

## ПУЛЬСАЦІЙНА ОБРОБКА РІДИН У ПРОМИСЛОВИХ РОТОРНИХ АПАРАТАХ

## LIQUIDS PULSE PROCESSING IN INDUSTRIAL ROTARY APPARATUSES

*Наведено результати дослідження сучасних промислових зразків роторно-пульсаційних апаратів. Визначено їх конструкційні і режимні параметри. Встановлено, що за конструктивними ознаками роторно-пульсаційні апарати принципово можна розділити на два типи: корпусні і безкорпусні. Виявлено особливості промислового використання і компонування генераторів пульсацій для обох типів апаратів. На основі аналізу даних, представлених виробниками обладнання і опублікованих результатів досліджень визначено основні конфігурації та конструкції робочих органів роторно-пульсаційних апаратів. Також для обох типів апаратів визначено діапазони потужності, продуктивності, частот обертання та лінійних швидкостей ротора, діаметрів роторно-статорних груп. Проаналізовані конструкції апаратів з додатковими робочими органами, такими як крилатки, шнеки та перфоровані диски. З'ясовано особливості конструкцій робочих органів і режимні параметри роторно-пульсаційних апаратів при обробці високов'язких і полікомпонентних рідких систем.*

*Ключові слова: роторно-пульсаційний апарат, генератор пульсацій, обробка, рідина, продуктивність, потужність.*

### Вступ

Значні обсяги споживання та темпи їх збільшення вимагають нарощування виробничих потужностей, у зв'язку з чим актуалізується проблема інтенсифікації технологічних процесів виробництва продукції. Забезпечення високого рівня життя та сталого розвитку суспільства вимагають підвищення якості продукції та зменшення витрат на її виробництво. Задовольнити цим вимогам дозволяє впровадження високоефективного обладнання з високим ступенем впливу на речовини, що піддаються обробці.

Значного поширення у промисловості набули роторно-пульсаційні апарати, які широко застосовуються для інтенсифікації процесів, що відбуваються в системах «рідина–рідина», «рідина–тверде тіло» і «рідина–газ» у хімічній, фармацевтичній, харчовій та багатьох інших галузях [1–8, 10, 11]. Їх переваги над іншими типами гідромеханічного обладнання аналогічного призначення зумовлені комплексним багатофакторним впливом на рідини, що дозволяє збільшити швидкість перебігу процесів, особливо тих, що відбуваються у полікомпонентних рідких системах одночасно із забезпеченням високої якості одержаних речовин. Разом з цим вони є достатньо простими за своєю конструкцією, їх виготовлення, у більшості випадків, не потребує складних технологій, вони є надійними у експлуатації і ремонті [1–6, 9].

Різноманітність комбінацій сукупності впливів на рідини дії фізичних явищ у роторно-пульсаційних апаратах зумовлює наявність на ринку розмаїття їх видів що, в основному, відрізняються конфігурацією робочих органів.

Фактично кожний з великих виробників обладнання подібного типу пропонує свій варіант конструкції роторно-пульсаційного апарата та рекомендації щодо його застосування для проведення технологічних процесів і їх режимів, ґрунтуючись на результатах власних досліджень, які у більшості випадків не публікуються з комерційних міркувань. Висока конкуренція на ринку обладнання вимагає від фірм-виробників мінімізації даних у вільному доступі. Наслідком такої ситуації є відсутність чітких рекомендацій щодо вибору роторно-пульсаційних апаратів та параметрів їх роботи, виходячи з технічного завдання на конструкційне оформлення технологічних процесів підприємств, що спричиняє необхідність при виборі апарата значною мірою покладатись на рішення обраної фірми-виробника в умовах обмежених можливостей щодо порівняння пропозицій.

### Основна частина

Зважаючи на велику різноманітність конструкцій роторно-пульсаційні апаратів та їх складових, наведені у літературі [3,5, 6, 7, 9, 10-12] спроби розробити загальну класифікацію призвели до складання громіздких систем ознак, сукупність яких дозволяє характеризувати роторно-пульсаційні апарати. Можна виділити два принципово різні, з точки зору компонування, типи роторно-пульсаційних апаратів — корпусні та безкорпусні. Відношення до одного з цих типів зумовлює як особливості конструкційних ознак і типорозмірних параметрів, так і особливості застосування та режимів роботи апаратів.

Апарати корпусного типу (рисунок 1) мають вигляд робочої камери із завантажувальним і розвантажувальним патрубками, всередині якої встановлено генератор пульсацій, у вигляді статора і ротора (рисунок 2), що мають форму дисків з розміщеними на основах співосними кільцями, бічні поверхні яких оснащено наскрізними отворами або прорізами. Кільця виконано таким чином, що у складеному вигляді у генераторі пульсацій кільця статора і ротора встановлюються із зазором між бічними поверхнями і чергуються у радіальному напрямі. Ротор генератора пульсацій з'єднано з електродвигуном напрямку або через передачу.

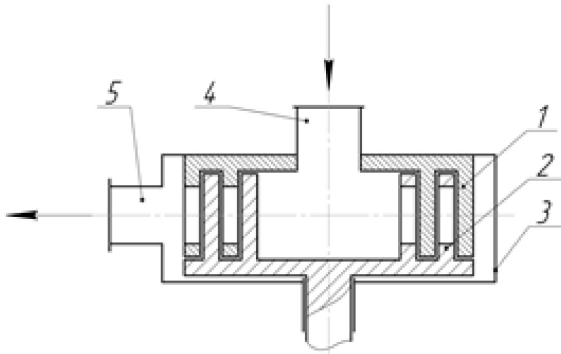


Рисунок 1 — Схема корпусного роторно-пульсаційного апарата: 1 — статор; 2 — ротор; 3 — корпус; 4, 5 — завантажувальний та розвантажувальний патрубки



Рисунок 2 — Фотографія ротора і статора корпусного роторно-пульсаційного апарата [13]

Оброблювана рідина надходить до апарата через завантажувальний патрубок і потрапляє до робочої камери всередину генератора пульсацій. Проходячи генератор пульсацій рідина прокачується через прорізи ротора та статора, які періодично перекриваються внаслідок обертання ротора. У той проміжок часу, коли прорізи статорів перекрито бічними стінками роторів, потік гальмується у радіальному напрямі і частина рідини у комірках, утворених прорізами ротора і бічними стінками статорів, транспортується у коловому напрямі. Коли ж прорізи роторів і статорів поєднуються, потік

пришвидшується у радіальному напрямі. При проходженні суцільних частин кілець ротора повз суцільні частини кілець статора у зазорах між роторами і статорами утворюється високоградієнтний потік рідини.

У апаратах безкорпусного типу (рисунок 3) генератор пульсацій монтується на довгому хвостовику стрижневого або трубчастого типу, до якого кріпиться статор, а всередині якого розміщується приводний вал з приєднаним до нього ротором. Приводний вал з'єднується з вихідним валом електродвигуна. Апарати такого типу агрегуються з ємкісним обладнанням і використовуються для проведення у ньому гідромеханічних процесів.



Рисунок 3 — Зображення безкорпусного роторно-пульсаційного апарата [14]: 1 — генератор пульсацій; 2 — приводний вал; 3 — електродвигун.

Основні фактори впливу на оброблюване середовище можливо розділити на три групи [1, 5]:

- механічний вплив за рахунок контакту частинок гетерогенного середовища з робочими органами роторно-пульсаційного апарата, коли упродовж взаємодії на складові оброблюваного середовища діють ударні, зрізуючі та стираючі, навантаження;

- гідродинамічний вплив, що полягає у створенні великих зсувних напружень у рідині, утворенні розвиненої турбулентності та пульсацій тиску і швидкості потоку рідини;

- гідроакустичний вплив на рідину за рахунок дрібно масштабних пульсацій тиску, інтенсивної кавітації, ударних хвиль та вторинних нелінійних акустичних ефектів.

Аналіз даних фірм-виробників роторно-пульсаційних апаратів [13–36] у поєднанні з наявними у літературі та публікаціях відомостями дозволяє зробити висновки щодо підходів до застосування пульсаційного впливу та особливостей конструкцій поширених на ринку роторно-пульсаційних апаратів. У таблиці 1 наведено основні характеристики цих апаратів, що випускаються серійно провідними виробниками обладнання.

Результати проведеного аналізу дозволяють виявити тенденції у конструюванні і функціонуванні роторно-пульсаційних апаратів. Не зважаючи на подібність до перемішувальних пристроїв, що особливо стосується безкорпусних апаратів, роторно-пульсаційні апарати суттєво від них відрізняються тим, що при проходженні генератора пульсацій на потік рідини накладаються пульсації, що спричиняють розділення потоку рідини на

Таблиця 1 — Основні характеристики представлених на ринку корпусних роторно-пульсаційних апаратів

Фірма, (країна виробник)	Тип, марка апарата	Параметр				
		Продуктивність, т/год.	Потужність двигуна, кВт	Частота обертання ротора, об./хв.	Колова швидкість, м/с	Діаметр роторно- статорної пари, мм
1	2	3	4	5	6	7
“Ystral”, (Німеччина)	Z 66	0,5—3,0	2,4—3,0	6000/12000	10—54	50—200
	Z 120	3,0—15	3—5	1500/3600		
	Z 150	4—30	11—15			
“Kinematica”, (Швейцарія)	MT 3000	0,9	0,8	—	24—42	20—30
	MT 5100	2,4—4,5	2	18000/21000	32—37	37—46
	MT-V 95	15	22	8000	40	30—350
“Ika”, (Німеччина)	UTL 2000/4	0,3	1,5	7900	23	—
	UTL 2000/5	2,5	4,0	5800		
	UTL 2000/10	8	7,5	4200		
“Ross”, (США)	401	15	1,1	—	—	64
	405	40,8	3,7			89
	425	79,5	18,4			114
	430	136,3	22,1			178
	450	206,6	36,8			279
“Ibw”, (Німеччина)	URL-60	1,5—2,5	1,5—3,0	—	—	—
	URL-80	1,8—3,0	2,2—5,5			
	URL-115	5—13	3—15			
“Fluko”, (КНР)	PD100-XG	1—10	11/14	1500/3600	10—40	—
	PD120-XG	1—20	18,5/22,0			
	PD140-XG	1—30	26/30			
“AlfaLavalCorp. AB”, (Швеція)	M 15	3,0	18,5	1500/3600	—	—
	S 15	1—20	15	3000/3600		
“SPX APV”, (Великобританія)	DAR 75	3	3—4	1450	—	—
	DAR 100	6	(3— 4)/(5,5— 7,5)			
“Quadro”, (Канада)	Z0	3,6	2,2	10000	—	—
	Z1	6,9	7,5	6000		
	Z3	22,8	18,5	3600		
	Z5	69	45	1800		
“Енергомашкомплект”, (Україна)	РПА-15	15	7,5	—	—	—
	РПА-25	25	11			
“Farfly”, (КНР)	FSW1-75	8	7,5	3000	—	—
	FSW1-110	12	11			
“Sower”, (КНР)	SNRE-1.1	1	1,1	2900	—	—
	SNRE-4	5	4			
“SieheIndustry”, (КНР)	SRB2.2/1/6	3	2,2	2930	—	—
	SRB4/1/6	5	4			
	SRB7.5/1/6	7	7,5			
“Дальтех прогрес”, (РФ)	TRL1-60	1—1,5	1,5	2900	—	—
	TRL1-100	3	2,2			
	TRL1-120	4	4			

Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5	6	7	
“ООО Молтехснаб”, (РФ)	РПА-1,5	1,5	3;4;5,5	-	-	-	
	РПА-2,5	2,5	3;4;5,5				
	РПА-5,0	5	5,5;7				
“ОАО ЭНА”, (РФ)	РПА-1,5-5-К	1,5	3	2900	-	-	
	РПА-5-5-К	5	4; 5,5; 7,5				
	РПА-25-5-К	25	15				
“Fristampumpen” (Німеччина)	FSPE 710	-	3—90	1450 / 3500	-	130	
	FSPE 3522					145	
	FSPE 3532					175	
	FSPE 3542					200	
	FSPE 3542	-	-	1450 / 2900	-	145	
	FSPE 352/145						3—5,5
	FSPE 353/175						5,5—11
	FSPE 354/200						11—18,5
FSPE 355/250	18,5—30						
“Voith” (Німеччина)	E1K	60	90	3000 / 3600	-	-	
	E2000	120	200		-	-	
	E4000	240	400	1500 / 1800	-	-	
	E8000	480	800	1000 / 1200	-	-	
“BWS Technologie” (Німеччина)	S200	200.4	10—45	8—28	7500	-	-
		200.7	12—54				
		200.9	15—68				
	S300	300.4	24—105	15—45	5400	-	-
		300.7	25—110				
		300.9	30—135				
	S400	400.4	35—158	30—132	3600	-	-
		400.7	50—225				
		400.9	65—290				
	S500	500.4	55—245	75—250	1800	-	-
		500.7	70—315				
		500.9	75—335				

частини, їх перерозподілення та злиття і супроводжуються перепадами тиску. Зважаючи на це, необхідною ознакою роторно-пульсаційних апаратів є наявність у конструкції генератора пульсацій з хоча б одного пульсаційного ступеня у вигляді пари кілець статора і ротора, що встановлено співосно із зазором, величина якого значно менша будь-якого іншого розміру генератора пульсацій, його складових або їх елементів.

Корпусні роторно-пульсаційні апарати застосовуються як апарати безперервної дії. Порівняно з безкорпусними апаратами за рахунок примусового прокачування оброблюваних рідин крізь генератор пульсацій, вони забезпечують більш широкі можливості для проведення процесів, особливо емульгування, суспендування, диспергування та обробки в'язких полікомпонентних рідин.

Корпусні роторно-пульсаційні апарати можуть працювати за одним з двох варіантів. За першим варіантом вони встановлюються безпосередньо у лінію і працюють у проточному режимі. Необхідний термін перебування рідини у зоні обробки і інтенсивність впливу

на рідину залежить від кількості ступенів у генераторі пульсацій і конфігурації статора і ротора. При цьому, іноді буває доцільно встановлення у лінії послідовно декількох корпусних апаратів, генератори пульсацій яких можуть відрізнятися, з урахуванням зміни властивостей оброблюваної рідини.

За другим варіантом апарат працює на одну ємкість у режимі циркуляції, на дві ємкості у режимі послідовної обробки або у режимі перевантаження рідини з ємкості у ємкість [3]. Ємкості можуть бути додатково оснащені перемішувальними пристроями. У випадку обробки рідин, що мають компоненти, розподілені в них у вигляді полідисперсних частинок, суттєво підвищити ефективність роботи апарату можливо встановленням гідроциклона у додатковий замкнений на роторно-пульсаційний апарат контур.

З урахуванням специфіки роботи корпусні роторно-пульсаційні апарати можуть бути виготовлені одно- або багатоступінчастими [1, 3, 5, 10], причому кількість пульсаційних ступенів може досягати десяти, а в окремих

випадках їх може бути більше. Збільшення кількості ступенів дозволяє за рахунок збільшення терміну перебування рідини у зоні обробки мінімізувати кількість частинок, які пройшли генератор пульсацій, не піддаючись обробці та підвищити рівномірність обробки частинок, що позитивно впливає на якісні показники рідини.

Іншим способом досягти зазначеного результату є використання модульних конструкцій (рисунок 4), у яких генератор пульсації складається з декількох модулів, що містять декілька (від однієї до п'яти) пульсаційних ступенів. Модулі встановлюються в одному корпусі, що оснащений елементами, які забезпечують послідовне проходження оброблюваної рідини з одного модуля до іншого. Кількість пульсаційних ступенів у модулях генератора пульсації може бути не однаковою.

Модульне компонування генератора пульсації дозволяє зменшити витрати енергії апарата на проведення у ньому процесів. Такі конструкції найдоцільніше використовувати для обробки рідин з твердофазною складовою. Наприклад, суспендування у роторно-пульсаційних апаратах з модульною конструкцією генератора пульсації дозволяє одержувати тонкі суспензії з вузьким розподіленням частинок за розмірами та досягати розмірів частинок, що дорівнюють 0,1—1 мкм.

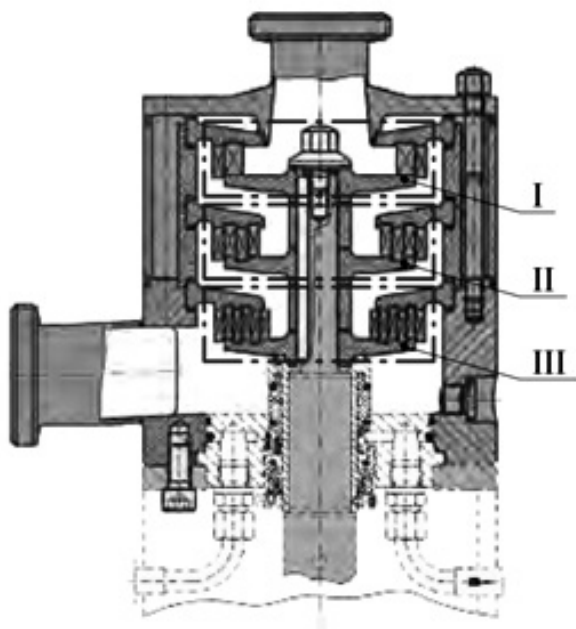


Рисунок 4 — Схема модульного роторно-пульсаційного апарата [38]: I—III — пульсаційні модулі

Корпусні роторно-пульсаційні апарати забезпечують продуктивність від 0,01 до 480  $t/год$  і працюють з приводом потужністю від 1,5 до 800  $kW$  і частотою обертання вала від 1200 до 21000  $об/хв$ . При цьому, найбільшого поширення набули апарати продуктивністю від 1,5 до 22  $t/год$ , з потужністю привода від 3,0 до 18,5  $kW$  і частотою обертання вала від 1500 до 3600  $об/хв$ .

Апарати з меншими продуктивністю і потужністю привода використовуються у якості лабораторного або пілотного обладнання, а апарати з більш високими показниками застосовуються у високопродуктивних лініях.

Питома енергоємність корпусних роторно-пульсаційних апаратів залежить від складу і властивостей оброблюваної рідини, процесу, що в ній відбувається, особливостей конструкції робочих органів і режиму роботи апарата, а тому її значення може знаходитись у широких межах (від 2 до 18  $кДж/кг$ ), хоча здебільше цей показник становить 3—6  $кДж/кг$ .

Безкорпусні апарати здебільшого застосовуються для проведення періодичних процесів у ємкісному обладнанні [3, 36]. У таблиці 2 наведено основні характеристики безкорпусних роторно-пульсаційних апаратів, що випускаються серійно провідними виробниками обладнання. Безкорпусні роторно-пульсаційні апарати можуть бути використані як високоефективні перемішувальні пристрої, замінюючи останні при перебігу таких процесів, як перемішування, гомогенізація, емульгування, диспергування, розчинення і екстракція [1, 3]. У такому випадку безкорпусні апарати встановлюються співісно ємкісному обладнанню (рисунок 5, а).

Іншим поширеним варіантом використання безкорпусних роторно-пульсаційних апаратів є їх спільне застосування з перемішувальними пристроями, найчастіше лопатевого типу. У такій комбінації співісно ємкісному обладнанню встановлюється перемішувальний пристрій, а роторно-пульсаційний апарат встановлюється поряд (рисунок 5, б), що дозволяє покращити циркуляцію рідини і зменшити воронкоутворення, збільшивши цим корисний об'єм обладнання. Найефективніше поєднання роторно-пульсаційного апарата і перемішувального пристрою у габаритному обладнанні.

У великорозмірному вертикальному обладнанні встановлюються багатоярусні перемішувальні пристрої, у той час, як у меншому обладнанні можна обійтись і одноярусним пристроєм. Враховуючи специфіку роботи безкорпусних роторно-пульсаційних апаратів, їх генератори пульсації не потребують великої кількості пульсаційних ступенів і складаються з однієї, двох або трьох ступенів.

Потужність привода промислових безкорпусних роторно-пульсаційних апаратів знаходиться у межах від 0,25 до 74  $kW$ . Діапазон частот обертання приводного вала у таких апаратах значно вузьчий, ніж у корпусних, і обмежується 1200—3600  $об/хв$ .

Окрім основних робочих органів, роторно-пульсаційні апарати можуть мати додаткові робочі органи, що призначено для підвищення ефективності їх роботи [32, 36—38]. Додаткові робочі органи переважно встановлюються у внутрішній порожнині генератора пульсації і жорстко з'єднуються з основними робочими органами. Такі роторно-пульсаційні апарати можуть бути як корпусного, так і безкорпусного типу.

Таблиця 2 — Основні характеристики представлених на ринку безкорпусних роторно-пульсаційних апаратів

Фірма, (країна виробник)	Тип, марка апарата	Параметр			
		Потужність двигуна, кВт	Частота обертання ротора, об/хв.	Колова швидкість, м/с	Діаметр роторно- статорної групи, мм
“Quadro”, (Канада)	Y0	0,25	—	—	—
	Y2	2,2			
	Y3	7,5			
	Y4	22,4			
	Y5	56,0			
“Ystral”, (Німеччина)	X 120 TFB	5—15	1500 / 3000	16—25	—
	X 150 TFB	11—15		20	
	X 180 TFB	15—18		25	
	X 220 TFB	11—18	1500	17	
	X 240 TFB	18—22		19	
“Ross”, (США)	101	1,1	3600	—	64
	105	3,68			89
	110	7,36			102
	125	18,39			114
	130	22,07	1800	—	178
	150	36,78	1200	—	279
	175	55,16			318
	1100	73,55			330
“Ibw”, (Німеччина)	URC-50	0,55	—	—	—
	URC-80	1,5			
	URC-150	3,0			
	URC-220	7,5			
“Ika”, (Німеччина)	UTC-80	3,68	3600	12	—
	UTC-115	5,52		18	
	UTC-220	18,39	1800	18	
	UTC-300	44,13		25	
	UTC-350	55,16	1200	20	
“ArdeBarincoInc.”, (США)	CJ-20	1,48—2,21	3600	—	0,1016
	C-1-2	3,72—5,59			0,0984
	CJ-75-1	5,59—7,46			0,1587
	C-3-1	11,18—18,64			0,1460

В якості додаткових елементів найчастіше використовуються лопаті, що встановлюються на роторі [3, 5, 7, 10], оскільки вони здатні забезпечити значний радіальний потік робочого середовища, спрямований на основні робочі органи, за рахунок чого значно поліпшуються напірновитратні характеристики роторно-пульсаційних апаратів, і у генераторі пульсацій створюється додатковий ступінь обробки.

Зазвичай використовуються прямокутні лопаті зі зрізаним кутом при осі, серповидні або S-подібні лопаті, стрижневі або пластинчасті вертикальні елементи (ножі). Використання профільованих лопатей забезпечує кращі гідродинамічні характеристики генератора пульсацій за однакових енерговитрат.

При обробці високов'язких рідин можливе встановлення на вході у внутрішню порожнину генератора

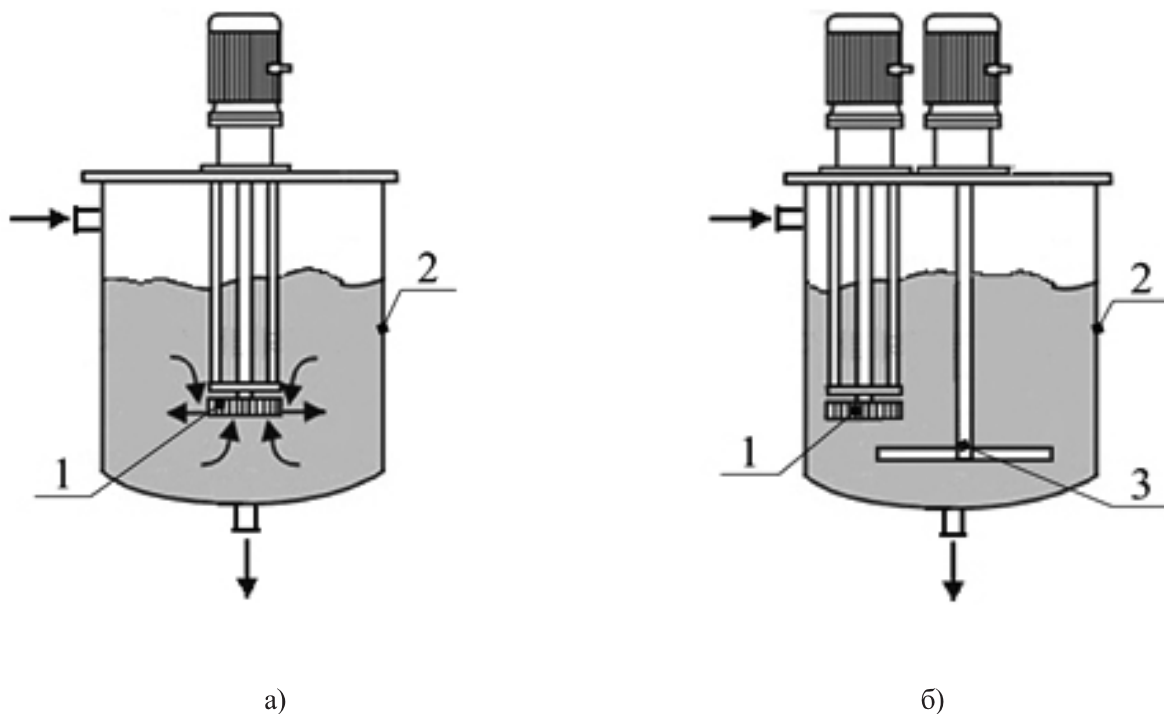


Рисунок 5 — Варіанти встановлення безкорпусного роторно-пульсаційного апарата : а) самостійне; б) з перемішувальним пристроєм: 1— роторно-пульсаційний апарат ; 2— ємність; 3 — перемішувальний пристрій.

пульсацій шнекового живильника, змонтованого на валу ротора перед лопатями (рисунок 6).

складається з рухомого і нерухомого перфорованих дисків (рисунок 7).

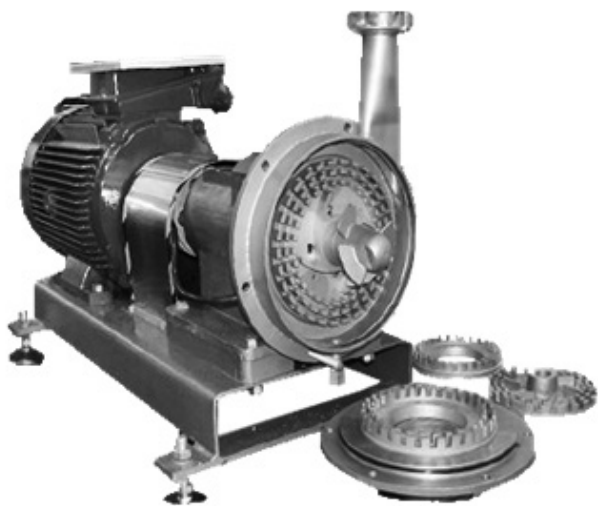


Рисунок 6 — Вид пульсаційного вузла насоса гомогенізатора-диспергатора [39]

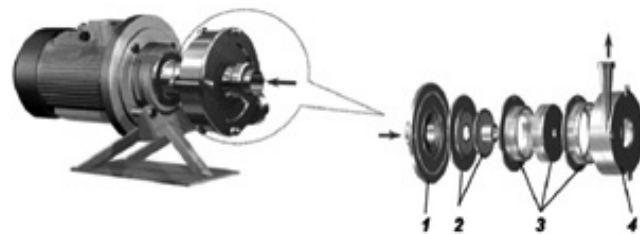


Рисунок 7 — Корпусний роторно-пульсаційний апарат з дисковими елементами [37]: 1 — кришка; 2 — статорно-роторний дисковий вузол; 3 — статорно-роторний циліндричний вузол; 4 — корпус з вихідним патрубком

Встановлення живильника полегшує подачу густих і неоднорідних продуктів, дозволяє руйнувати конгломерати сухих речовин у рідині.

Замість додаткових органів у внутрішній порожнині генератора пульсацій або на додачу до них у корпусних роторно-пульсаційних апаратах перед входом до внутрішньої порожнини генератора пульсацій можуть бути встановлені дискові елементи у вигляді пари, що

Іншими варіантами компоновання робочих органів, що передбачає утворення зони попередньої обробки перед надходженням потоку до генератора пульсацій є встановлення на вході у генератор пульсацій перфорованої плити з розміщенням перед нею на роторі лопатей у вигляді крилатки, або нахилених до осі ротора лопатей, що встановлюються за гвинтовою лінією так, щоб унеможливити проходження рідини у генератор пульсацій без потрапляння на них.

Такі конструкції дозволяють зменшити енерговитрати на обробку рідин і забезпечують підвищення ефективності обробки суспензій.

Геометричні розміри і конфігурація роторно-статорних груп генераторів пульсацій обираються відповідно до

заданої продуктивності по оброблюваному середовищу і виробничих потреб [1—3, 5]. При цьому, найбільш важливими параметрами є діаметри ротора і статора, форма, розміри і кількість прорізів, а також ширина радіального зазору між роторами і статорами генератора пульсацій.

Збільшення кількості ступенів у генераторах пульсацій дозволяє збільшити частоту пульсацій і термін перебування рідини у зоні обробки, що позитивно впливає на якість обробки, особливо емульсій та суспензій, і дозволяє підвищити продуктивність обладнання за рахунок зменшення кількості проходів рідини через зону обробки, необхідної для досягнення заданого результату. При обробці подібних рідин безкорпусні апарати можуть бути виготовлені з меншою кількістю пульсаційних ступенів, ніж корпусні, оскільки кратність циркуляції рідини через зону обробки у безкорпусних апаратів більша, ніж у корпусних. Необхідно враховувати, що зі збільшенням кількості пульсаційних ступенів збільшується діаметр роторно-статорної групи, що спричиняє збільшення витрат енергії. Потужність привода роторно-пульсаційного апарата нелінійно зростає зі збільшенням частоти обертання або діаметра ротора, тому, незалежно від кількості ступенів генератора пульсацій, діаметри роторно-статорних груп промислових апаратів знаходяться у межах 50—350 мм, а швидкість руху ротора дорівнює 10—54 м/с (найчастіше у діапазоні 20—40 м/с). Використання апаратів з більш високими показниками даних параметрів потребує додаткового обґрунтування.

Конфігурація прорізів у роторі та статорі суттєво впливає на гідродинаміку потоку та ефективність обробки рідини. За умов простоти виготовлення найчастіше використовують апарати з прямими радіальними прорізами у формі пазів або отворів (рисунок 8, а, б). Радіальні прорізи забезпечують найбільшу величину пульсацій тиску при проходженні потоком пари ротор—статор, що зумовлено гальмуванням радіальної складової потоку при перекритті тілом ротора прорізей статора і подальшим розгоном потоку при відкритті перерізу внаслідок радіального співпадіння прорізів.

Ширина прорізів обирається відповідно до технологічних потреб виробництва та фізичних властивостей оброблюваного середовища [1, 3, 6]. У [3, 7] рекомендується приймати ширину прорізів для робочих органів діаметром до 100 мм — у межах 1—3 мм, для робочих органів більшого діаметра — у межах 1—11 мм. Для підвищення ефективності обробки у багатоступінчастих генераторах пульсацій ширина отворів у більш віддалених від осі робочих органах може прийматись меншою, ніж у ближчих до осі робочих органах.

За даними [3] висоту прорізів рекомендується приймати такою, що дорівнює 0,1—0,25 діаметра пульсаційного вузла. Остаточна величина висоти прорізів вибирається згідно потреб виробництва і особливостей робочого середовища.

Ширина тіла між прорізами приймається у межах від 0,5 до 2,0 ширини прорізів [3]. З умов спрощення конструкції і простоти виготовлення ширина тіла між прорізами прийнято такою, що дорівнює ширині прорізів.

Зустрічається виконання прорізів під кутом до радіуса або до осі (рисунок 8, в, г) робочих органів. При цьому кут обирається з огляду на швидкість і напрям обертання ротора. Це дозволяє зменшити гідравлічний опір генератора пульсацій, проте, разом з цим зменшується і величина пульсацій.

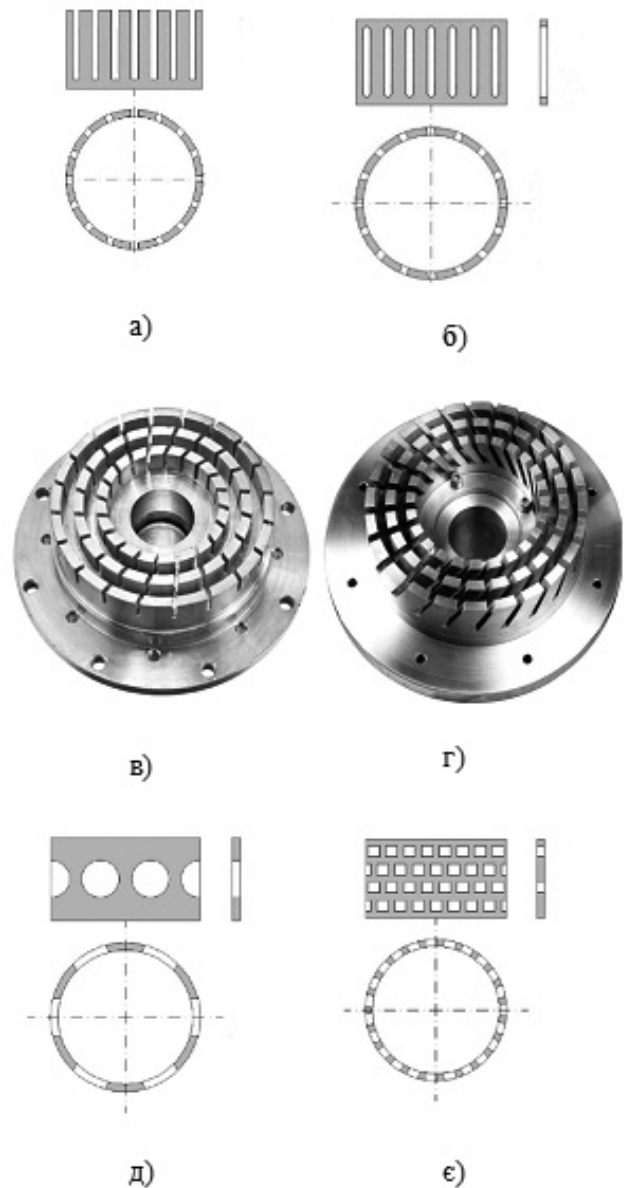


Рисунок 8 — Варіанти статорів з отворами [12, 40]:  
а) прямокутні, б) овальні, в) прямокутні під кутом до радіуса, г) прямокутні пази під кутом до твірної, д) круглі, е) квадратні

Альтернативним є конструювання пульсаційних ступенів, у яких один з циліндрів має радіальні прорізи, а інший — прорізи під кутом до радіуса. Інший варіант



полягає у використанні в пульсаційних ступенях комбінації з циліндрів з вертикальними радіальними прорізами і циліндрів з радіальними прорізами, нахиленими до твірної.

Замість прорізів можлива застосування перфорація ротора і статора у формі отворів, найчастіше круглого, рідше — прямокутного перерізу, що розташовуються в один або декілька рядів (рисунок 8 д, є) [12, 26, 32]. Використання таких отворів у робочих органах генераторів пульсацій не дозволяє створювати пульсації значної величини. Обробка рідин у таких генераторах пульсацій здійснюється за рахунок інтенсивної зміни швидкостей і перерозподілення потоків і високоградієнтного зсуву рідини у зазорах між статором і ротором. Як і у випадку прорізів, розташованих під кутом до радіуса, використовуються і комбіновані конструкції генераторів пульсацій, що складаються з циліндрів з радіальними прорізами і циліндрів з перфорацією отворами.

Ширина радіального зазору між ротором і статором у пульсаційних ступенях для переважної більшості роторно-пульсаційних апаратів знаходиться у межах 0,1—3 мм [41]. Автори [3, 5, 7] рекомендують обирати ширину зазору у межах 0,05—1 мм. Переважна ж більшість обладнання, що пропонується виробниками, виготовляється із зазорами у межах 0,2—1 мм. Причому найдоцільнішим вважається вибір ширини зазору від 0,25—0,3 мм до 0,5 мм. В умовах обертання ротора з високою швидкістю такі ширини зазору дозволяють одержувати швидкості зсуву в зазорі у межах 50000—125000 л/с.

Зазор обирається більшої ширини при обробці високов'язких рідин.

При обробці рідин, що містять дисперсну фазу ширина зазору повинна обиратись близькою до нижньої межі розмірів. Бажано, щоб ширина зазору була меншою за максимальний розмір частинок дисперсної фази у рідині, однак при значній міцності частинок ширина зазору повинна дорівнювати або бути меншою за діаметр твердих частинок [1, 3].

Зі зменшенням ширини зазору ефективність обробки рідин, що містять дисперсні частинки, зростає, однак одержання малих зазорів є вельми складним і вимагає високої точності виготовлення робочих органів і їх монтажу. З цієї точки зору перспективним є застосування апаратів з генераторами пульсацій, робочі органи яких мають конічні перфоровані поверхні, що можуть присаджуватись одна до одної.

## Висновки

Результати проведеного дослідження сучасних промислових зразків роторно-пульсаційних апаратів свідчать про різноманітність підходів до проведення пульсаційної обробки рідин, що на практиці проявляються у інтенсифікації різних впливів гідродинамічної, гідроакустичної або механічної природи.

Висока конкуренція і широка пропозиція роторно-пульсаційних апаратів на ринку свідчать про попит на пульсаційне обладнання, що є найкращим аргументом на користь активізації зусиль у напрямі дослідження пульсаційної обробки рідин. Разом з цим комерційна складова зумовлює стримування поширення інформації щодо результатів досліджень в області пульсаційної техніки.

Аналіз даних, представлених виробниками обладнання у поєднанні з опублікованими результатами досліджень дозволив визначити особливості конструкцій роторно-пульсаційних апаратів, основні параметри генераторів пульсацій та режими їх роботи.

Встановлено актуальність досліджень з виявлення впливу конструкцій роторно-пульсаційних апаратів та конфігурацій робочих органів на параметри та інтенсивність процесів, що у них проводяться, а також на якість одержаних продуктів.

## Література

1. Промтов, М.А. Пульсационные аппараты роторного типа, теория и практика / М.А. Промтов.— М.: Машиностроение-1, 2001. — 247 с.
2. Червяков, В.М. Гидродинамические и кавитационные явления в роторных аппаратах / В.М. Червяков, В.Ф. Юдаев.— М.: Машиностроение, 2007.— 128 с.
3. Балабудкин, М.А. Роторно-пульсационные аппараты в химико-фармацевтической промышленности / М.А. Балабудкин.— М.: Медицина, 1983. — 160 с.
4. Гоберт, В.Ф. Совершенствование технологии приготовления мягких лекарственных форм с повышенным содержанием твердых компонентов / В.Ф. Гоберт, В.А. Лыгорева, М.А. Балабудкин, Н.М. Езерский // Хим.-фарм. журн., 1979. — т. 13. — № 4.— с. 87—90.
5. Промтов, М.А. Методы расчета характеристик роторного импульсного аппарата / М.А. Промтов, А.Ю. Степанов, А.В. Алешин.— Тамбов: ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015.— 148 с.
6. Балабышко, А.М. Гидромеханическое диспергирование / А.М. Балабышко, А.И. Зимин, В.П. Ружицкий.— М.: Наука, 1998. — 331 с.
7. Генералов, М.Б. Машины и аппараты химических и нефтехимических производств / М.Б. Генералов, В.П. Александров, В.В. Алексееви др. // Энциклопедия: Т. IV-12 / подобщ. ред. М.Б. Генералова.— М.: Машиностроение, 2004. — 832 с.
8. Островский, Г.М. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий / Г.М. Островский и др.— Ч. II.— СПб.: НПО «Профессионал», 2006. — 916 с.
9. Cheremisinoff, N.P. Handbook of chemical processing equipment / N.P. Cheremisinoff.— U.K.: Butterworth-Heinemann, 2000.— 535 p.

10. Paul, E.L. Handbook of industrial mixing: science and practice / E.L. Paul, A. Victor, A. Obeng, S.M. Kresta.— U.S.A.: Wiley-Interscience, 2004.— 1448 p.
11. Scale-up of the power draw of inline-rotor-stator mixers with high through put / Björn Schönsted, Hans-Joachim Jacob, Carsten Schilde, Arno Kwade. // Chem. Eng. Res. Des.— 2014, vol. 93.— p. 12-20.
12. SILVERSON. Industrial Mixing Products: [Електронний ресурс].— Режим доступу: <http://www.silverson.com/us/products/>.
13. Kinematica. MEGATRON MT 3100 S: [Електронний ресурс].— Режим доступу: [http://www.Kinematica.ch/uploads/tx\\_abtshop/documents/articles/MEGATRON\\_MT\\_3100\\_S\\_eng\\_A4\\_01.pdf](http://www.Kinematica.ch/uploads/tx_abtshop/documents/articles/MEGATRON_MT_3100_S_eng_A4_01.pdf).
14. Ibw. Produktkatalog: [Електронний ресурс].— Режим доступу: <http://www.ibw-ruehrer.de/en/dl.inc.php?download=produktkatalog.pdf>.
15. Ystral. Z-Inline Dispersers: [Електронний ресурс].— Режим доступу: [http://ystral.com/fileadmin/user\\_upload/Unternehmen/Broschueren/E-Z-Inline.pdf](http://ystral.com/fileadmin/user_upload/Unternehmen/Broschueren/E-Z-Inline.pdf).
16. Kinematica. Inline Dispersers Overview: [Електронний ресурс].— Режим доступу: <http://www.kinematica.ch/en/products/inline-dispersers/overview.html>.
17. IKA. Inline Mixers: [Електронний ресурс].— Режим доступу: <http://www.ikausa.com/product-type/inline-mixers-inline-dispersers-dispersing-machines-high-shear/>.
18. Ibw. UniRex. Rotor/stator systems: [Електронний ресурс].— Режим доступу: <http://www.ibw-ruehrer.de/en/uni-rex.php#>.
19. Fluko. Products catalog: [Електронний ресурс].— Режим доступу: <http://www.fluko.com/en/Products.aspx>.
20. Alfa-Laval. Product sand solutions: [Електронний ресурс].— Режим доступу: <http://www.alfalaval.com/#>.
21. SPX-APV. Products: [Електронний ресурс].— Режим доступу: <http://www.spxflow.com/en/apv/>.
22. Quadro. Products: [Електронний ресурс].— Режим доступу: <http://www.quadroliquids.com/products/>.
23. Sower. Products Dispersers / Dissolvers: [Електронний ресурс].— Режим доступу: <http://www.sowergroup.com/dispersing/>.
24. Admix. All Equipment: Inline Mixing and Milling: [Електронний ресурс].— Режим доступу: <http://www.admix.com/inline-mixing-and-milling-mixers>.
25. Farfly. Products Emulsifiers: [Електронний ресурс].— Режим доступу: <http://www.farfly.com/products/emulsifiers.html>.
26. Arde Barinco Inc. Continuous High Shear Homogenizer Mixer (Cavitron): [Електронний ресурс].— Режим доступу: <http://www.arde-barinco.com/Continuous-High-Shear-Homogenizer-Mixer-CAVITRON-C177.aspx>.
27. Fryma Koruma. Inline Homogenisator: [Електронний ресурс].— Режим доступу: <http://www.frymakoruma.com/gb/products/inline-homogenizer.html>.
28. Siehe Industry. Product sand Solutions: [Електронний ресурс].— Режим доступу: <http://sieheindustry.com/>.
29. Энергомашкомплект. Роторно-пульсационные аппараты: [Електронний ресурс].— Режим доступу: <http://energomashkomplekt.all.biz/rotorno-pulsacionnye-apparaty-gra-n315673>.
30. Дальтех прогрес. Роторно-пульсационные аппараты РПА: [Електронний ресурс].— Режим доступу: <http://daltech-progress.ru/equipment/Homogenizer/>.
31. Молтехснаб. Диспергатор РПА: [Електронний ресурс].— Режим доступу: <http://moltechsnab.ru/dispergatory>.
32. Condit Company. Mixers: [Електронний ресурс].— Режим доступу: [www.conditcompany.com/equipment?page=shop.browse&category\\_id=72](http://www.conditcompany.com/equipment?page=shop.browse&category_id=72).
33. ЭНА. Роторно-пульсационные аппараты и установки типа РПА: [Електронний ресурс].— Режим доступу: [http://www.ena.ru/products/nasosy\\_pishev\\_prom/rotorno\\_puls/](http://www.ena.ru/products/nasosy_pishev_prom/rotorno_puls/).
34. Ross. Mixers and Blenders: [Електронний ресурс].— Режим доступу: <http://www.mixers.com/catlist.asp>.
35. IKA. Process Technology: [Електронний ресурс].— Режим доступу: [http://www.ikausa.com/wp-content/uploads/2013\\_IKA-Process-Technology.pdf](http://www.ikausa.com/wp-content/uploads/2013_IKA-Process-Technology.pdf).
36. Arde Barinco. High shear plus scraped surface agitator multi shaft mixer. max mixer: [Електронний ресурс].— Режим доступу: <http://www.arde-barinco.com/High-Shear-Plus-Scraped-Surface-Agitator-Multi-Shaft-Mixer-MAXI-MIXER-C178.aspx>.
37. Долинский, А.А. Метод ДИВЭ в инновационных технологиях и теплообменном оборудовании / А.А. Долинский, Л.Н. Грабов, Т.Л. Грабова // Пром. теплотехника, 2012.— т. 34.— № 3.— с. 18—30.
38. Агромаш. Пищевое оборудование. Оборудование для пищевых продуктов. Гомогенизирующее оборудование. Кондитерское и прочее технологическое оборудование. Разработка. Изготовление: [Електронний ресурс].— Режим доступу: <http://www.agro-mash.ru/index.htm>.
39. Новатор. Каталог: [Електронний ресурс].— Режим доступу: <https://www.ptknovator.ru/katalog/gomogenizatory-dispergatory/dispergator/>.
40. Shanghai ELE Mechanical & Electrical Equipment Co., Ltd. Products: [Електронний ресурс].— Режим доступу: <http://elemix.en.made-in-china.com/product-list-1.html>.
41. Development in continuous mechanical production of oil-in-water macroemulsions / H. Karbstein, H. Schubert // Chem. Eng. Process.— 1995, vol. 35.— p. 205—211.

## References

1. Promtov, M.A. Pulsatsionnye apparaty i rotornogo tipa teoriya i praktika / M.A. Promtov.— М.: Mashinostroenie-1, 2001.— 247 p.
2. Chervyakov, V.M. Gidrodinamicheskie i kavitatsionnye yavleniya v rotornykh apparatakh / V.M. Chervyakov, V.F.

Yudaev.— M.: Mashinostroenie, 2007.— 128 p.

3. Balabudkin, M.A. Rotorno-pulsatsionnyie apparaty i v himiko-farmatsevticheskoy promyshlennosti / M.A. Balabudkin.— M.: Meditsina, 1983.— 160 p.

4. Gobert, V.F. Sovershenstvovanie tehnologii prigotovleniya myagkikh lekarstvennykh form s povyishennym soderzhaniem tverdykh komponentov / V.F. Gobert, V.A. Lyigoreva, M.A. Balabudkin, N.M. Ezerskiy // Khim.-farm. zhurn., 1979.— t. 13.— # 4.— P. 87—90.

5. Promtov, M.A. Metody i rascheta kharakteristik rotornogo impulsnogo apparata / M.A. Promtov, A.Yu. Stepanov, A.V. Aleshin.— Tambov: FGBOU VPO «TGTU», 2015.— 148 p.

6. Balabyishko, A.M. Gidromekhanicheskoe dispergirovanie / A.M. Balabyishko, A.I. Zimin, V.P. Ruzhitskiy.— M.: Nauka, 1998.— 331 p.

7. Generalov M.B. Mashiny i apparaty khimicheskikh i neftehimicheskikh proizvodstv M.B. Generalov, V.P. Aleksandrov, V.V. Alekseev i dr. // Entsiklopediya: T. IV-12 / podobsch. red. M.B. Generalova.— M.: Mashinostroenie, 2004.— 832 p.

8. Ostrovskiy, G.M. Novyyi spravochnik khimika i tekhnologa. Protssy i apparaty khimicheskikh tekhnology / G.M. Ostrovskiy i dr.— Ch.II.— SPb.: NPO «Professional», 2006.— 916 p.

9. Cheremisinoff N.P. Handbook of chemical processing equipment / N.P. Cheremisinoff.— U.K.: Butterworth-Heinemann, 2000.— 535 p.

10. Paul E.L. Handbook of industrial mixing: science and practice / E.L. Paul, A. Victor, A. Obeng, S.M. Kresta.— U.S.A.: Wiley-Interscience, 2004.— 1448 p.

11. Scale-up of the power draw of inline-rotor-stator mixer with high throughput / Björn Schönsted, Hans-Joachim Jacob, Carsten Schilde, Arno Kwade. // Chem. Eng. Res. Des.— 2014, vol. 93.— P. 12-20.

12. SILVERSON. Industrial Mixing Products: [Elektronnyiresurs].— Rezhym dostupu: <http://www.silverson.com/us/products/>.

13. Kinematica. MEGATRON MT 3100 S: [Elektronnyiresurs].— Rezhym dostupu: [http://www.Kinematica.ch/uploads/tx\\_abtshop/documents/articles/MEGATRON\\_MT\\_3100\\_S\\_eng\\_A4\\_01.pdf](http://www.Kinematica.ch/uploads/tx_abtshop/documents/articles/MEGATRON_MT_3100_S_eng_A4_01.pdf).

14. Ibw. Produktkatalog: [Elektronnyiresurs].— Rezhym dostupu: <http://www.ibw-ruehrer.de/en/dl.inc.php?download=produktkatalog.pdf>.

15. Yastral. Z-Inline Dispersers: [Elektronnyiresurs].— Rezhym dostupu: [http://ystral.com/fileadmin/user\\_upload/Unternehmen/Broschueren/E-Z-Inline.pdf](http://ystral.com/fileadmin/user_upload/Unternehmen/Broschueren/E-Z-Inline.pdf).

16. Kinematica. Inline Dispersers Overview: [Elektronnyiresurs].— Rezhym dostupu: <http://www.kinematica.ch/en/products/inline-dispersers/overview.html>.

17. IKA. Inline Mixers: [Elektronnyiresurs].— Rezhym dostupu: <http://www.ikausa.com/product-type/inline-mixers-inline-dispersers-dispersing-machines-high-shear/>.

18. Ibw. UniRex. Rotor/stator systems: [Elektronnyiresurs].— Rezhym dostupu: <http://www.ibw-ruehrer.de/en/>

uni-rex.php#.

19. Fluko. Productscatalog: [Elektronnyiresurs].— Rezhym dostupu: <http://www.fluko.com/en/Products.aspx>.

20. Alfa-Laval. Product sand solutions: [Elektronnyiresurs].— Rezhym dostupu: <http://www.alfalaval.com/#>.

21. SPX-APV. Products: [Elektronnyiresurs].— Rezhym dostupu: <http://www.spxflow.com/en/apv/>.

22. Quadro. Products: [Elektronnyiresurs].— Rezhym dostupu: <http://www.quadroliquids.com/products/>.

23. Sower. Products Dispersers/Dissolvers: [Elektronnyiresurs].— Rezhym dostupu: <http://www.sowergroup.com/dispersing/>.

24. Admix. All Equipment: Inline Mixing and Milling: [Elektronnyiresurs].— Rezhym dostupu: <http://www.admix.com/inline-mixing-and-milling-mixers>.

25. Farfly. Products Emulsifiers: [Elektronnyiresurs].— Rezhym dostupu: <http://www.farfly.com/products/emulsifiers.html>.

26. Arde Barinco Inc. Continuous High Shear Homogenizer Mixer (Cavitron): [Elektronnyiresurs].— Rezhym dostupu: <http://www.arde-barinco.com/Continuous-High-Shear-Homogenizer-Mixer-CAVITRON-C177.aspx>.

27. Fryma Koruma. Inline Homogenisator: [Elektronnyiresurs].— Rezhym dostupu: <http://www.frymakoruma.com/gb/products/inline-homogenizer.html>.

28. Siehe Industry. Products and Solutions: [Elektronnyiresurs].— Rezhym dostupu: <http://sieheindustry.com/>.

29. Energomashkomplekt. Rotorno-pulsatsionnyie apparaty RPA: [Elektronnyiresurs].— Rezhym dostupu: <http://energomashkomplekt.all.biz/rotorno-pulsatsionnyie-apparaty-rpa-n315673>.

30. Daltechprogres. Rotorno-pulsatsionnyie apparaty RPA: [Elektronnyiresurs].— Rezhym dostupu: <http://daltech-progres.ru/equipment/Homogenizer/>.

31. Moltechsnab. Dispergator RPA: [Elektronnyiresurs].— Rezhym dostupu: <http://moltechsnab.ru/dispergatory>.

32. Condit Company. Mixers: [Elektronnyiresurs].— Rezhym dostupu: [www.conditcompany.com/equipment?page=shop.browse&category\\_id=72](http://www.conditcompany.com/equipment?page=shop.browse&category_id=72).

33. ENA. Rotorno-pulsatsionnyie apparaty i ustanovki tipa RPA: [Elektronnyiresurs].— Rezhym dostupu: [http://www.ena.ru/products/nasosy\\_pishev\\_prom/rotorno\\_puls/](http://www.ena.ru/products/nasosy_pishev_prom/rotorno_puls/).

34. Ross. Mixer sand Blenders: [Elektronnyiresurs].— Rezhym dostupu: <http://www.mixers.com/catlist.asp>.

35. IKA. Process Technology: [Elektronnyiresurs].— Rezhym dostupu: [http://www.ikausa.com/wp-content/uploads/2013\\_IKA-Process-Technology.pdf](http://www.ikausa.com/wp-content/uploads/2013_IKA-Process-Technology.pdf).

36. Arde, Barinco. High shear plus scraped surface agitator multi-shaft mixer. maximixer: [Elektronnyiresurs].— Rezhym dostupu: <http://www.arde-barinco.com/High-Shear-Plus-Scraped-Surface-Agitator-Multi-Shaft-Mixer-MAXIMIXER-C178.aspx>.

37. Dolinskiy, A.A. Metod DIVE v innovatsionnykh tekhnologiyakh i teplomassoobmenom oborudovanii / A.A.

Dolinskiy, L.N. Grabov, T.L. Grabova // Prom. teplotekhnika, 2012.— t. 34.— # 3.— P. 18—30.

38. Agromash. Pischevoe oborudovanie. Oborudovanie dlya pishchevykh produktov. Gomogeniziruyushchee oborudovanie. Konditerskoe i prochee tekhnologicheskoe oborudovanie. Razrabotka. Izgotovlenie: [Elektronnyi resurs].— Rezhym dostupu: <http://www.agro-mash.ru/index.htm>.

39. Novator. Katalog: [Elektronnyiresurs].— Rezhym dostupu: <https://www.ptknovator.ru/katalog/gomogenizatory-dispergatory/dispergator/>.

40. Shanghai ELE Mechanical&Electrical Equipment Co., Ltd. Products: [Elektronnyiresurs].— Rezhym dostupu:<http://elemix.en.made-in-china.com/product-list-1.html>.

41. Development in continuous mechanical production of oil-in-water macro emulsions / H. Karbstein, H. Schubert // Chem. Eng. Process. — 1995, vol. 35. — p. 205—211.

*Надійшла*

УДК 66.06: 66.084

## Пульсационная обработка жидкостей в промышленных роторных аппаратах

**A.O. Seminsky  
Г.О. Лялька**

Приведены результаты исследования современных промышленных образцов роторно-пульсационных аппаратов. Определены их конструкционные и режимные параметры. Установлено, что по конструкционным признакам роторно-пульсационные аппараты можно принципиально разделить на два типа: корпусные и безкорпусные. На основании анализа данных, представленных производителями оборудования и опубликованных результатов исследований определены основные конфигурации и конструкции рабочих органов роторно-пульсационных аппаратов. Также для обоих типов аппаратов определены диапазоны мощности, производительности, частот вращения и линейных

скоростей ротора, диаметров роторно-статорных групп. Проанализированы конструкции аппаратов с дополнительными рабочими органами, такими как крылатки, шнеки и перфорированные диски. Установлено особенности конструкций рабочих органов и режимные параметры роторно-пульсационных аппаратов при обработке высоковязких и поликомпонентных жидких систем.

*Ключевые слова: роторно-пульсационный аппарат, генератор пульсаций, обработка, жидкость, производительность, мощность.*

UDC 66.06: 66.084

## Liquids pulse processing in industrial rotary apparatuses

**A.O. Seminsky  
G.O. Lyalka**

The authors of the article presents the results of study of modern industrial samples of rotary pulse apparatuses defining their design parameters and operating conditions. In this review the authors describes two main types of rotary pulse apparatuses according to their design parameters i.e. in-line (autonomous) and integrated (submerged) ones, and considers the peculiarities of industrial usage and arrangement of pulse generators for each type. On the basis of the analysis of the data presented by the equipment manufacturers and published results of the research the author defines main configurations and design of the actuators of rotary pulse apparatuses showing the ranges of the power, productivity, rotation frequency and linear velocity of rotor and rotor stator units' diameters for both types of the apparatuses. The design of the apparatuses with supplementary actuators such as impeller, screw and perforated discs is analyzed. The authors also defines the specific design features and operating parameters of rotary pulse apparatuses for processing high-viscosity and multicomponent complex liquids.

*Keywords: rotary pulse apparatus, pulse generator, processing, liquid, productivity, power*