

УДК 532.529, 536.426, 664

БАСОК Б.И., ГРАБОВА Т.Л.

Институт технической теплофизики НАН Украины

ОЦЕНКА ЭФФЕКТОВ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ВКЛЮЧЕНИЙ В РОТОРНО-ПУЛЬСАЦИОННОМ АППАРАТЕ ДИСКОВО-ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ТИПА

Розглянуто механізми подрібнення дисперсних включень у рідкому середовищі й виконано оцінні розрахунки розмірів включень при диспергуванні в роторно-пульсаційному апараті дисково-циліндричного типу. Отримано узгодження розрахункових значень з експериментальними даними.

Рассмотрены механизмы дробления дисперсных включений в жидкой среде и выполнены оценочные расчеты размеров включений при диспергировании в роторно-пульсационном аппарате дисково-цилиндрического типа. Получено согласование расчетных значений с экспериментальными данными.

The mechanisms of crushing of the dispersed particles are considered in a fluid medium. The evaluation calculations of sizes of particles are performed to disperse in rotor-pulse apparatus of disk-cylindrical type. The results of calculation and experimental data are in agreement.

a – ускорение;
 b – линейное ускорение;
 Bo – число Бонда;
 C – скорость звука;
 d – диаметр частицы;
 g – ускорение свободного падения;
 P – давление;
 t – текущее время;
 u – скорость;
 We – число Вебера;
 x, y – декартовы координаты;
 ε – скорость диссипации энергии турбулентности;
 ρ – плотность;
 σ – поверхностное натяжение;

ν – кинематический коэффициент вязкости;
 τ – касательное напряжение;
 φ – угол поворота;
 ω – угловая скорость вращения.

Индексы:

c – параметр дисперсионной среды;
 ϕ – параметр дисперсной фазы;
 ζ – центробежный;
 \max – максимальное значение параметра;
 \min – минимальное значение параметра;
 $*$ – критическое значение величины.

Сокращения:

ДИВЭ – дискретно-импульсный ввод энергии;
 РПА – роторно-пульсационный аппарат.

Одним из перспективных направлений реализации энергосбережения является разработка высокоэффективных аппаратов с многофакторным воздействием на обрабатываемую среду за счет дискретного ввода в локальную рабочую зону массы и энергии большой плотности. К таким аппаратам относятся РПА дисково-цилиндрического типа, одна из модификаций которого представлена на рис. 1.

Моделирование процессов гидродинамического дробления дисперсных включений в жидкостной системе в РПА затруднительно, т.к. на процесс дробления влияет комплекс факторов воздействия [1-4]:

- механическое воздействие на дисперсные частицы гетерогенной среды, заключающееся в ударных, срезающих и истирающих нагрузках при контактах с рабочими органами РПА;
- гидродинамическое воздействие, выражающееся в больших сдвиговых напряжениях, возникающих в гетерогенной среде, развитой турбулентности, в пульсациях давления и скорости в среде;
- гидроакустическое воздействие на среду, которое осуществляется за счет мелкомасштабных пульсаций давления, кавитации, ударных волн и других акустических эффектов.

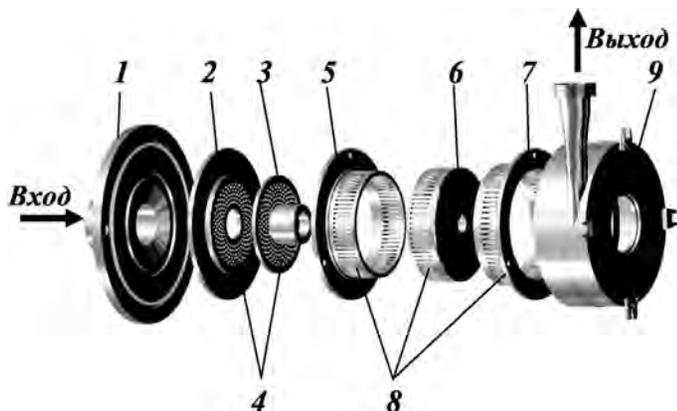


Рис. 1. Конструкция роторно-пульсационного аппарата дисково-цилиндрического типа:
 1 – крышка; 2 – статор дискового узла;
 3 – ротор дискового узла; 4 – каналы дискового узла; 5 – внутренний статор цилиндрического узла; 6 – ротор цилиндрического узла; 7 – внешний статор цилиндрического узла; 8 – щели цилиндрического узла; 9 – корпус.

Механизмы разрушения дисперсных частиц мало исследованы, поэтому рассматриваются различные модели, позволяющие осуществить лишь оценку эффектов диспергирования. Однако даже такие качественные результаты зачастую являются информативными и полезными для реализации технологических процессов, т.к. указывают правильное направление проведения процесса с точки зрения энерго- и ресурсосбережения.

В работе проведено обобщение возможных механизмов диспергирования частиц в жидкости в РПА на основании имеющихся данных гидродинамических и теплофизических возмущений параметров потока, рассмотренных в работе [5], и оценка их влияния на конечный размер частиц. Результаты расчетов гидродинамических параметров потока жидкости в РПА, полученные с помощью компьютерного моделирования, приведены для характерных зон рассматриваемого РПА типа АР-3000 [6, 7] в табл. 1, 2 и на рис. 2, 3.

Рассмотрим модельную двухфазную гетерогенную среду, например, с межфазным натяжением $\sigma = 20$ мН/м, где несущая фаза (дисперсионная среда) – вазелин, а другая фаза – включения частиц дисперсной фазы сферической формы. Принимаем: твердость частиц мень-

ше твердости материала внутренней поверхности РПА, допускаются пластические и упругие деформации, размер частиц меньше диаметра (ширины) каналов (прорезей) роторов и статоров, наименьший исходный размер частиц больше величины междискового и межцилиндрических зазоров между статорами и роторами. Частица, испытывающая пульсации давления, скорости и ускорения, движется пока не окажется зажатой между противоположными кромками статора и ротора, при последующем вращении роторов частица разрушается.

Рассмотрим следующие механизмы дробления включений дисперсной фазы в жидкой несущей фазе.

1. Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца [8, 9], возникающая в результате образования поверхностных волн при продольном движении двух взаимонерастворимых фаз относительно межфазной поверхности.

При данном виде неустойчивости характерный размер включений (диаметр d) может быть оценен как [8]:

$$d = \frac{\sigma We^*}{\rho_\phi u^2}, \quad (1)$$

где $\rho_\phi = 1200$ кг/м³, $We^* = 10$ [8], u – локальные значения скорости потока дисперсионной среды. За характерную скорость можно принять максимальную скорость u_{\max} в рассматриваемых областях потока (табл. 1, 2). Для рассматриваемой системы такая оценка дает значения $d_{\min} = 1...7$ мкм для области дискового узла (поз. 2-4, рис. 1) и $3...7$ мкм для области цилиндрического узла (поз. 5-8, рис. 1). Причем наиболее эффективными зонами дробления дисперсных включений являются: область входа в канал ротора дискового узла и зоны входа и выхода прорезей ротора цилиндрического узла.

Оценивая размер дисперсных включений согласно [9] с учетом плотностей несущей среды и дисперсной фазы и относительной скорости их движения по формуле:

$$d = \frac{\sigma We^* (\rho_\phi + \rho_c)}{\rho_\phi \rho_c \Delta u^2}, \quad (2)$$

Табл. 1.

Область потока дискового узла	Время, 10^{-4} с	u_{max} , м/с	d_{min} , мкм	$ \Delta u _{max}$, м/с	d_{min} , мкм	P_{max} , 10^5 Па	d_{min} , мкм	$ \Delta P _{max}$, 10^5 Па	d_{min} , мкм	$ \Delta u _{max}$, 10^3 м/с	d_{min} , мкм	b , 10^3 м/с ²	d_{min} , мм	ϵ_{max} , 10^5 м ² /с ³	d_{min} , мкм	u_0 , м/с	d_{min} , мкм	τ , Па	d_{min} , мкм
статора на выходе из канала	0	5,0	6,7	3,4	33,4	1,7	1,2	0,2	23,5					1,2	37,8	0,2	69,8	98,2	331,6
ротора на входе в канал		7,2	3,2	3,6	30,7	1,7	1,2	0,8	5,1					8,3	17,3	0,2	67,6	102,5	162,3
статора на выходе из канала	2,22	15,6	0,7	13,1	2,3	2,9	0,7	1,2	3,4	57,4	3,4	3,7	0,4			0,4	25,4	378,1	169,0
ротора на входе в канал		19,1	0,5	13,3	2,2	1,6	1,3	1,3	3,1	29,6	4,8	3,4	0,4			0,4	25,2	382,5	84,0
статора на выходе из канала	3,89	8,7	2,2	6,1	10,4	2,8	0,7	0,9	4,4	35,0	4,4	6,4	0,3			0,3	45,0	176,3	247,5
ротора на входе в канал		11,2	1,3	6,3	9,8	2,4	0,8	1,2	3,5	41,5	4,0	7,8	0,3			0,3	44,1	181,4	122,0
статора на выходе из канала	6,67	9,3	1,9	6,6	8,9	2,5	0,8	0,9	4,6	28,6	4,8	2,4	0,5			0,3	42,4	190,9	237,8
ротора на входе в канал		8,1	2,6	6,4	9,6	2,2	0,9	0,9	4,4	27,5	4,9	2,9	0,5			0,3	43,7	183,5	121,3
статора на выходе из канала	8,33	10,8	1,4	10,6	3,5	3,8	0,5	2,1	1,9	13,1	7,1	2,4	0,5			0,4	29,9	303,8	188,5
ротора на входе в канал		15,8	0,7	11,6	2,9	1,9	1,0	3,9	18,6	6,0	1,6	0,7				0,4	27,9	333,2	90,0

где Δu – скорость тангенциального движения фаз относительно границы их раздела (табл. 1, 2), $\rho_c = 900$ кг/м³ – плотность несущей фазы (вазелина), получим значения $d_{min} = 2...30$ мкм для области дискового узла и от 6 мкм до 20 мкм для области цилиндрического узла.

Оценку размера включений дисперсной фазы при реализации эффектов гидродинамического дробления в РПА [10] можно провести на основе числа Вебера в другом представлении:

$$d = \frac{\sigma We^*}{|P|}, \quad (3)$$

где P – давление в рассматриваемой области потока (табл. 1, 2, рис. 2, 3). По результатам оценочных расчетов в рассматриваемых областях потока $d_{min} = 1...10$ мкм.

Оценивая размер дисперсных включений по [10],

$$d = \frac{2\sigma We^*}{|\Delta P|}, \quad (4)$$

где ΔP – перепад давлений, действующих на противоположные части включения дисперсной фазы (табл. 1, 2). Из (4) получили значения $d_{min} = 2...24$ мкм для области дискового узла и 10...40 мкм для области цилиндрического узла.

2. Неустойчивость Релея-Тейлора, возникающая в результате роста малых отклонений давления, плотности и скорости в жидкой среде с неоднородным распределением плотности, находящейся в гравитационном поле или движущейся с ускорением. Согласно [8, 9], оценка размера включений при таком механизме дробления может быть проведена по формуле:

$$d = \left(\frac{\sigma Bo^*}{4a|\rho_\phi - \rho_c|} \right)^{0,5}, \quad (5)$$

где $Bo^* = 40$ - критическое число Бонда [8], a – ускорение, направленное нормально к поверхности раздела сред. Для расчета взято максимальное значение ускорения $a_{max} = 5 \cdot 10^3 ... 57 \cdot 10^3$ м/с² $\approx 510g ... 5820g$ в рассматриваемых областях потока

Табл. 2.

Область потока цилиндрического узла	Время, 10 ⁻³ с	u_{max} , м/с	d_{min} , мкм	$ \Delta u _{max}$, м/с	d_{min} , мкм	$ P _{max}$, 10 ⁵ Па	d_{min} , мкм	$ \Delta P _{max}$, 10 ⁵ Па	d_{min} , мкм	$ \Delta u _{max}$, 10 ³ м/с	d_{min} , мм	b , 10 ³ м/с ²	d_{min} , мм	u_0 , м/с	d_{min} , мкм	τ , 10 ² Па	d_{min} , мкм
внутренний статор на выходе из прорези	1,5	5,1	6,4	4,5	19,2	1,5	1,4	0,4	10,5					0,2	75,7	0,9	349,9
ротор на входе в прорезь		7,4	3,0	6,8	8,4	1,3	1,5	0,2	16,7					0,3	41,7	2,0	235,3
ротор на выходе из прорези		5,1	6,4	4,5	19,2	1,4	1,5	0,3	14,8					0,3	39,2	2,1	225,6
межцилиндрический зазор				8	6,1	1,5	1,4							1,2	5,1	32	58,1
внутренний статор на входе в прорезь		6,9	3,5	6,9	8,2	1,2	1,7	0,2	20,0					0,2	78,6	0,8	358,9
внутренний статор на выходе из прорези	1,61	5,1	6,4	4,5	19,2	1	2,0	0,1	28,6			1,8	0,6	0,2	74,5	0,9	346,4
ротор на входе в прорезь		8	2,6	8	6,1	1	2,0			5,4	11,1	1,2	0,8	0,4	25,9	3,7	171,2
ротор на выходе из прорези		7,4	3,0	6,8	8,4	1,2	1,7	0,2	20,0	20,7	5,7	1,4	0,7	0,4	27,7	3,4	179,1
межцилиндрический зазор				8	6,1	0,9	2,4					5,8	0,3	1,2	5,1	32	58,1
внутренний статор на входе в прорезь		8	2,6	8	6,1	1,2	1,7	0,1	40,0	9,9	8,2	0,5	1,1	0,2	57,3	1,3	290,8
внутренний статор на выходе из прорези	1,67	5,1	6,4	4,5	19,2	1,1	1,8	0,1	28,6			1,1	0,8	0,2	81,2	0,8	366,8
ротор на входе в прорезь		8	2,6	8	6,1	1,1	1,8	0,1	28,6			1,1	0,8	0,3	35,3	2,4	210,5
ротор на выходе из прорези		7,4	3,0	6,8	8,4	1,3	1,5	0,2	16,7			1,6	0,7	0,3	29,3	3,1	185,7
межцилиндрический зазор				4,6	18,6	0,9	2,3					0,2	2,0	0,4	7,8	18,3	76,9
внутренний статор на входе в прорезь		6,9	3,5	6,9	8,2	1,4	1,5	0,3	13,3	1,98	18,4	1,3	0,7	0,9	75,0	0,9	347,8

для различных моментов времени (табл. 1, 2). Оценка минимального размера дисперсных включений в рассматриваемых областях потока дает значения $d_{min} = 3...18$ мкм.

3. Акустические эффекты диспергирования. Эффекты гидродинамического дробления дисперсных включений в жидких многофазных средах достигаются при реализации механизмов принципа ДИВЭ [10], основными рабочими элементами которого являются парогазовые образования (пузырьки, каверны).

Высокочастотные колебания дисперсной среды, обусловленные импульсным изменением давления при пульсациях и разрушении парогазовых пузырьков на границе раздела взаимонерастворимых фаз, происходят с линейным ускорением $b = du/dt$, которое можно оценить, проинтегрировав выражение для акустического давления [11]

$$b = \frac{1}{\rho_c C} \left| \frac{dP}{dt} \right|. \quad (6)$$

Согласно расчетным данным для рассматриваемой системы $\left| \frac{dP}{dt} \right| \sim 107...109$ Па/с. Ускорения

потока в рассматриваемых областях потока (табл. 1, 2, рис. 2, 3), вызванные импульсным изменением давления, достигают значений $0,2 \cdot 10^3...13 \cdot 10^3 \approx 20g...1300g$. Оценить конечный размер частиц можно на основании числа Бонда [8]

$$d = \left(\frac{\sigma Bo^*}{4b |\rho_\phi - \rho_c|} \right)^{0,5}. \quad (7)$$

Оценка показывает, что минимальный конечный размер частиц дисперсной фазы соответствует 300 мкм.

4. Дробление дисперсных включений в турбулентном потоке жидкости. Согласно теории изотропной турбулентности [12], дробление дисперсных включений в турбулентном потоке происходит благодаря пульсациям, масштаб которых сопоставим с разме-

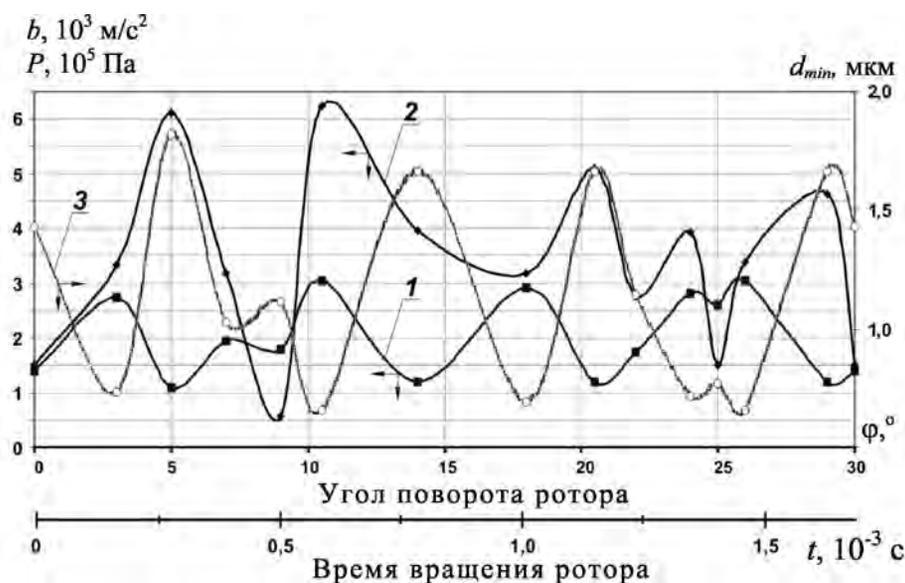


Рис. 2. Кривые изменения в междисковом зазоре по оси периферийного канала статора: 1 – давления P ; 2 – линейного ускорения b (рассчитанного по выражению (6)), 3 – минимального размера дисперсных включений d_{min} (выражение (3)).

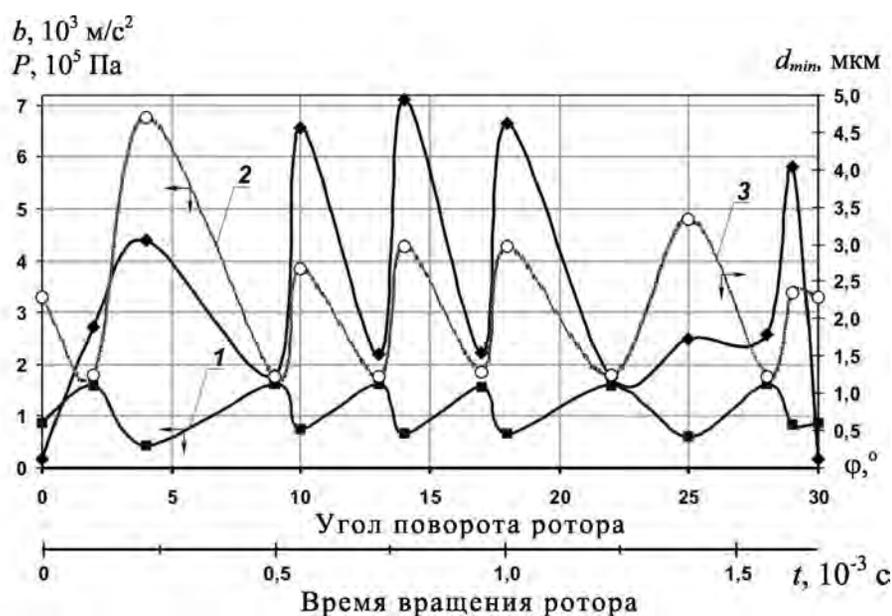


Рис. 3. Кривые изменения в межцилиндрическом зазоре между ротором и внешним статором: 1 – давления P ; 2 – линейного ускорения b (рассчитанного по выражению (6)), 3 – минимального размера дисперсных включений d_{min} (выражение (3)).

рами включений. По теории локально однородной изотропной турбулентности диаметр включений

$$d = k \left(\frac{\sigma^3}{\rho_c^3 \varepsilon^2} \right)^{0,2}, \quad (8)$$

где ε – скорость диссипации энергии турбулентности (табл. 1-3), k – эмпирическая константа, равная 0,725...3,5 [9, 10, 12, 13]. Расчетные данные свидетельствуют о том, что в междисковом и межцилиндрических зазорах происходит наибольшая диссипация кинетической энергии турбулент-

Табл. 3.

Выражение для оценки размера включений	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(7)	(8)	(9)	(10)
d_{min} , мкм	1...7	2...68	1...10	2...40	3...18	≥ 300	17...37	5...80	60...350

ности. В этих областях потока происходит трансформация кинетической энергии потока в энергию деформации и, следовательно, дробление дисперсных включений. Максимальные значения скорости диссипации $\varepsilon_{max} = 0,59 \cdot 10^5 \dots 8,3 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{с}^3$ достигаются на входе в каналы ротора дискового узла, которые являются эффективными зонами дробления в турбулентном потоке. Данный механизм дробления дает конечный размер дисперсных включений $d_{min} = 17 \dots 37 \text{ мкм}$.

5. Дробление вблизи стенок. Вблизи стенки в пределах вязкого подслоя довольно резкое изменение пульсационных скоростей (велики поперечные градиенты скорости), и средняя скорость имеет логарифмический профиль. В работе [14] показано, что наименьший размер дисперсных включений

$$d \approx \sqrt{\frac{\sigma v}{6\rho_\phi u_0^3}}, \quad (9)$$

где $u_0 = \sqrt{\tau/\rho}$ (табл. 1, 2), $v = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ [15]. Таким образом, конечный размер включений в пристеночной области дискового узла у границы вязкого подслоя достигает значений 25...70 мкм и в области цилиндрического узла – 5...80 мкм.

6. Сдвиговый механизм. Под воздействием внешних сил в измельчаемых частицах возникают объемно-напряженные состояния, приводящие с ростом его интенсивности к разрушению включений дисперсной фазы. В сдвиговом потоке дисперсные включения совершают вращательное движение. Размер твердых включений дисперсной фазы, в которых возникают центробежные напряжения [3]

$$d = \left(\frac{\tau_u}{0,4\omega_\phi^2 \rho_\phi} \right)^{0,5}, \quad (10)$$

где $\omega_\phi \cong 0,5 \frac{du_x}{dy}$ – угловая скорость вращения

частиц дисперсной фазы; τ_u – центробежное напряжение (табл. 1, 2). При данном механизме дробления конечный размер дисперсных включений $d_{min} = 60 \dots 360 \text{ мкм}$. Наиболее эффективными областями диспергирования при таком механизме дробления являются области междискового и межцилиндрических зазоров.

7. Механическое разрушение. Из [16] известно, что разрушающее механическое напряжение для объектов нашего исследования (дисперсных частиц твердых включений) составляет: для стрептоцида $27 \cdot 10^5 \text{ Па}$, для серы – $5,6 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Сравнивая эти значения с полученными перепадами давления (табл. 1, 2, рис. 2, 3), можно сделать вывод о том, что значений перепадов давления достаточно, чтобы осуществить механическое разрушение частиц твердых включений.

Результаты оценочных расчетов конечных размеров дисперсных включений для рассматриваемой системы при различных механизмах дробления приведены в табл. 3. Из рассмотренных причин дробления доминирующими являются возмущения, приводящие дисперсную систему к неустойчивости Кельвина-Гельмгольца (выражения (1)-(4)) и Релея-Тейлора (выражение (5)). Такие механизмы дробления обеспечивают конечный размер частиц на микронном уровне, а в момент перекрытия каналов статора и ротора дискового узла достигается и субмикронный уровень дробления. Включения дисперсной фазы, попадая в пристеночную область внутренней поверхности РПА у границы вязкого подслоя, дробятся до микронного уровня (выражение (9)). Интенсивность воздействия гидродинамических возмущений, возникающих за счет акустических эффектов (выражения (6)-(7)), позволяют получать грубодисперсные системы. При сдвиговом механизме дробления (10) наиболее эффектив-

ными являются области междискового и межцилиндрических зазоров, где конечный размер дисперсных включений достигает 40...60 мкм в момент полного перекрытия каналов и щелей статорно-роторных пространств.

Отметим, что оценочные расчеты размеров дисперсных включений согласуются с полученными [4, 17, 18] экспериментальными значениями размеров продиспергированных в РПА частиц.

Выводы

1. С учетом преобладающих частных механизмов дробления можно уточнить особенности процесса диспергирования и прогнозировать дисперсность исследуемых систем, а также оценить эффективные зоны для процесса диспергирования.

2. Полученные результаты дают возможность указать направления оптимального конструирования и мероприятия с целью повышения эффективности тепломассообменных процессов в РПА дисково-цилиндрического типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Долинский А.А., Басок Б.И. Роторно-импульсный аппарат. Сообщения 1,2,3// Промышленная теплотехника. – 1998. – Т. 20. – № 6. – С. 7 – 10; – 1999. – Т. 21. – № 1. – С. 35; – 1999. – Т. 21. – № 2-3. – С. 3-5.

2. Балабудкин М.А. Роторно-пульсационные аппараты в химико-фармацевтической промышленности. – Л.: Химия. 1983. – 160 с.

3. Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 260 с.

4. Грабов Л.Н., Мерщий В.И., Грабова Т.Л., Посунько Д.В. Проблема трансформации энергии в системе “твердое тело - жидкость” при тонком и супертонком диспергировании// Промышленная теплотехника. – 2001. – Т. 23. – № 4-5. – С. 74-80.

5. Круковский П.Г., Грабов Л.Н., Юрченко Д.Д., Грабова Т.Л. Трехмерная CFD-модель гидродинамических процессов в реакторном аппарате// Промышленная теплотехника. – 2004. – Т. 26. – № 4. – С. 5-12.

6. Патент Украины №20698 Реакторный гомогенизатор/ Грабов Л.Н., Мерщий В.И., Жилев В.Т.

7. Патент України №55709 Спосіб гідродинамічної обробки гетерогенних рідких середовищ та гідродинамічний диспергатор-змішувач для його здійснення/ Грабов Л.М., Мерщій В.І., Грабова Т.Л.

8. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч.1. – М.: Наука, 1987. – 464 с.

9. Абиев Р.Ш. Исследование течения газожидкостной системы в трубе с периодически меняющимся сечением// Химическая промышленность. – 2003. – Т. 80. – № 12. – С. 10-17.

10. Долинский А.А., Басок Б.И., Накорчевский А.И. Адиабатически вскипающие потоки. Теория, эксперимент, технологическое использование. – К.: Наукова думка, 2001. – 207 с.

11. Маргулис М.А. Основы звукохимии. Химические реакции в акустических полях. – М.: Высшая школа, 1984. – 272 с.

12. Колмогоров А.Н. О дроблении капель в турбулентном потоке// Докл. АН СССР. – 1949. – Т. 66. – № 5. – С. 825-828.

13. Басок Б.И., Пироженко И.А., Булавка А.В. Дисперсный анализ соевой пасты, полученной при роторно-пульсационной гомогенизации// Промышленная теплотехника. – 2003. – Т. 26. – № 4. – С. 88-92.

14. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. – М.: Физматгиз, 1959. – 699 с.

15. Ли В.Н., Соболенко А.К., Бузовский А.Н. Исследования качества суспензионных мазей изготовленных на основе вазелина// Фармация. – 1990. – № 2. – С. 33-34.

16. Маркова Л.М., Балабудкин М.А. Прочностные характеристики частиц некоторых лекарственных порошков // Химико-фармацевтический журнал. – 1979. – № 11. – С. 112-113.

17. Грабов Л.Н., Мерщий В.И. и др. Исследование процесса диспергирования в системе “твердое тело- жидкость” в тепломассообменных технологиях. // Промышленная теплотехника. – 2003. – Т. 25. – № 4. – С. 60-64.

18. Грабова Т.Л. Воздействие ДИВЭ на свойства кремнийорганических сорбентов// Промышленная теплотехника. – 2004. – Т. 26. – № 6. – С. 9-15.

Получено 25.05.2006 г.