

ВЛИЯНИЕ НА ФИЗИКОХИМИЧНИТЕ СВОЙСТВА НА ТЕЧНАТА ФАЗА ВЪРХУ ПРОКАПВАНЕТО Й В СВОБОДНОТО СЕЧЕНИЕ НА КОЛОННИ АПАРАТИ, ЗАПЪЛНЕНИ С ПЪЛНЕЖИ С ВЕРТИКАЛНИ СТЕНИ

Елена Разказова-Велкова, Даниела Джонова-Атанасова

INFLUENCE OF THE PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF THE LIQUID PHASE ON ITS LEAKAGE IN THE FREE VOLUME SECTION OF COLUMN APPARATUSES FILLED WITH VERTICALLY WALLED PACKINGS

Elena Razkazova-Velkova, Daniela Dzhonova-Atanasova

ABSTRACT: Among all types of packings for packed-bed columns, the vertical-wall honeycomb packings show the lowest pressure drop per transfer unit, i.e. the lowest energy consumption for carrying out absorption processes. A limitation for its practical application is the possibility for tearing of the liquid film flowing over the packing's wall and its leakage in the free volume of the packing in the form of drops and trickles. This leads to two effects. The first one is positive, related to the increasing of the total interphase surface area due to the additional surface of the drops and trickles. The second effect is negative, because of the increasing rate of longitudinal mixing in the liquid phase due to the different velocity of the liquid film and leaking liquid. The influence of the viscosity and surface tension of the liquid phase over the leakage from packings manufactured from different materials is studied. The maximum dimension of the various packings that does not allow leakage is shown and equations for its calculation are derived.

Key words: Packed-bed columns, Vertical-wall packings, Leakage of the liquid phase

Въведение

Колоните с пълнеж са едни от най-разпространените апарати за провеждане на топло и масообменни процеси. Причините за това са простото им устройство, лесната им поддръжка и най-вече фактът, че позволяват водене на процеса при условия близки до пълния противоток т.е. на практика при максимална движеща сила на процеса. Пълнежите с вертикални стени и особено тип “пчелна пита” се характеризират с най-ниско съпротивление за една преносна единица. Причина, ограничаваща тяхното разпространение, е опасността от прокапване на течната фаза. Прокапването представлява откъсване на част от течната фаза, стичаща се под формата на филм върху пълнежите стени и пропадането й в свободното сечение на пълнежа. Когато това явление съществува води до два ефекта, свързани с работата на апарата. Първият е положителен и е свързан с увеличаване на ефективната повърхност на пълнежа за сметка на повърхността на прокапалите капки и струйки, а вторият -отрицателен и поради увеличаване на надлъжното смесване в апарата, тъй като прокапалата течност има различна скорост от тази, на стичащата се по пълнежа. При работа при ниски плътности на оросяване, увеличаването на междуфазната повърхност е незначително. В този случай, обаче влиянието на надлъжното смесване е изключително голямо поради малката височина на преносната единица. Целта на настоящата работа е да изследва опасността от прокапване на течната фаза, както и на нейните физикохимични свойства като повърхностно напрежение и вискозитет при различни материали, подходящи за изработване на пълнежи. В изследването са използвани освен класическите керамика, неръждаема стомана и полистирол и два нови материала.

Постановка на експеримента

Стичането на течността по вертикален добре омокрен пълнежен елемент може да бъде представено [4] като стичане на струя по вертикална пластина. Схематично това е дадено на фигура 1 а, където 1 е самата пластина, 2- течния филм, а 3, своеобразен “канал”, образуван от задържана вследствие на капилярни сили течна фаза в долната част на пластината 1.

На практика, ясно оформен канал се образува само при добре омокряемите материали. Откъсването на течността от пластината става от каналчето 3. На фиг.1 б е посочен разрез от пластината от фиг.1 а, при оросяване на двете ѝ страни. При спиране на оросяването течният филм изтича, а върху пластината 1 остава само “каналът” 3. Ако към долния край на пластината 1 долепим двете пластини 4, перпендикулярни към нея, вследствие на взаимодействието между капилярните, вискозните и инерционните сили съществуват следните две възможности:

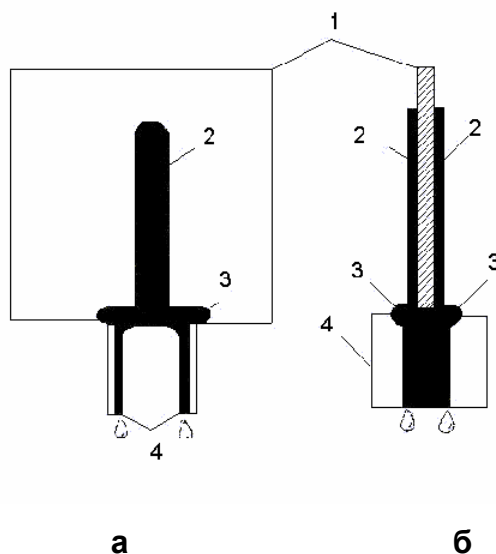
1. При преобладаващо действие на капилярните сили в долния край на пластината 2, при добре омокрените материали, се образува “каналът” 3, през който течността се движи в хоризонтална посока към пластините 4 без да прокапва

2. При преобладаващо действие на инерционните сили, т.е. при големи дебита на течността, отнесени за единица ширина на течния филм, както и при по-голямо разстояние между пластините 4, течността прокапва между пластините.

Тъй като пренасянето на течността към пластините 4 е свързано с хидравличното съпротивление на “канала” 3, а това съпротивление от своя страна зависи от дължината на този канал, разстоянието между пластините 4 ще окаже съществено влияние върху прокапването на течната фаза.

От направените разсъждения е ясно, че съществуват разстояния между пластините 4 и дебита на течната фаза, отнесени към единица ширина на филма, при които течността няма да прокапва между пластините 4, както и че съществуват такива условия, при които тя винаги ще прокапва.

Тъй като пластините 4 могат да се разглеждат като стени на по-долу лежащия пълнежен елемент, от разстоянието между тях, при което течността няма да прокапва, можем да съдим дали в реалния пълнеж ще има или няма да има прокапване. Следователно от направените по-горе разсъждения се вижда, че схемата



Фиг. 1. Схема на стичане на течностен филм по пластина от добре омокряем материал.

1-пластина от изследвания материал, 2- течностен филм, 3-капилярно каналче, образувано по ръба на изследвания материал, 4-пластини, разположени

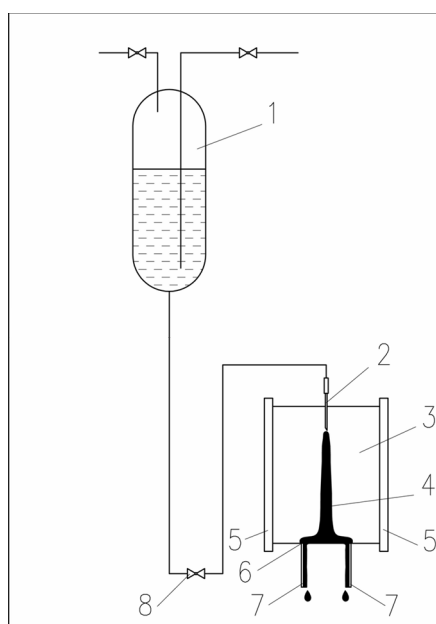
перпендикулярно на ръба на изследвания материал и симетрично по отношение на оста на стичащия се течностен филм.

дадена на фиг. 1а може да се разглежда като един опростен, но все пак достатъчно точен физически модел на явленията, които се извършват в самия пълнеж, във връзка с процапването. Доколкото точното математично решаване на проблема е сравнително трудно, а експеримента - сравнително прост, за решаването на задачата беше избран експерименталния подход

Експеримент

Схемата на експерименталната инсталация е представена на Фиг. 2. Тя включва съда на Мариот 1, осигуряващ постоянен дебит. Пластина от изследвания материал 3 е закрепена върху рамката 6. Посредством иглата от спринцовка 2 се подава оросяващата течност, която формира течностния филм 4. Пластините 7 са разположени симетрично на оста на филма 4, за отвеждане на течността от каналчето 6. Измерваше се най-голямото (критично) разстояние между пластинките 7 (l_{max}), при което течността не се стича в пространството между тях, а само върху тяхната повърхност. Дебитът на течността се контролираше допълнително обемно чрез събирането му с помощта на мерителен цилиндър. Тъй като действието на капилярните сили зависи от това дали пластината е суха или е била предварително изцяло омокрена, изследванията се проведоха както при първоначално суха, така и при първоначално изцяло омокрена пластина. Експериментите се проведоха за следните материали.

1. Лист от поцинкована ламарина;
2. Лист от неръждаема стомана;
3. Лист от силно порьозен, синтерован PVC;
4. Лист от материала KR, синтезиран от нас специално за целта, на базата на фенол-формалдехидна смола.
5. Керамична плочка.



Фиг. 2. Схема на експериментална инсталация за определяне на опасността от процапване.

1-съд на Мариот, 2-игла от спринцовка, 3- пластина от изследвания материал, 4– течностен филм, 5- рамка за закрепяне на изследвания материал, 6-капилярно каналче, образувано на ръба на изследвания материал, 7-пластини, разположени симетрично на оста на течностния филм, за отвеждане на течността от капилярното каналче, 8-вентил за задаване на определен дебит.

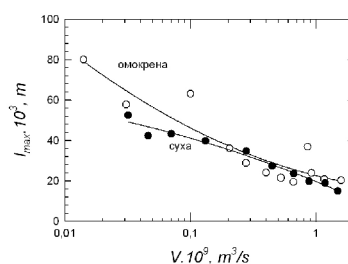
Физикохимичните свойства на използваните течности са дадени в Таблица 1. Като повърхностно активно вещество (ПАВ) беше използван воден разтвор на Epicol ESC70 (алкилетерсулфат Na-сол R-O-(CH₂ CH₂ O)₃-SO₃Na R-C₁₂-C₁₄)

Таблица 1. Физикохимични свойства на използваните течности

Система	Състав	Плътност ρ	Вискозитет μ	Повърхностно напрежение σ
	Об. %	g/cm^3	$mPa.s$	mN/m
вода	100	1	1	72.75
глицерол-вода	73	1.190	26.4	48.5
глицерол-вода	70	1.175	16.3	40.2
ПАВ	0.0025	1	0.9821	39.6

Резултати

На Фиг.3 е показано критичното разстояние като функция на дебита за суха и предварително омокрена керамика, оросявана с ПАВ. От нея се вижда, че предварителното омокряне съществено увеличава капилярното каналче, респективно критичното разстояние, при което не се наблюдава прокапване. Разликата между сухия и предварително омокрения материал е по-съществена при ниски дебита.



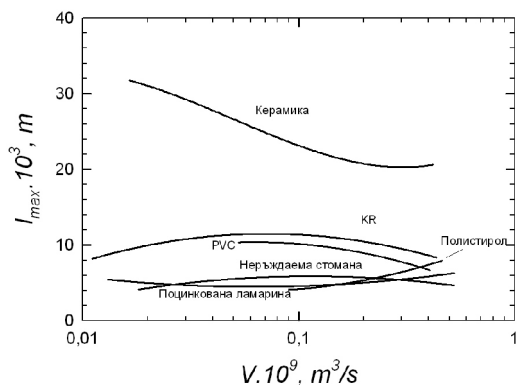
Фиг.3. Критичното разстояние (l_{max}) като функция на дебита за суха и предварително омокрена керамика, оросявана с ПАВ.

С увеличаване на вискозитета и намаляване на повърхностното напрежение на течната фаза при сухите материали се наблюдава увеличаване на максималното разстояние, при което не се наблюдава прокапване. При сухия порьозен PVC увеличаването на вискозитета води до намаляване на l_{max} . С увеличаване на вискозитета и намляване на повърхностното напрежение при предврително омокрените материали се наблюдава увеличаване на критичното разстояние. при порьозния, синтерован PVC, поцинкованата ламарина и неръждаемата стомана, докато при керамиката, материала KR се наблюдава намаляване. Освен това е

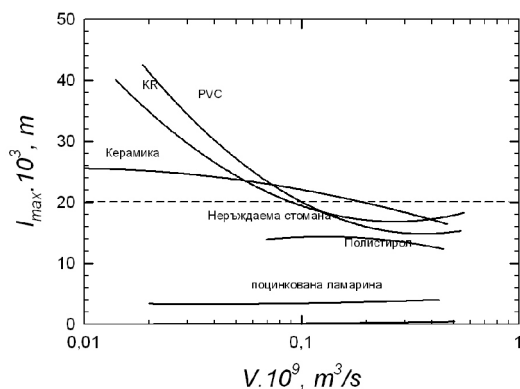
необходимо да се отбележи, че при предварителното омокряне повечето критичните разстояния са много близки за различните течности и са почти еднакви при едни и същи дебители.

При изследваните метали и полистирола широчината на максималното разстояние съвпада с течния филм, стичащ се по пластината. При някои течности не се образува дори и течен филм върху пластините, а оросяващата течност се стича под формата на отделни капки по повърхността ѝ.

Сравнението на материалите по отношение на критичното разстояние, при което не се наблюдава прокапване показва, че най-добри материали в това отношение са керамиката, материалът КР и синтерованият PVC. За различни течности или при предварително омокряне те разменят местата си (Фиг.4 и Фиг. 5)



Фиг.4. Сравнение на критичното разстояние (l_{max}) като функция на дебита за сухи материали, оросявани с течност с вискозитет 16.3 mPa.s.



Фиг.5. Сравнение на критичното разстояние (l_{max}) като функция на дебита за предварително омокряни материали, оросявани с течност с вискозитет 16.3 mPa.s.

Уравнения за изчисляване на максималното разстояние, при което не се наблюдава прокапване

Както беше споменато по-горе дължината на капилярното каналче в долната част на изследваната пластина, зависи изключително много от омокряемостта ѝ. Влиянието на физикохимичните свойства на течната фаза върху омокрената повърхност на пълнежите са обследвани в множество работи [1-3]. В източници [2,3] е направено сравнение между получените резултати. В [4] чрез измерване на широчината на течностния филм, стичащ се по пластини от същите материали и при същите течности, използвани за оросяване, са изведени безизмерни уравнения за определяне на широчината на течностния филм. Вида на уравненията е:

$$B/\delta = K.((Ca + VT^{-1})/Ca^{0.5}) \quad (1),$$

където:

B е широчината на течностния филм в m;

δ -дебелината на течностния филм в m;

Тя се изчислява по уравнението на Nusselt:

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{3G\mu}{\rho^2 g}} \quad (2),$$

където:

$G=L/B$ - е масовият дебит за единица омокрен периметър , kg/m s,

$L=V\rho$ -е масовият дебит , kg/s

V - подавания дебит, m³/s

μ е вискозитета на течната фаза; Pa s

ρ -плътността на течната фаза, kg/m³

$Ca = \frac{\mu v}{\sigma}$ е капилярното число;

$VT = v.\delta/V$ - безизмерно отношение

(3)

$v = \frac{\rho g \delta^2}{3\mu}$ -средна повърхностна скорост на филма, m²/s.

Таблица 2. Константа K за различните материали

Материал	Течност	K	R	Средна грешка %	Максимална грешка
Керамика суха	Вода	211,6	0,999	0,5	4,3
	Глицерол	293	0,994	0,4	4,1
	Глицерол	271	0,996	2,6	5,9
	ПАВ	286	0,999	0,54	1,6
Керамика омокрена	Вода	211,6	0,999	0,062	0,2
	Глицерол	305,1	0,999	0,5	1,5
	Глицерол	279,6	0,999	0,41	0,8
	ПАВ	525,6	0,999	0,3	0,6
KR сух	Вода	211,5	0,999	0,6	3,2
	Глицерол	293	0,995	4,7	9,2
	Глицерол	273	0,996	2,3	2,9
	ПАВ	285,8	0,999	0,7	1,8
KR омокрен	Вода	211,9	0,999	0,051	0,2
	Глицерол	308,3	0,999	0,4	1,1
	Глицерол	280,7	0,999	-	-
	ПАВ	287,33	0,999	0,3	0,5
PVC сух	Вода	209,3	0,999	1,1	3,2
	Глицерол	272	0,996	4	9,7
	Глицерол	485	0,987	4,2	7,9
	ПАВ	285,3	0,999	1,7	4,7
PVC омокрен	Вода	211,66	0,999	0,1	0,6
	Глицерол	305,5	0,996	0,5	1,5
	Глицерол	278,8	0,998	0,4	0,7
	ПАВ	286,4	0,999	0,1	0,2
Неръждаема стомана суха	Вода	208	0,999	1,02	1,9
	Глицерол	290	0,992	5,8	8,1
	Глицерол	267	0,991	3,7	4,2
	ПАВ	497	0,993	3,7	7
Неръждаема стомана Поцинкована ламарина суха	Вода	209,2	0,999	0,8	1,5
	Глицерол	305	0,999	0,5	1,3
	Вода	211	0,999	0,3	0,71
	Глицерол	289	0,992	4,9	8,1
Поцинкована ламарина омокрена	Глицерол	276	0,998	4,6	9,9
	ПАВ	284	0,999	2,5	5,1
	Вода	388,9	0,999	0,041	0,075
	Глицерол	554	0,998	0,9	1,4
Полистирол сух	Surfactant	524,3	0,999	0,3	0,6
	Вода	208,9	0,999	0,9	1,6
	Глицерол	277	0,982	3,2	4,4
	ПАВ	282	0,999	1,3	2,5
Полистирол омокрен	Глицерол	512	0,971	3,7	6,6
	16				

Отношението v/V е важна величина, както за формирането на течностния филм, така и за неговата дебелина. Константата K отчита и ъгъла на омокряне на различните материали, който е различен в зависимост от състоянието на изследваната пластина –суха или предварително омокрена. В Таблица 2 са дадени константите за различните материали, както средната и максималната грешка при определяне на широчината на течностния филм по уравнение (1).

За определяне на максималното разстояние, при което не се наблюдава прокапване от съществено значение освен омокряемостта на използвания материал е и стабилността на полученото каналче, т.е. неговата дебелина, грапавините на ръба на пластината, скоростта му на движение в хоризонтална посока. По тази причина безизмерните уравнения за определяне на l_{max} бяха търсени във вида:

$$\ln(l_{max}/\delta_1) = K.(B/\delta)^n VT_1^m \quad (4),$$

където:

δ_1 е дебелината на капилярното каналче, изчислена по уравнение (2), а отношението VT_1 е определено по уравнение (3), но за капилярното каналче.

Коефициента K включва в себе си и състоянието на ръба на пластините и тяхната грапавост, което е различно при сухи и предварително омокрени материали.

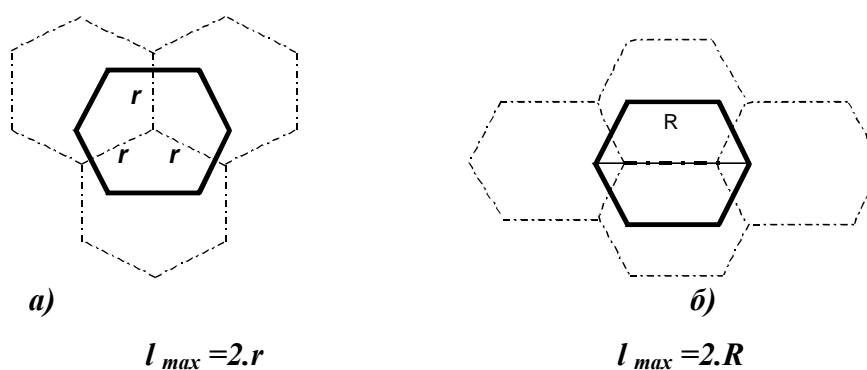
Степенните показатели и коефициента K , както и средната и максимална грешка на уравненията са дадени в Таблица 3.

Таблица 3. Степенни показатели и коефициент K от уравнение (4)

Материал	Течност	K	n	m	R	Средна грешка %	Максимална грешка
Керамика суха	Вода	0,12	0,3	0,42	0,998	4,92	6,05
	Глицерол	0,62	0,27	0,19	0,997	5,5	7,5
	Глицерол	0,62	0,3	0,25	0,995	4,3	6
	ПАВ	0,11	0,3	0,45	0,998	5,1	9,1
Керамика омокрена	Вода	0,07	0,3	0,54	0,998	4	10,4
	Глицерол	0,07	0,23	0,21	0,986	5	9,8
	Глицерол	0,37	0,18	0,3	0,999	2,1	3,9
	ПАВ	0,11	0,3	0,26	0,997	4,5	9,3
KR сух	Вода	0,42	0,27	0,21	0,998	2,5	6,1
	Глицерол	0,24	0,26	0,31	0,982	7,4	11
	Глицерол	1,23	0,2	0,1	0,997	2,1	3,4
	ПАВ	0,12	0,3	0,4	0,990	4,5	11,3
KR омокрен	Вода	0,03	0,43	0,59	0,970	5,4	11,4
	Глицерол	0,26	0,3	0,28	0,999	2,4	5,9
	Глицерол	0,17	0,3	0,4	-	5,7	13
	ПАВ	0,01	0,05	0,71	0,999	3,6351	7,045
PVC сух	Вода	1,24	0,2	0,08	0,993	4,1	7,7
	Глицерол	1,7	0,19	0,06	0,988	4,1	10,6
	Глицерол	0,35	0,39	0,15	0,999	4,08	7,3
	ПАВ	0,35	0,39	0,15	0,999	3,8	7,3
PVC омокрен	Вода	0,004	0,63	0,7	0,997	5	7,9
	Глицерол	0,093	0,41	0,39	0,999	2,8	5,1
	Глицерол	0,14	0,38	0,34	0,999	1,4	2,7
	ПАВ	0,003	0,9	0,56	0,999	2,4	3,4
Неръждаема стомана суха	Вода	2,44	0,2	-0,05	0,999	0,6	0,9
	Глицерол	6,13	0,07	-0,1	0,988	2,6	4,1
	Глицерол	0,05	0,29	0,53	1	-	-
	ПАВ	6,32	0,18	-0,18	0,99	3,6	8,1
Неръждаема стомана	Вода	2,37	0,19	-0,04	0,999	0,39	0,6
	Глицерол	1,7	0,17	0,03	0,985	2,9	7,7
Позинкована ламарина суха	Вода	1,58	0,21	0,016	0,999	0,35	0,63
	Глицерол	0,29	0,27	0,26	1	-	-
	Глицерол	2,21	0,24	-0,07	0,999	2,1	5,2
	ПАВ	3,97	0,2	-0,13	0,999	1,8	4,4
Позинкована ламарина омокрена	Вода	3,24	0,13	-0,03	0,999	0,3	0,6
	Глицерол	0,81	0,31	0,04	0,999	1,6	3,9
	ПАВ	0,037	0,46	0,47	0,999	2,9	5,7
	Глицерол	0,037	0,46	0,47	0,999	2,9	5,7
Полистирол сух	Вода	2,46	0,19	-0,04	0,999	0,65	0,89
	Глицерол	75,78	0,009	-0,47	0,984	4,1	6,8
	ПАВ	2,62	0,19	-0,048	0,999	0,4	0,8
Полистирол омокрен	Глицерол	1,35	0,11	0,12	0,986	5,5	11,7

За практически цели, обаче, е удобно да бъде определена плътността на оросяване, след която ще се наблюдава явлението прокапване. Необходима е връзка между дебита на единичната струя и плътността на оросяване. За преминаването от единична омокрана пластина към пълнеж тип “пчелна пита” е необходимо да се разгледа разположението на пълнежните елементи в колоната. Съществуват две възможности за подреждане на пълнежите тип “пчелна пита” в колонния апарат (Фиг. 6). В първия случай (Фиг. 6 а) критичното разстояние l_{max} ще отговаря на два пъти радиуса на вписаната в шестоъгълните отвори окръжност т.е $2.r$. Имайки предвид, че двете страни на всяка стена на пълнежа са оросявани периметърът, по който се стича течната фаза, отвеждана от даден течностен канал е $4 r$.

Дебитът на течната фаза отнесена към единица повърхност, респ. към единица периметър на пълнежа е $\frac{L}{a}$, където a е специфичната повърхност на пълнежа, m^2/m^3 .



Фиг.6. Варианти за подреждане на пълнежите “пчелна пита” в колонните апарати

Следователно общият дебит на течността, отвеждан от течностния канал от дадена клетка на пълнежа по двете лежащи под него пресичащи се пластини, ще бъде:

$$V = 4.r.L/a. \quad (5)$$

Аналогично на казаното по-горе можем да запишем за разположението показано на Фиг. 6б можем да запишем:

$$V = 4.R.L/a. \quad (6)$$

Така знаейки специфичната повърхност на даден пълнеж и радиусът на неговата вписана или описана окръжност от фигурите за максималното разстояние можем да намерим дебитът, а от там и плътността на оросяване, след която ще се наблюдава прокапване.

Заклучение

Експериментално е определено критичното разстояние, при което не се наблюдава прокапване от вертикални пластини от някои класически и три нови материала, подходящи за изготвяне на пълнежи при оросяване с течности с различни физикохимични свойства. Един от изследваните материали е поцинкована ламарина, която не се използва за изработване на пълнежи. Изследването с нея е проведено с цел сравнение на получените данни. Показано е, че критичното разстояние, при което не се наблюдава прокапване, е най-голямо при керамичната пластина и новите материали KR и порьозен, синтерован PVC. Изведени са безизмерни уравнения за изчисляване на максималното разстояние. Дадена е връзката за преминаване от единична струя към плътност на оросяване за дадено подреждане на пълнеж “пчелна пита” с известна специфична повърхност.

Благодарности

Това изследване беше осъществено благодарение на финансовата подкрепа на Европейски социален фонд и Оперативна програма "Развитие на човешките ресурси" 2007-2013, по проект "Програми и инструменти за повишаване на научния потенциал на докторанти, пост-докторанти и млади учени в областта на химичната и биохимичната технология и опазването на околната среда", изпълняван съвместно от Институт по инженерна химия при БАН – София и Университет «Проф. Д-р Асен Златаров» - Бургас, по договор №BG051PO001-3.3.04/ 30 /28.08.2009.

Литература

1. Nakov, Sv., *Chem Eng. Technol.*, **23** (7) (2000).
2. Nicolaiewsky, E. M. A., F. W. Tavares, K. Rajagopal, J. R., Fair, ICeap-4, The Forth Italian Conference on Chemical and Process Engineering, Florence, Italy, May 2-5, pp.519-523 (1999).
3. Nicolaiewsky, E. M. A., F. W. Tavares, K. Rajagopal, J. R., Fair, ICeap-4, The Forth Italian Conference on Chemical and Process Engineering, Florence, Italy, May 2-5, pp.461-464 (1999).
4. Nicolaiewsky, E. M. A., F. W. Tavares, K. Rajagopal, J. R., Fair, *Powder Technology*, **104**, pp. 84-94 (1999).
5. Razkazova-Velkova, E., N. Kolev, *Comptes rendus de l' Academie bulgare des Sciences*, **52**, No 7-8, pp. 43-46 (1998).

Елена Николаева Разказова-Велкова, н. с. I ст. д-р,

E-mail: razkazova_velkova@bas.bg

н.с. I ст. д-р Даниела Боянова Джонова-Атанасова, н. с. I ст. д-р

E-mail: dzhonova@bas.bg

Институт по инженерна химия-БАН, ул."Акад. Г Бончев" бл. 103, 1113 София,