

## РАЗДЕЛ 3

ХОЛОДИЛЬНЫЕ И  
СОПУТСТВУЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 536.248.2:532.529.5

*А.В. Дорошенко<sup>1)</sup>, С.Ю. Васютинский<sup>1)</sup>, В.П. Данько<sup>2)</sup>, М.А. Глауберман<sup>3)</sup>*<sup>1)</sup> Учебно-научный институт холода, криотехнологий и экоэнергетики им. В.С. Мартыновского ОНАПТ, ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, 65082<sup>2)</sup> Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского, ул. Щорса, 31, г. Донецк, 83050<sup>3)</sup> ННВЦ при ОНУ им И. Мечникова, ул. Дворянская, 2, г. Одесса, 65082.**СОЛНЕЧНЫЕ ОСУШИТЕЛЬНО-ИСПАРИТЕЛЬНЫЕ ХОЛОДИЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ АППАРАТОВ С ПОДВИЖНОЙ НАСАДКОЙ  
ЧАСТЬ II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОБМЕНА В ИСПАРИТЕЛЬНЫХ ОХЛАДИТЕЛЯХ С ПОДВИЖНОЙ НАСАДКОЙ**

*Разработаны принципиальные схемы солнечных систем тепло-хладоснабжения и кондиционирования воздуха с использованием тепломассообменных аппаратов на основе псевдооживленных насадочных слоев «газ-жидкость-твердое тело». Применение таких ТМА в осушительной части СХС обеспечивает возможность работы на водных растворах абсорбентов без опасности возникновения отложений на рабочих поверхностях и стенках аппаратов. Ранее [2] были рассмотрены основные режимы псевдооживления применительно к новым принципам оформления колонны тепломассообменного аппарата. В настоящей статье приведены результаты экспериментальных исследований процессов тепломассообмена в аппаратах охладительного контура солнечных абсорбционных систем*

**Ключевые слова:** Испарительные охладители, эффективность охлаждения сред, солнечные системы.

*The circuit diagrams of solar heat-cold supply and air conditioning systems with usage of heat- and mass transfer devices based on fluidized packed layers of "gas-liquid-solid" were developed. The usage of such apparatuses in drainage part of the solar cooling systems provides the opportunity to work on the water absorbent solution without the risk of deposits occurrence on operation surfaces and the apparatuses walls. Earlier [2] were considered the main modes of fluidization applied to the new column design principles of the heat- and mass transfer apparatus. This paper presents the results of experimental studies of processes in cooling loop solar absorption systems heat- and mass transfer devices.*

**Keywords:** Evaporative coolers, the cooling efficiency of media, solar systems.

**I. ВВЕДЕНИЕ**

Солнечные осушительно-испарительные системы находят широкое применение для решения задач тепло- и хладоснабжения и кондиционирования воздуха [1, 3-5]. Использование в качестве насадок тепломассообменных аппаратов подвижных насадок обусловлено как опасностью возможных загрязнений рабочих поверхностей в открытых системах, так и работой с растворами абсорбентов в осушительной части солнечных систем. Значительный интерес представляет исследование процесса испарительного охлаждения в аппаратах с подвижной насадкой.

**II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, МЕТОДИКА И ПРОГРАММА ИССЛЕДОВАНИЙ**

Стенд ([3], рис. 3.17) обеспечивает возможность изучения рабочих процессов: в испаритель-

ном охладителе воды (градирня, ГРД). Воздух забирается из атмосферы вентилятором, проходит термовлажностную обработку (подогрев в калорифере и доувлажнение через байпасную линию от воздушного потока, покидающего ИО) и подается в рабочую камеру, где установлен модуль ИО с подвижной насадкой. Наличие электродвигателя с изменяемым числом оборотов позволяет регулировать расход воздуха через аппарат. Температура воздуха регулируется с помощью канального электрокалорифера и может составлять до 40 °С. Головная часть стенда, в которой расположен модуль ИО, выполнена со смотровым окном (съёмной крышкой) из толстостенного прозрачного плексигласа. Габариты колонны цилиндрической формы, состоящую из набора прозрачных царг диаметром  $D_k \approx 200$  мм и высотой  $H_k = 1000$  мм. На воздушной линии установлен расходомер и регуляторы расхода на байпасной линии.

Циркуляцию воды через рабочую камеру обеспечивает насос с регулируемой производи-

тельностью. Расход воды определяется при помощи блока ротаметров типа РС. Вода по напорному трубопроводу поступает в верхнюю распределительную камеру, откуда поступает на орошение насадки. Конструктивное оформление всех ТМА, входящих в разрабатываемые альтернативные системы унифицировано (абсорбер АБР, градирня ГРД) [4].

Расход воздуха измеряется трубкой Пито и микроанометром. Все коммуникации и аппараты теплоизолированы. В схеме предусмотрены измерения температуры и относительной влажности воздушных потоков перед и после рабочей камеры, а также температуры циркулирующей воды. Для измерения параметров воздуха используются термодатчики с многоканальным измерительным преобразователем Ш711/1И (МИП). Дополнительно осуществлялся замер температур при помощи лабораторных термометров ТЛ-4 с ценой деления  $0,1^{\circ}\text{C}$ .

Экспериментальный стенд обеспечивает возможность исследования процессов теплообмена в разработанных градирнях ГПН с подвижной насадкой.

Ранее, в ОГАХ, в ходе исследований ГРН с насадкой из продольнофрированных элементов из алюминиевой фольги [2] варьировали в широком диапазоне значения геометрических параметров: величина эквивалентного диаметра каналов варьировалась в диапазоне 15–20 мм; конструктивная поверхность насадки в единице объема слоя варьировалась в диапазоне  $170\text{--}200\text{ м}^2/\text{м}^3$ . Это позволило использовать полученные результаты для сравнения с новыми данными по процессам в ГПН.

В программе исследований было принято:

- В качестве базового элемента в модулях ГПН использовали элементы сферической формы.
  - Перечень варьируемых параметров в ходе экспериментального исследования теплотехнических характеристик подвижных слоев насадки приведен на рисунках; изучали влияние начальных условий (влажности и температуры воздушного потока, температуры жидкости на входе в аппарат, числа секций в колонне (до трех секций); высоты и свободного сечения опорно-распределительной решетки ОРР; высоты и свободного сечения ОРР/т-о, выполненной в виде теплообменника; высоты стационарной насадки в секции.
  - Рабочий диапазон скоростей движения воздуха в каналах насадки изменялся в диапазоне  $v_{\text{Г}} = 1,5\text{--}7,0\text{ м/с}$ ;
  - Плотность орошения в опытах варьировали в диапазоне  $q_{\text{ж}} = 5\text{--}35\text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ .
- Погрешность измерения основных величин, обусловленная точностью измерений, вычислялась при обработке данных для каждого опыта и составляет: точность сведения теплового баланса до 12%; экспериментальный материал характеризуется надежной воспроизводимостью.

### III. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ. ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В СИСТЕМЕ

На рисунках 1-7 приведены экспериментальные результаты исследования процессов в градирне ГПН в виде эффективности охлаждения воды и степени использования воздушного потока.

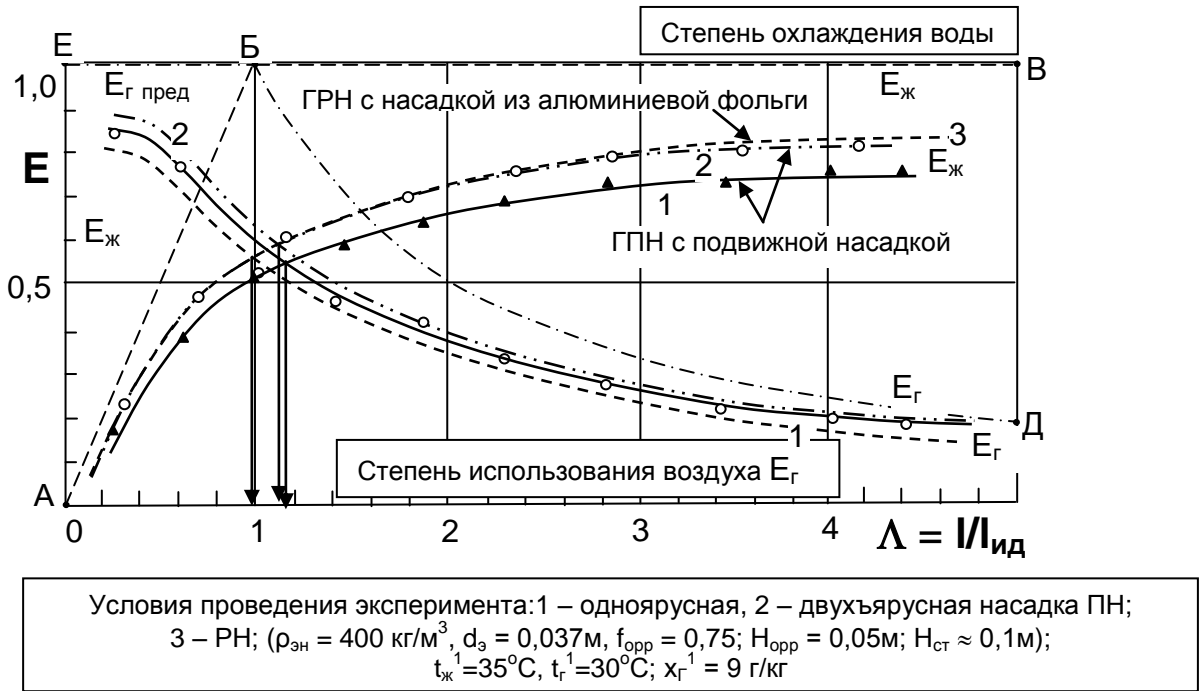
На рисунке 1 дано сравнение эффективности процесса для ГПН и ГРН (по данным работы [2] на насадках из алюминиевой фольги). Можно видеть, что при близких начальных условиях проведения процесса испарительного охлаждения воды, эффективность одноступенчатой (одноярусной) ГПН ниже, чем у ГРН. При переходе к двухъярусному оформлению слоя ПН эффективность сравниваемых принципов охлаждения практически совпадает. Величина оптимального характеристического числа  $\Lambda_{\text{опт}}$  (по достигаемой степени охлаждения воды) для одноярусной насадки ПН составляет  $E_{\text{ж}} = 0,55$ , а для регулярной насадки и двухъярусной ПН они практически совпадают и составляют  $E_{\text{ж}} \approx 0,6$ , при смещении  $\Lambda_{\text{опт}}$  от 1,0 для РН к  $\approx 1,1$  для подвижного слоя. Степень использования воздушного потока повышается для подвижного слоя, сравнительно с насадкой пленочного типа, что было ожидаемо по результатам анализа распределения фазовых сопротивлений. Это указывает на определенный резерв эффективности в ГПН и на преимущества двухъярусного оформления рабочей колонны. На рис. 2 этот результат представлен в виде зависимости эффективности процесса  $E = f(\Lambda)$ , подтверждающей сделанные выводы.

На рис. 3 представлено влияние начальных параметров воздушного потока на эффективность процесса по воде  $E_{\text{ж}}$ . Видна значительная зависимость величины  $\Lambda_{\text{опт}}$  от влагосодержания воздуха.

На рис. 4 представлена эффективность процесса по воде  $E_{\text{ж}}$  в зависимости от высоты  $H_{\text{ст}}$ . Рост эффективности процесса здесь естественным образом сопряжен с возрастанием энергозатрат.

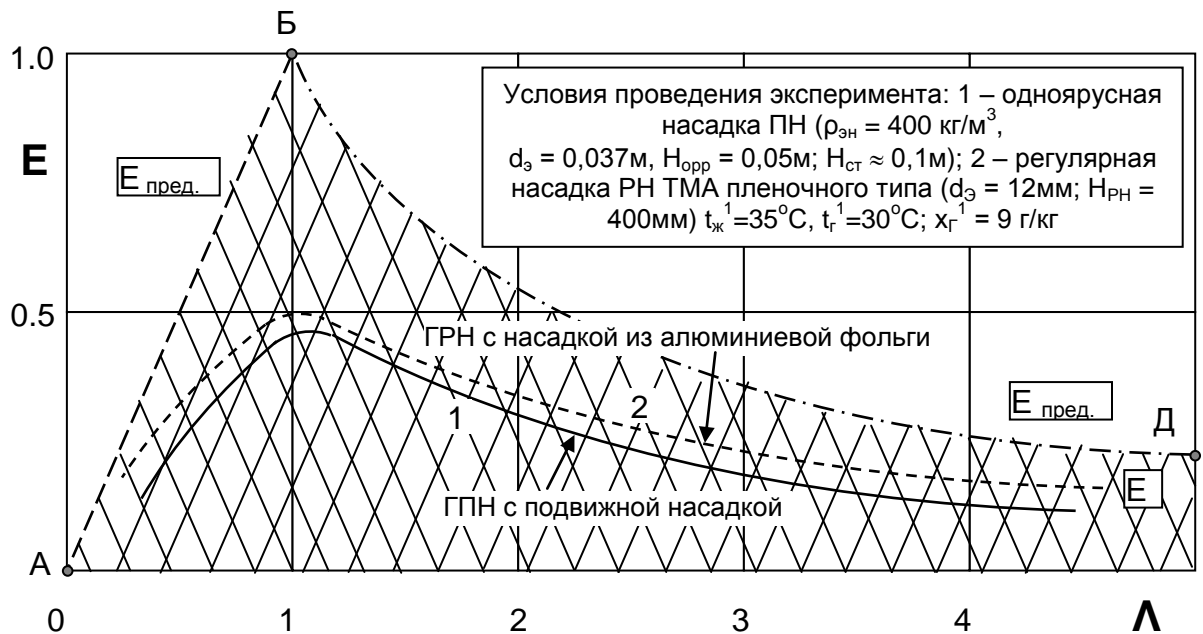
На рис. 5 представлена эффективность процесса по охлаждению воды и использованию воздушного потока при многоярусном оформлении колонны. С учетом экспериментальных кривых псевдооживления для двух- и трехъярусного оформления колонны можно сделать вывод о перспективности двухъярусного ее оформления, где возрастание эффективности не приводит к существенному росту энергозатрат. Можно отметить, что увеличение числа ярусов приводит к росту эффективности по охлаждаемой воде и в меньшей степени сказывается на степени использования воздушного потока.

Данные на рис. 6 иллюстрируют влияние высоты и свободного сечения ОРР на эффективность процессов. Рис. 6.А позволяет сделать вывод о нецелесообразности роста  $f_{\text{ОРР}}$  выше 0,75, что говорит о принципиальной важности ОРР в деле равномерности распределения воздушного потока как на входе в рабочую колонну. Оптимальная высота ОРР составляет величину 0,1 м и была в дальней-

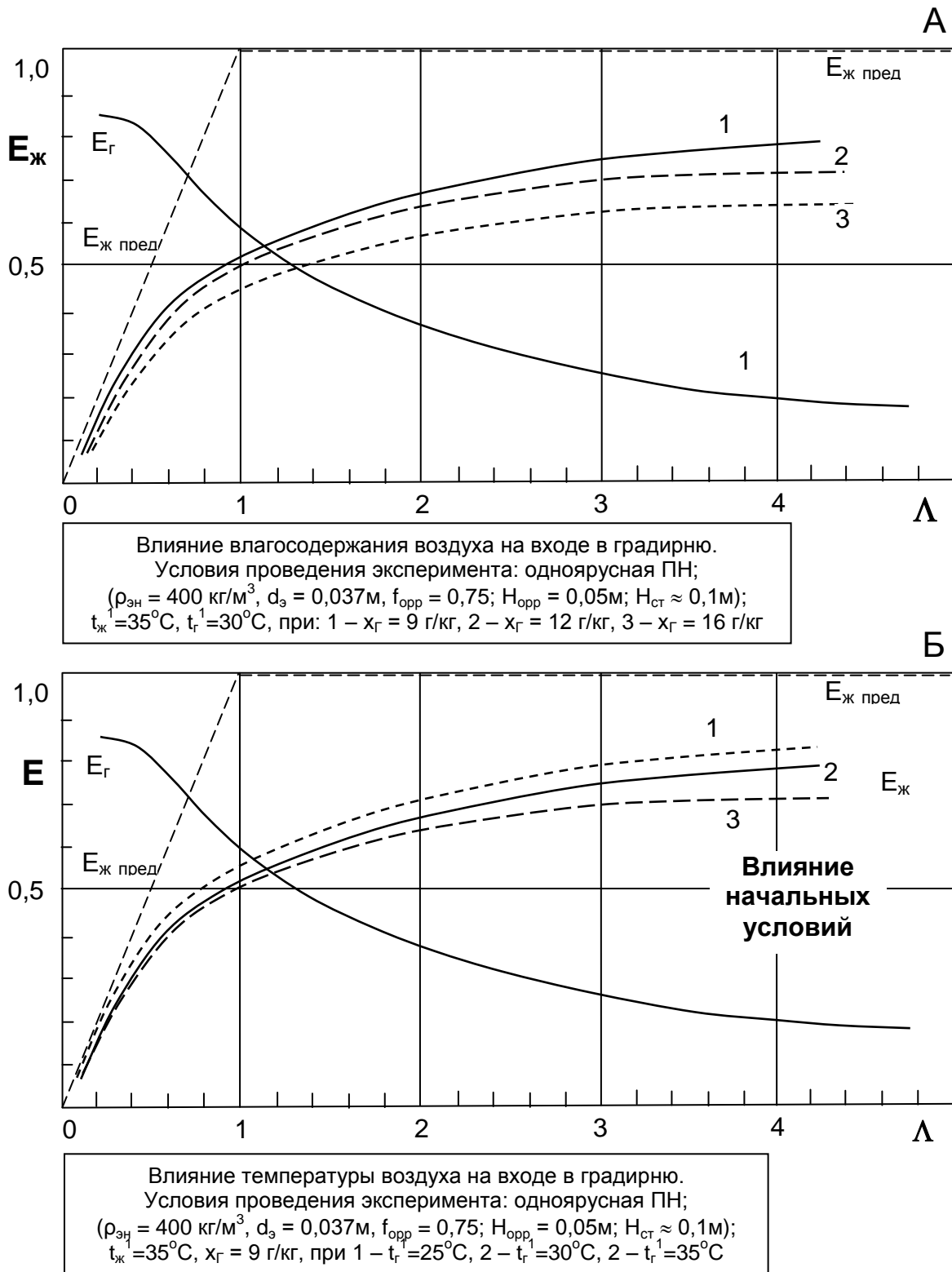


**Рисунок 1.** Эффективность процесса охлаждения воды и использования воздушного потока в градирне как функции характеристического числа  $\Lambda$ .

А – Сравнительные характеристики ГПН и ГРН (по данным работы [2] на насадке из алюминиевой гофрированной фольги с параметрами слоя:  $d_{\text{э}} = 12\text{мм}$ ;  $H_{\text{РН}} = 400\text{мм}$ ), и на подвижной насадке:  $d_{\text{э}} = 15\text{мм}$ ,  $H_{\text{РН}} = 400\text{мм}$ . (экспериментальные данные автора). Условия проведения эксперимента:  $t_{\text{ж}}^1 = 35^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{г}}^1 = 30^\circ\text{C}$ ,  $\phi_{\text{г}}^1 \approx 45\%$ .



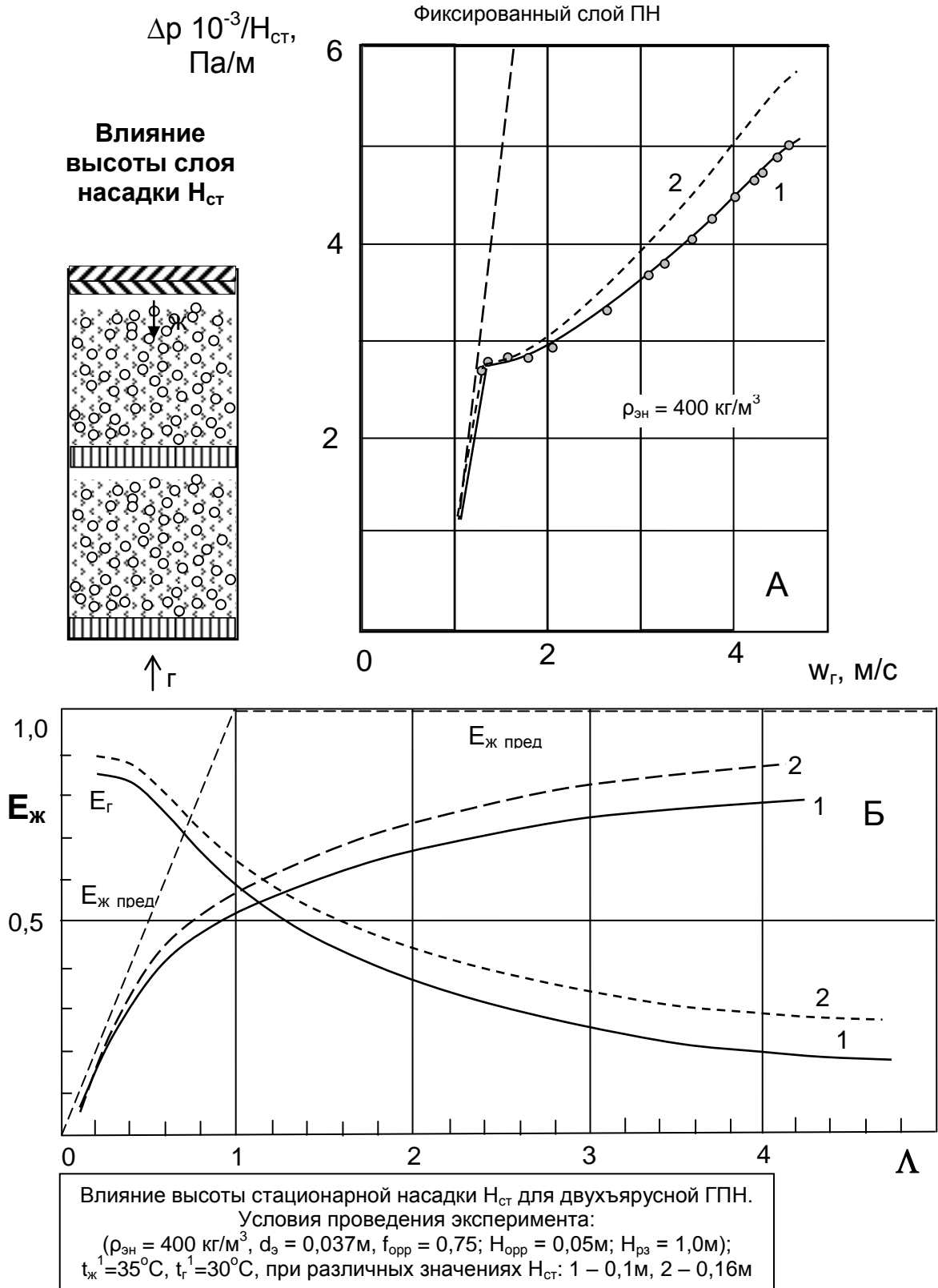
**Рисунок 2.** Эффективность процесса  $E$  (предельные линии А-Б-Д) в испарительном водоохладителе; на графиках заштрихованы области возможных значений величин эффективности процессов и показано протекание соответствующих зависимостей по данным работы [2] на насадке из алюминиевой гофрированной фольги и на подвижной насадке (экспериментальные данные авторов).



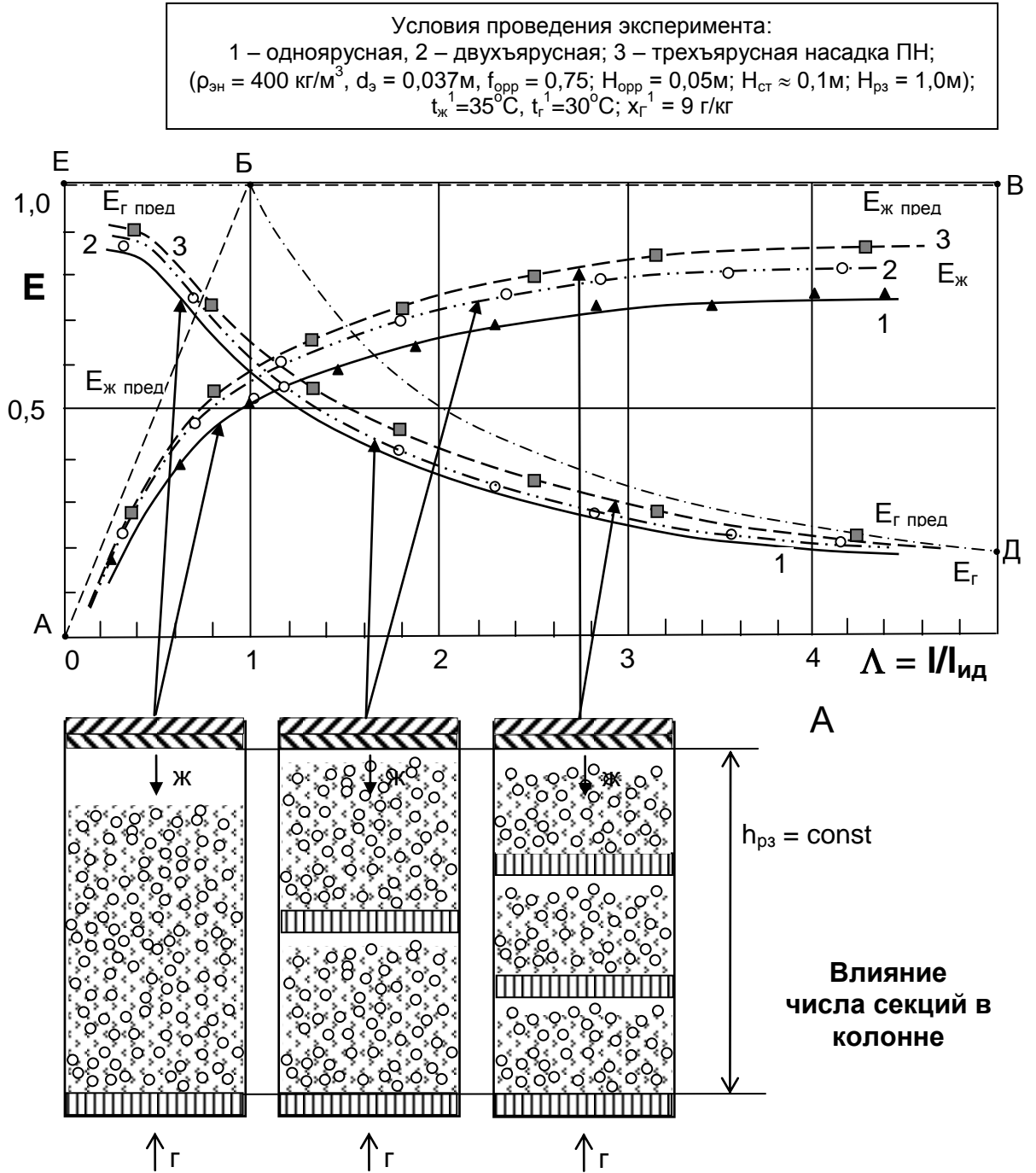
**Рисунок 3.** Эффективность процесса охлаждения воды в градирне как функции характеристического числа  $\Lambda$ .

А – Влияние начального влагосодержания наружного воздуха.

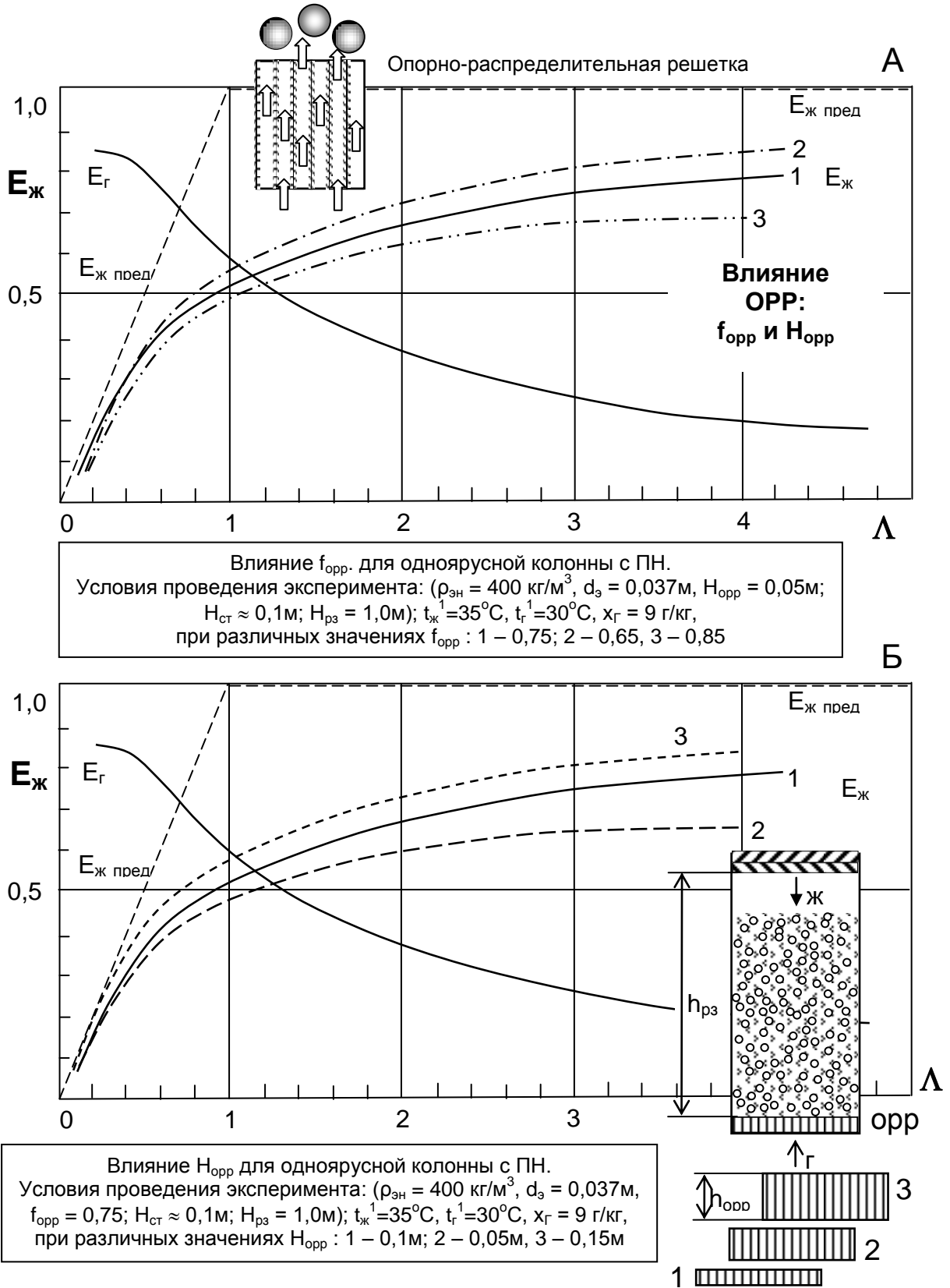
Б – Влияние температуры наружного воздуха.







**Рисунок 4.** Эффективность процесса охлаждения воды в градирне как функции характеристического числа  $\Lambda$ . Влияние высоты стационарной насадки  $H_{ст}$ . А – экспериментальные кривые псевдооживления для двухъярусной насадки при значении  $\rho_{эп} = 400 \text{ кг/м}^3$ , при  $q_{ж} = 12 \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$ ,  $H_{рз} = 0,5\text{м}$  в каждом ярусе колонны; высота стационарной насадки в каждом ярусе постоянна,  $H_{орп} = 0,05\text{м}$ ;  $d_э = 0,037\text{м}$ .  $H_{ст} \approx 0,1\text{м}$  (экспериментальные точки),  $H_{ст} \approx 0,16\text{м}$  (пунктирные линии).



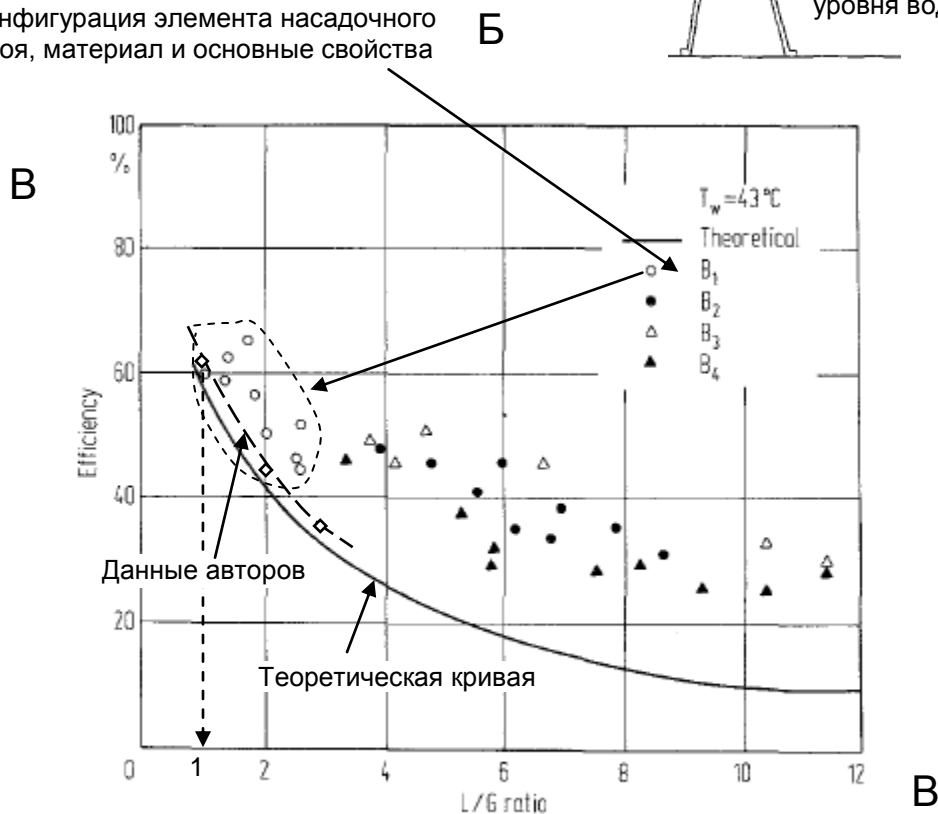
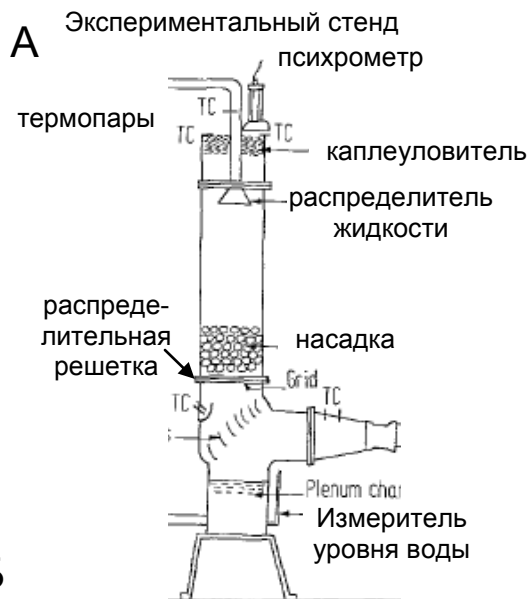
**Рисунок 5.** Эффективность процесса охлаждения воды и использования воздушного потока в градирне как функции характеристического числа  $\Lambda$ . Влияние числа секций в ГПН.



**Рисунок 6.** Эффективность процесса охлаждения воды в ГПН как функции характеристического числа  $\Lambda$ .  
 А – Влияние  $f_{opp}$  для одноярусной колонны с ПН;  
 Б – Влияние высоты опорно-распределительной решетки  $H_{opp}$ .

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>

Конфигурация элемента насадочного слоя, материал и основные свойства



Влияние соотношения контактирующих потоков на эффективность градирни ГПН

**Рисунок 7.** Сравнение рабочих характеристик градирен с подвижной насадкой ГПН (одно-русное расположение ПН) по данным работы Seetharamu K.N., Varier K.V.S. Performance of a fluidized bed cooling tower [6] и по данным настоящего исследования.

А – Схема экспериментального стенда [6];

Б – Типы и характеристики насадочных элементов в работе [6];

В – Эффективность водоохладителя ГПН:

Данные работы [6] получены для условия  $t_{ж}^1 = 43^\circ\text{C}$ ;

Данные авторов получены для условия  $t_{ж}^1 = 35^\circ\text{C}$ .



шем принята для одно- и двухъярусного оформления колонны. Оптимальное значение соотношения потоков газа и жидкости составляет  $1 = G_T/G_{ж} = 1.1-1.2$ , 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 [2] величина  $\Lambda$  составляла в среднем 0,8-1,0, при несколько более высоком значении эффективности процесса (для двухъярусного оформления колонны эффективности процесса в ГРН и ГПН практически совпадают).

Полученные экспериментальные данные могут быть представлены в виде:

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

где величина  $c \approx 0.85$  (ранее в работе [2] 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 обусловлен снижением величины реальной поверхности теплообмена (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 [6]. Следует отметить, что реальные данные по теоретическому и экспериментальному изучению процессов аэродинамики и теплообмена в подвижных трехфазных слоях немногочисленны и чаще всего соотнесены с малыми значениями определяющего размера элементов ПН [6-8]. Работа [6] посвящена изучению характеристик испарительных водоохлаждающих насадок 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  $H_{ст} = 0,1\text{м}$  в одноярусном оформлении колонны. Теоретическая кривая на рис. 7.В соответствует представлениям об «идеальной» модели водоохлаждающей. Видно, что наши данные и результаты работы [6] в интервале соотношений  $G_{ж} / G_T = 1-2$  достаточно близки, причем наши результаты хорошо соответствуют теоретической кривой. Для величины  $G_{ж} / G_T = 1$  получено самое высокое значение степени охлаждения воды  $E_{ж} = 60\%$ . Все остальные типы насадочных элементов по работе [6] соответствуют очень большим отношениям  $1 / (G_{ж} / G_T)$  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».

#### IV. ВЫВОДЫ

1. На основании проведенного эксперимента сделан вывод о нецелесообразности роста  $f_{орп}$  выше 0,75, что говорит о принципиальной важности

ОРП в деле равномерности распределения воздушного потока на входе в рабочую колонну; оптимальная высота ОРП составляет величину 0,1м. и была в дальнейшем принята для одно- и двухъярусного оформления колонны; для ОРП, выполняемой в виде теплообменника, рекомендовано:  $f_{орп} = 0.35-0.55$ , при высоте ОРП/т-о 0.05-0.2;

2. Впервые, в рамках настоящего экспериментального исследования, были изучены такие важные вопросы, как:

– влияние параметров опорно-распределительной решетки (живого сечения и высоты ОРП) на поведение слоя (рис. 6); в конечном итоге, в качестве оптимального рекомендовано значение  $f_{орп} = 75\%$ , как для одно- так и для двухъярусного оформления колонны;

– влияние высоты ОРП на поведение слоя (рис. 6); в конечном итоге, в качестве оптимального рекомендовано значение  $h_{орп} = 0,1-0,2\text{м}$ , как для одно- так и для двухъярусного оформления колонны;

– влияние перехода на одно- и двухъярусное оформление колонны аппарата; рекомендовано для оформления аппаратов осушительного контура двухъярусное оформление колонны (абсорбера АПН и десорбера ДПН), для продуктовой градирни также двухъярусное оформление колонны (ГПН/пр), для воздухоохладителя ВПН и градирни технологического назначения (обслуживающей абсорбер градирни ГПН/т) одноярусное оформление колонны;

– влияние высоты стационарной насадки  $H_{ст} = 0,1$  и  $0,16\text{м}$  (рис. 4);

3. Установлено, что величина  $E_T$  для подвижного слоя оказывается достаточно высокой (сравнительно с эффективностью  $E_T$  для градирни с регулярной насадкой пленочного типа), что указывает на существование резерва повышения эффективности процесса в целом и на перспективность перехода к двухъярусному оформлению колонны; можно отметить, что увеличение числа ярусов приводит к росту эффективности по охлаждаемой воде и в меньшей степени сказывается на степени использования воздушного потока;

4. Полученные экспериментальные данные могут быть представлены в виде зависимостей для степени охлаждения воды  $E_{ж} = c(1 - e^{-1.1\Lambda})$ , и степени использования воздуха  $E_T = c(1 - e^{-1.1\Lambda})\Lambda^{-1}$ , где величина  $c \approx 0.85$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Горин А.Н., Дорошенко А.В., Глауберман М.А. Солнечная энергетика (Теория, разработка, практика). – Донецк: Норд-Пресс, 2008. – 374 с.
2. Дорошенко А.В. Компактная теплообменная аппаратура для холодильной техники (теория, расчет, инженерная практика). Докторская диссертация, Одесский институт низкотемпературной техники и энергетике. Одесса. - 1992. – т. 1. – 350 с., т. 2. – 260 с.

3. **Дорошенко А.В., Васютинский С.Ю., Филлин С.О., Закшевский Б.** Испарительные охладители в альтернативной энергетике. – Щецин: ZAPOL, 2012. – 440 с.
4. **Дорошенко А.В., Васютинский С.Ю., Данько В.П.** Исследования процессов в тепломассообменных аппаратах с подвижной насадкой для солнечных многофункциональных систем. Физика аэродисперсных систем, вып. № 49, 2012.
5. **Grandov A., Doroshenko A.** Cooling Tower with Fluidized Beds for Contaminated Environment. Int. J. Refrig., vol. 18, no. 8, 1995. - P. 512-517.
6. **Seetharamu K.N., Varier K.V.S.** Performance of a fluidized bed cooling tower using bed materials of

various configuration. *Warme- und Stoffubertragung*, vol. 22, 1988. P. 219-222.

7. **Sisupalan N., Seetharamu K. N.** Heat transfer and pressure drop in fluidized bed cooling tower. *Warme- und Stoffubertragung*, vol. 27, 1992, P. 499-503.

8. **Laszuk A., Berengarten M. G.** Modeling of Heat Transfer in a Three-Phase Fluidized-Bed Apparatus. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, vol. 35, 2001, No. 3, P. 312–315.

---

Получена в редакции 18.02.2013, принята к печати 22.02.2013