

*Дорошенко А.В. *, Казак И.И. *, Глауберман М.А. **, Андреев В.И. ***

**Одесская государственная академия холода, г. Одесса*

***УНПЦ при ОНУ имени И.И.Мечникова, г. Одеса*

Солнечные системы теплоснабжения с непрямой регенерацией абсорбента и теплообменной аппаратурой с псевдооживленным слоем

Статья посвящена вопросам разработки альтернативных систем теплоснабжения на основе открытого абсорбционного цикла, с использованием теплообменной аппаратуры с подвижной насадкой. Подвижный слой обеспечивает самоочищаемость рабочей поверхности, что в условиях использования водных растворов абсорбентов представляет особую важность для солнечных альтернативных систем. Описано экспериментальное исследование рабочих характеристик теплообменной аппаратуры с подвижной псевдооживленной насадкой для абсорбционных систем.

I. Вступление. Методы испарительного охлаждения сред хорошо известны. Этот процесс используется в испарительных охладителях воды и воздуха. Практическое применение методов испарительного охлаждения сдерживается низкой эффективностью процесса при сравнительно высоких влагосодержаниях наружного воздуха. Суть открытого абсорбционного цикла заключается в том, что наружный воздух предварительно осушается в условиях непрерывного цикла, так что при этом резко возрастают потенциалы испарительного охлаждения с использованием осушенного воздуха, который затем поступает в испарительный охладитель, где может быть обеспечено глубокое охлаждение среды в альтернативных холодильных системах теплоснабжения. При этом процесс испарительного охлаждения может быть эффективен безотносительно параметров наружного воздуха. Сравнительно с традиционными решениями, с применением пароконденсационных охладителей сред, такие схемы обеспечивают значительное снижение энергопотребления и высокую экологическую чистоту [1].

II. Разработка новых схемных решений. На рис. 1 приведен вариант разработанной схемы на основе открытого абсорбционного цикла и непрямой солнечной регенерации абсорбента. Схема включает две основные части: осушения воздуха и испарительного охлаждения. В осушительной части тепло, необходимое для регенерации абсорбента обеспечивается гелиосистемой с плоскими солнечными коллекторами 6. Воздушный поток А (свежий наружный воздух) при осушении в абсорбере 2 снижает влагосодержание x_2 и величину температуры точки росы t_p , что обеспечивает значительный потенциал последующего охлаждения в испарительном охладителе воздуха. В качестве всех теплообменных аппаратов ТМА (воздухоохладителя, абсорбера, десорбера, гра-

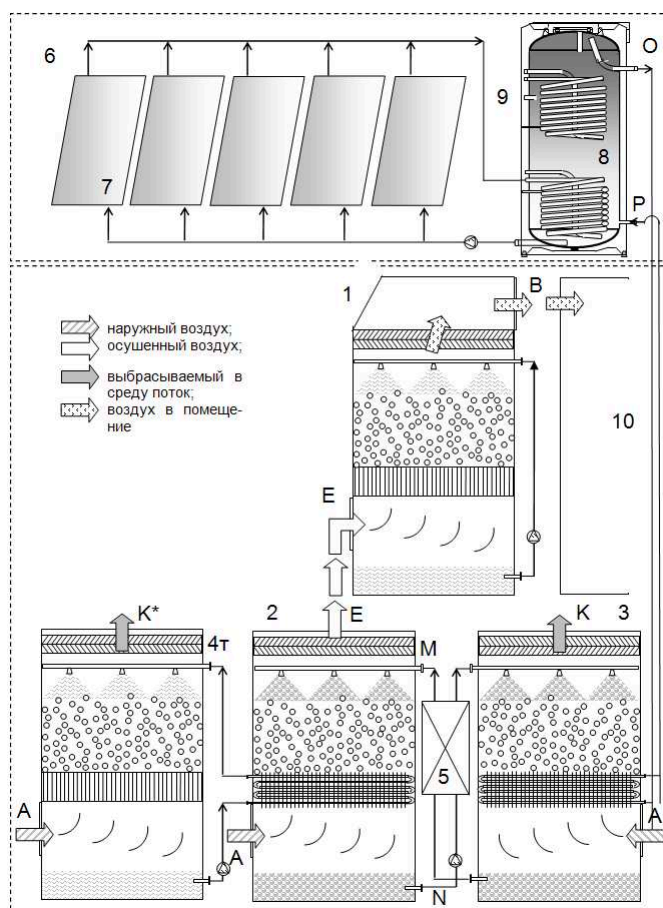


Рис. 1. Принципиальная схема солнечной системы хладоснабжения. Обозначения: 1 – испарительный охладитель; 2 – абсорбер, 3 – десорбер; 4 – градирня; 5 – теплообменник; 6 – гелиосистема; 7 – солнечный коллектор; 8 – бак-аккумулятор; 9 – дополнительный греющий источник; 10 – помещение; А – наружный воздух; Е – осушенный воздух; В – в помещение; К, К* – выброс воздуха из градирни, из десорбера; М – крепкий раствор абсорбента; N – слабый раствор; О, Р – теплоноситель из солнечной водонагревательной системы.

дирен технологического и «продуктового» назначения) используются разработанные аппараты унифицированного типа с применением подвижной насадки (ПН) – трехфазный псевдооживленный слой «газ-жидкость-твердое тело». Этот тип аппарата обеспечивает возможность самоочистки рабочих поверхностей и стенок корпуса ТМА, что, при работе с наружным воздухом и растворами абсорбентов представляется принципиально важным условием поддержания работоспособности альтернативных систем. В испарительном воздухоохладителе с ПН (ВПН) количество испарившейся воды в рециркуляционном водном контуре компенсируется подпиткой свежей водой. Наличие технологической градирни 4т в схеме вызвано тем, что в процессе абсорбции водяных паров из воздуха выделяется тепло и абсорбер нуждается в охлаждении. Приближение процесса абсорбции к изотермическому значительно повышает эффективность процесса абсорбции. Крепкий и горячий раствор абсорбента М и слабый и холодный раствор N обмениваются теплом в теплообменнике 5.

II. Принципы теплообменных аппаратов с подвижной насадкой. Колонные насадочные аппараты (НА) предназначены для реализации процессов

теплообмена и обеспечения однородных гидродинамических условий проведения этих процессов. С этой целью, часть объема НА заполнена слоями твердых тел различных размеров и формы, которые служат для создания развитой поверхности контакта между взаимодействующими потоками, преимущественно газ (пар)- жидкость. Традиционные аппараты с ПН (АПН) выполнены в виде колонны, рабочая зона которой ограничена опорно-распределительной решеткой (ОРР) и ограничительной решеткой. АПН – новое решение колонных ТМА, обеспечивающее возможность эксплуатации в экстремальных условиях (загрязненные среды, резкие колебания нагрузок), повышение предельных нагрузок, высокую поперечную равномерность (упрощение задачи масштабирования), нетребовательность к качеству распределения потоков. В качестве элементов насадки (ЭН) в аппаратах с ПН могут быть использованы тела различной формы, изготовленные из материалов, устойчивых в соответствующих средах. Для системы «вода-воздух» эти требования упрощаются [1]. ЭН должны обеспечивать хороший контакт газа и жидкости, высокую поверхность переноса в слое; хорошее качество псевдооживления; низкие потери напора; надежность и простоту эксплуатации. В экспериментальных работах и практике наиболее распространена сферическая форма ЭН: это пустотелые, цельные, либо выполненные из пористых материалов ЭН; с различными отверстиями (рост поверхности контакта и перераспределение жидкости), выступами и т.д. Материалом ЭН служат пластмассы – полиэтилен, полипропилен, пенопласт, фторопласт, стирол; резина; металлы – полые ЭН.

Принципиальная схема АПН для альтернативных систем представлена на рис. 2а. Насадка ПН (11) располагается либо непосредственно на ОРР, имеющей живое сечение более 90% и высоту от 100 до 150 мм, либо на трубчаторебристом теплообменнике (3), обеспечивающем охлаждение для абсорбера и нагрев для десорбера. В качестве элементов насадки нами использованы цельные шары из вспененного полипропилена с $d_{эн} = 36,6-40,1$ мм, и $\rho_{эн} = 335-248$ кг/м³, а также, для изучения влияния $\rho_{эн}$ полые целлулоидные шары, частично заполненные водой, с $d_{эн} = 37,1$ мм., $\rho_{эн} = 100-1000$ кг/м³ с шагом в 100 единиц (величина $\rho_{эн} = 91$ кг/м³ для пустого элемента). Распределитель жидкости (4) введен непосредственно в рабочую зону аппарата. Он укомплектован центробежно-струйными форсунками, либо раскатателями свободнопадающей струи жидкости. В границах воздухоприемного окна установлена поворотная решетка 2, обеспечивающая, совместно с ОРР, равномерность поступления воздушного потока в слой ПН [3].

III. Экспериментальное исследование. Изучение гидроаэродинамики трехфазного псевдооживленного слоя насадки «газ-жидкость-твердое тело» и совместного теплообмена в процессах испарительного охлаждения сред и осушения воздуха (абсорбции водяных паров водными растворами абсорбентов) носило преимущественно экспериментальный характер. Исследования проведены на стенде (рис. 2б) для изучения процессов испарительного охлаждения воды и процессов термовлажностной обработки воздуха (адиабатический и политропический процессы, – испарительное охлаждение воды), а также процесса осушения воздуха растворами абсорбента. Возможности стенда: расходы

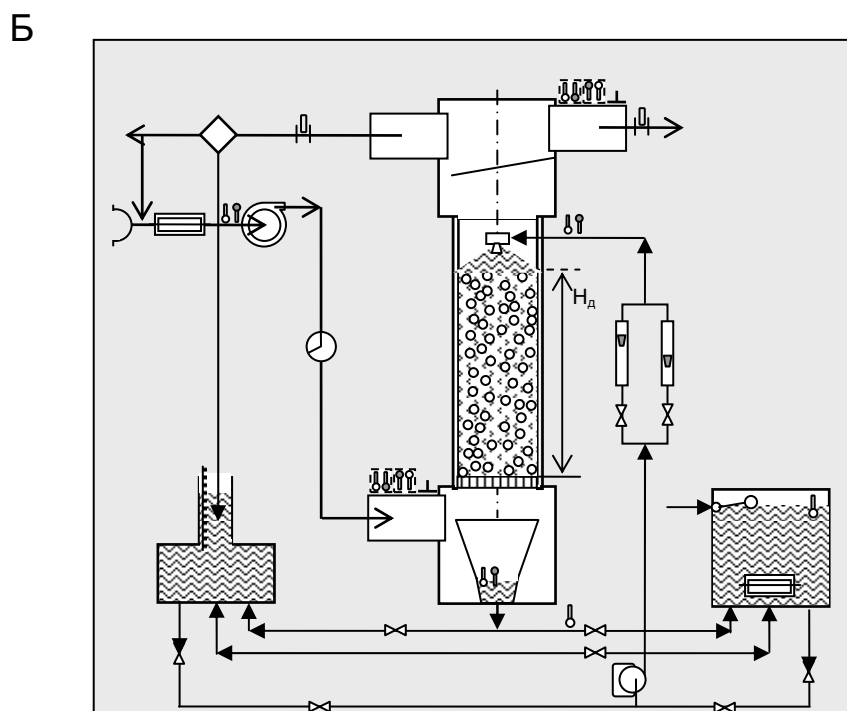
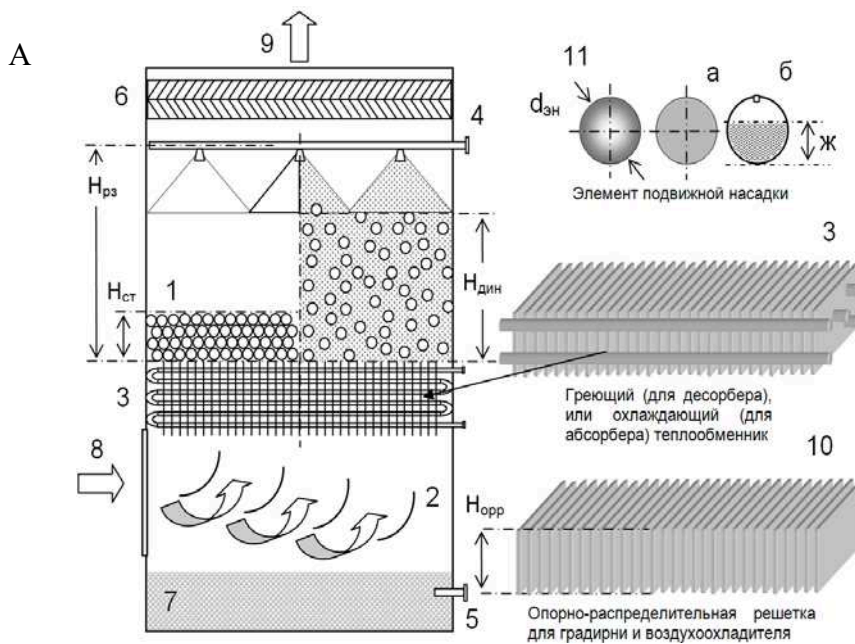


Рис. 2. (А) Принципиальная схема тепломассообменного АПН для солнечных систем теплохладоснабжения (абсорбера-осушителя, десорбера-регенератора, градирни и воздухоохладителя. Обозначения: 1 – рабочая камера; 2 – поворотная решетка; 3 – теплообменник; 4 – распределитель жидкости с центробежно-струйными форсунками (рассекатель свободнопадающей струи); 5 – выход жидкости из аппарата; 6 – сепаратор капельной влаги; 7 – емкость для жидкости; 8, 9 – вход и выход воздушного потока; 10 – опорно-распределительная решетка; 11 – элемент насадки: а – «цельный» элемент из вспененного полипропилена, б – полый элемент, частично заполняемый жидкостью, для опытов с изменяющейся эффективной плотностью элементов.

(Б) Принципиальная схема экспериментального стенда для изучения характеристик трехфазных псевдооживленных слоев насадки («газ-жидкость-твердое тело») и процессов тепломассообмена при испарительном охлаждении воды.

теплоносителей и теплофизические параметры изменялись в диапазонах: $w_2 = 0-8$ м/с, $q_{жс} = 0-40$ м³/(м² ч), $Q_{\Sigma} = 0-7,5$ кВт (по воде) и $0-6$ кВт (по воздуху), t_f до 50°C , $\varphi_r = 30-90\%$, $t_{жс}$ до 40°C . Важнейшей характеристикой аппаратов с ПН является количество удерживаемой жидкости, или задержка $H_{жс}$. Эта величина определяет поверхность переноса в псевдооживленном слое насадки. Нами 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 позволяет учесть эти составляющие и определить полную задержку жидкости. Жидкость, удержанную в сепарационной зоне, определяли методом отсечки: при w_2 до 4 м/с и $q_{жс}$ до $40\text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ ч})$ ее количество составляет менее 25% от удерживаемой в аппарате. Точность эксперимента, определяемая по максимальной погрешности средств измерения, колебалась от $\pm 30\%$ при малых значениях удерживающей способности ($H_{жс} \sim 0,5 \cdot 10^{-2}\text{ м}$) до $\pm 3\%$ при больших ($H_{жс} \sim 7 \cdot 10^{-2}\text{ м}$). 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 преимущественно цельные шары из вспененного полипропилена, которыми компоновали и промышленные ТМА. Значения $\rho_{ЭН}$ в специальной серии опытов варьировали последовательным частичным заполнением водой целлулоидных полых шаров.

Программа исследования охватывала вопросы:

- Гидроаэродинамика подвижного слоя «газ-жидкость-твердое тело» с учетом критических явлений в системе (переход ЭН в псевдооживление, явления гистерезиса и захлебывания слоя ПН); определяли рабочие диапазоны нагрузок по газу и жидкости, влияние f_{opp} , $H_{ст}$, $\rho_{ЭН}$, формы и материала ЭН и принципа компоновки слоя ПН;
- Структура трехфазного подвижного слоя насадки с учетом задержки жидкости, динамической высоты слоя ПН, порозности, поверхности переноса и пр.;
- Движение газокапельных потоков в основных узлах ТМА (сепарационная зона, водораспределитель, опорно-распределительная решетка);
- Тепломассообмен в системе в процессах испарительного охлаждения и осушения воздуха (абсорбция).

Экспериментальное изучение гидроаэродинамики в слое подвижной насадки. С научной и практической точек зрения важным представляется вопрос о характере перехода насадочного слоя из стационарного в подвижное состояние. Традиционно критическая скорость перехода (w_0 , w'_0) определяется визуальным анализом кривой псевдооживления $\Delta p = f(w_2, q_{жс})$. Нами проведена конкретизация переходных процессов анализом виброкривой $L_a(w_2, q_{жс})$. Порозность фиксированного слоя не зависит от нагрузки по газу и жидкости. Введем

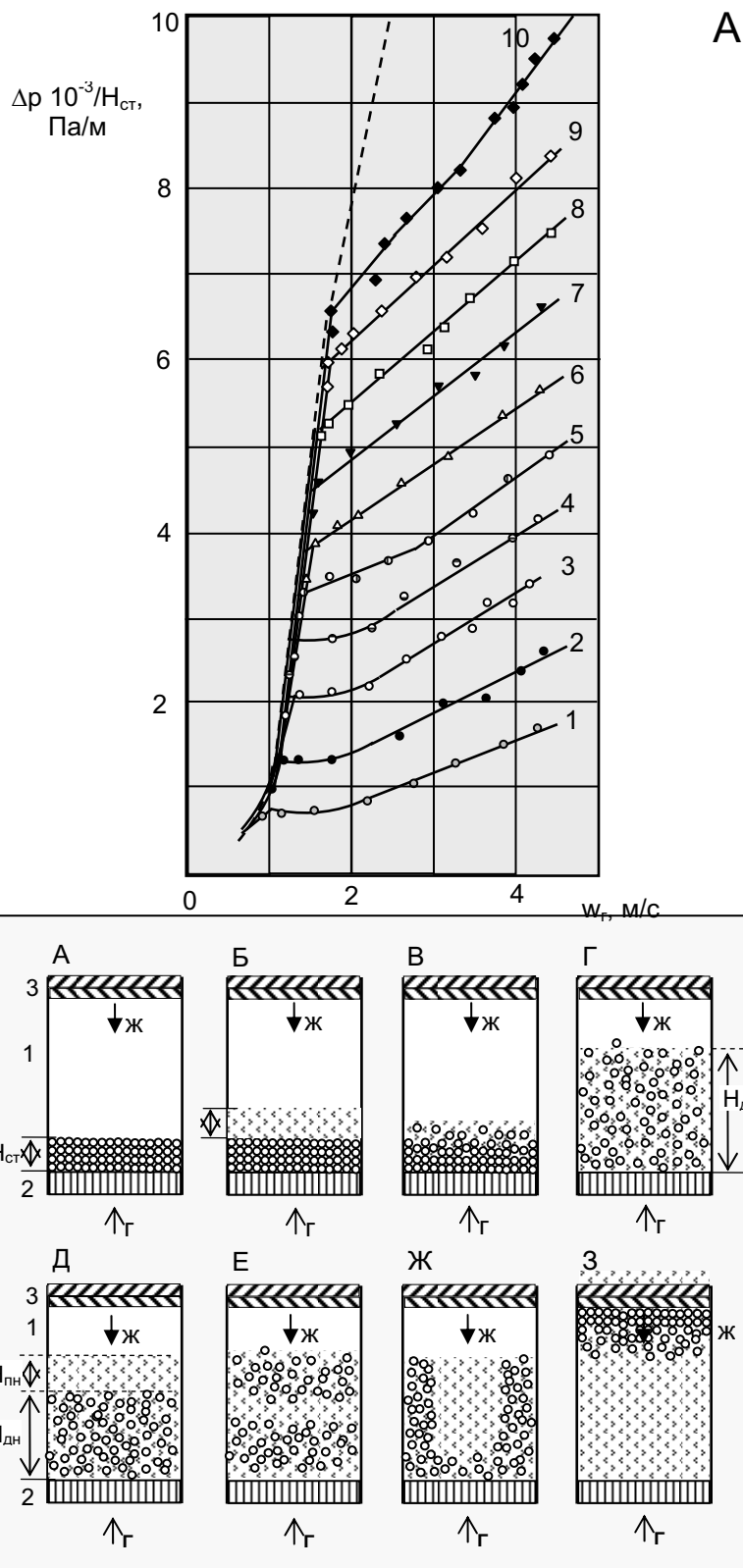
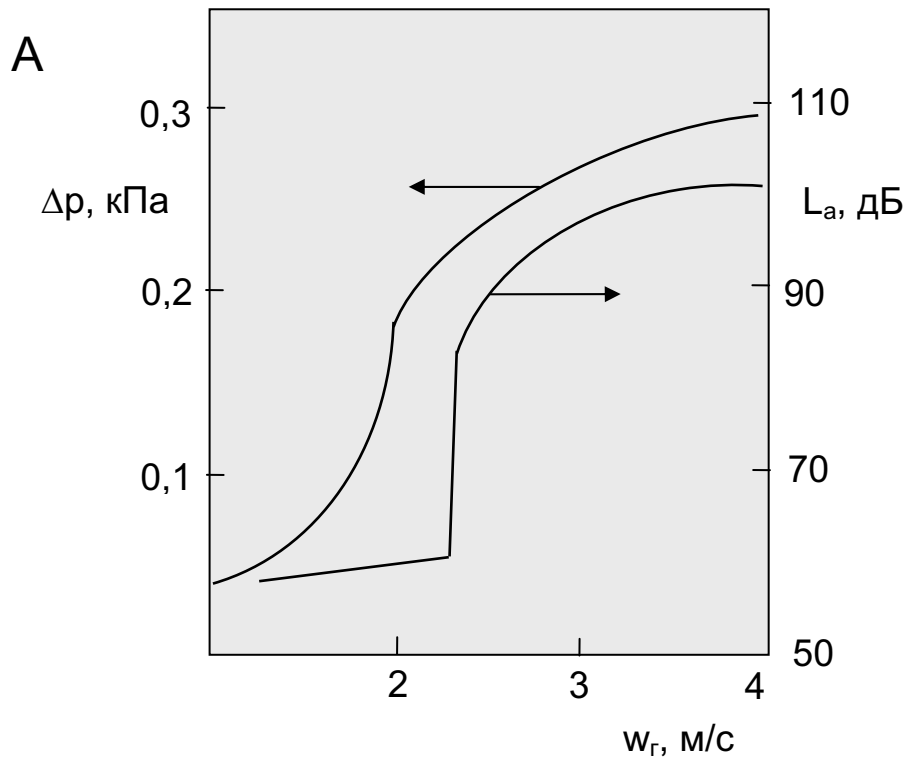


Рис. 3. (А) Экспериментальные кривые псевдооживления для различных значений $\rho_{эн}$ (кг/м^3): 1 – 90; 2 – 200; 3 – 300; 4 – 400; 5 – 500; 6 – 600; 7 – 700; 8 – 800; 9 – 900; 10 – 1000, при $q_{жс} = 15 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, $H_{ст} = 0,1 \text{ м}$, $d_3 = 0,037 \text{ м}$ (----) – фиксированный слой.

(Б) Основные режимы псевдооживления трехфазного слоя «газ-жидкость-твердое тело»: А – стационарный слой насадки; Б – «захлебывание» стационарного слоя; В – режим начального псевдооживления слоя насадки; Г – режим развитого псевдооживления слоя насадки; Д – режим псевдооживления «тяжелых» элементов с $\rho > 700 \text{ кг/м}^3$; Е – «поршневой режим»; Ж – «кольцевой» режим; З – инверсионный режим работы насадки.

обозначения для характерных скоростей движения газа w'_z (рис. 3б): w_{omp} – максимальная скорость, до которой совпадают кривые для фиксированного и подвижного слоев; w_3 – начало захлебывания стационарного слоя; w_0 , w'_0 – начало псевдооживления «сухого» и «орошаемого» слоя насадки; w_l – начало развитого псевдооживления; $w_{ин}$ – начало инверсии. Значение w'_0 четко фиксируется по виброкривой $L_a(w_r)$ (рис. 4) в виде скачка ($\cong 20$ ДБ или 30%) и слабо выражено на кривой псевдооживления (виброускорение стенок колонны определяется состоянием ПН). Видно, что стационарному состоянию слоя соответствует практически неизменный уровень виброускорения ($L_a = 5,5w_r^{0,08}$). Процесс перехода в подвижность оказался значительно сложнее традиционных представлений. При $w_r \cong w'_0$ образуются неустойчивые псевдостационарные состояния ЭН, при неизменных нагрузках характеризующиеся периодическим движением отдельных ЭН (перестройка слоя с изменением его порозности). Их длительность колеблется от десятков секунд до нескольких минут и здесь отмечается большая амплитуда колебаний виброграмм (рис. 4б). Изменяется структура слоя и колеблется задержка жидкости в нем, т.е. значение w'_0 характеризуется некоторым диапазоном существования. Ширина этого диапазона зависит от степени первоначальной уплотненности слоя, которая определяется собственным весом ЭН и действием внешних нагрузок и вибраций. Например, для ЭН с $\rho_{ЭН} = 300$ кг/м³ и $d_{ЭН} = 0,037$ м, эта величина составляет 0,4 м/с. Можно сделать вывод о существенно более сложном протекании процессов в трехфазной системе, чем предполагалось ранее, в частности, дополнить качественные представления, развитые в работе [3] о влиянии $\rho_{ЭН}$ (рис. 3а): 1) $\rho_{ЭН I}$ ($\rho_{ЭН} < 200$ кг/м³), – «легкие» элементы. Система переходит в устойчивое псевдооживленное состояние с незначительным накоплением жидкости в стационарном слое. Характерные особенности: малые значения $N_{ж}$, причем задержка жидкости мало изменяется с ростом w_r ; резкое возрастание с увеличением w_r динамической высоты слоя ЭН – N_d , а, следовательно, высоты рабочей зоны и общей высоты аппарата. 2) $\rho_{ЭН II}$ (200-700 кг/м³). Началу псевдооживления предшествует частичное захлебывание стационарного слоя; характер перехода системы в подвижность определяет все последующее поведение системы. Характерные особенности: значительно большее значение $N_{ж}$; снижение N_d в сопоставимых условиях. Скорость начала захлебывания аппарата w_3 достаточно велика (≈ 6 м/с); унос жидкости $\Delta G_{ж}$ из рабочей зоны невелик до значений w_3 . 3) $\rho_{ЭН III}$ ($\rho_{ЭН} > 700$ кг/м³), – «тяжелые» элементы. Картина переходных процессов в целом аналогична вышеописанной. Характерные особенности: дальнейший рост $N_{ж}$, но ему сопутствует перераспределение общей массы жидкости за счет ее выноса из слоя насадки в расположенный над ней пенный слой; резкий рост $\Delta G_{ж}$ при $w_r > w_3$. Наблюдается совершенно иная картина работы системы, чем в предыдущем случае. Таким образом, предпочтительным для реализации представляется диапазон $\rho_{ЭН II}$ (200 – 700 кг/м³), отличающийся широким рабочим участком по w_r , приемлемыми значениями уноса жидкости и сравнительно небольшой динамической высотой слоя. Применительно к этой зоне рассмотрим характерные режимы псевдооживления: 1) $0 < w_r \leq 2,0$ м/с. Стационарное состояние системы с характерной



Б

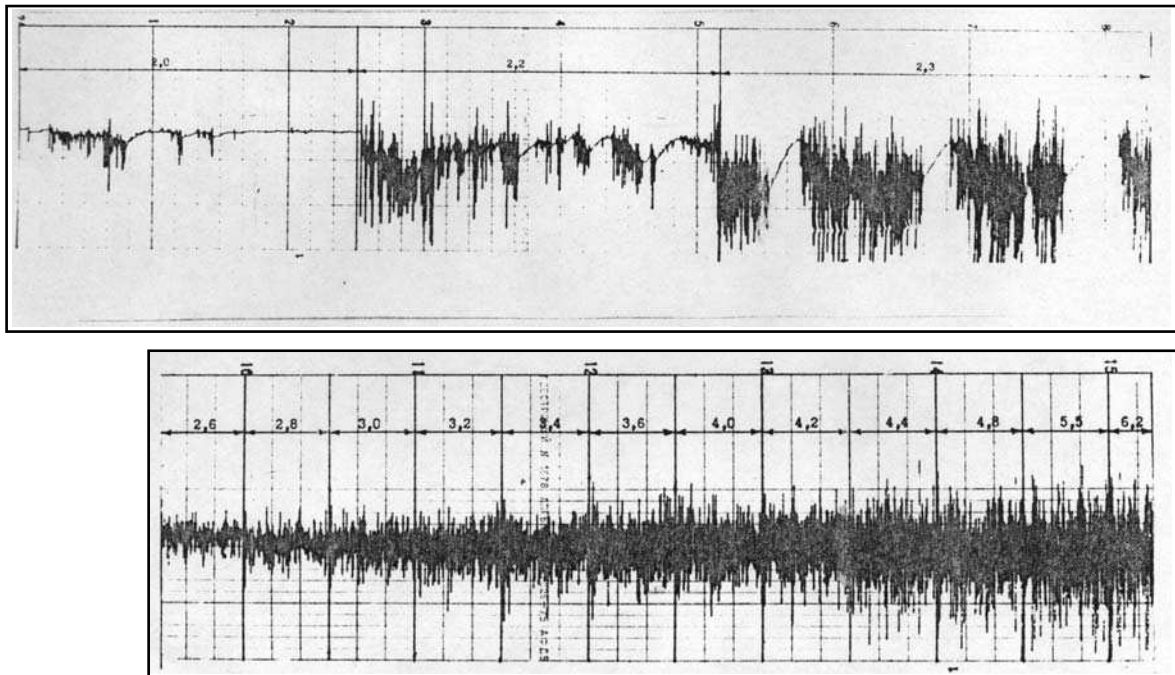


Рис. 4. (А) Кривая псевдооживления $\Delta p = f(w_{Г})$ и виброкривая: $L_a = f(w_{Г})$ при:
 $H_{ст} = 0,1\text{ м}$, $d_э = 0,04\text{ м}$, $\rho_{эп} = 300\text{ кг/м}^3$, $q_{жс} = 15\text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ ч})$

(Б) Виброграмма псевдооживленного слоя (цифры в интервалах соответствуют скорости движения газа)

локальной перестройкой структуры неподвижного слоя и некоторым ростом порозности. 2) $2.0 < w_2 \leq 2.5$ м/с. Режим начального псевдооживления (переходный режим). 3) $2.5 < w_2 \leq 6.0$ м/с. Режим развитого псевдооживления. Весь слой насадки подвижен, система однородна (гомогенна). Сравнение характеристик системы с аналогичным режимом для зоны $\rho_{энI}$ показывает, что новый характер перехода в подвижность сказался на поведении системы в целом: поддерживается состояние начального захлебывания, которое, однако, с ростом w_1 не развивается далее в развитое захлебывание, благодаря компенсирующему механизму расширения слоя. Такая своеобразная ситуация поддерживаемого в широком диапазоне w_2 начального захлебывания обеспечивает возможность устойчивой эксплуатации аппаратов с ПН в этом режиме.

Изучение процессов теплообмена при испарительном охлаждении жидкости в слое подвижной насадки. Исследовался процесс испарительного охлаждения воды в аппаратах с подвижной насадкой. Обработка экспериментальных данных по теплообмену и получение обобщенных расчетных уравнений осуществлялась Нелдера-Мида [2] в виде:

$$Sh = c Re_2^{x1} \cdot Re_{жс}^{x2} \cdot Ga_{жс}^{x3} \cdot Ar_2^{x4} \cdot \left(\frac{H_{cm}}{d_{эн}} \right)^{x5} \quad (1)$$

Полученные результаты для выделенных диапазонов $\rho_{эн}$ приведены на рис. 5, где особый интерес представляют данные для рекомендованного диапазона $\rho_{энII} = 200-700$ кг/м³. Для всего массива экспериментальных данных ($\rho_{эн} = 90-1000$ кг/м³, примерно 600 опытных точек) с погрешностью ± 25 % получено выражение:

$$Sh = 9.47 Re_2^{0.933} \cdot Re_{жс}^{0.410} \cdot Ga_{жс}^{-0.541} \cdot Ar_2^{0.217} \cdot \left(\frac{H_{cm}}{d_{эн}} \right)^{-0.681} \quad (2)$$

V. Выводы:

- Надежность эксплуатации солнечных абсорбционных систем выдвигает особые требования к используемой в них теплообменной аппаратуре. В первую очередь это касается опасности отложений на рабочих поверхностях.
- В разработанных аппаратах (абсорбер, десорбер, градирни) используются трехфазные псевдооживленные системы "газ-жидкость-твердое тело" обеспечивающее самоочищаемость рабочих поверхностей даже при высоких концентрациях и работе вблизи линии кристаллизации.
- Переход ПН из стационарного в подвижное состояние сопровождается формированием неустойчивых псевдостационарных композиций, отличающихся порозностью, и зависит от эффективной плотности $\rho_{эн}$. Легкие ЭН ($\rho_{эн} < 200$ кг/м³) псевдооживляются при малой задержке жидкости; ЭН средней плотности ($200 < \rho_{эн} < 700$ кг/м³) начинают псевдооживляться в условиях захлебывания псевдостационарного слоя, и состояние начального захлебывания характеризует все их последующее поведение; тяжелые ЭН ($\rho_{эн} > 700$ кг/м³) псевдооживляются в условиях захлебывания и формирования слоя пены поверх ПН.
- Практическое значение имеет область начального и развитого псевдооживле

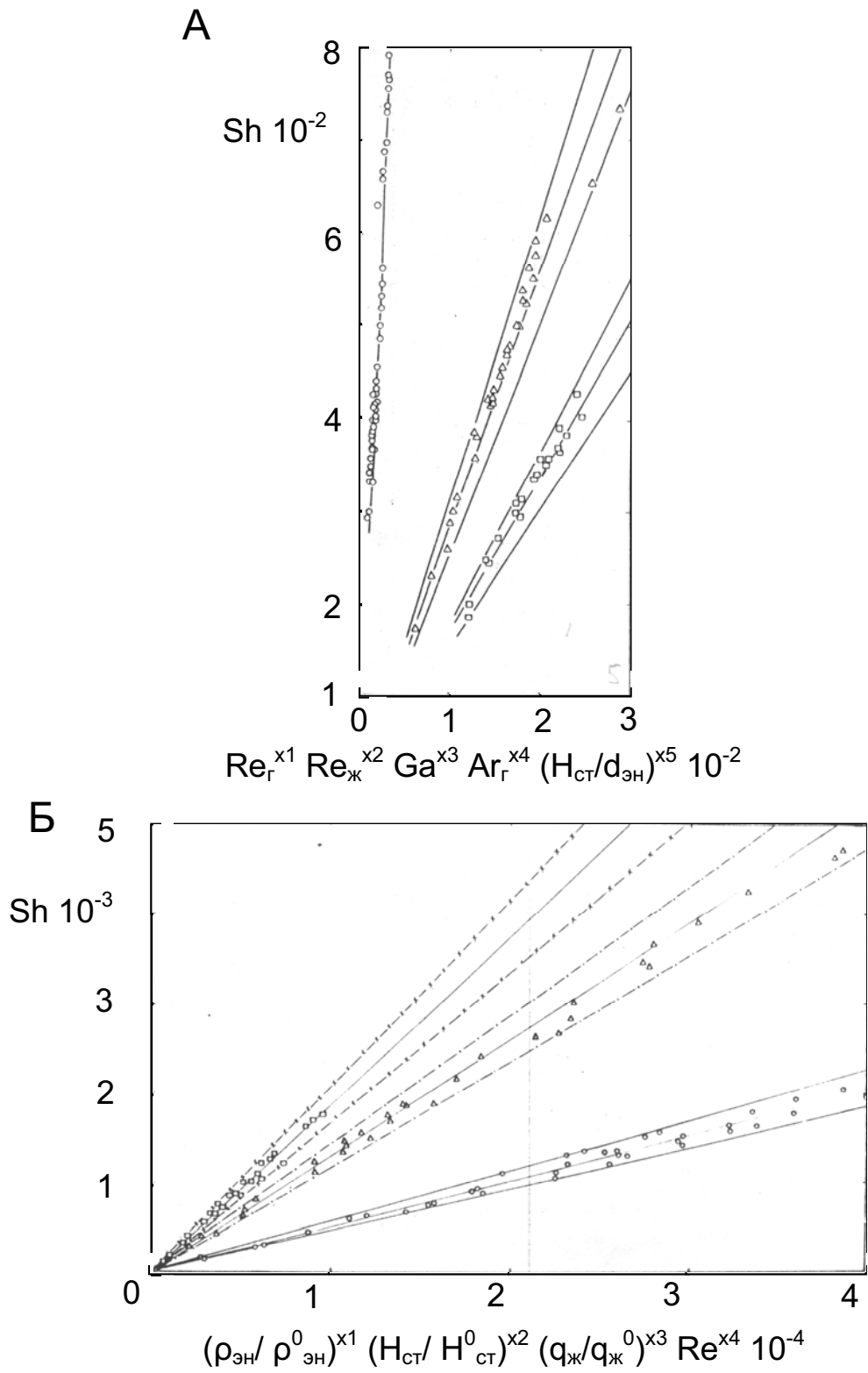


Рис. 5. (А) Зависимость числа Sh (Nu_D) от определяющих величин (чисел подобия) по уравнению 1 при $\rho_{эН}$ ($\text{кг}/\text{м}^3$):

- – 90-200;
- – 200-700;
- △ – 700-1000.

На графиках выделены диапазоны разброса экспериментальных данных
(Б) Зависимости по уравнению (2)

ния системы, составляющая для $200 < \rho_{\text{эН}} < 700 \text{ кг/м}^3$, величину $w_2 = 2.5 \dots 6.0 \text{ м/с}$. Поскольку с ростом $\rho_{\text{эН}}$ величина w_1 линейно растет, для $\rho_{\text{эН}} > 500 \text{ кг/м}^3$ приходится использовать режим начального псевдосжижения, характеризующийся допустимой величиной каплеуноса.

Литература:

1. Горин А.Н., Дорошенко А.В., Альтернативные солнечные системы и системы кондиционирования воздуха – Донецк: Норд-Пресс. – 2006. – 341 с.
2. Lowenstein, H. A., 1993, Liquid desiccant air-conditioners: An attractive alternative to vapor-compression systems. Oak-Ridge nat. Lab/Proc. Non-fluorocarbon Refrig. Air-Cond. Technol. Workshop. Breckenridge, CO, US, 06.23-25. – P. 133-150.
3. Дорошенко, А. Компактная теплообменная аппаратура для холодильной техники (теория, расчет, инженерная практика). Докторская диссертация, Одесский институт низкотемпературной техники и энергетики. Одесса. – 1992.

Дорошенко О.В., Казак І.І., Глауберман М.А., Андреев В.І.

Сонячні системи теплохолодопостачання з непрямою регенерацією абсорбенту й тепломасообмінною апаратурою із псевдозрідженням шаром

АНОТАЦІЯ

Стаття присвячена питанням розробки альтернативних систем теплохолодопостачання на основі відкритого абсорбційного циклу, з використанням тепломасообмінної апаратури з рухомою насадкою. Рухомий шар забезпечує самоочистку робочої поверхні, що в умовах використання водяних розчинів абсорбентів становить особливу важливість для сонячних альтернативних систем. Описане експериментальне дослідження робочих характеристик тепломасообмінної апаратури з рухомою псевдозрідженою насадкою для абсорбційних систем.

Doroshenko A.V., Kazak I.I., Glauberman M.A., Andreev V.I.

Heat and refrigeration supply solar systems based on indirect absorbent regeneration and fluidized bed heat-and-mass transfer equipment

SUMMARY

The study deals with development of alternative heat and refrigeration supply systems based on open absorption cycle. Fluidized bed heat-and-masstransfer equipment was used in systems design. The fluidized bed provided self-cleaning of the operating surface. This fact is of special importance for solar alternative systems with water absorbent solutions use. The pilot research of fluidized bed heat-and-mass equipment for absorption systems performance was described.