

Аэротермические испытания регулярной насадки из гофрированных полимерных труб

Александр Пушнов,

Екатерина Петрашова

*Московский государственный
университет инженерной экологии,
Старая Басманная ул., д. 21/4,
105066 Москва
E-mail: petrashova86@list.ru*

Стасис Шинкунас

*Каунасский технологический
университет,
ул. К. Донелайчио 20–225,
LT-44239 Каунас*

Экспериментально исследован процесс испарительного охлаждения на регулярной насадке, изготовленной из гофрированных трубчатых полимерных элементов. Высота блоков насадки изменялась с 0,45 до 2,4 м. Скорость воздушного потока составляла 2,0 м/с. Плотность орошения изменялась от 6,0 до 12,0 м³/(м²·ч) при относительном расходе воздуха $\lambda = 0,5$ и 1,0 и температуре горячей воды 32–35 °С. Экспериментально установлены потери напора и температура охлажденной воды. Результаты опытов представлены в виде зависимости чисел Меркеля и коэффициентов гидравлического сопротивления от высоты блоков насадки.

Ключевые слова: насадка, испарительное охлаждение, гидравлическое сопротивление, пленка жидкости

ВВЕДЕНИЕ

Тип насадки и ее расположение в аппарате влияют на гидравлический режим и эффективность работы абсорбера. К насадкам, применяемым для заполнения колонн, предъявляются следующие основные требования [1]:

- высокая эффективность;
- низкое гидравлическое сопротивление;
- технологичность при крупносерийном производстве;
- широкий интервал устойчивой работы;
- высокая пропускная способность;
- низкая удерживающая способность.

Применительно к процессу испарительного охлаждения все вышеуказанные требования, хотя некоторые из них противоречивы, являются важными, особенно большая степень охлаждения и низкие энергетические затраты для осуществления процесса фазового превращения.

Применительно к процессам массообмена в насадочных колоннах важно получить более высокие значения

коэффициентов массопередачи и степени извлечения. Все эти параметры в совокупности определяют высокую эффективность процесса массообмена. Для осуществления последнего также важно достичь приемлемого гидравлического сопротивления, высокой пропускной способности, небольшой величины обратного перемешивания [2, 3].

Для осуществления процесса испарительного охлаждения в промышленных градирнях в настоящее время используются разнообразные регулярные насадки пленочного типа. Наибольшее распространение получили насадки, выполненные из вертикальных гофрированных полимерных листов. Горизонтально или наклонно расположенные гофры на поверхности насадки, представляющие собой элементы регулярной шероховатости, позволяют интенсифицировать процессы тепломассообмена в аппарате [4, 5].

Поэтому важно изучить процессы, происходящие в регулярных насадках, изготовленных из гофрированных полимерных труб.

СТЕНД И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Опыты проводили на стенде, схема которого представлена на рис. 1. Применялась колонна опытного аппарата прямоугольного сечения высотой 2,5 м.

Контролировались плотность орошения охлаждающей воды, ее температура на входе и выходе из аппарата. Кроме того, измерялись потери давления в слое насадки, а также расход воздушного потока, температура и относительная влажность наружного воздуха и давление атмосферного воздуха. Методика экспериментов описана в работе [6].

В опытах использовали регулярную насадку, выполненную из гофрированных полимерных труб наружным диаметром 63 мм с элементами различной высоты $h_{op} = 0,45-2,4$ м. В испытанных блоках регулярной на-

садки соседние трубы устанавливались с зазором между ними на величину, соизмеримую с радиусом гофра, что обеспечивало омывание контактирующим потоком всей наружной и внутренней поверхности гофрированных труб. Комплектование труб в элементах (блоках) было выполнено по четырем схемам, общий вид которых представлен на рис. 2 и описание в табл. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

Результаты испытаний при расчетной скорости воздушного потока в полном сечении аппарата без насадки $w_0 = 2$ м/с и при плотности орошения $q = 8,0$ и $10,0$ м³/м² · ч и относительном расходе воздуха $\lambda = 0,5$ и $1,0$ представлены в табл. 2–5 и на рис. 3, 4.

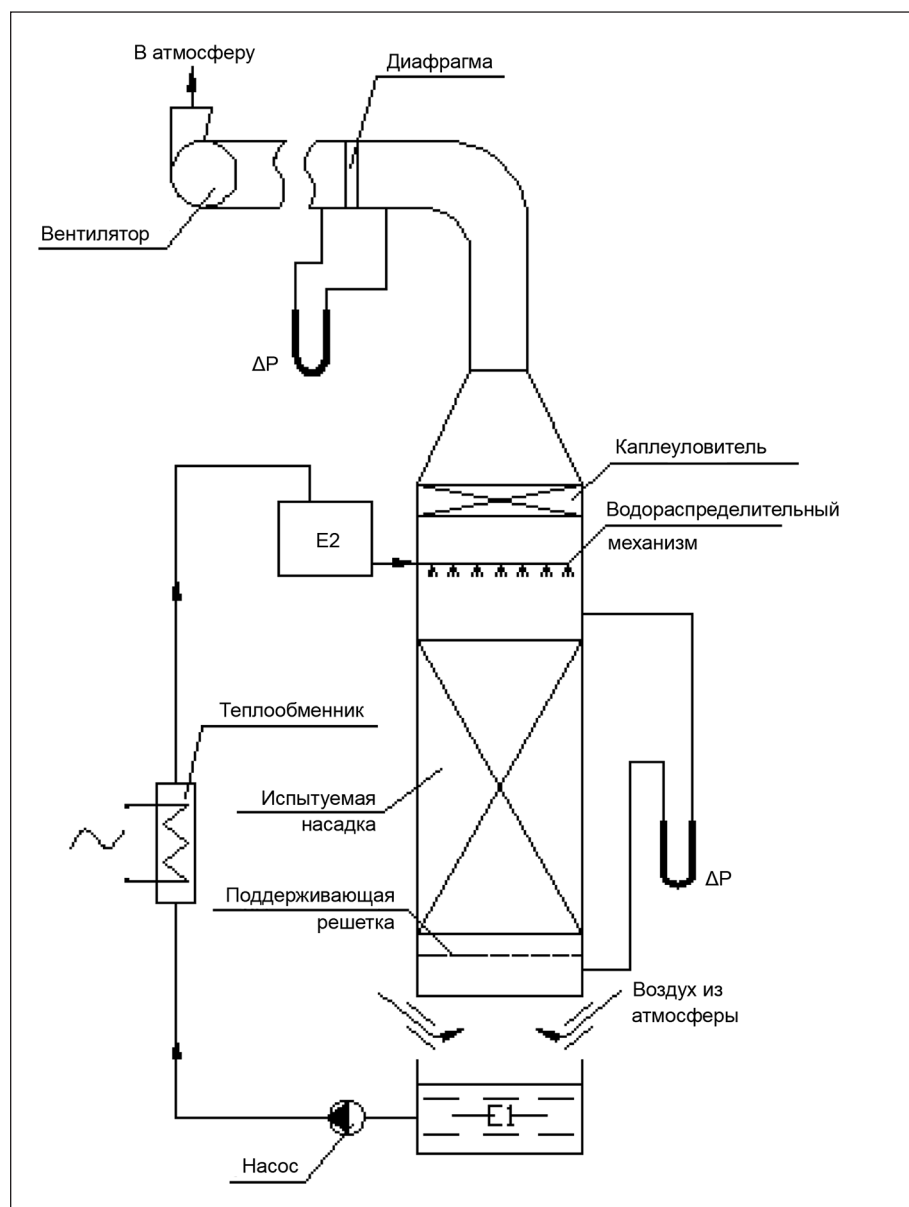


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

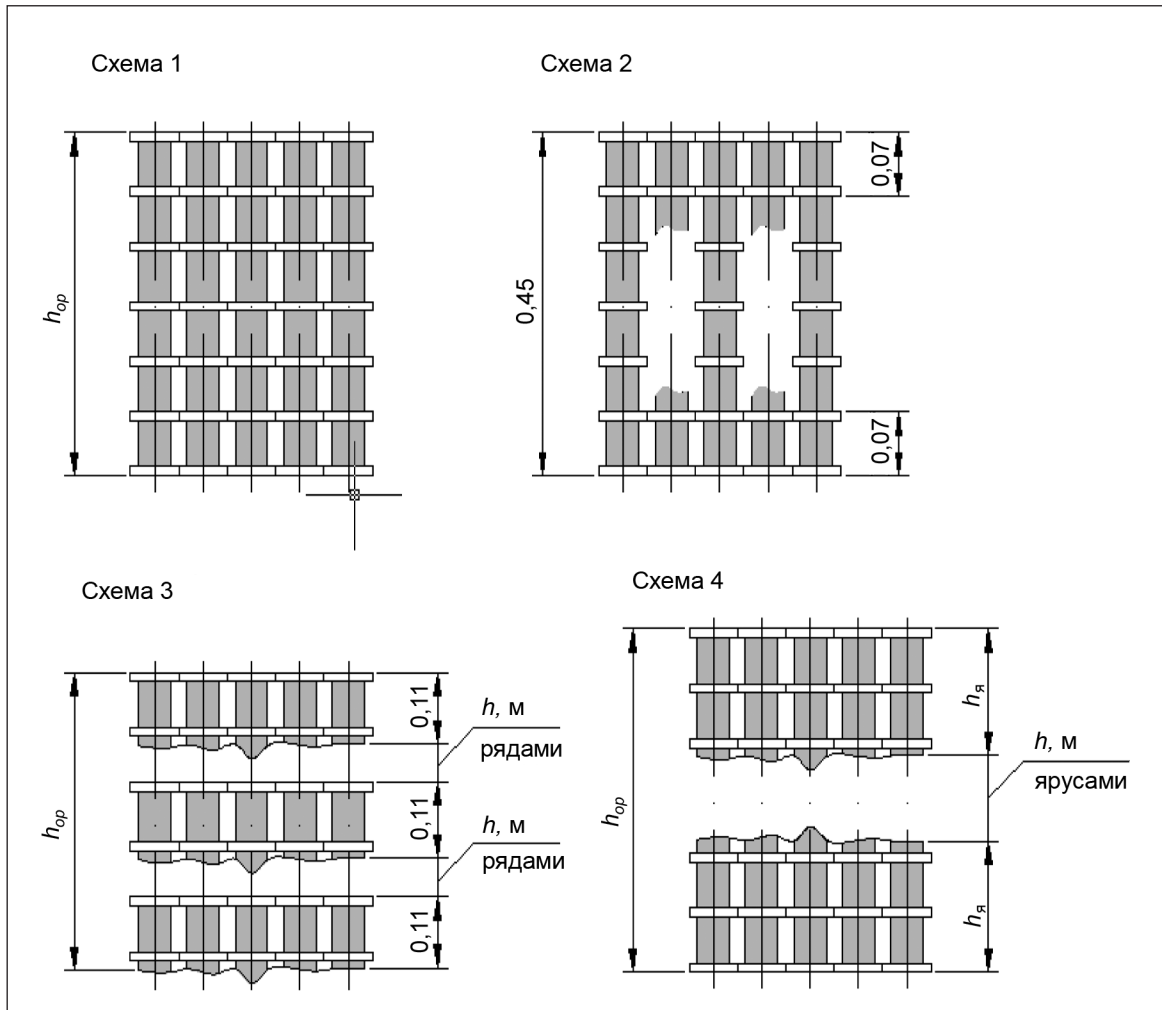


Рис. 2. Схемы блоков испытуемой насадки

Таблица 1. Описание блоков испытуемой насадки

Схема	Описание
1	Сплошные трубы по всей высоте ($h_{op} = 0,45-2,4$ м)
2	Чередующиеся длинные (0,45 м) и короткие (0,07 м) по торцам блока трубы (высота отдельного блока 0,45 м, $h_{op} = 0,45, 0,9$ и 1,7 м)
3	Короткие (0,11 м) трубы ($h_{op} = 0,45-1,6$ м, расстояние между рядами 0,06 и 0,23 м)
4	Сплошные трубы на высоту яруса ($h_{op} = 1,95$ и 2,4 м)

Таблица 2. Результаты испытаний укладки по схеме 1

$h_{op}, м$	ξ_{op}		$\beta_{хв}, кг/(м^3 \cdot с)$		Me	
	$q = 8,0 м^3/м^2 \cdot ч$	$q = 10,0 м^3/м^2 \cdot ч$	$\lambda = 0,5$	$\lambda = 1,0$	$\lambda = 0,5$	$\lambda = 1,0$
0,45	6	7	0,49	0,73	0,35	0,53
0,45	7	7	0,44	0,67	0,32	0,48
0,8	9	10	0,41	0,63	0,53	0,81
1,6	12	13	0,38	0,58	0,98	1,48
2,4	17	18	0,38	0,57	1,45	2,2

Таблица 3. Результаты испытаний укладки по схеме 2

$h_{op}, м$	ξ_{op}		$\beta_{хв}, кг/(м^3 \cdot с)$		Me	
	$q = 8,0 м^3/м^2 \cdot ч$	$q = 10,0 м^3/м^2 \cdot ч$	$\lambda = 0,5$	$\lambda = 1,0$	$\lambda = 0,5$	$\lambda = 1,0$
0,45	6	7	0,49	0,73	0,35	0,53
0,9	9	10	0,36	0,54	0,52	0,79

Таблица 4. Результаты испытаний укладки по схеме 3

$h_{оп}, м$	$\xi_{оп}$		$\beta_{лп}, кг/(м^3 \cdot с)$		Me	
	$q = 8,0 м^3/м^2 \cdot ч$	$q = 10,0 м^3/м^2 \cdot ч$	$\lambda = 0,5$	$\lambda = 1,0$	$\lambda = 0,5$	$\lambda = 1,0$
0,45	6	7	0,56	0,84	0,4	0,61
0,6	7	8	0,47	0,72	0,45	0,69
0,95	10	11	0,45	0,68	0,69	1,05
1,7	11	12	0,34	0,51	0,92	1,4
0,45	5	6	0,49	0,76	0,35	0,55
1,6	–	–	0,29	0,43	0,74	1,11

Таблица 5. Результаты испытаний укладки по схеме 4

$h_{оп}, м$	$\xi_{оп}$		$\beta_{лп}, кг/(м^3 \cdot с)$		Me	
	$q = 8,0 м^3/м^2 \cdot ч$	$q = 10,0 м^3/м^2 \cdot ч$	$\lambda = 0,5$	$\lambda = 1,0$	$\lambda = 0,5$	$\lambda = 1,0$
1,7	9	10	0,19	0,29	0,52	0,79
1,95	10	11	0,225	0,34	0,71	1,08
2,4	14	15	0,23	0,35	0,9	1,37

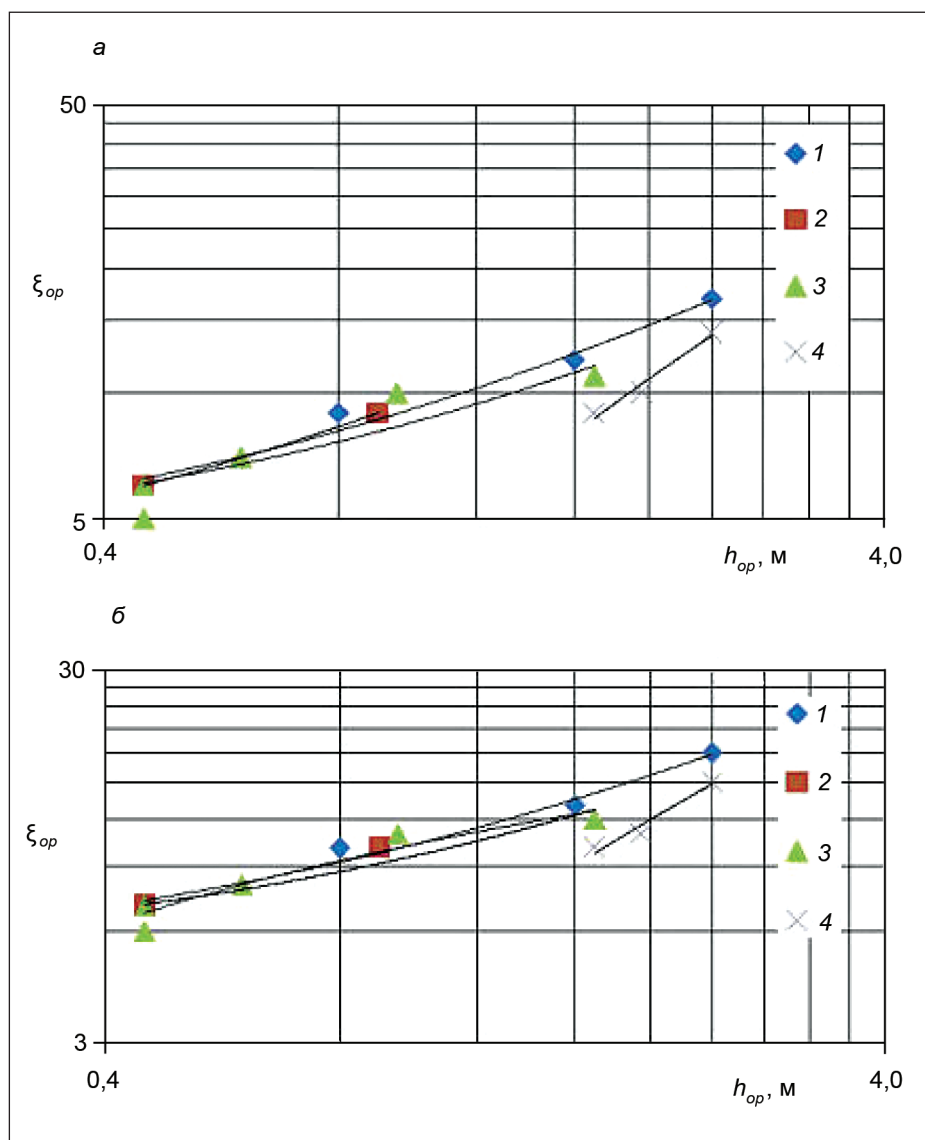


Рис. 3. Зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от высоты блока насадки $\xi_{оп} = f(h_{оп})$: а – при $q = 8,0 м^3/м^2 \cdot ч$; б – при $q = 10,0 м^3/м^2 \cdot ч$. 1, 2, 3, 4 – схемы (см. рис. 2)

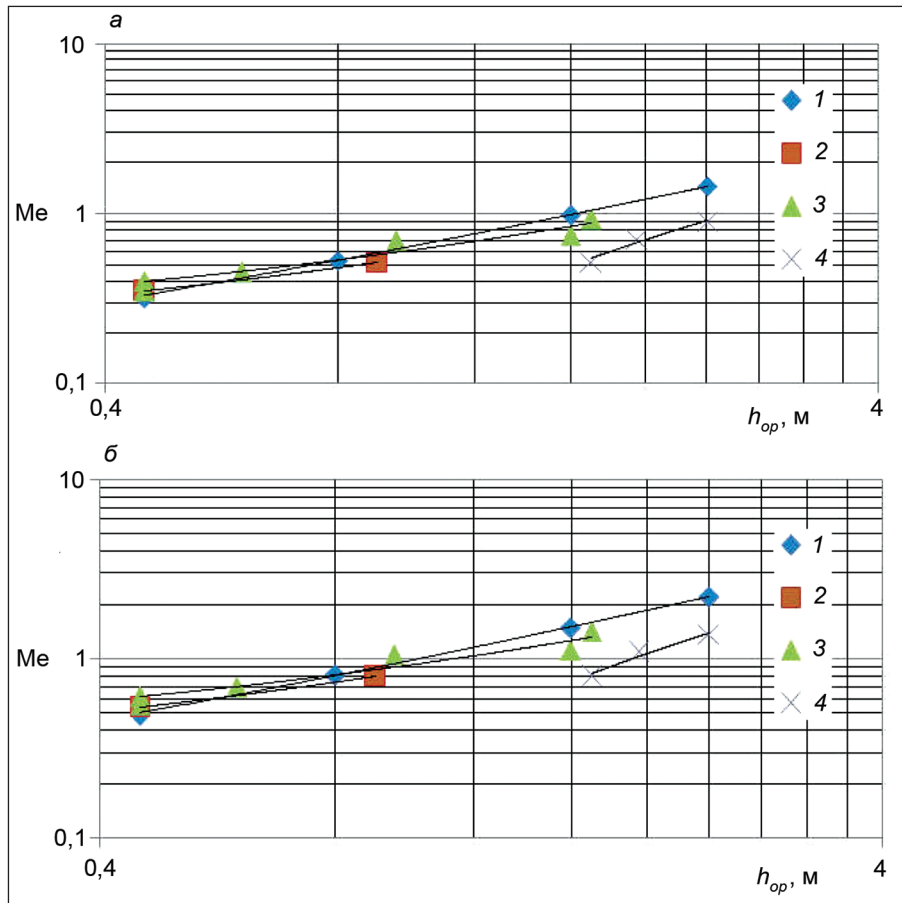


Рис. 4. Зависимости числа Me от высоты блока насадки $Me = f(h_{op})$: а – при $\lambda = 0,5$; б – при $\lambda = 1,0$

Коэффициент гидравлического сопротивления определялся по формуле:

$$\xi_{op} = \frac{2\Delta P}{W_0^2 \cdot \rho_B} \quad (1)$$

Число Меркеля (Me) определяется по формуле:

$$Me = \frac{1,61 \cdot \beta_{xv} \cdot h_{op}}{q} \quad (2)$$

Установлено, что максимальные значения коэффициента аэродинамического сопротивления составляют $\xi_{op} = 17-18$ ($h_{op} = 2,4$ м).

Результаты показали, что наивысшее значение коэффициента гидравлического сопротивления при идентичных высотах достигается при укладке по схеме 1 (рис. 1), которая также характеризуется и наибольшим значением числа Me .

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ЭЛЕМЕНТОВ НАСАДКИ НА ТОЛЩИНУ ПЛЕНКИ СТЕКАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ

В Каунасском технологическом университете проведены измерения толщины пленки трансформаторного масла,

гравитационно стекающей по вертикальной гофрированной поверхности [7]. Как и следовало ожидать, безразмерная толщина пленки η_δ при ее течении по вертикальному участку может быть рассчитана по уравнению, полученному из известного закона В. Нуссельта, описывающего закон распределения скорости поперек пленки [8]. Уравнение для расчета безразмерной толщины пленки имеет вид [7]:

$$\eta_\delta = (3/4 Re)^{1/2} \quad (3)$$

Число Рейнольдса пленки определяется по формуле:

$$Re = \frac{\bar{W} \cdot d}{\nu} \quad (4)$$

На рис. 5 представлены обобщенные результаты опытов, обработанные согласно работе [7], по измерению толщины пленки жидкости, стекающей по гофрированной поверхности.

Уравнения для расчета толщины пленки приводятся ниже.

При течении по выпуклому участку поверхности:

$$\eta_\delta = (0,68 Re)^{0,5} \quad (5)$$

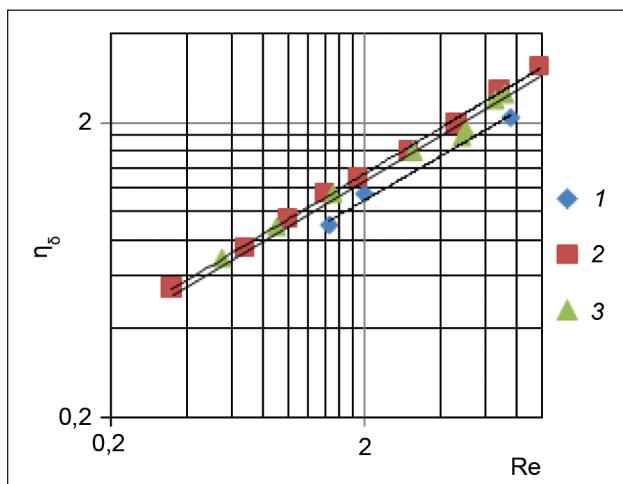


Рис. 5. Безразмерная толщина ламинарной пленки трансформаторного масла при течении по гофрированной поверхности по результатам опытов: 1, 2, 3 – выпуклая, вогнутая, ровная вертикальная поверхность (соответственно)

При течении по вогнутому участку поверхности:

$$\eta_{\delta} = (0,83 \text{ Re})^{0,5}. \quad (6)$$

При течении по ровному вертикальному участку поверхности:

$$\eta_{\delta} = (0,75 \text{ Re})^{0,5}. \quad (7)$$

Установлено, что уравнение (7) совпадает с результатами, полученными ранее в работе [7] для гравитационного течения пленки жидкости по ровному участку вертикальной поверхности, а уравнения (5) и (6) отличаются лишь величиной коэффициентов при числах Рейнольдса.

Результаты проведенных опытов по обтеканию гравитационной пленки воды элемента гофрированной насадки подтвердили установленную в работе [7] закономерность. Можно предполагать, что уменьшению толщины пленки жидкости на выпуклых частях обтекаемой гофрированной поверхности и, наоборот, увеличению толщины во впадинах способствуют силы поверхностного натяжения. При этом в исследуемом случае впадина практически совпала с вертикальным ровным участком гофрированной трубы.

ВЫВОДЫ

Получены результаты экспериментального исследования процесса испарительного охлаждения на регулярной насадке, изготовленной из гофрированных трубчатых полимерных элементов наружным диаметром 63 мм. Результаты опытов представлены в виде зависимости чисел Меркеля и коэффициентов гидравлического сопротивления от высоты блоков насадки и могут быть полезны при проектировании насадочных установок.

Условные обозначения

- ξ_{op} – коэффициент гидравлического сопротивления;
 ΔP – потери напора, Па ($\text{кг}/\text{м} \cdot \text{с}^2$);
 w_0 – скорость воздушного потока в расчете на полное сечение пустого аппарата;
 ρ_v – плотность воздуха (в условиях наших опытов принималась $\rho_v = 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$);
 Re – число Рейнольдса;
 Me – число Меркеля;
 β_{xv} – объемный коэффициент массоотдачи, $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$;
 q – плотности орошения, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$;
 h_{op} – высота блока насадки, м;
 λ – относительный расход воздуха;
 \bar{W} – средняя скорость стабилизированного течения пленки жидкости, м/с;
 ν – кинематический коэффициент вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$;
 d – эквивалентный диаметр пленки или трубы, м.

Поступило 12 07 2011

Принято 05 09 2011

Литература

1. Колев Н., Винклер К., Даракчиев Р., Брош З. Создание эффективных насадок для колонных аппаратов на основе теории массообменных процессов. *Химическая промышленность*. 1986. № 8. С. 41–45.
2. Алексеенко С. В., Маркович Д. М., Евсеев А. Р., Бобылев А. В., Тарасов Б. В., Карстен В. М. Экспериментальное исследование распределения жидкости в колонне со структурными насадками. *Теоретические основы химической технологии*. 2007. Т. 41. № 4. С. 442–448.
3. Каган А. М., Пушнов А. С., Рябушенко А. С. Сравнение эффективности промышленных насадок для испарительного охлаждения оборотной воды в градирнях. *Химическая промышленность сегодня*. 2007. № 4. С. 44–48.
4. Пушнов А. С., Каган А. М., Шинкунас С., Гимбутите И., Витковская Р. Ф., Трусов М. С., Шишов В. И. Влияние геометрии регулярной насадки из полимерной сетки на ее тепло- и массообменные характеристики. *Химическая промышленность*. 2009. Т. 86. № 5. С. 227–240.
5. Pushnov A., Baranova E., Socolov A., Petrashova E., Shustikov A., Generozov S. Influence of geometry of a packing on affiance of process of vaporize cooling in cooling-towers of compressor station of the agricultural enterprises. *Proceedings of the International Conference "Biosystems Engineering and Processes in Agriculture", September, 2008*. Raudondvaris, 2008. P. 246–253.
6. Сухов Е. А., Шишов В. И. Влияние относительной влажности воздуха на тепловые характеристики оросительного устройства градирни. ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. 1991. Т. 224. С. 57–60.

7. Гимбутис Г. Теплообмен при гравитационном течении пленки жидкости. Монография. Подред. А. Жукаускаса. Вильнюс: Мокслас, 1998. 186 с.
8. Nusselt W. Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes. *Zeitschrift VDI*. 1916. Bd. 60. S. 541–546.

Aleksandr Pušnov, Jekaterina Petrašova, Stasys Šinkūnas

GOFRUOTŲ POLIMERINIŲ VAMZDŽIŲ TAISYKLINGOS ĮKROVOS AEROTERMINIAI TYRIMAI

Santrauka

Straipsnyje pateikiami garinamojo aušinimo proceso, vykstančio taisyklingoje gofruotų polimerinių vamzdžių įkrovoje, eksperimentinio tyrimo rezultatai. Įkrovos blokų aukštis kito nuo 0,45 iki 2,4 m. Oro srauto greitis lygus 2,0 m/s. Drėkinimo tankis kito nuo 6,0 iki 12,0 m³ / (m² · h). Santykinis oro debitas $\lambda = 0,5$ ir $\lambda = 1,0$. Karšto vandens temperatūra buvo palaikoma 32–35 °C. Eksperimento metu nustatyti slėgio nuostoliai ir ataušinto vandens temperatūra. Eksperimentiniai rezultatai pateikti Merkelio skaičiaus ir hidraulinio pasipriešinimo koeficiento priklausomybės nuo įkrovos blokų aukščio pavidalu.

Raktažodžiai: įkrova, garinamasis aušinimas, hidraulinis pasipriešinimas, skysčio plėvelė

Alexandr Pushnov, Yekaterina Petrashova, Stasys Šinkūnas

AEROTHERMAL TESTS OF REGULAR PACKING MADE OF CORRUGATED POLYMERIC PIPES

Summary

Results of an experimental research of the vaporized cooling process on a regular packing made of corrugated tubular polymeric elements are presented. The height of blocks of the packing varied from 0.45 m to 2.4 m. The velocity of the air stream was 2.0 m/s. The irrigation density varied within 6.0 to 12.0 m³ / (m² · h). The relative rate of air $\lambda = 0.5$ and 1.0. The temperature of hot water was 32–35 °C. During the experiments, losses of pressure and chilled water temperature were estimated. The results of experiments are presented in the form of the dependence of the Merkel numbers and the factors of hydraulic resistance on the height of blocks of the packing.

Key words: packing, vaporized cooling, hydraulic resistance, liquid film