seetharamu,** Heat transfer and pressure drop in fluidized bed cooling tower. Wärme- und Stoffübertragung. 1992. – N 27. – P. 499–503.
4. **K. N. Seetharamu. K. V. S. Varier.** Performance of a fluidized bed cooling of various configuration. Wärme- und Stoffübertragung. – 1988. – N 22. – P. 219–222.
5. **А.В. Дорошенко, Б.Е. Молчанский,** Солнечные системы кондиционирования воздуха осушительно-испарительного типа и теплообменной аппаратурой с подвижным трехфазным слоем. Холодильная техника и технология. 2008, №5 (115), с. 15-23.
6. **А.В. Дорошенко, В.П. Данько.** Теплоиспользующие абсорбционные осушительно-испарительные системы охлаждения с использованием альтернативных источников энергии. Холодильная техника и технология. №4 (138) 2012. Одеса: ОДАХ. – С. 47-53
7. **А.В. Дорошенко, М.А. Глауберман, В.П. Данько.** Солнечные осушительно-испарительные холодильные системы на основе теплообменников аппаратов с подвижной насадкой. «Холодильная техника і технологія». Одеса, 2012, № 6 (140), с. 22-30.
8. **А.В. Дорошенко, В.А. Гончаренко.** Разработка многофункциональных солнечных систем на основе теплоиспользующего абсорбционного цикла и теплообменников аппаратов с подвижной насадкой. «Холодильная техника та технологія». Одеса, 51 (1), 2015, стр. 35-46.

Отримана в редакції 15.10.2015, прийнята до друку 18.12.2015

A. V. Doroshenko, V. A. Goncharenko, A. N. Tsapushel, Yu. I. Demianenko

Odessa National Academy of Food Technologies, 112 Kanatnaya St., Odessa, 65039, Ukraine

## EXPERIMENTAL RESEARCHES OF HEAT TRANSFER AND PRESSURE DROP IN FLUIDIZED BED COOLING TOWER OF VARIOUS CONFIGURATION

The schematics of heat and mass transfer apparatus are worked out with the fluidized beds attachment "gas - liquid - solid body" for the evaporated cooling of environments (evaporative coolers of water (cooling towers CTW) and evaporative coolers of air (direct and indirect type coolers). The multifunction solar refrigeration systems and air conditioning system are worked out on the based on absorbing open-cycle with the indirect regeneration of absorbent. In the basic contours of drainage of air and cooling of environments of the solar systems heat and mass transfer apparatus are used with fluidized beds. Decisions for heat and mass transfer apparatus with the fluidized beds "gas - liquid - solid body" have been worked out in a few basic variants, in particular, with possibility of heat-exchanger placing directly in the volume of the fluidized beds. It is the evaporated air coolers of indirect type (IECg) and evaporated liquid coolers of indirect type (IECw) of cool contour of the solar systems; absorber on the air flow and desorber-regenerator of absorbent of contour of drainage of outward air of the solar systems. The cycle of experimental researches of fluidizing bed "gas - liquid - solid body" features was executed both for a variant with the free fluidized bed of attachment and in a variant with placing of heat-exchanger directly in the volume of the fluidized bed of attachment. Influence of height of stationary layer of elements, geometrical parameters of distributive grate was studied, initial parameters of current of air, entering in the heat and mass transfer apparatus. On the basis of cycle of theoretical and experimental researches practical recommendations were proposed on determination of optimal geometrical parameters of basic elements and regime parameters of heat and mass transfer apparatus operation in autonomous regime and in composition with multifunction solar absorbing systems.

**Keywords:** Heat and mass transfer apparatus – Fluidized bed – Evaporative cooler – Cooling tower – Indirect evaporative cooler – Absorber – Desorber (absorbent regenerator) – Solar system – Refrigeration system – Air conditioning system

## REFERENCES

1. Doroshenko, A.V., Glauberman, M.A. 2012. Alternativnaya energetika, Solnechnyye sistemyi teplohladosnabzheniya, Odessa, ONU im. Mechnikova, 447 p.
2. Grandov, A., Doroshenko, A., Yatskar, I. 1995. Cooling Towers with fluidized beds for contaminated environment. *Int. J. Refrig.* Vol. 18, No. 8, pp. 512-517.
3. Sisupalan, N., Seetharamu, K.N. 1992. Heat transfer and pressure drop in fluidized bed cooling tower. *W- und Stoffgbertragung.* No 27. P. 499–503.
4. Seetharamu, K. N., Varier, K. V. S. 1988. Performance of a fluidized bed cooling of various configuration. *W- und Stoffubertragung.* No 22. P. 219–222.
5. Doroshenko, A.V., Molchanskiy, B.E. 2008. Solnechnyye sistemyi konditsionirovaniya vozduha osushitelno-isparitel'nogo tipa i teplomassoobmennoy apparaturoy s podvizhnyim trehfaznyim sloem. *Refrigeration Engineering and Technology*, 5 (115), 15-23.
6. Doroshenko, A.V., Danko, V.P. 2012. Teploispolzuyushchie absorbtionnyie osushitelno-isparitelnyie sistemyi ohlazhdeniya s ispolzovaniem alternativnyih istochnikov energii. *Refrigeration Engineering and Technology*, 4(138), 47-53
7. Doroshenko, A.V., Glauberman, M.A., Danko, V.P. 2012. Solnechnyye osushitelno-isparitelnyie holodilnyie sistemyi na osnove teplomassoobmennyih apparatov s podvizhnoy nasadkoy. *Refrigeration Engineering and Technology*, 6 (140), 22-30.
8. Doroshenko, A.V., Goncharenko, V.A. Engineering development of multifunctional solar systems based on the heat-absorption cycle and heat and mass transfer devices with a mobile nozzle. *Refrigeration Engineering and Technology*, 51(1), 2015, 35-46. doi: 10.15673/0453-8307.1/2015.36783

Received 15 October 2015  
Approved 18 December 2015  
Available in Internet 28.02.2016