

## ВСТУП

На сучасних гірничо-збагачувальних підприємствах, де відбувається переробка залізорудної сировини, використовуються технологічні цикли мокрого збагачення, при якому подрібнена сировина транспортується у потоці води, утворюючи так звану пульпу. Для перекачування такої суміші, яка має досить високу абразивність, використовуються в основному відцентрові насоси. Але висока абразивність пульпи, що перекачується, суттєво знижує строк служби деталей насосів, що контактують з нею, особливо робочих коліс.

Попри те, що відцентрові насоси застосовують практично у всіх гірничо-збагачувальних підприємствах, крім швидкого зношування поверхонь деталей насосу, що контактують з пульпою, їм притаманні наступні недоліки: відсутність для більшості насосів можливості здійснення самовсмоктування рідини при розміщенні їх вище за рівень у приймальному резервуарі; обмеження через виникнення кавітації допустимої вакуумметричної висоти всмоктування; суттєві обмеження при перекачуванні гідросумішей, що містять тверді домішки; суттєве зниження ККД при малих подачах та великих напорах, а також при перекачуванні в'язких рідин; неможливість при регулюванні збільшити тиск вище значення, що має місце при нульовій подачі.

Одним з варіантів заміни відцентрових насосів для перекачування пульпи є використання гідравлічних або гідроструменевих насосів, які призначені для здійснення процесу взаємного перемішування струменя робочої (активної) рідини з потоком підсмоктується (пасивного) середовища та подальшого їх спільного транспортування. У ролі пасивного середовища виступає пульпа, що містить крім рідини тверді або газоподібні дисперсні домішки. Таким чином, зовнішня енергія до гідроструменевих насосів підводиться робочою рідиною.

Для забезпечення змішування активної та пасивної середовищ і їх подальшого спільного транспортування необхідно, щоб активна (робоча) рідина мала більш високий тиск, ніж тиск низьконапірного (пасивного) середовища.

Безперечними перевагами гідроструменевих насосів є висока всмоктуюча здатність, можливістю перекачування гідросумішей, що містять тверді домішки, агресивних середовищ; відсутність рухомих деталей, простота конструкції; малими габаритними розмірами і масою та простотою регулювання подачі та напору.

Отже дослідження процесу транспортування пульпи залізорудної сировини на гірничо-збагачувальних підприємствах гідроструменевими насосами є **актуальним науково-технічним завданням.**

**Метою роботи** є підвищення ефективності гідро транспортування пульпи на гірничо-збагачувальних підприємствах за рахунок обґрунтування раціональних параметрів гідроструменевих насосів.

**Об'єкт досліджень** – процес транспортування пульпи залізорудної сировини на гірничо-збагачувальних підприємствах гідроструменевими насосами.

**Предмет дослідження** – параметри гідроструменевих насосів.

**Наукове положення.** Вперше встановлено, що значення коефіцієнту площі, який визначається як відношення площі вхідного патрубку пульпопроводу до площу патрубка подачі води  $k_s = 2.336$  та значення коефіцієнту ширини, який визначається як відношення ширини першого каналу до ширини другого каналу  $k_k = 1$  забезпечують оптимальні параметри гідроструменевого насосу щілинного, при яких витрата робочої рідини (води)  $\rightarrow \min$ ; потрібна потужність насосу для води  $\rightarrow \min$ ; витрата пульпи на вході  $\rightarrow \max$ ; швидкість суміші на виході з насосу  $\rightarrow \max$ ; ККД  $\rightarrow \max$ ; напір  $\rightarrow \max$ .

## 1. АНАЛІЗ ГІДРОСТРУМІННИХ НАСОСІВ

### 1.1. Порівняльний аналіз насосів для перекачування пульпи

Подрібнення та основні процеси збагачення руд кольорових та чорних металів, вугілля та гірничо-хімічної сировини пов'язані з необхідністю переробки великих обсягів рудних гідросуспензій (пульп). Для реалізації складних технологічних схем збагачення на сучасних фабриках та видалення хвостів збагачення широко використовують спеціальні насоси, які називаються відцентрові піскові та ґрунтові насоси. Повсюдне впровадження класифікації в гідроциклонах поставило насоси в один ряд з основними технологічними агрегатами, що суттєво впливають на ефективність роботи відділення подрібнення, збереження стабільності всього технологічного циклу та надійність роботи гідротранспортних систем та хвостового господарства [11].

Насос є гідромашиною, що перетворює зовнішню енергію, що підводиться до неї, в механічну енергію краплинної рідини [9].

За механізмом передачі зовнішньої енергії до рідини, що перекачується, усі насоси поділяють на [9]:

- динамічні, у яких енергія передається за рахунок дії масових (інерційних) сил або сил рідинного тертя.
- об'ємні, у яких енергія передається за рахунок сил тиску на поверхню рідини, тобто. витіснення рідини з певного обсягу. Область використання насосів об'ємного типу обмежується в основному високими тисками та малими подачами.

У лопатевих динамічних насосах напір створюється за рахунок обертання лопатевого робочого колеса. Крім того, відцентрові, осьові та вихрові насоси мають ідентичні робочі та кавітаційні характеристики [9].

До динамічних насосів відносять [9]:

- лопатеві (відцентрові, осьові), в яких на рідину діють переважно інерційні сили;
- вихрові насоси;

- гідрострумінні насоси, де енергія передається рідині в основному за рахунок рідинного тертя.

Відцентрові насоси застосовують практично у всіх галузях народного господарства. Осьові насоси мають переваги при перекачуванні рідин з великими подачею при відносно невеликих напорах [9].

Вихрові насоси використовують у тих випадках, де потрібно забезпечити малі подачі при порівняно високих напорах, а також коли потрібно забезпечити самоусмоктування або перекачування рідин, що містять нерозчинені гази [9].

До переваг найбільш часто застосовуваних лопатевих насосів відносяться наступні [9]:

- можливість безпосереднього з'єднання з швидкохідними двигунами обертання (електродвигунами, парової або газової турбіною);
- високий ККД, що сягає 0,90 і більше великих насосів;
- відносно малі габаритні розміри та маса;
- можливість забезпечення практично рівномірного (без пульсацій) потоку;
- простота обслуговування.

Недоліки лопатевих насосів [9]:

- відсутність для більшості насосів можливості здійснення самовсмоктування рідини при розміщенні їх вище за рівень у приймальному резервуарі;
- обмеження через виникнення кавітації допустимої вакуумметричної висоти всмоктування, особливо при перекачуванні нагрітих та легкокиплячих рідин;
- неможливість перекачування газорідинних сумішей та суттєві обмеження при перекачуванні гідросумішей, що містять тверді домішки;
- суттєве зниження ККД при малих подачах та великих напорах, а також при перекачуванні в'язких рідин;

– неможливість при регулюванні збільшити тиск вище значення, що має місце при нульовій подачі.

Внаслідок низьких термінів служби робочих коліс і уліт відцентрових піскових та ґрунтових насосів потрібно встановлення 100% резерву цих деталей, причому на великих комбінатах проводять 6000-8000 ремонтів на рік (включаючи заміни зношених робочих деталей) [11].

До основних причин, що визначають малі ресурси робочих деталей та надійність насосів типу ГР, ГРТ, ПС, ПБ, слід віднести низьку якість литих деталей, зумовлену насамперед відсутністю проведення подвійної термообробки деталей із сплаву ІЧХ28Н2, відсутністю регулювання частоти обертання ротора у насосів з метою підбору найбільш сприятливих режимів експлуатації, низькою ремонтпридатністю та незадовільною конструкцією сальпінкових вузлів, застосуванням для подачі в сальники оборотної (забрудненої) води [11].

Насоси типів ГР та ПБ, якими в даний час в основному оснащені збагачувальні фабрики, не задовольняють сучасним вимогам щодо показників надійності, енергоємності, можливості регулювання робочих параметрів. Крім того, насоси цих типів застаріли [11].

Піскові (ґрунтові) насоси відносяться до групи відцентрових і призначені для транспортування на збагачувальних фабриках абразивних гідросумішей із вмістом твердої речовини за обсягом до 30-40% та щільністю пульпи до 2800 кг/м<sup>3</sup>. Допустима крупність твердих включень у пульпі: до 6 мм для насосів з металевим робочим колесом та до 2 мм при застосуванні гумованих робочих коліс [11].

Сучасне покоління насосів для збагачувальних фабрик: горизонтальних типів ГРА в металевому (Т) або корундованому (К) виконаннях, НПБ в металевому (Т) і гумованому (Р) виконаннях і ПР в гумованому виконанні, а також вертикальний ПБР в гумованому (Р) виконанні має підвищений ресурс деталей проточної частини завдяки зниженню частоти обертання, тобто практично шляхом застосування робочих коліс великих діаметрів. За збереження значення коефіцієнта стиснення вдалося збільшити товщину лопаток і забезпечити збереження досить

високого ККД. Для зменшення інтенсивності зношування улиги збільшили її радіальний переріз, при цьому знизилася швидкість руху пульпи у відведенні [11].

Але навіть це не в змозі повністю подолати головну проблему транспортування висока абразивних пульп, а саме інтенсивне гідроабразивне зношення робочих поверхонь коліс та улiт [11].

Численні дослідження та практика експлуатації піскових насосів дозволяють охарактеризувати рух гідросуміші проточними каналами наступним чином. Зазвичай потік гідросуміші у каналах насосів є турбулентним. Структура його тісно пов'язана з фізичними явищами, що спостерігаються у турбулентних потоках однорідних рідин. Разом з тим відомо, що в потоці гідроабразивної суміші при великих числах Рейнольдса відбувається інтенсивне вихорові утворення, яке обумовлює пульсацію абразивних частинок і частинок рідини, що знаходяться в вихровому русі. Внаслідок наявності вихорів та турбулентності потоку миттєва швидкість частинок може змінюватись у будь-яких напрямках. В результаті цього тверді частинки, що містяться в потоці, ударяють по поверхні деталей під різними кутами атаки, викликаючи цим її знос. .

На поверхні деталей, що працюють в гідроабразивному середовищі, виявляються ділянки, зношені порівняно рівномірно, і ділянки, руйнування яких має вигляд окремих заглиблень або наскрізних каверн, тобто відзначається знос рясні і місцевий [11].

Загальний та місцевий гідроабразивний знос спостерігається у всіх роторних машин, що працюють на воді та повітрі, в яких містяться абразивні частки. Результат місцевого зносу глибокі каверни з характерною хвилястістю бічної поверхні. Дуже часто такі каверни утворюються на стику деталей, наприклад бронедиска та корпусу насоса, у місцях наплавлення тощо.

Максимальна глибина каверн може дорівнювати товщині стінки деталі, у той час як загальний знос за той же період роботи зазвичай буває незначним. Зазначене свідчить у тому, що місцевий знос протікає у кілька разів швидше загального зносу [11].

Гідроструменеві насоси є пристроями, призначеними для здійснення процесу взаємного перемішування струменя робочої (активної) рідини з потоком підсмоктуючого (пасивного) середовища та подальшого їх спільного транспортування. Пасивне середовище може бути рідиною, газом або гідросумішшю, що містить крім рідини тверді або газоподібні дисперсні домішки. Таким чином, зовнішня енергія до гідроструминних насосів підводиться робочою рідиною [9].

Для забезпечення змішування активного та пасивного середовищ і їх подальшого спільного транспортування необхідно, щоб активна (робоча) рідина мала більш високий тиск, ніж тиск низьконапірного (пасивного) середовища. Суміш середовищ після апарату матиме проміжний тиск між тисками активної (робочої) рідини та (пасивного) середовища.

Зазначимо переваги гідроструменевих насосів [9]:

- висока здатність до самовсмоктування;
- можливістю перекачування рідин, газів, газорідинних сумішей, гідросумішей, що містять тверді домішки, агресивних середовищ;
- відсутність рухомих деталей;
- простота будови;
- малі габаритні розміри та маса;
- можливість розміщення у важкодоступних місцях;
- простота регулювання подачі та напору.

Попри безперечні переваги, гідроструменеві насоси мають і суттєві недоліки [9]:

- відсутність автономного приводу;
- необхідність використання для приводу стороннього джерела напірної рідини;
- низький ККД, який не перевищує в кращих конструкціях значення 0,35-0,4;
- безповоротне скидання великої кількості рідини, що використовується як робоче (активне) середовище.

ККД гідроструминних насосів має природну межу, обумовлену неминучістю втрат при змішуванні робочого (активного) і перекачуваного (пасивного) потоків [9].

Одним зі шляхів усунення перелічених недоліків є використання установок, в яких відцентрові та гідроструминні насоси застосовують спільно. Такі установки мають комплекс показників, яких не мають окремо взяті гідроструменевий або відцентровий насос. Зокрема, на основі спільного застосування відцентрових та гідроструминних насосів можуть бути створені установки, що дозволяють досягти наступних переваг [9]:

- змінювати в широкому діапазоні робочі характеристики відцентрових насосів (збільшувати в кілька разів створюваний ними натиск або подачу);
- збільшувати до десятків і навіть сотень метрів глибину, з якої можна піднімати рідину відцентровими насосами, розташованими вище за резервуар (джерела);
- запобігати кавітації у відцентрових насосах, що працюють при значних вакуумметричних висотах всмоктування, а також при роботі на нагрітих, перегрітих або легкокиплячих рідинах;
- перекачувати гідросуміші з твердими та (або) газоподібними включеннями; створювати вакуум і відкачувати гази (струменеві вакуум-насоси), створювати тиск газу (струменеві компресори);
- охолоджувати або очищати повітря (газ) від домішок (струменеві установки з диспергованим струменем рідини);
- здійснювати змішування та розчинення рідких, твердих та газоподібних середовищ та виконувати багато інших функцій.

Тому підвищення ККД установок з відцентровими та гідроструминними насосами може бути досягнуто, якщо більшу частину роботи з перекачування рідини (гідросуміші) здійснюватиме відцентровий насос, що має високий ККД. Струменевий насос виконуватиме лише ті технологічні функції, які не може



здійснити відцентровий насос (здійснювати самоусмоктування, пригнічувати кавітацію, перекачувати гази або тверді речовини).

Розглянемо основні групи показники насосів, що характеризують їх роботу [9]:

- технологічні;
- ергономічні;
- надійнісні.

Визначають номінальні показники, при яких насос має експлуатуватися, та оптимальні, що відповідають максимальному економічному ефекту від використання насоса. Під оптимальним режимом найчастіше розуміють роботу з максимальним ККД. У багатьох випадках номінальний та оптимальний режими роботи насосів та установок не збігаються. Це пояснюється необхідністю у реальних (виробничих) умовах забезпечити будь-який показник роботи установки, який не збігається на робочих характеристиках насоса з режимом максимального ККД [9].

Основні технологічні показники насосів, а саме [9]:

- подачу  $Q$ ,
- напір  $H$ ,
- потужність  $N$ ;
- вид та параметри енергетичного живлення приводу;
- характеристики середовищ, що перекачуються і споживаються (щільність  $\rho$ , температуру  $t$ , наявність або відсутність в рідині твердих або газоподібних домішок);
- кавітаційні (антикавітаційні) властивості;
- характеристики самовсмоктування;
- коефіцієнти корисної дії (ККД);
- масу, габаритні розміри насоса.

Розглянемо характеристики насосів, що використовуються на збагачувальних фабриках для перекачування пульп.

Відцентрові піскові насоси призначені для перекачування пульп (рис 1.1) [8].

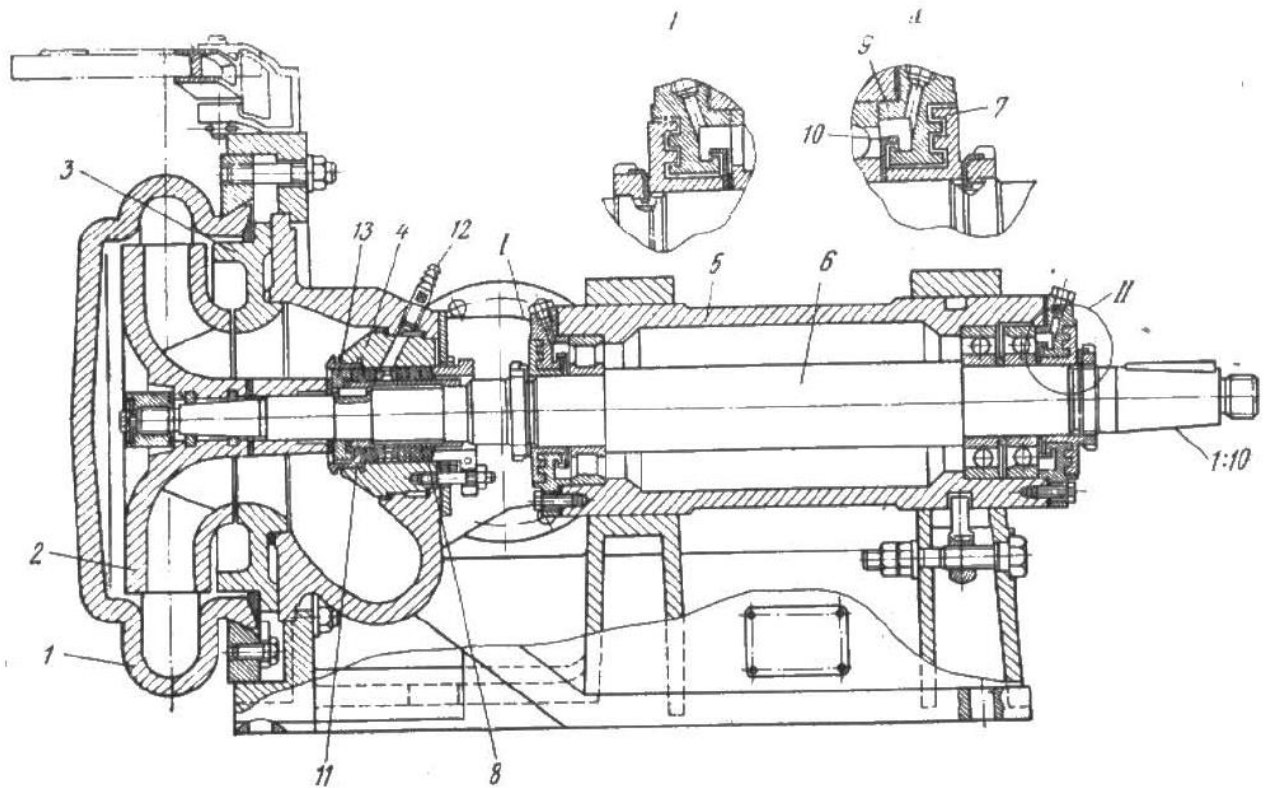


Рис 1.1 - Насос пісковий 6Пс-10 [8]: 1 - уліта; 2 - робоче колесо; 3 - диск; 4 - корпус сальника; 5 - склянка; 6 - вал; 7 - кришка лабіринту; 8 - набивання сальника; 9 - кришка притискна; 10 - кільце відбивне; 11 - втулка захисна; 12 - ніпель подачі води в сальник; 13 - кільце сальника

Нормальна робота сальника забезпечується подачею в нього через ніпель 12 води для охолодження і мастила під тиском на  $0,5 \text{ кгс/см}^2$  більшим, ніж тиск на вході в насос. Витрата води: 25-30 л/год для насосів I групи; 35-40 л/год для насосів II групи; 40-45 л/год для III групи.

У разі потреби насоси можуть працювати без подачі води в сальниковий пристрій. Лабіринтове ущільнення підшипникових вузлів допускає застосування як рідкого, так і консистентного мастила [8].

Для збільшення напору допускається послідовна робота двох насосів одного типорозміру при щільності пульпи трохи більше  $1,25 \text{ кг/дм}$ .

Допустима щільність пульпи під час роботи у оптимальному режимі 1,5— 1,9 кг/дм<sup>3</sup>. Робочі деталі піскових насосів (робоче колесо, улита) виготовляють І8 зносостійкого сплаву ІЧХ28Н2 (300Х28Н2) [8].

Для насосів, що перекачують пульпу після другої стадії подрібнення, допускається застосування гумованих деталей.

Технічна характеристика піскових насосів типу ПС наведена у табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Технічна характеристика горизонтальних консольних піскових насосів [8]

Модель насосу	Подача, м <sup>3</sup> /год	Напір, м вод.ст.	Висота всмоктування, м вод.ст	ККД	Електродвигун			Робоча область подачі, м <sup>3</sup> /год	Габаритні розміри, мм			Мінімальний розмір перетину проточного	Маса агрегату, кг
					Тип	Потужність, кВт	Частота обертання, об/хв		довжина	ширина	висота		
НП-1М	7,2	12	1,5	50	-	2,2	1420	3,5-9	900	350	380	8	98
2,5Пс-6	34	18	7	50	АО2-42-4	5,5	1450	17-38	1387	581	600	20	340
3Пс-6	54	24	6,5	52	АО2-61-4	13	1450	28-65	1460	510	375	25	403
4Пс-6	85	32	5	54	АО-2-72-4	30	1450	45-100	1825	965	830	30	912
4Пс-10	85	16,5	6	58	АО-2-61-4	13	1450	48-105	1525	580	640	35	440
5Пс-8	135	44	5	56	АО-2-82-4	55	1450	72-165	2120	920	910	35	1040
5Пс-10	135	22	5,5	60	АО2-72-4	30	1460	80-160	1950	895	875	40	905
6Пс-6	200	56	4	58	АО2-92-4	100	1470	130-280	2375	1075	1135	42	1625
6Пс-10	216	30	4	63	АО2-82-4	55	1450	120-270	2140	795	895	46	1025
8Пс-8	345	52	3	60	АО3-314-S4	160	1470	200-430	2745	1075	1190	55	2480
8Пс-10	342	41	2	65	АО2-92-4	100	1470	195-430	2650	900	1135	55	1700

8Пс-14	342	16,5	6	68	АО2-82-6	40	980	185-390	2265	915	1130	55	1435
5ШМ-1	150	33	6,85	-		-	1450	95-200	278	832	720	37	335

Грунтові насоси (землесоси) призначені для транспортування пульпи на великі відстані. На збагачувальних фабриках насоси застосовуються в основному для перекачування хвостів у хвостосховища. Їх пристрій та принцип дії аналогічні пристрою та принципу дії піскових насосів з центральним живленням, але вони відрізняються великою подачею та напором, а також конструкцією окремих елементів. Насос відцентровий ґрунтовий 8Гр-8Т показаний на рис. 1.2 [8].

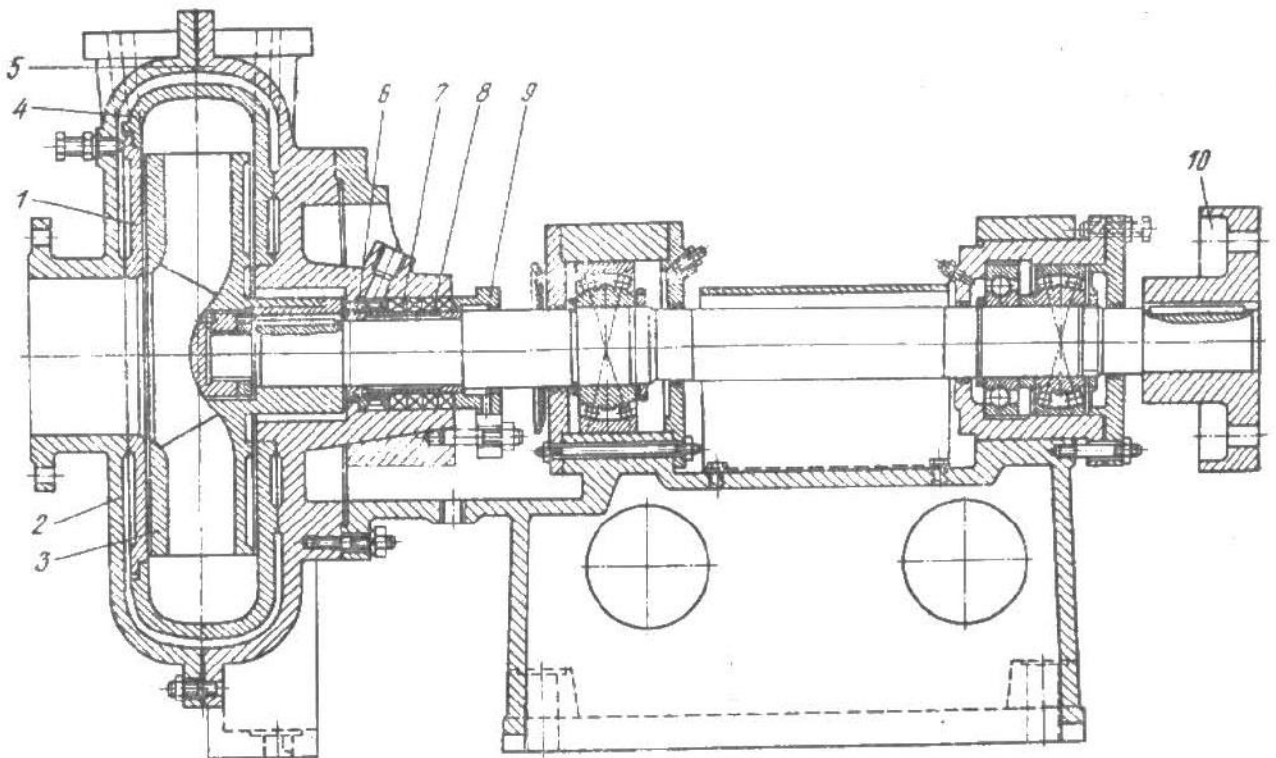


Рис 1.2 - Насос відцентровий ґрунтовий 8Гр-8Т [8]: 1 - футерування всмоктувальної кришки; 2 - передня половина корпусу; 8 - робоче колесо; 4 - внутрішній корпус; 5 - задня половина корпусу; 6 - колесо сальника; 7 - набивання сальника; 8 - захисна втулка; 9 - кришка сальника; 10 - муфта

Технічна характеристика ґрунтових насосів типу ГР наведена у табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Технічна характеристика ґрунтових насосів типу Гр [8]

Модель насосу	Подача, м <sup>3</sup> /год	Напір, м вод.ст.	Висота всмоктування, м вод.ст	Електродвигун		Габаритні розміри, мм			Маса, кг
				Потужність, кВт	Частота обертання, об/хв	довжина	ширина	висота	
3ГрТ-8	50	16	8	10	1430	1400	470	620	325
3ГрК-8	50	16	8	10	1430	1400	470	620	315
5ГрТ-8	150	35	7,8	40	1460	200	737	770	930
5ГрК-8	150	35	7,8	40	1460	2000	737	770	920
5ГрУ12	150	16,5	7	22	1450	1630	625	756	610
8ГрТ-8	400	38	7,5	125	1245	2860	1060	1210	2550
8ГрК-8	400	38	7,5	125	985	2810	1105	1210	2460
8ГрУ-12	400	19,5	7,5	55	985	2456	911	1030	1890
10Гр-6-12	500; 900	68; 73	1	400	985	4435	1555	1990	9860
10ГруЛ-8	740	38	8	200	750	3235	1230	1410	4570
12ГрТ-8	1340; 600	58; 45	6	500	735	3377	1600	1830	7840
12ГрК-8	1330; 600	58; 45	6	500	735	3377	1600	1830	7840
12ГрВ-12	1000;1500	76; 70	1	630	980	4770	1645	1880	11100
16ГруЛ-8	1320	28	7,4	250	750	3475	1410	1410	4960
16ГруТ-8	2140	58	7,2	630	585	5640	1835	2010	13540
20ГрТ-8	4000;3800	70; 52	5	1600-1250	685	5470	2190	2435	10610
28ГрТ-8	3600; 9000	68; 71	2-4	3200	500	7834	2600	2310	30900
3ГМ-1-350	1480; 1260	63; 45	5	630-500	740-59	6530	3600	3825	58860

У табл 1.3 наведено строк службі деталей насосів залежно від виконуваних робіт [11].

Таблиця 1.3 – Строки служби деталей піскових насосів зі сплаву ИЧХ28Н [11]

Стадія подрібнення, продукт та його щільність	Тип насосу	Деталі			
		Робоче колесо	Уліта а її футерування	Захистний диск	Підшипники кочення
<b>Важкі умови роботи</b>					
I, до 50% твердого	8НП; 8Гр-8Т	15	45	30	65-70
II, до 65% твердого	8НП; 8Гр-8Т	25	75	50	80-90
Концентрат, до 65% твердого	5Гр-8СС	90	90	90	120-130
Хвосты, до 28% твердого	28-Гр-8Т	150	80	30-60	140-150
I, піски крупністю до 0,2 мм, 50-60 твердого	6Пс; 8Пс	10-12	20-30	10	90-100
Коллективна флотація, піски крупністю 0,2 мм, 25-30% твердого	6Пс; 8Пс	30	30-40	30-40	110-120
Селективна флотація, піски крупністю -0,1 мм, 25-30% твердого	6Пс; 8Пс	60	180	6	110-120
Хвосты, до 25% твердого	20Гр-8	80-85	55-60	55-60	200
<b>Середні умови роботи</b>					
I, промпродукт, 28-48% твердого	8Гр-8Т	18-20	18-20	16-18	80-100
II, промпродукт, 20-40% твердого	8Гр-8Т	80-100	80-100	65-80	100-125
Хвосты, 10-12% твердого	12Гр-8Т	50-65	55-65	25-30	165-180
Концентрат	4НП	90-100	165-180	80-90	165-170
I, до 70% твердого, продукт крупністю -0,5 мм	НП-6	15	60	15	185
II, до 50% твердого, крупністю 0-3 мм	НП-6	45	120	45	185
II, до 50% твердого, крупністю 0-3 мм	НП-4	180	200	180	185
II, до 50% твердого, крупністю 0-3 мм	НП-3	180	365	180	185
<b>Легкі умови роботи</b>					
I, 36-38% твердого	8Гр-8Т	45-50	45-50	45-50	65
II, 30-32% твердого	8Гр-8Т	100-120	100-120	100-120	95
III, 25-27% твердого	8Гр-8Т	170-190	170-190	170-190	125
Хвосты відвальні	12Гр-8Т	190-210	190-210	190-210	125

## 1.2. Характеристики перекачувної рідини

Пульпа є суміш мінеральних частинок та води, в якій тверді частинки знаходяться у зваженому стані та рівномірно розподілені в обсязі води. Зважування мінеральних частинок у воді досягається перемішуванням пульпи або рухом її з достатньою швидкістю. Чим більші частки, тим легше пульпа розшаровується. Поступово перемішана пульпа має властивості рідини більш важкої, ніж вода [10].

За крупністю частинок розрізняють такі види пульпи:

- грубі суспензії;
- тонкі суспензії;
- шлами (мули);
- колоїдні розчини.

Концентрація пульпи (відношення мас твердої та рідкої фаз) вимірюється у відсотках твердого або у співвідношенні твердої фази до рідкої (Т:Р). Склад пульпи характеризується такими показниками [10]:

- вмістом твердого в пульпі по масі  $C_T$ , тобто відношенням маси твердої речовини до маси всієї пульпи, в якій розташовується кількість твердої речовини. Дане відношення виражається у відсотках чи частках одиниці. Для сильно розріджених пульп масу твердого відносять до об'єму рідкої речовини, тобто вказують скільки грамів або міліграмів твердого припадає на 1 м<sup>3</sup> або 1 л води. Так характеризуються, наприклад, зливи згущувачів та фільтрати;
- розрідженням  $R = P:T$ , тобто відношенням маси рідкого Р до маси твердого Т в деякому обсязі пульпи. Це відношення показує, скільки тонн (або кубічних метрів) води посідає 1 т твердого:

$$R = P:T = \frac{100 - C_T}{C_T}$$

- густиною пульпи  $\Delta$  при відомій щільності твердого:

$$\Delta = \frac{\delta}{C_T + \delta(1 - C_T)} = \frac{R + 1}{R + 1/\delta}$$

де  $\delta$  – щільність твердого, кг/м<sup>3</sup>.

- в'язкістю - дуже важлива властивість пульпи. На в'язкість пульпи впливають вміст твердої речовини, її крупність і хімічний склад, в'язкість рідини, присутність деяких хімічних сполук, температура. В'язкість пульпи зростає із збільшенням вмісту у ній твердої речовини. При добавках твердого в'язкість спочатку збільшується порівняно повільно, а після того як вміст твердого перевищить 20-25% за обсягом, зростає дуже швидко навіть при незначних добавках твердого, і пульпа зовсім втрачає свою плинність при 35-42% вмісту в ній твердої речовини за обсягом. Крупнозернисті пульпи менш в'язкі, ніж тонкозернисті при тому вмісті твердого. Присутність у пульпі дуже дрібних частинок твердого (менше 10-20 мкм), званих шламами, сильно змінює її в'язкість. ГГ

Таблиця 1.1 – Параметри пульп на збагачувальних фабриках [12]

Найменування операцій і продуктів	Вміст твердого $C_t$ , %	
	У живленні операції	у продуктах
Подрібнення у стрижневих та кульових млинах	65-80	
Злив класифікаторів при подрібненні до:		
0,3 мм	—	28—50
0,2 мм	—	25-45
0,15 мм	—	20—35
0,10 мм	—	15—30
Піски спіральних класифікаторів	—	80-85
Піски гідроциклонів	—	60—70
Основна флотація першої стадії при двостадіальних схемах	30-50	—
Основная флотація при одностадіальних схемах і основна флотація другої стадії для руд	20-35	—
Основная флотація при одностадіальних схемах і основна флотація другої стадії для вуглів	17—25	—
Перечистка концентратів флотації	15-30	—
Концентрати основної флотації	—	25-45
Концентрати контрольної флотації	—	25—35
Концентрати перечистних операцій флотації	—	30-50
Відсадка камених вуглів	30—40	—
Відсадка руд	40-50	—
Продукти відсадки, що видаються обезводнювальними елеваторами:		
крупні		80—90
дрібні зернисті	—	75-85



Продукти відсадки, що видаються через крани, насадки і поріг	—	30—50
Концентрація на столах	25-35	
Важкі продукти зі столів	—	40-60
Проміжні продукти зі столів	—	30-45
Концентрація на гвинтових сепараторах	25—35	—
Концентрація на струмінних і конусних сепараторах	45—55	—
Гідравлічна класифікація	30—50	
Піскові фракції гідравлічної класифікації	—	20—50
Миті продукти похилих коритних мійок	—	90—85
Згущені продукти згущувачів при згущенні рудних концентратів перед фільтруванням	—	50—70
Згущені продукти згущувачів при згущенні вугільних шламів перед фільтруванням, при згущенні		25-35
Фільтрування флотажних вугільних концентратів без попереднього згущення	30-40	82-76
Фільтрування вугільних шламів після згущення	25—35	80—76
Центрифугування дрібного вугільного концентрата	85—82	93—91
Обезводнення у бункерах крупного вугільного концентрата	93—91	93—95
Обезводнення у бункерах вуглезбагачувальних фабрик	70—82	84-89

Таблиця 1.2 – Критична (мінімально припустима) швидкість пульпи у пульпопроводах, м/с [8]

Діаметр пульпропровода, мм	Критична швидкість пульпи при перекачуванні піска та гравію, м/с		
	Багато глини (понад 70%)	Середній вміст глини (30-70%)	Невеликий вміст глини (до 30%)
250	1,6	2	2,5
300	1,8	2,1	2,8
400	2,2	2,4	3,3
450	2,3	2,6	3,5
500	2,5	3	3,8
600	2,7	3,2	4

### 1.3. Аналіз конструкцій гідроструменевих насосів

Гідроструменевим насосом називається динамічний насос тертя, в якому перекачується (пасивне) середовище (рідина, газ або суміш рідини з газом або твердими частинками), яке переміщується зовнішнім потоком (струменем) робочої (активної) рідини. Енергія від одного потоку рідини до іншого передається силами, що діють на поверхні робочого струменя [9].

За більш ніж столітній період, що минув з моменту створення струменевих апаратів, досягнуто значного прогресу як у галузі вдосконалення конструкцій апаратів, так і в розробці методів їх розрахунку. Конструктивне вдосконалення апаратів дозволило збільшити коефіцієнт корисної дії (ККД) з 5—8 до 30—40 %.

На сьогодні відомо досить багато конструктивних схем гідроструменевих насосів. На рис. 1.1 наведено схеми найбільш відомих та поширених конструкцій нерегульованих гідроструменевих насосів, а на рис. 1.2 - гідроструменевих насосів з регульованими геометричними параметрами, причому регулювання проводиться за рахунок зміни площі вихідного перерізу робочого (активного) сопла або площі поперечного перерізу камери змішування (горловини). Незважаючи на різноманітність конструкцій у більшості струминних насосів можна виділити наступні елементи [9]:

- активне (робоче) сопло,
- камеру змішування (горловину),
- дифузор,
- вхідну ділянку горловини для пропуску пасивного потоку, що виконується, як правило, у вигляді конфузора.

Робоче конічне сопло (насадок) в основному встановлюють співвісно (по центру) з камерою змішування (рис. 1.1, а; 1.2), а також у вигляді кільця, розміщеного по периферії камери змішування (рис. 1.1, б), або комбіновано (рис. 1.1, в). У деяких випадках застосовують багатосоплові гідроструменеві апарати (рис. 1.1, г). Площина зрізу активного сопла повинна або перебувати у вхідному перерізі камери змішування, або бути висунута з нього проти течії на деяку відстань (зазвичай не більше ніж на один-три калібру сопла) [9].

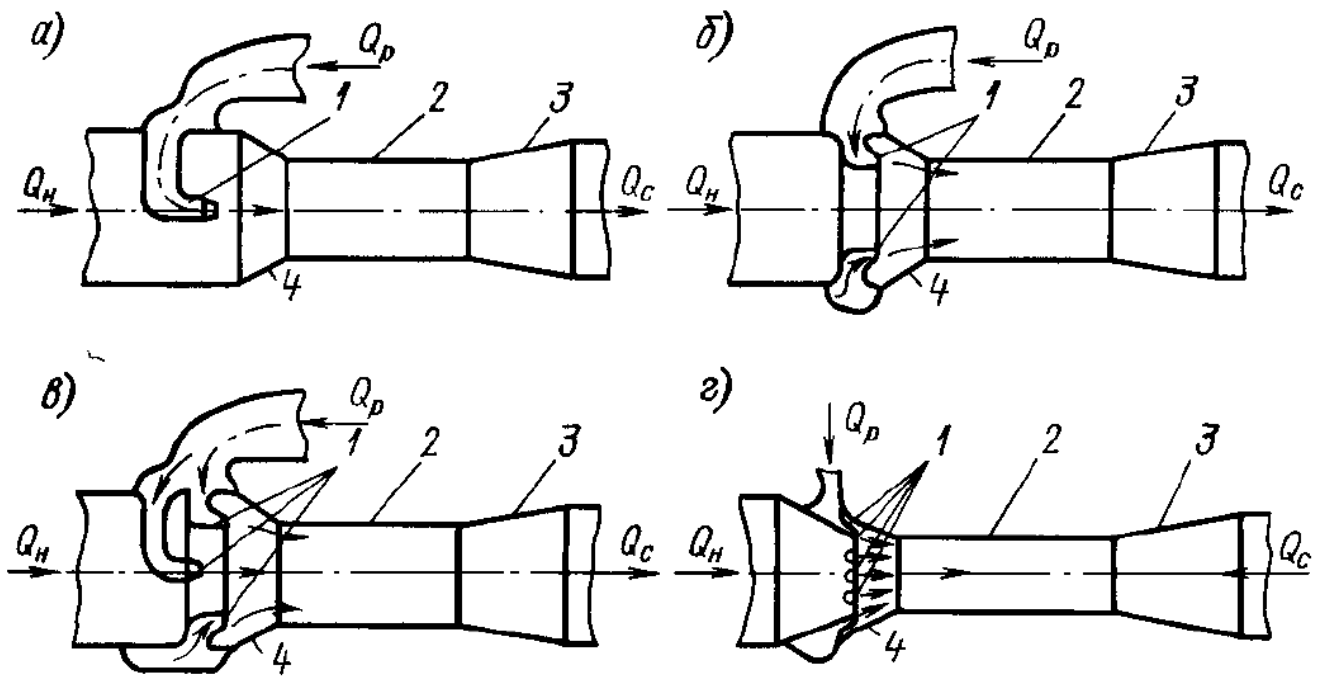


Рис. 1.1 - Схеми нерегульованих гідроструменевих насосів [9]: *а* - з центральним соплом; *б* - з кільцевим соплом; *в* - з центральним та кільцевим соплами; *г* - багатосопловий; 1 - сопло; 2 - камера змішування; 3 - дифузор; 4 - конфузор

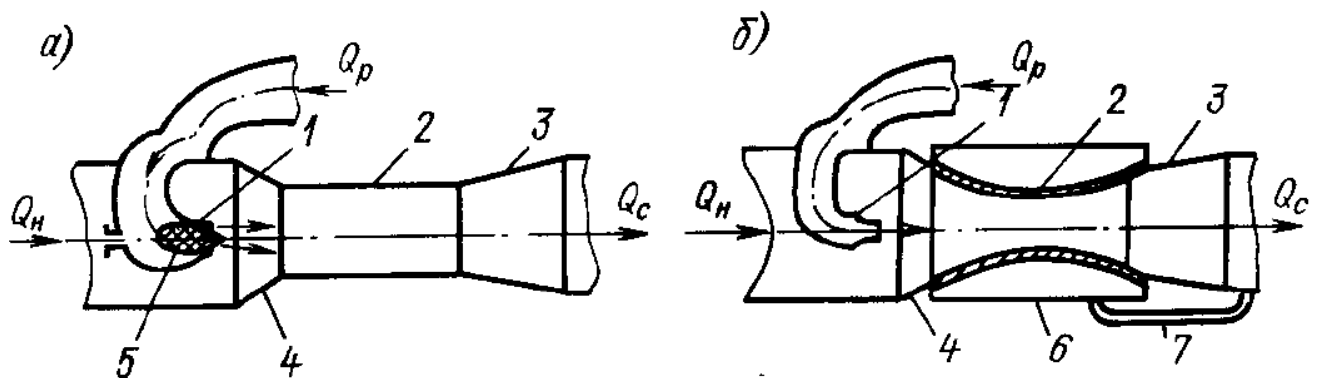


Рис. 1.2 - Схеми насосів з регульованими геометричними параметрами [9]: *а* - з регульованою площею вихідного перерізу сопла; *б* - з регульованою площею поперечного перерізу камери змішування; 1 - сопло; 2 - камера змішування; 3 - дифузор; 4 - конфузор; 5- елемент для регулювання площі вихідного перерізу сопла; 6 - додаткова порожнина для зміни площі поперечного перерізу камери змішування; 7- трубопровід для подачі рідини у камеру 6.

Процес змішування активного і пасивного середовищ у гідроструменевих насосах з центральним струменем можна умовно розділити на дві ділянки. Потік

рідини на початковій ділянці відбувається подібно до поширення затопленого турбулентного струменя. На межах затопленого струменя утворюється широка зона змішування, що розширюється, - турбулентний прикордонний шар. Внаслідок залучення частинок рідини в прикордонний шар розтікання струменя в камері змішування відбуватиметься не в товщі нерухомої рідини, а в супутньому потоці, що підсмоктується. При цьому кут розширення струменя буде тим менше, чим більша швидкість підсмоктується (супутного) потоку. Крім турбулентного прикордонного шару є зменшується при віддаленні від сопла ядро швидкостей рідини, що витікає з сопла. Завдяки тому що в прикордонний шар безперервно залучаються частинки з середовища, що перекачується, загальна витрата рідини в струмені в міру віддалення від зрізу сопла зростає. У певному перерізі зростання прикордонного шару припиняється за рахунок обмеження стінками камери змішування. Починаючи від цього перерізу припиняється залучення нових мас навколишнього середовища в струмінь активної рідини. Але в цьому перерізі швидкість по радіусу розподілена ще рівномірно [9].

Тому потрібна додаткова ділянка стабілізації в камері змішування довжиною до 6-10 її діаметрів, де відбувається подальше вирівнювання параметрів потоку [9].

Після вирівнювання полів тисків і швидкостей змішаний потік, що має ще велику швидкість, подається в дифузор, де відбувається перетворення кінетичної енергії потоку в потенційну енергію тиску [9].

Підсмоктування пасивного потоку в струмені робочої рідини відбувається, на сучасні погляди, в результаті взаємодії сил турбулентного тертя, що викликає появу вихорів робочої (активної) і підсмоктується (пасивної) середовища у вхідному перерізі камери змішування, де встановлюється тиск, який нижче тиску пасивного середовища. Складання вихрового та поступального руху рідин створює, згідно з теоремою Кутта-Жуковського, підйомну силу, поперечну по відношенню до напрямку поступального руху. При цьому відбувається перемішування активного та пасивного потоків [9].

Різними авторами запропоновано низку нових, відмінних від попередніх конструкцій струменевих апаратів. Так, на рис. 1.3 наведено конструкції струменевих насосів, виконаних у вигляді коліна (повороту) на трубопроводі. При цьому активне середовище, як правило, подається по зовнішньому коліну, а пасивне підсмоктується по внутрішньому [9].

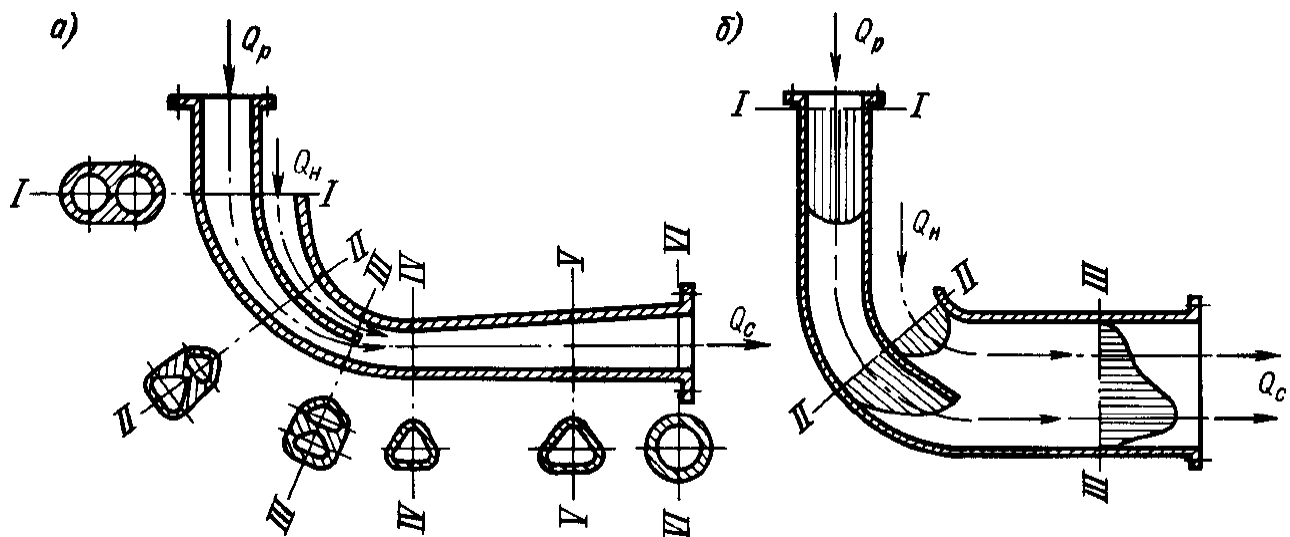


Рис. 1.3 - Схеми асиметричних струминних насосів [9]: а - за а. с. 193930 (); б - по пат. 3650637; I—I— VI— VI— поперечні перерізи.

На рис. 1.4 зображено три конструкції щілинних струменевих апаратів.

Робоча рідина (рис. 1.4 а) подається по трубці 1 і віддзеркалюється від пластини 5, до якої в зоні максимального зниження гідростатичного тиску приєднаний всмоктувальний патрубок 4, суміш середовищ виливається в щілину між пластинами 5 і 7 і через кожух 3 і патрубок 2 відводиться до споживача. Пластини 5 і 7 утримуються на заданій відстані за допомогою болтів кріплення 6.

Струменевий апарат, представлений на рис. 1.4 б є удосконаленим апаратом, зображеним на рис. 1.4 а. Робочий струмінь надходить по трубці 1 сопло 8 і, відбиваючись від пластини 5, утворює симетричну кругову зону віддзеркалення. Всмоктувальна порожнина у вигляді проточки 9 використовує всю зону зниженого тиску, утворену струменем, що витікає з сопла 8. Пасивне середовище підсмоктується по патрубку 4 просвердленому в корпусі 10 [9]

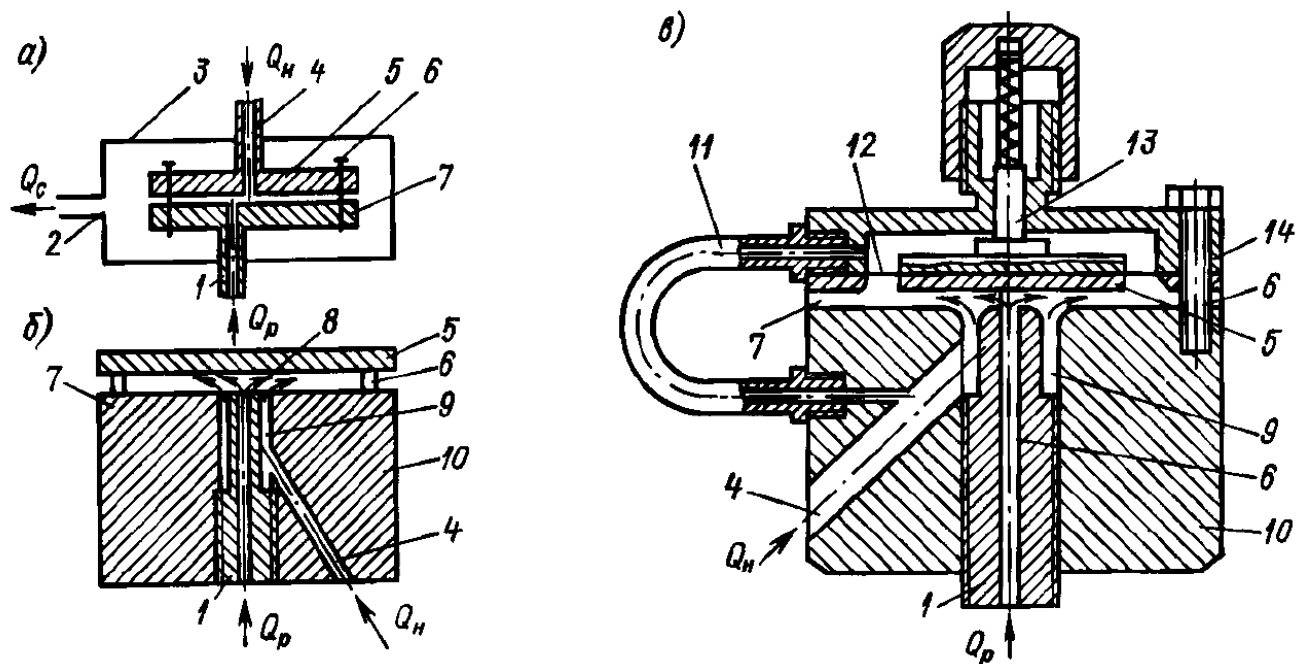


Рис. 1.4 - Схеми щілинних струменевих насосів [9]: *а* - а. с. 210663; *б* - а. с. 338687; *в* - а. с. 901654; 1 – трубка; 2 – патрубок; 3 – кожух; 4 – всмоктувальний патрубок; 5 – пластина; 6 – кріплення; 7 – пластина; 8 – сопло; 9 – проточки; 10 – корпус; 11 - трубка; 12 – діафрагма; 13 – шток; 14 – фланець.

Щілинний струменевий апарат, наведений на рис. 1.4, в аналогічний по конструкції апарату, зображеному на рис. 1.4, б, але є регульованим, оскільки пластина, що відбиває 5 спирається на еластичну діафрагму 12, закріплену у фланцях 14. Відбиває пластина 5 спирається також на шток 13 з пружиною. Порожнина над діафрагмою 12 повідомлена трубкою 11 з всмоктуючим отвором 4, просвердленим в корпусі насоса 10. При зміні тиску всмоктування відбиває пластина 5 може переміщатися під дією пружини та діафрагми 12 [9].

На рис. 1.5 зображені зблоковані струменеві насоси, що дозволяють збільшити подачу середовища, що відкачується. Насос наведений на рис. 1.5 а, зібраний з профільованих тарелей, що утворюють в поперечному перерізі звичайні струменеві насоси, що мають дифузор 1, камеру змішування 2, конфузор 3 [9].

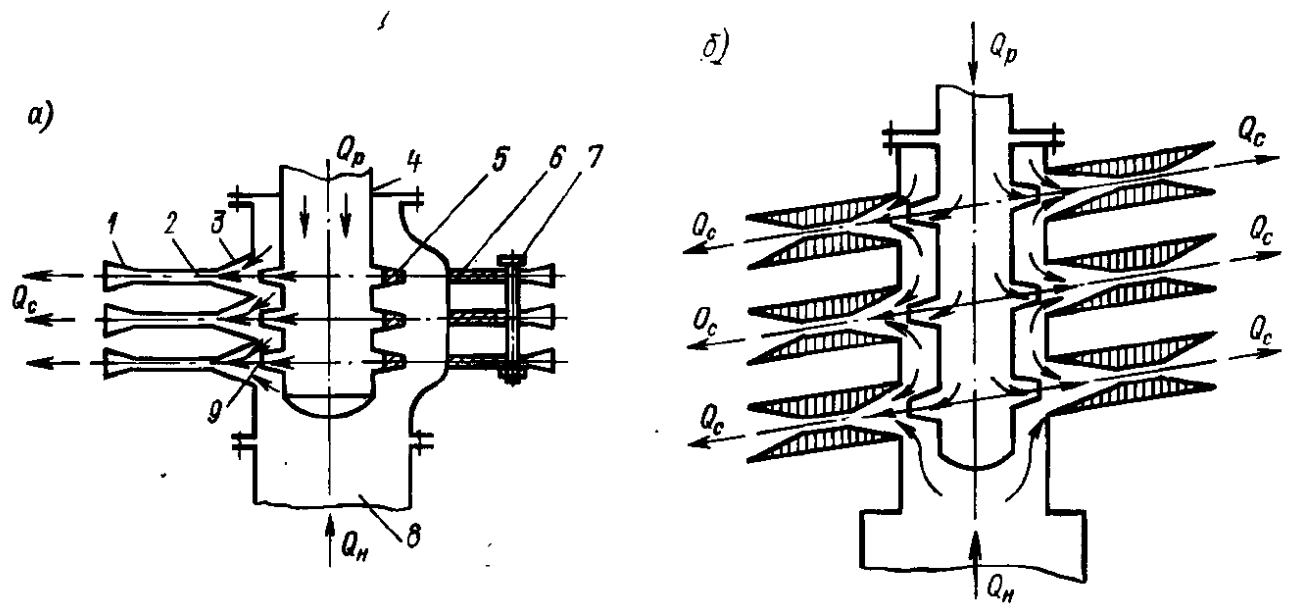


Рис. 1.5 - Схеми зблокованих струминних щілинних насосів [9]: а - а. с. 180290; б - по а. с. 800434; 1 – дифузор; 2 – камера змішування; 3 – конфузур; 4 – труба; 5 – сопло; 6 – камери змішування; 7 – болти; 8 – труба; 9 - сопло

Робочі сопла 9 зібрані з штампованих або литих деталей, закріплених на трубі 4, що підводить активну рідину. Для організації потоків робочої (активної) і підсмоктується (пасивної) середовищ по трубах 4 і частина 8 частин робочих сопл 5 і камер змішування 6 заглушені. Підсмоктується середовище підводиться знизу трубою 8. Конструкція загалом стягнута болтами 7. Струменевий насос, зображений на рис. 1.6 б, аналогічний по конструкції попередньому, проте для забезпечення технологічності складання та виготовлення основні деталі його виконані шляхом намотування смуги по спіралі з наступним зварюванням [9].

Необхідно відзначити, що конструктивне вдосконалення гідроструменевих насосів певною мірою йде за рахунок створення регульованих апаратів. Враховуючи, що відношення площі поперечного перерізу камери змішування (горловини) до площі вихідного перерізу сопла є одним з основних геометричних критеріїв подібності, що визначає тип гідроструминного насоса і вид його гідравлічних характеристик, подібно до того, як коефіцієнт швидкохідності визначає тип лопатевого (відцентрового) насоса, були зроблені численні спроби сконструювати регульовані струменеві насоси. Один із напрямків таких розробок

охоплює способи регулювання площі вихідного перерізу сопла. Ряд авторів використовує принцип безперервного регулювання: за рахунок введення «голки» в сопло (див., наприклад, рис. 1.2, а), шляхом встановлення на виході з сопла еластичної порожнистої втулки, що обтискається при обертанні сопла, тощо. Інші фахівці пішли по лінії дискретного регулювання, пропонуючи ряд конструкцій, що дозволяють швидко замінювати сопло одного діаметра [9].

Основною ідеєю заміни відцентрового піскового або ґрунтового насосу на гідроструменевий є суттєве зниження зношення та збільшення строку служби. З розглянутих схем гідроструменевих насосів (рис 1.1) обираємо саме схему у яких на шляху потоку пульпи не буде жодних перешкод у вигляді деталей насосу. Тобто схеми з центральним соплом (рис 1.1. а), з центральним та кільцевим соплами (рис 1.1 в) мають елементи конструкції, що знаходяться на шляху потоку пульпи. Натомість схема з кільцевим соплом (рис 1.1 б) та багатосоплова схема (рис 1.1 г) залишають шлях пульпи вільним, Причому багатосоплова схема є більш ефективною за рахунок рівномірного розподілення імпульсу прискорюючої речовини [9].

#### **1.4 . Мета, об'єкт, предмет, завдання та методи дослідження**

*Метою роботи* є підвищення ефективності гідро транспортування пульпи на гірничо-збагачувальних підприємствах за рахунок обґрунтування раціональних параметрів гідроструменевих насосів.

*Об'єкт досліджень* – процес транспортування пульпи залізородної сировини на гірничо-збагачувальних підприємствах гідроструменевими насосами.

*Предмет дослідження* – параметри гідроструменевих насосів.

Задачі дослідження:

1. Аналіз відомих конструкцій гідроструменевих насосів;
2. Дослідження конструкції гідроструменевого насосу;
3. Розробка методики проектування гідроструменевого насосу





## **2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОСТРУМЕНЕВИХ НАСОСІВ**

### **2.1. Загальна методика досліджень**

Задля досягнення поставленої мети з підвищення ефективності гідро транспортування пульпи на гірничо-збагачувальних підприємствах за рахунок обґрунтування раціональних параметрів гідроструменевих насосів, планується проведення наступних досліджень.

На початку проводиться аналіз відомих конструкцій гідроструменевих насосів та обираються конструкції, у яких у поперечному перерізі труби не має бути ніяких додаткових елементів, оскільки перекачувана пульпа є дуже абразивною речовиною. Це знизить зношення матеріалу насосу.

Надалі планується та проводиться дослідження обраної конструкції насосу. Виокремлюються варійовані та сталі чинники та планується дослідження. Розробляється комп'ютерна модель насосу та проводиться дослідження. Визначаються залежності та проводиться визначення оптимальних параметрів конструкції.

Наприкінці розробляється методика проектування гідроструменевих насосів обраного типу.

### **2.2. Аналіз відомих конструкцій гідроструменевих насосів**

Мета винаходу [1] - підвищення ККД. Поставлена мета досягається тим, що сопла першого ступеня нахилені до осі каналу в діаметральній площині над кутом  $18^{\circ}$ - $30^{\circ}$ , другий ступінь розташований в площині, що проходить через вершину конуса, утвореного напрямом нахилу, і перпендикулярної до осі каналу, а нахил сопел другого ступеня в діаметральній площині становить  $6^{\circ}$ - $10^{\circ}$ .

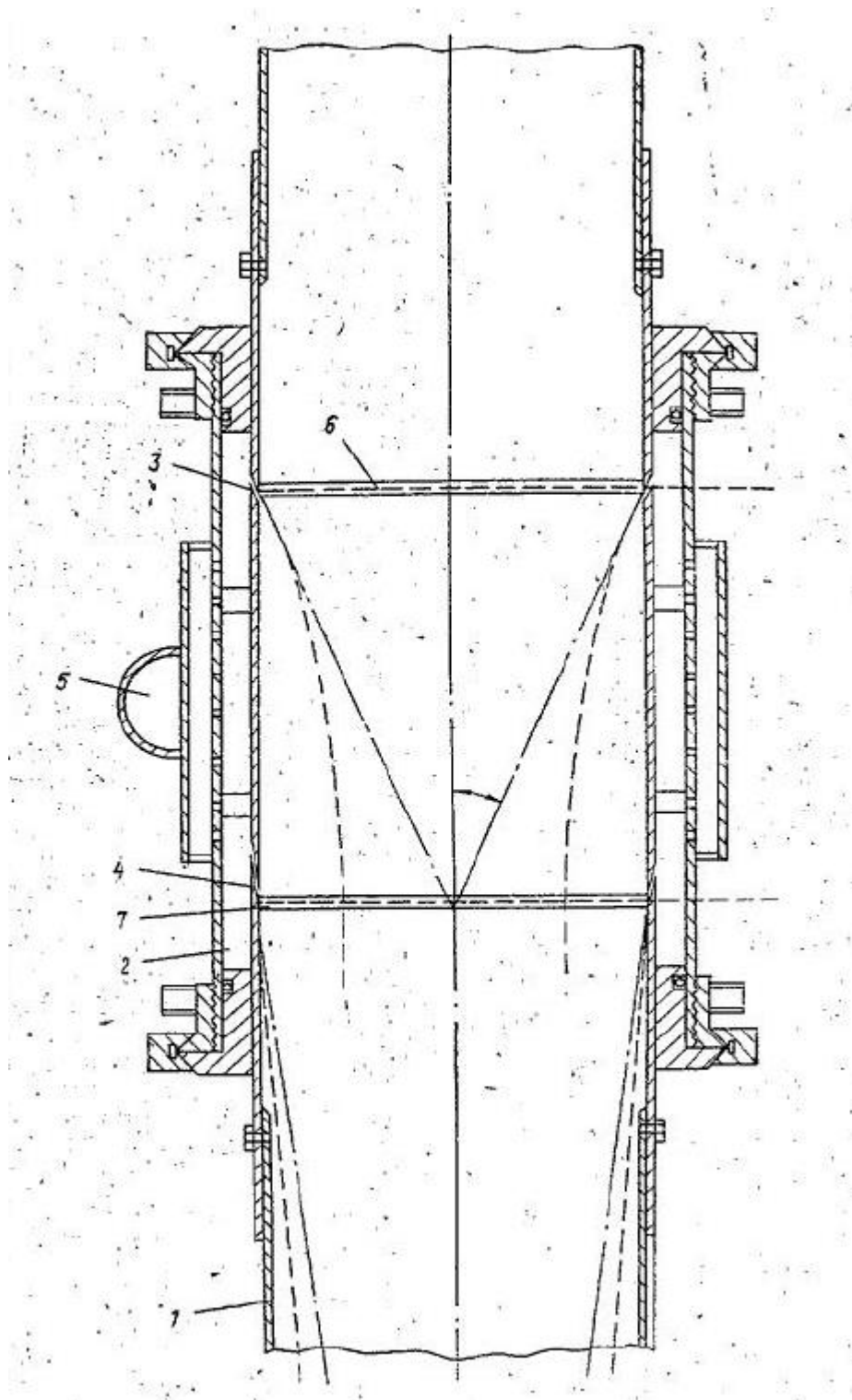


Рис 2.1 – До патенту [1]

Струменевий насос містить циліндричний канал 1 постійного перерізу з кільцевим колектором 2, що охоплює циліндричний канал 1 і забезпеченим на бічній стінці каналу наскрізними соплами 3 і 4, нахиленими до діаметральної площини у бік руху ежектованого середовища, поєднаний з джерелом 5

середовища та згрупованими у дві кільцеві ступні 6 до 7. Сопла 3 першого кільцевого ступеня 6 нахилені до осі каналу 1 в діаметральній площині під кутом  $18^\circ - 30^\circ$ . Другий ступінь 7 розташований в площині, що проходить через вершину конуса, утвореного напрямом нахилу, перпендикулярної до осі каналу, а нахил сопел 4 другого кільцевого ступеня 7 в діаметральній площині становить  $6^\circ - 10^\circ$ .

Струменевий насос працює наступним чином. Робоче середовище подається від джерела колектор 2 і через сопла 3 першого кільцевого ступеня 6 і сопла 4 другого кільцевого ступеня 7 потрапляє в канал Г постійного перерізу, ежектуючи по ньому пасивне середовище. '

Вибір оптимального співвідношення кутів нахилу сопел 3 першого ступеня 6 і сопел 4 другого ступеня 7, а також взаємне розташування сходів забезпечують високий ККД насоса.

Метою винаходу [2] є спрощення експлуатації струменевого насоса. Це досягається тим, що робоча порожнина поєднана з лінією нагнітання та джерелом керуючого середовища служить остання.

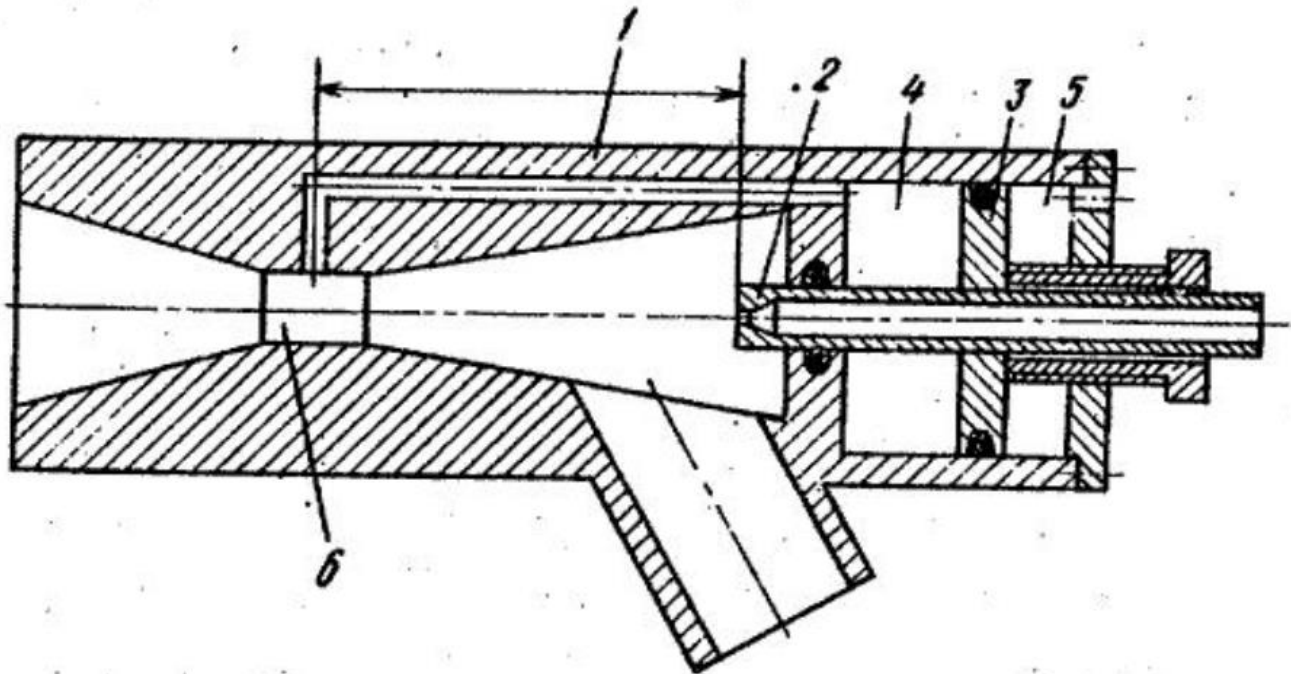


Рис 2.2 – До патенту [2]

Струменевий насос містить корпус 1, встановлене в ньому з можливістю осьового переміщення активне сопло 2, забезпечене приводним елементом 3,

розташованим в корпусі 1 а утворенням робочої та дренажної порожнин 4 і 5, перша з яких підключена до джерела керуючого середовища, а друга - повідомлена з атмосферою і лінію нагнітання 6. Робоча порожнина 4 повідомлена з лінією нагнітання 6, і джерелом керуючого середовища служить остання.

Активне середовище, витікаючи із сопла 2, захоплює в лінію нагнітання 6 пасивне середовище. У лінії нагнітання 6 кінетична енергія суміші середовищ частково перетворюється на потенційну енергію. При зміні параметрів активного або пасивного середовища відповідно зміниться параметр суміші середовищ у лінії нагнітання 6, що викличе відповідний імпульс в робочу порожнину 4 і призведе до переміщення активного сопла 2 і відновлення необхідної величини параметра лінії нагнітання 6.

Таким чином, виконання струменевого насоса з робочою порожниною, поєднаною лінією нагнітання, дозволяє автоматизувати процес роботи насоса і, отже, спростити процес його експлуатації.

Мета винаходу [3] - підвищення надійності та ККД шляхом здійснення очищення проточної частини. Поставлена мета досягається тим, що струменевий насос, що містить криволінійний конфузور з кільцевим колектором, камерою змішування, дифузором, і радіальним підведенням активної рідини і концентрично розміщені у конфузорі з можливістю осьового переміщення криволінійне пасивне сопло, що утворює зі стіною сопла, забезпечений додатковим підведенням активної рідини, виконаним у вигляді тангенціально приєднаного до колектора патрубка, а на внутрішній поверхні пасивного сопла виконані гвинтові канавки.



отвору криволінійного сопла 5 до виходу отримує обертальний рух від гвинтових канавок 8, в результаті чого проводиться змучування осаду в зоні вхідного отвору і розмивання скупчень на вході в сопло 5. Це запобігає засміченню, зменшує гідравлічний опір проточної частини, що підвищує надійність та ККД насоса.

Винахід [4] відноситься до галузі струменевих апаратів/

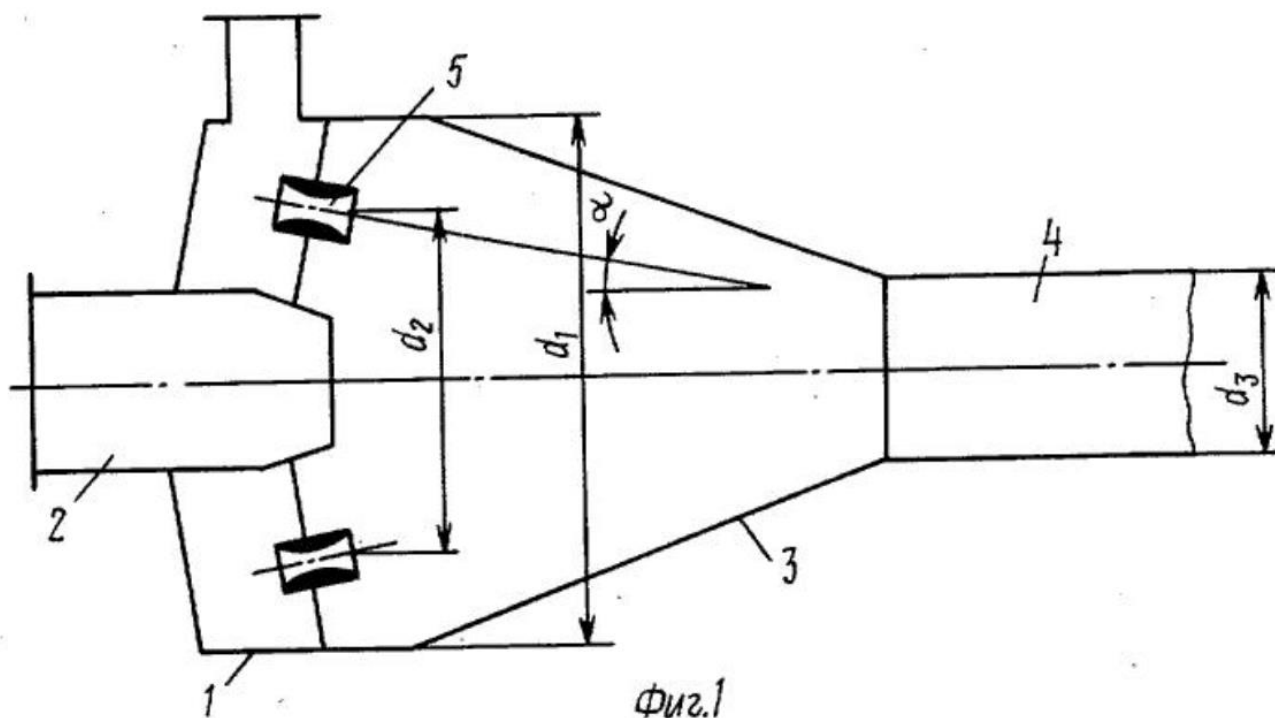


Рис 2.4 – До патенту [4]

Струменевий насос містить корпус 1 з осьовим патрубком 2 підведення пасивного середовища, перехідною конфузornoю ділянкою 3 і циліндричною камерою 4 змішування і розміщені по колу коаксіально до патрубка 2, активні сопла 5, розташовані під гострим кутом до осі корпусу 1 перед конфузornoю ділянкою сопел 5, який дорівнює  $6-10^\circ$ . а діаметри  $d_2$  та  $d_1$  кола і вхідного перетину конфузornoї ділянки 3 складають відповідно  $1,1-1,5$  і  $1,2-2,0$  від діаметра  $d_3$  камери змішування 4.

Струменевий насос працює наступним чином. Активний газ, що надходить у перехідну конфузornoю ділянкою 3 через сопла 5, ежектує пасивне середовище, що підводиться по патрубка 2. Обмін енергією між активним та пасивним середовищами починається в ділянці 3 і закінчується в камері 4 змішування, в результаті чого тиск пасивного середовища зростає. Розміщення сопел 5 під кутом

6-10° до осі корпусу і вибір геометрії проточної частини ( $d_1 = (1,2-2,0)d_3$  і  $d_2 = (1,1-1,5) d_3$ ) дозволяють досягти в даному струменевому насосі високої ефективності змішування активного та пасивного середовищ.

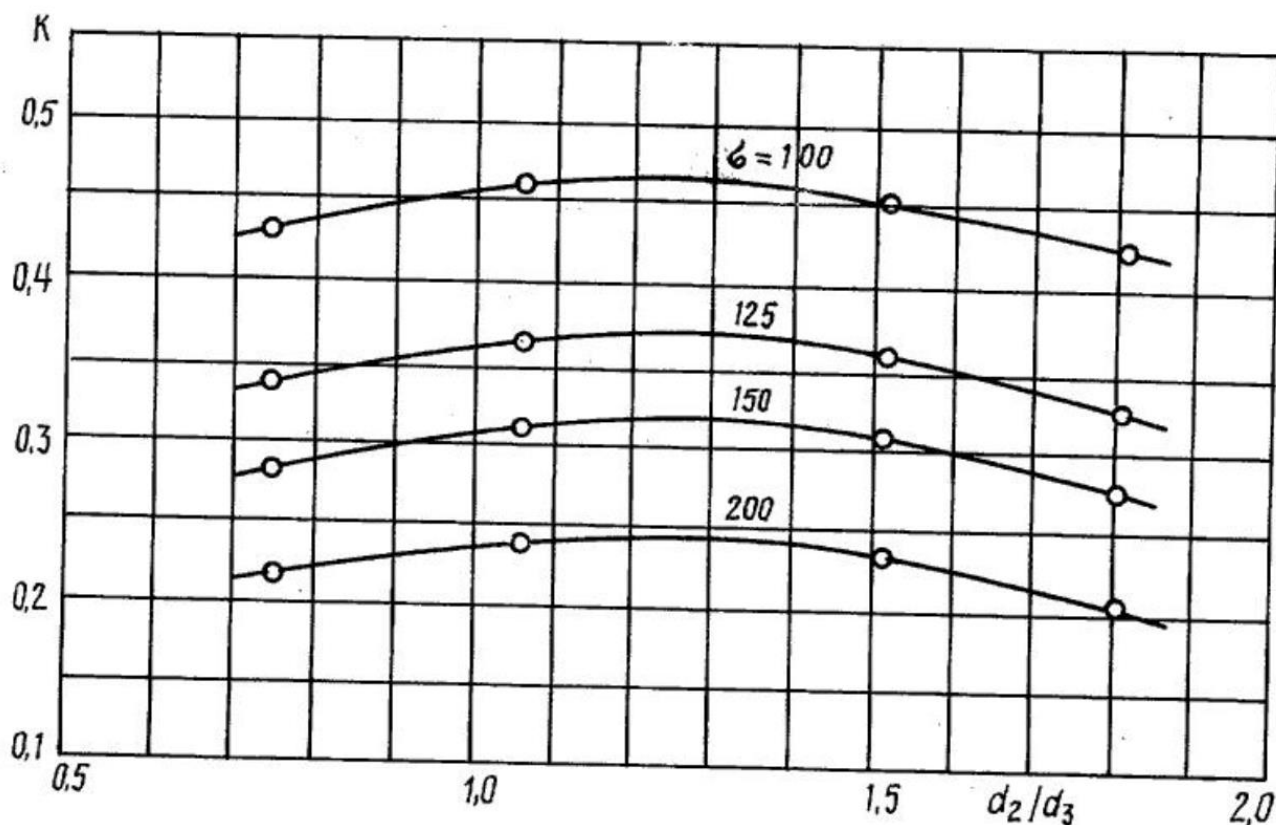


Рис 2.5 – експериментальні залежності коефіцієнта ежекції До відношення діаметра кола ( $d_2$ ) до діаметру ( $d_3$ ) камери змішування при відношенні діаметра ( $d_1$ ) вхідного перерізу конфузорної ділянки до діаметру ( $d_3$ ) камери змішування, рівному 2,33, і при різних значеннях відношення ( $\sigma$ ) повних тисків газу, що ежектує, і ежектованого



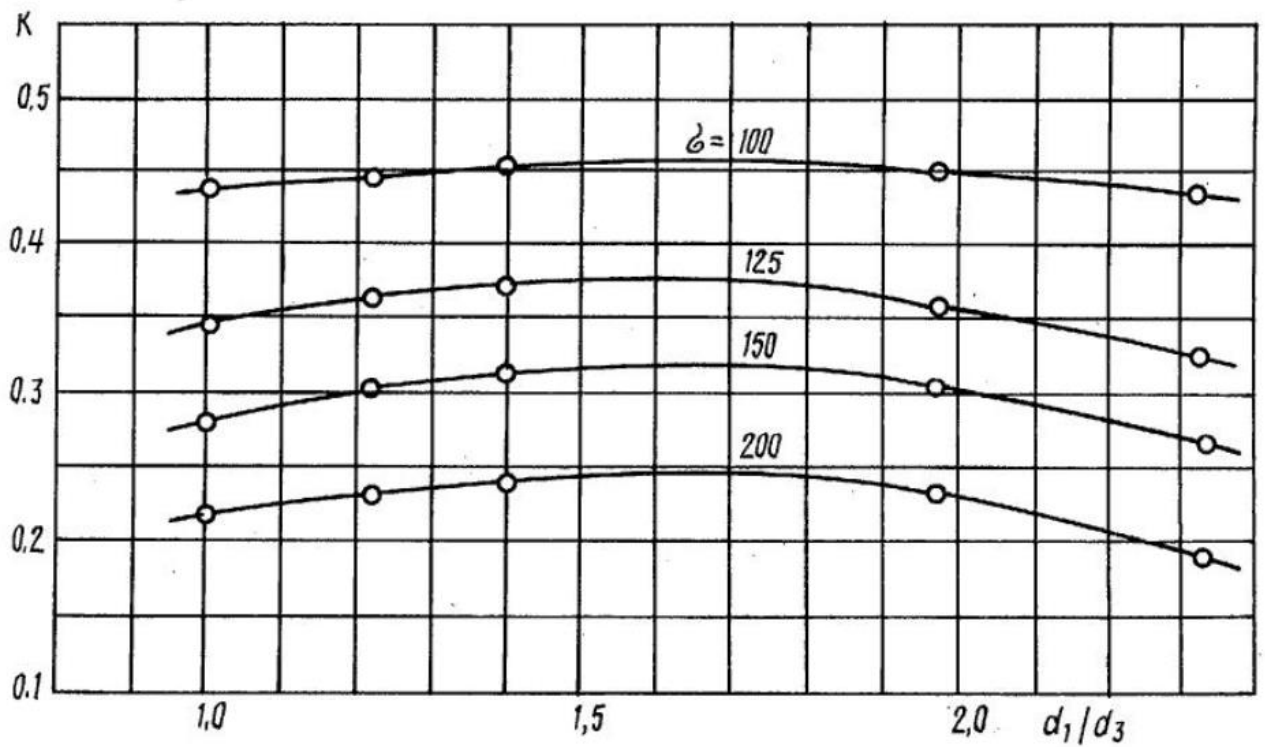


Рис 2.6 – Експериментальні залежності  $K$  відношення  $d_1/d_3$  при  $d_1/d_2=1,2-1,35$ .

Таким чином, в струменевому насосі описаної геометрії відбувається більш повний обмін енергією між активним і пасивним середовищами, що призводить до збільшення коефіцієнта ежекції.

Винахід [5] відноситься до струменевих апаратів. Метою винаходу є підвищення надійності роботи при перекачуванні пасивного середовища з твердими включеннями.

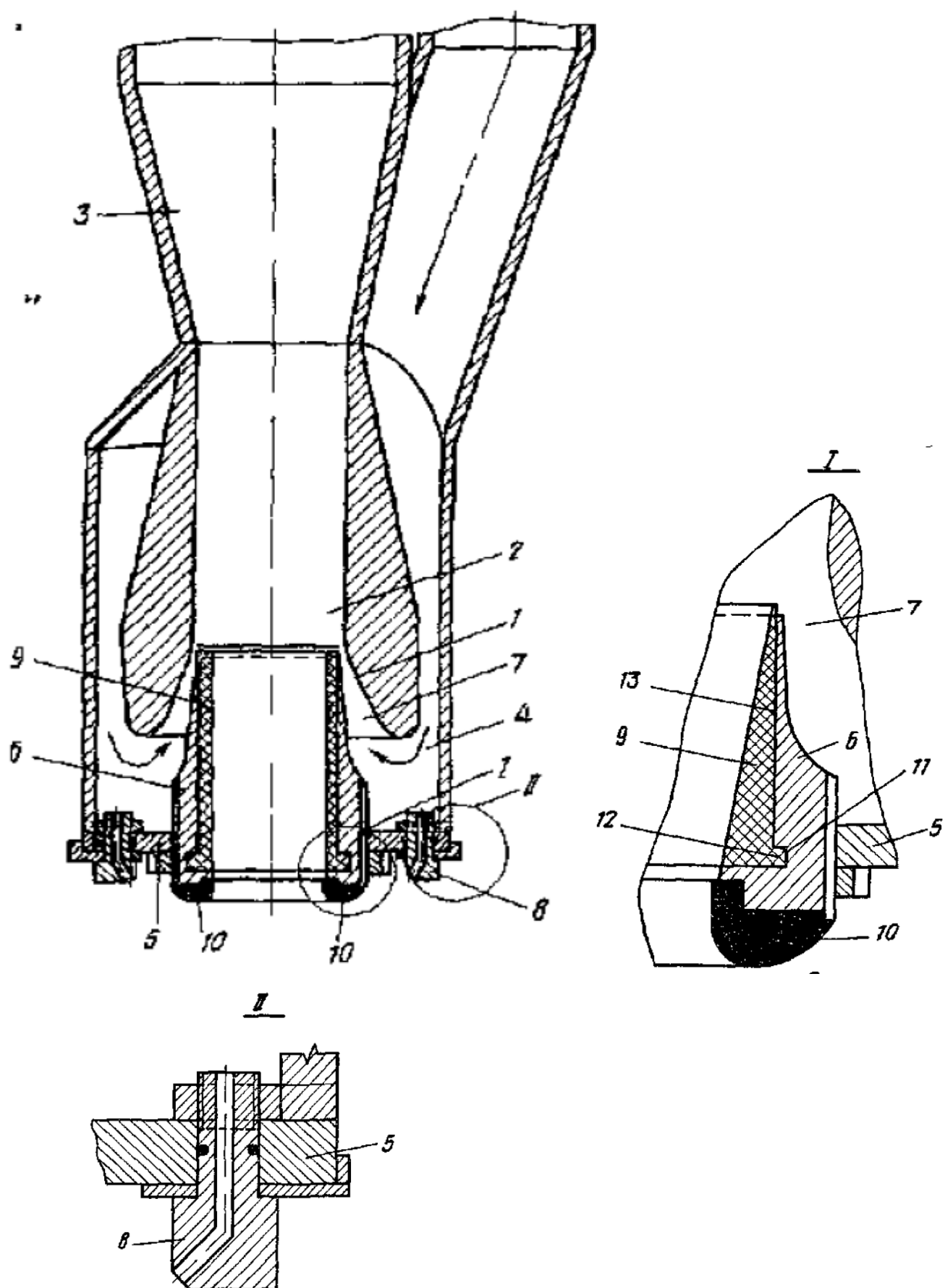


Рис 2.7 – До патенту [5]

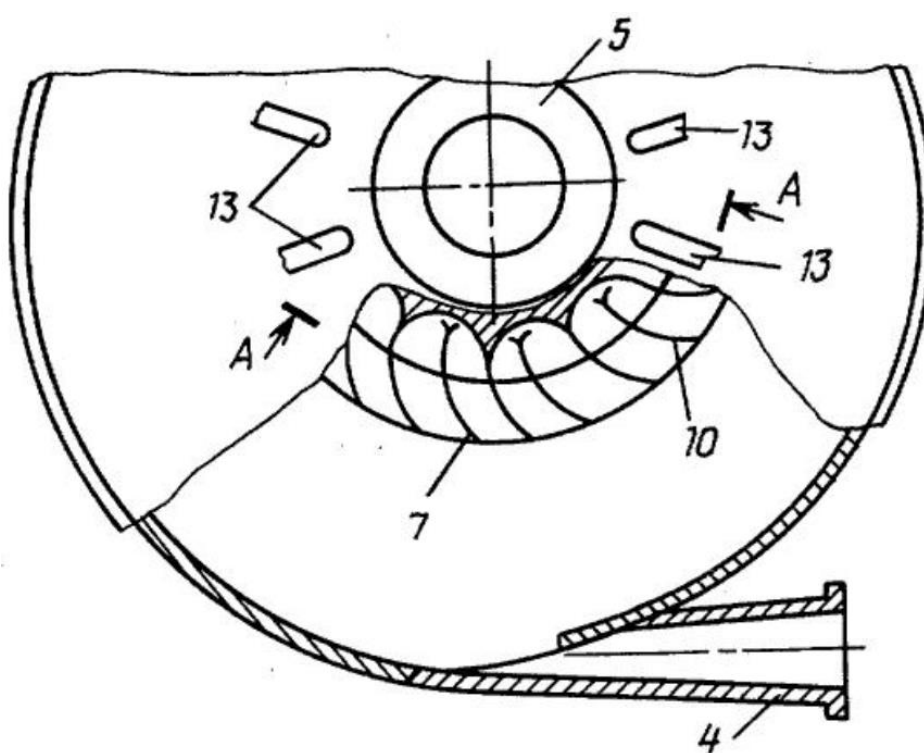
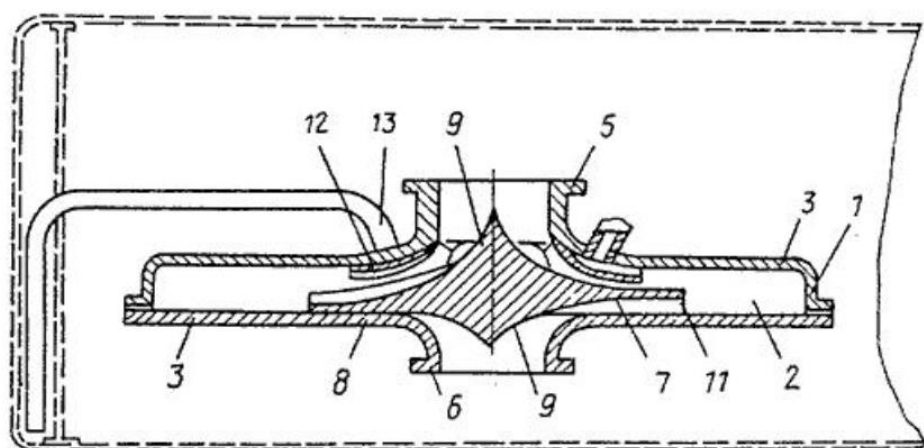
Струменевий насос містить співвісно розташовані криволінійний конфузор 1, камеру 2 змішування і дифузор 3, кільцевий колектор 4 і встановлене в його торцевій стінці 5 з можливістю осевого переміщення пасивне сопло 6, що утворює з конфузором 1 активне кільцеве сопло 7, поворотні сопла 8, встановлені в торцевій стінці 5 колектора сопла 6, причому останнє виконано розширюється і забезпечене з внутрішньої сторони футеровкою у вигляді вкладиша 9 з еластичного матеріалу і вхідним насадком 10 з твердого зносостійкого матеріалу, східчасто пов'язаним з пасивним соплом 6. При цьому останнє забезпечене з боку насадка 10 кільцевим паз відповідним виступом 12, а його зовнішня поверхня 13 має форму усіченого конуса, зверненого меншою основою в бік камери 2 змішування.

Насос працює наступним чином. Активне середовище з кільцевого колектора 4 потрапляє в активне сопло 7 і ежектує пасивне середовище, що надходить через сопло у камері змішування 2 відбувається обмін енергією між активним і пасивним середовищем, а в дифузорі 3 — часткове перетворення кінетичної енергії потоку в потенційну. При цьому активне середовище з колектора надходить також і в поворотні сопла 8, що дозволяє здійснити закрутку пасивного середовища на вході в насос і часткове диспергування твердих включень. Розширюється форма пасивного сопла 6 дозволяє знизити ймовірність забивання його твердими включеннями, а вкладиш 9 і насадки 10 підвищують зносостійкість сопла 6, а конічна форма зовнішньої поверхні вкладиша 9 сприяє його щільному приляганню до поверхні сопла, що сполучається з ним 6.

Таким чином, конструкція пропонованого насоса дозволяє підвищити надійність його роботи за рахунок зниження ймовірності забивання пасивного сопла твердими включеннями та підвищення зносостійкості пасивного сопла.

Винахід [6] відноситься до струминної техніки, переважно до струминних насосів для перекачування різних рідинних середовищ їх кількох джерел одночасно.

Мета винаходу - підвищення продуктивності струменевої техніки..



*A - A (развернуто)*

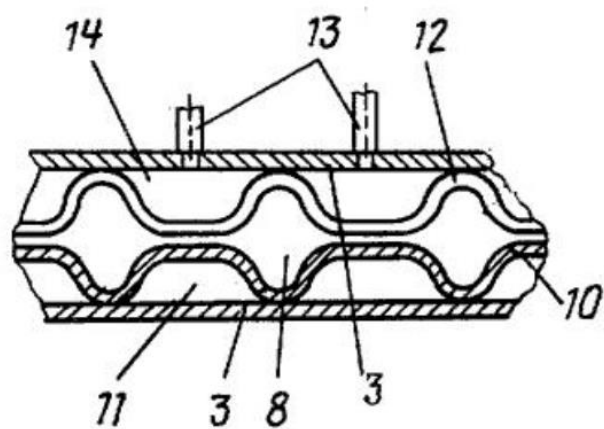


Рис 2.8 – До патенту [6]

Струменевий насос містить корпус 1, виконаний у вигляді диска з щілинною камерою 2 змішування, утвореної торцевими поверхнями корпусу 3 1, відвідний дифузор 4 і розташовані співвісно один одному на протилежних торцевих поверхнях 3 патрубків 5 і 6 підведення активної і пасивної середовищ, а встановлений виконаний у вигляді диска 7 направляючий апарат з каналами 8 для підведення активного середовища та виступами 9 коноїдальної форми, зверненими вершинами відповідно до патрубків 5 і 6 підведення активної та пасивної середовищ. Диск 7 направляючого апарату виконаний гофрованим, гофри 10 виконані по спіральним утворюючим з утворенням з торцевою поверхнею 3 корпусу 1 з боку патрубка 6 підведення пасивного середовища каналів 11 підведення пасивного середовища, а корпус 1 з боку патрубка 5 підведення активної середовища 2 додатковими патрубками 13 підведення пасивного середовища. Проставка 12 встановлена в корпусі 1 з утворенням додаткових каналів 14 підведення пасивного середовища, які повідомлені з додатковими патрубками 13, причому вершини і западини гофрів проставки 12 розташовані навпроти вершин і западин гофрів 10 диска 7, а гофри проставки 2 1.

При подачі через патрубок 5 активне середовище, обтікаючи виступ 9, змінює свій напрямок на радіальний і, рівномірно розподіляючись, спливає через канали 8 для активного підведення середовища в камеру 2 змішування. Одночасно, минаючи спіральними каналами 8, активне середовище закручується і захоплює в камеру 2 змішування пасивне середовище, що надходить по патрубку 6 підведення пасивного середовища і додатковим патрубкам 13 підведення пасивного середовища, причому патрубки 13 можуть бути підключені до самостійних джерел пасивного середовища. Пасивне середовище з патрубків 6 і 13 надходить у спіральні канали 11 і 14 підведення пасивного середовища, закручуючи в них. За рахунок виконання каналів 14 більш короткими, ніж канали 11, активне середовище спочатку змішується з пасивною з каналів 14, а потім суміш середовищ змішується в камері 2 змішування з пасивним середовищем з каналів 11. З камери змішування 2 суміш середовищ надходить у відвідний дифузор 4 і далі до споживача.

Таким чином, в результаті забезпечення відкачування пасивного середовища з декількох джерел та розвитку поверхні активного середовища в гофрах підвищується продуктивність струминного насоса.

Винахід [7] відноситься до струменевих апаратів та дозволяє усунути додаткові втрати напору без зменшення продуктивності. Мета винаходу - збільшення напору гідроструминного насоса.

Гідрострумний насос містить приймальну камеру 1 пасивного середовища джерела, приймальні камери 2 активного середовища лопатевих насосів, 5.

Діаметри камер змішування визначаються виразом

$$d_3 = \frac{d_1 (1 + \beta)}{\left(1 + \beta^2 \frac{d_1^2}{d_2^2}\right)^{0,5}}$$

де  $d_3$  - внутрішній діаметр камери змішування;  $d_1$  - внутрішній діаметр вихідного перерізу активного сопла першого ступеня;  $\beta$  - Коефіцієнт ежекції;  $d_2$  - внутрішній діаметр вихідного перерізу пасивного сопла.

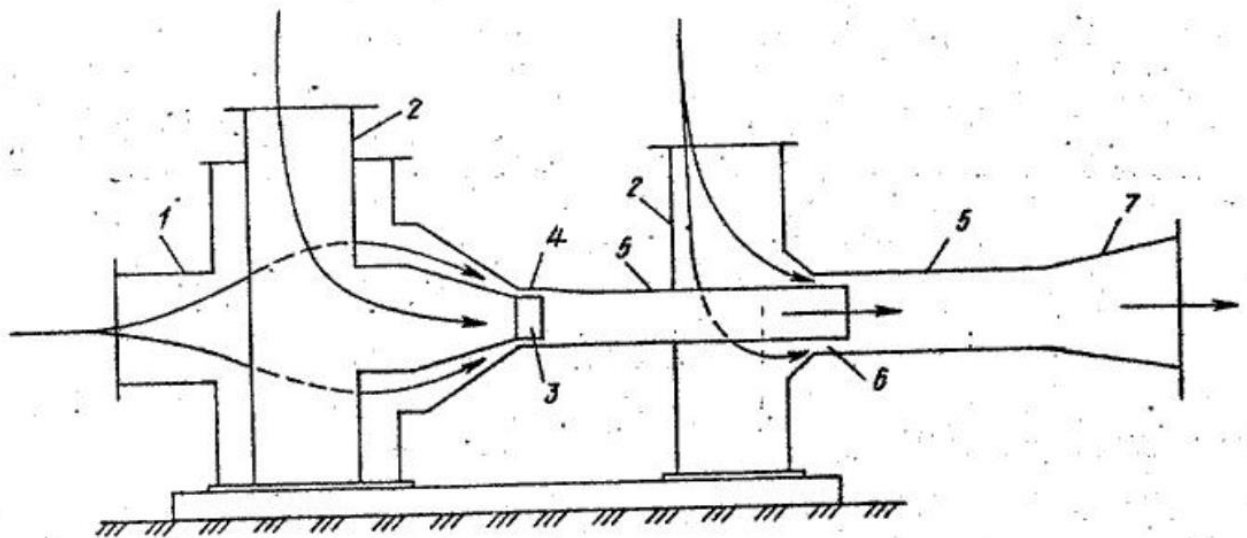


Рис 2.9 – До патенту [7]

Пристрій складається з декількох ступенів, кожна з яких містить послідовно розташовані, приймальну камеру 1 і 2, сопло 3, 4, циліндричні камери змішування 5, кільцеве нагнітальне сопло 6 активного середовища лопатєвого насоса і дифузор 7.

Насосна установка, що містить багатоступінчастий гідрострумний насос, працює наступним чином.

Активне водне середовище під напором лопатевих насосів направляється в приймальні камери 2, далі центральне сопло 3 і кільцеве сопло 6, при закінченні з яких в приймальну камеру 1 і кільцеве сопло 4 починає надходити пасивне середовище джерела. і перемішуючись з активним потоком 8 циліндричних камерах змішування 5 першого ступеня! а потім другого ступеня насоса, транспортується в дифузор 7, де кінетична енергія суміші перетворюється на потенційну, і потік під напором подається до споживача.

Виконує струменевий насос з поєднанням центрального активного сопла першого ступеня (поз.3) і кільцевого активного сопла наступного ступеня (поз.6). дозволяє інтенсифікувати процес змішування потоків, оскільки закінчення активного середовища відбувається як по центру камери змішування, так і по її периметру, що також призводить до збільшення напору багатоступеневого гідрострумного насоса.

Розглядаючи наведені вище конструкції гідрострумних насосів, потрібно пам'ятати, що перекачувана пульпа є дуже абразивною речовиною і тому, за можливості, у поперечному перерізі труби не повинно бути ніяких додаткових елементів конструкції. Цій умові відповідають практично усі розглянуті конструкції, окрім [6], яке являє собою різновид відцентрового насосу.

Але найпростішою є саме конструкція [1], що являє собою звичайну трубу пульпопроводу, у якій послідовно розташовані дві колові щілини у які подається робоча рідина.

### **2.3. Методика моделювання гідрострумних насосів**

У результаті проведено аналізу насосів для перекачування пульпи (див. п.1.1 ), встановлено параметри найбільш вживаної групи піскових та ґрунтових насосів:

- щільність пульпи, що перекачується пісковими та ґрунтовими насосами становить від 1300 до 1840 кг/м<sup>3</sup>;

- вміст твердого в пульпі по масі  $C_T$  до 40%;
- діаметри вхідних патрубків насосів від 200 мм до 350 мм;
- діаметри вихідних патрубків від 150 мм до 300 мм;
- подача від до 60 до 160 м<sup>3</sup>/год (0,0167 – 0,044);
- потужність від 35 до 55 кВт.

Потрібна швидкість потоку, м/с

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2}$$

де  $Q$  – подача, м<sup>3</sup>/с;  $S$  – площа поперечного перетину труби, м<sup>2</sup>;  $D$  – діаметр труби, м.

Згідно з даними (табл. 1.2), гідроструменевий насос має забезпечувати швидкість потоку пульпи від 1,6 до 3 м/с для трубопроводу діаметром 300-350 мм.

Розглядаючи проаналізовані схеми гідроструменевих насосів, слід відзначити схему [1] що відрізняється простотою конструкції та підвищеною ефективністю передачі руху робочої рідини пасивній. Отже надалі будемо досліджувати саме цю схему (рис 2.10).

Гідравлічний режим роботи струменевого насоса можна охарактеризувати при  $p = \text{const}$  наступними параметрами [9]:

- 1) робочим напором (витраченим у гідроструменевому насосі), що дорівнює різниці питомих енергій робочого потоку на вході в насос і змішаного потоку на виході з нього;
- 2) корисним напором, що створюється гідроструменевим насосом, рівним різниці питомих енергій змішаного потоку на виході з насоса і пасивного потоку на вході у всмоктувальний патрубок);
- 3) витратою робочої рідини;
- 4) витратою пасивної рідини (корисною витратою);
- 5) ККД струменевого насосу.

Отже, у загальному випадку для розрахунку нормальних гідравлічних характеристик гідроструменевих насосів необхідно визначити наступні величини:



- витрати робочої та пасивної (корисної) рідин (витрата змішаної рідини на виході з гідроструминного насоса ;

- повні напори (питомі) енергії робочої, пасивної і змішаної рідин;

- два основні геометричні параметри (розміри), що характеризують гідроструминний насос:

- площа вихідного перерізу сопла або його діаметр

- площа поперечного перерізу горловини або її діаметр.

Для розрахунку струменевих апаратів, що використовуються для гідротранспортування твердих речовин, застосовуються рівняння, що відносяться до гідроструминних насосів для однорідних рідин. Однак при виведенні цих рівнянь крім впливу на процеси дисперсного складу домішок доводиться враховувати, що робоче підсмоктування та змішані середовища матимуть різну щільність.

Вважається, що решта геометричних розмірів проточної частини гідроструменевих насосів є відомими функціями відношень вказаних вище параметрів.

Таким чином, в результаті розрахунку гідроструминного насоса необхідно визначити принаймні сім невідомих величин. Для їх розрахунку можуть бути складені наступні рівняння:

- 1) рівняння зміни кількості руху (рівняння імпульсів) по довжині камери змішування;

- 2) рівняння для робочого тиску активного потоку;

- 3) рівняння для корисного тиску пасивного потоку.

З іншого боку, можна записати рівняння балансу витрат. Звідси випливає, що кількість невідомих у загальному випадку перевищує кількість рівнянь, що описують процеси, що протікають у гідроструминних насосах.

Враховуючи вище наведене, параметри, що характеризують гідроструменевий насос будуть визначені за допомогою комп'ютерного моделювання. Сплануємо дослідження з метою визначення раціональних параметрів гідроструменевих насосів

## Сталі чинники

- діаметр вхідного патрубку  $D_{in} = 0,2$  м;
- діаметр вихідного патрубку  $D_{out} = 0,15$  м;
- щільність пасивної рідини (пульпа) -  $\rho_{п} = 1800$  кг/м<sup>3</sup>;
- щільність робочої рідини (вода) -  $\rho_{в} = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;
- кут нахилу першої щілини до осі  $\alpha_1 = 30$  град;
- кут нахилу другої щілини до осі  $\alpha_2 = 10$  град;

## Варійовані чинники:

- витрата робочої рідини (води)  $Q_p$ , м<sup>3</sup>/с; (0,01, 0,02, 0,03);
- ширина першої щілини  $h_1$ , мм (3, 5, 7);
- ширина другої щілини  $h_2$ , мм (3, 5, 7);

Примітка. При зміні ширин першої та другої щілин задля стабільності потоку також потрібно змінювати площу впускного каналу,  $S_{in}$ , мм<sup>2</sup> за наступною залежністю

$$S_{in} = \pi D_1 h_1 + \pi D_2 h_2$$

Для зручності можна прийняти  $D_1 = D_2$ , тоді

$$S_{in} = 2\pi D_1 (h_1 + h_2)$$

Однак для перебудови моделі зручніше користуватися зміною зовнішнього діаметру каналу втікання (рис 2.10, 2.11).

З іншого боку

$$S_{in} = \frac{\pi}{4} (D_{in1}^2 - D_{in}^2)$$

Тоді

$$2\pi D_1 (h_1 + h_2) = \frac{\pi}{4} (D_{in1}^2 - D_{in}^2)$$

$$8D_1 (h_1 + h_2) + D_{in}^2 = D_{in1}^2$$

$$D_{in1} = \sqrt{8D_1 (h_1 + h_2) + D_{in}^2}$$

З побудованої моделі (рис 2.10, 2.11) відомо, що  $D_1 = 214$  мм,  $D_{in2} = 220$  мм, тоді

$$D_{in1} = \sqrt{8 \cdot 214 (h_1 + h_2) + 220^2} = \sqrt{1712 \cdot (h_1 + h_2) + 48400}$$

План експерименту зводимо у таблицю (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – План експерименту

№	X1 $Q_p, \text{ м}^3/\text{с};$	X2 $h_1, \text{ мм}$	X3 $h_2, \text{ мм}$	$D_{in1}, \text{ мм}^2$
1	0.01	3	3	242,223
2	0.02	3	3	242,223
3	0.03	3	3	242,223
4	0.01	5	3	249,1907
5	0.02	5	3	249,1907
6	0.03	5	3	249,1907
7	0.01	7	3	255,9687
8	0.02	7	3	255,9687
9	0.03	7	3	255,9687
10	0.01	3	5	249,1907
11	0.02	3	5	249,1907
12	0.03	3	5	249,1907
13	0.01	5	5	255,9687
14	0.02	5	5	255,9687
15	0.03	5	5	255,9687
16	0.01	7	5	262,5719
17	0.02	7	5	262,5719
18	0.03	7	5	262,5719
19	0.01	3	7	255,9687
20	0.02	3	7	255,9687
21	0.03	3	7	255,9687
22	0.01	5	7	262,5719
23	0.02	5	7	262,5719
24	0.03	5	7	262,5719
25	0.01	7	7	269,013
26	0.02	7	7	269,013
27	0.03	7	7	269,013

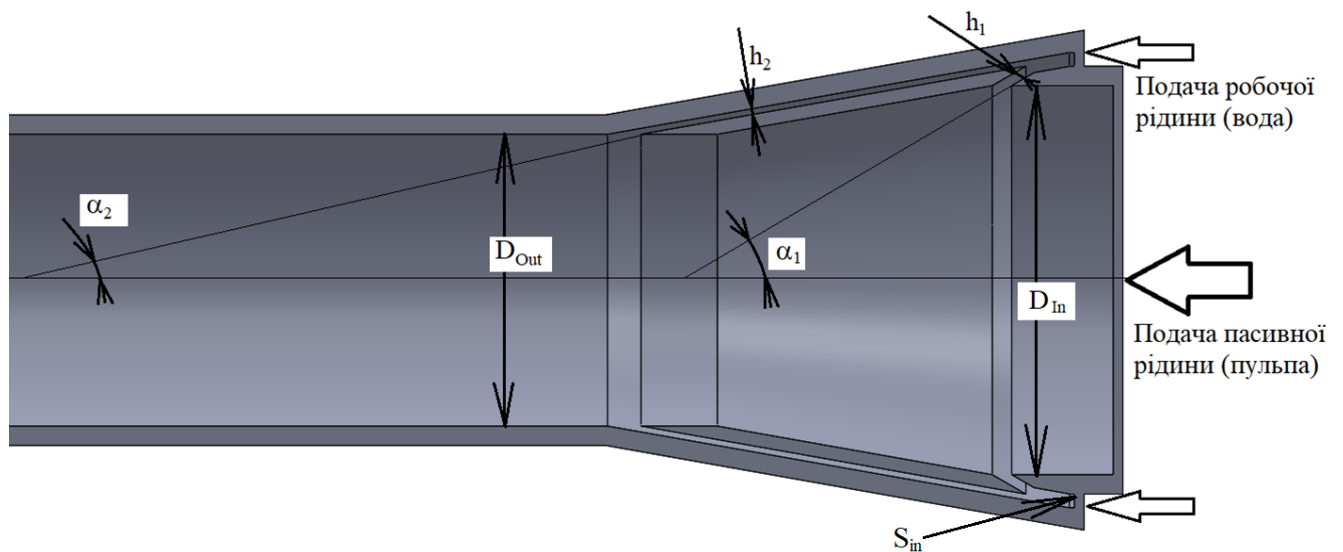


Рис 2.10 – Розрахункова модель

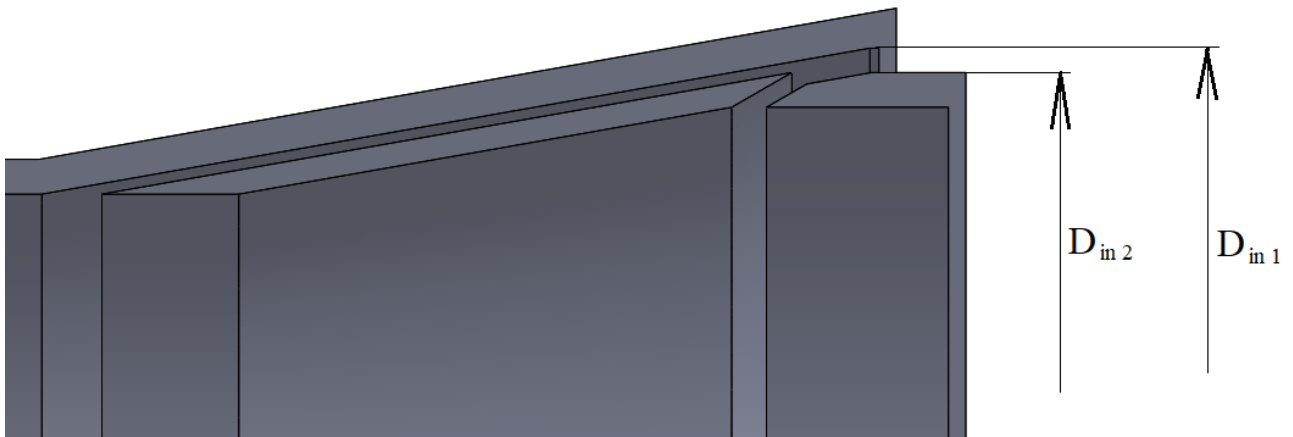


Рис 2.11 – Вхідний канал

### Функції відгуку

- тиск пасивної рідини на вході у насос  $P_n$ , Па;
- тиск суміші на виході з насосу  $P_c$ , Па;
- тиск робочої рідини на вході у насос  $P_b$ , Па;
- швидкість пасивної рідини на вході у насос  $v_n$ , м/с;
- швидкість суміші на виході з насосу  $v_c$ , м/с;
- швидкість робочої рідини на вході у насос  $v_b$ , м/с;
- щільність суміші на виході з насосу  $\rho_c$  кг/м<sup>3</sup>;
- витрата пасивної рідини на вході у насос  $Q_n$  м<sup>3</sup>/с;
- витрата суміші на виході з насосу  $Q_c$  м<sup>3</sup>/с;
- швидкість зношення окремих ділянок насосу.

Після проведення дослідження визначаються наступні похідні параметри:

- потрібна потужність насосу для робочої рідини

$$N = \frac{Q_a \cdot P_a}{1020}$$

- робочий напір насосу

$$H = \frac{P_c - P_n}{\rho_c \cdot g} + \frac{v_c^2 - v_n^2}{2g} + (z_2 - z_1)$$

де  $g=9.8 \text{ м/с}^2$  - прискорення вільного падіння;  $\rho_c$  - щільність суміші на виході з насоса,  $\text{кг/м}^3$ ;  $v_n$ , - швидкість пасивної рідини на вході у насос,  $\text{м/с}$ ;  $v_c$  - швидкість суміші на виході з насоса,  $\text{м/с}$ ;  $z_1, z_2$  – відстань між точками вимірювання тиску,  $\text{м}$ ;  $P_n$  - тиск пасивної рідини на вході у насос,  $\text{Па}$ ;  $P_c$  - тиск суміші на виході з насоса,  $\text{Па}$ ;

- ККД гідроструменевого насоса

$$\eta = \frac{\rho_n \cdot E \cdot Q}{N} 100\%$$

де  $E$  – об'ємний напір,  $\text{Дж/м}^3$

$$E = g \rho_n (z_2 - z_1) + (P_c - P_n) + \frac{\rho_n Q^2}{2} \left( \frac{\alpha_2}{S_{out}^2} - \frac{\alpha_1}{S_{in}^2} \right)$$

де  $S_{in}$  - площа вхідного патрубку,  $\text{м}^2$ ;  $S_{out}$  – площа вихідного патрубку,  $\text{м}^2$ ;  $\alpha_1, \alpha_2$  – коректив кінетичної енергії (коефіцієнт Кориоліса).

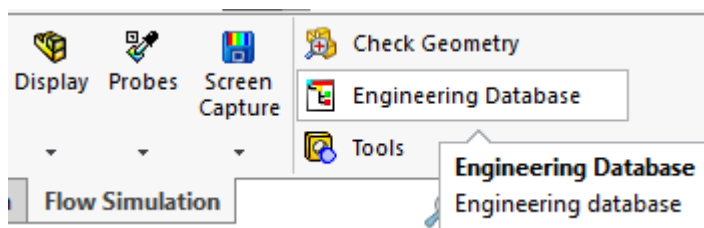
Вихідні параметри суміші такі як швидкість, тиск та ін. знімаються на відстані  $10D$  від виходу з насоса, щоб знизити вплив турбулентності процесу.

Для моделювання буде застосовано розрахунковий модуль SolidWorks Flow Simulation.

Оскільки мова йде про дві речовини – вода та пульпа, які добре змішуються, то для аналізу будемо використовувати звичайну внутрішню задачу без додаткових підзадач.

Послідовність створення розрахункової моделі (рис 2.10).

1. Створюємо нову речовину – пульпу. Для цього на стрічці на вкладці Flow Simulation обираємо інструмент Engineering Database (2.11).



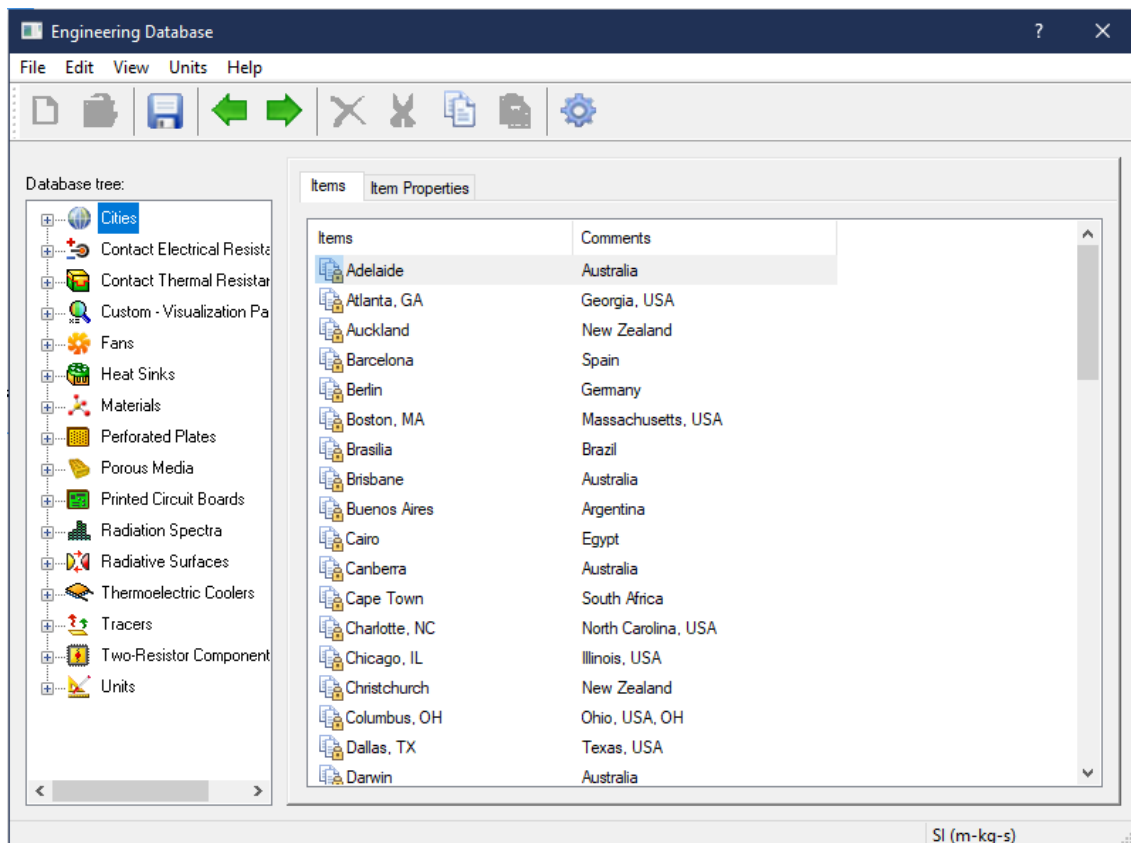


Рис 2.11 - Engineering Database

- У дереві Database Tree обрати гілки Materials-> Liquids і правою кнопкою миші натиснути на гілку User Defined. У контекстному меню обрати пункт New Item (2.12).

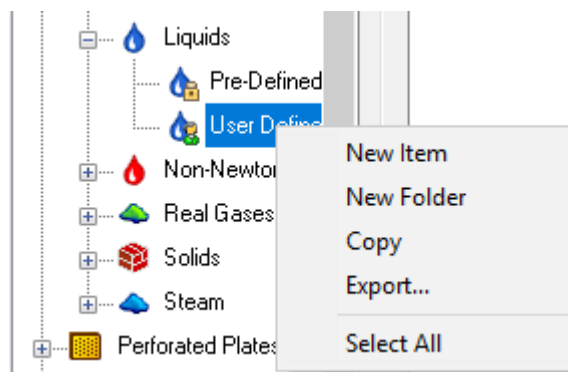


Рис 2.12 - New Item

- Створити нову рідину, ввівши наступні параметри:

Property Name	Value
Comments	
Density	1800 kg/m <sup>3</sup>
Dynamic viscosity	0.0017912 Pa*s
Specific heat (Cp)	4219.9 J/(kg*K)
Thermal conductivity	0.56104 W/(m*K)
Cavitation effect	<input type="checkbox"/>
Radiation properties	<input type="checkbox"/>

Рис 2.13 - Нова рідина

## 4. Зберегти нову рідину.

Після створення твердотільної моделі (рис 2.10), створюємо новий проект Flow Simulation, скориставшись інструментом Wizard.

1. Перший і другий крок (назва та система одиниць вимірювання) залишаємо без змін;
2. Третій крок – встановлюємо вирішення внутрішньої задачі без застосування інших підзадач (рис 2.14);

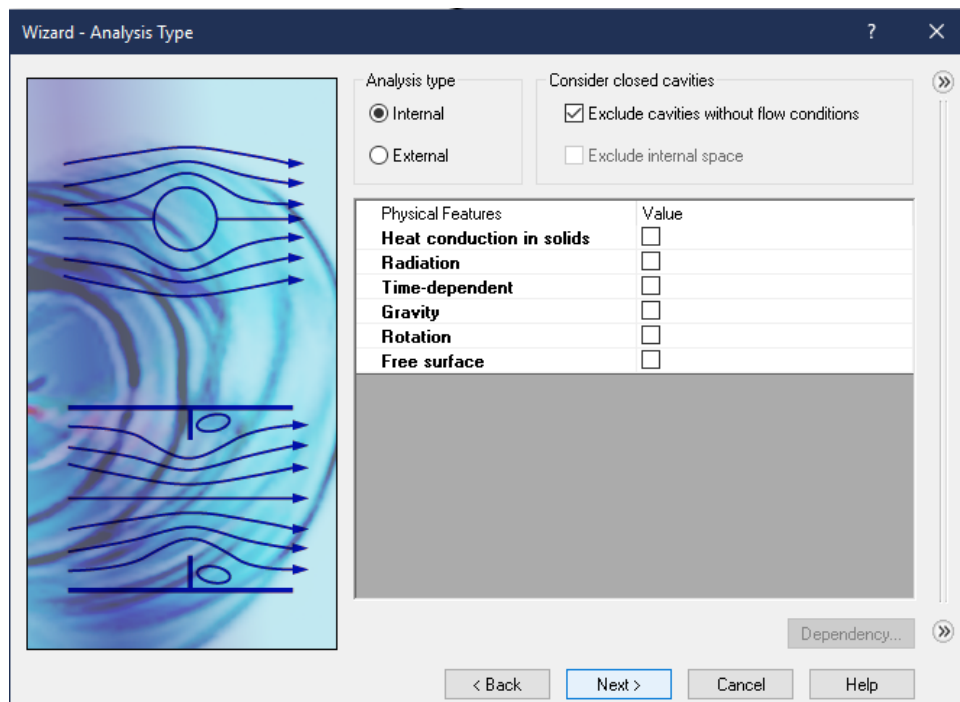


Рис 2.14 – Тип задачі

3. На наступному кроці визначаємо речовини, що приймають участь у розрахунку – вода та пульпа (рис 2.15);

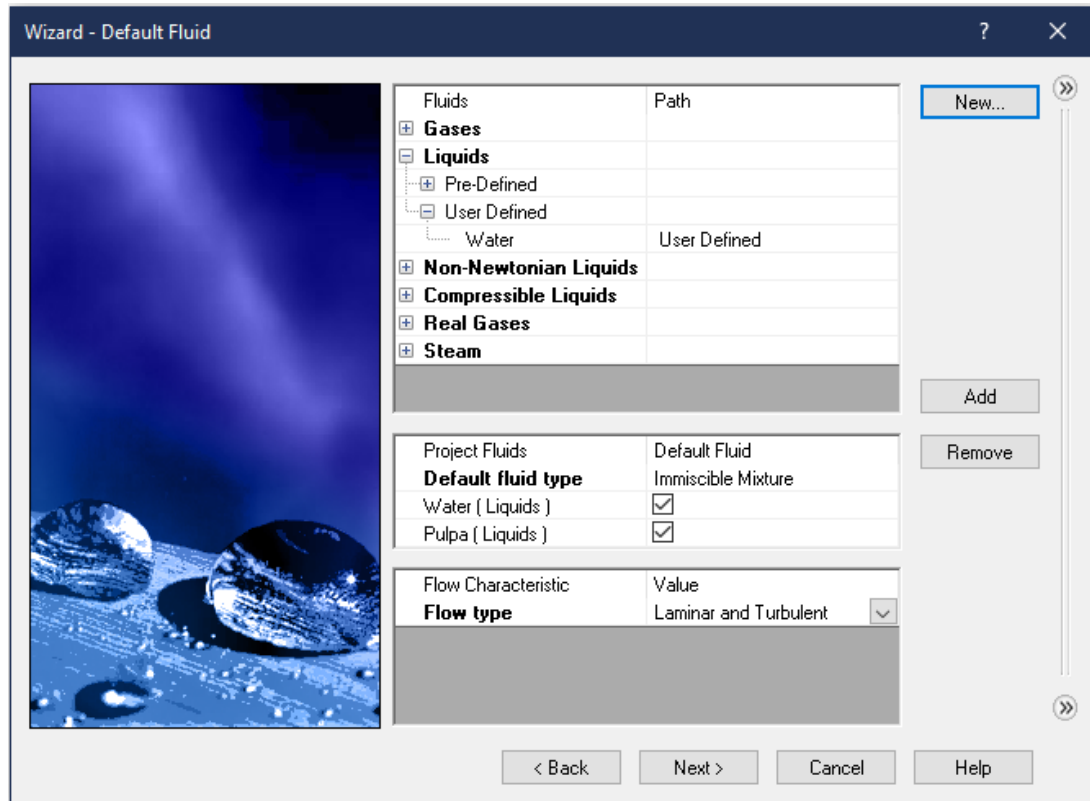


Рис 2.15 – Речовини у задачі

4. На кроці визначення параметрів зовнішнього середовища у пункті Concentration призначаємо пульпу речовиною за замовчуванням (рис 2.16);
5. Визначаємо розрахункову область. Задля зменшення обсягу розрахунків та підвищення їх якості та в наслідок того, що конструкція насоса симетрична у двох площинах, розрахункову область задаємо як чверть від об'єму насоса (рис 2.17);
6. Створюємо граничні умові втікання (рис 2.18). Визначаємо область втікання води, задаємо витрату (попередню) і у розділі Substance Concentration встановлюємо речовину – вода;
7. Створюємо граничні умови вільної течії (рис 2.19). визначаємо області з атмосферним тиском і у розділі Substance Concentration встановлюємо речовину – пульпа;



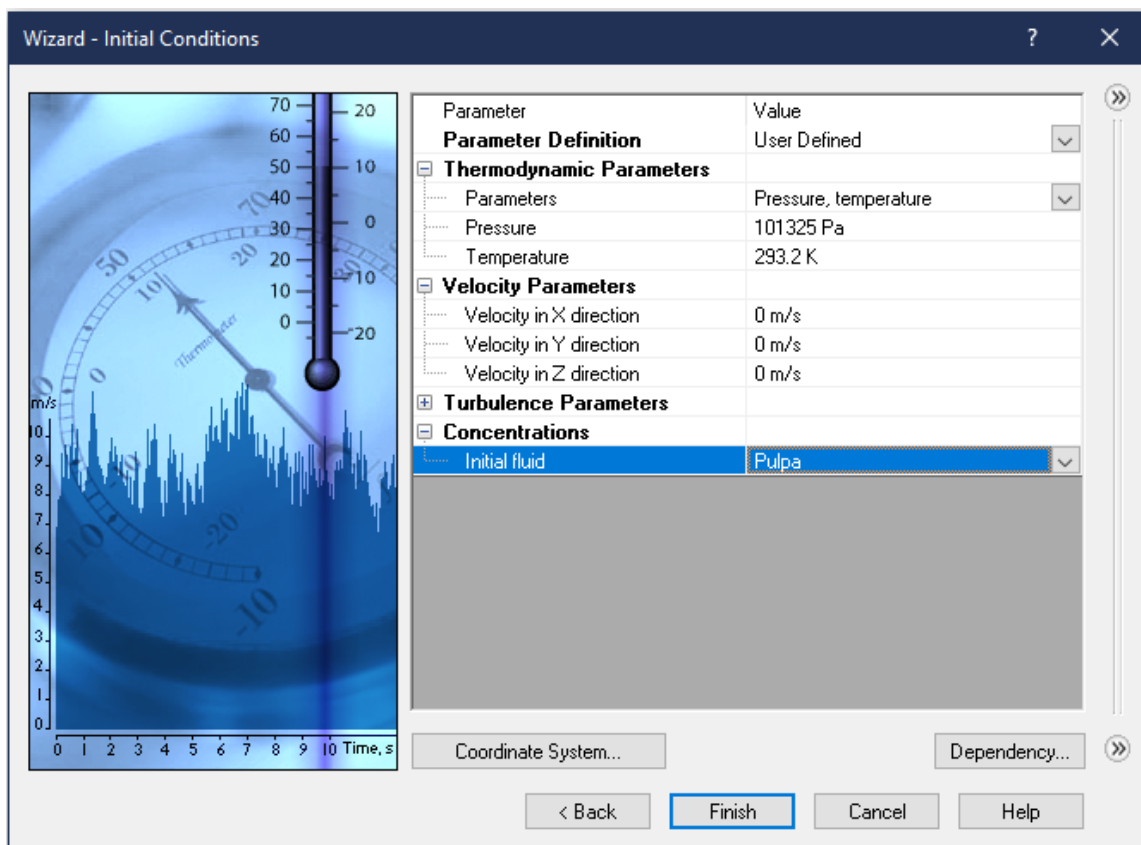


Рис 2.16 – Параметри зовнішнього середовища.

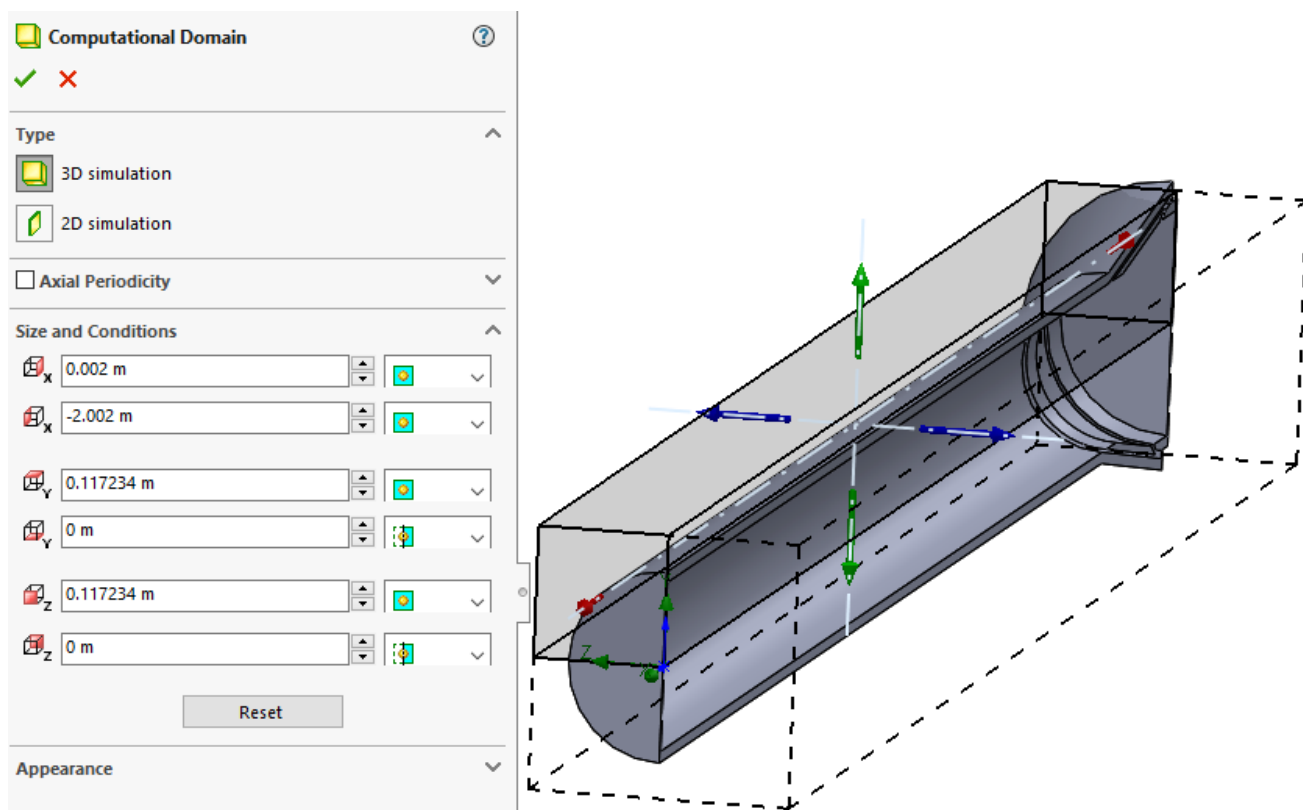


Рис 2.17 – Розрахункова область

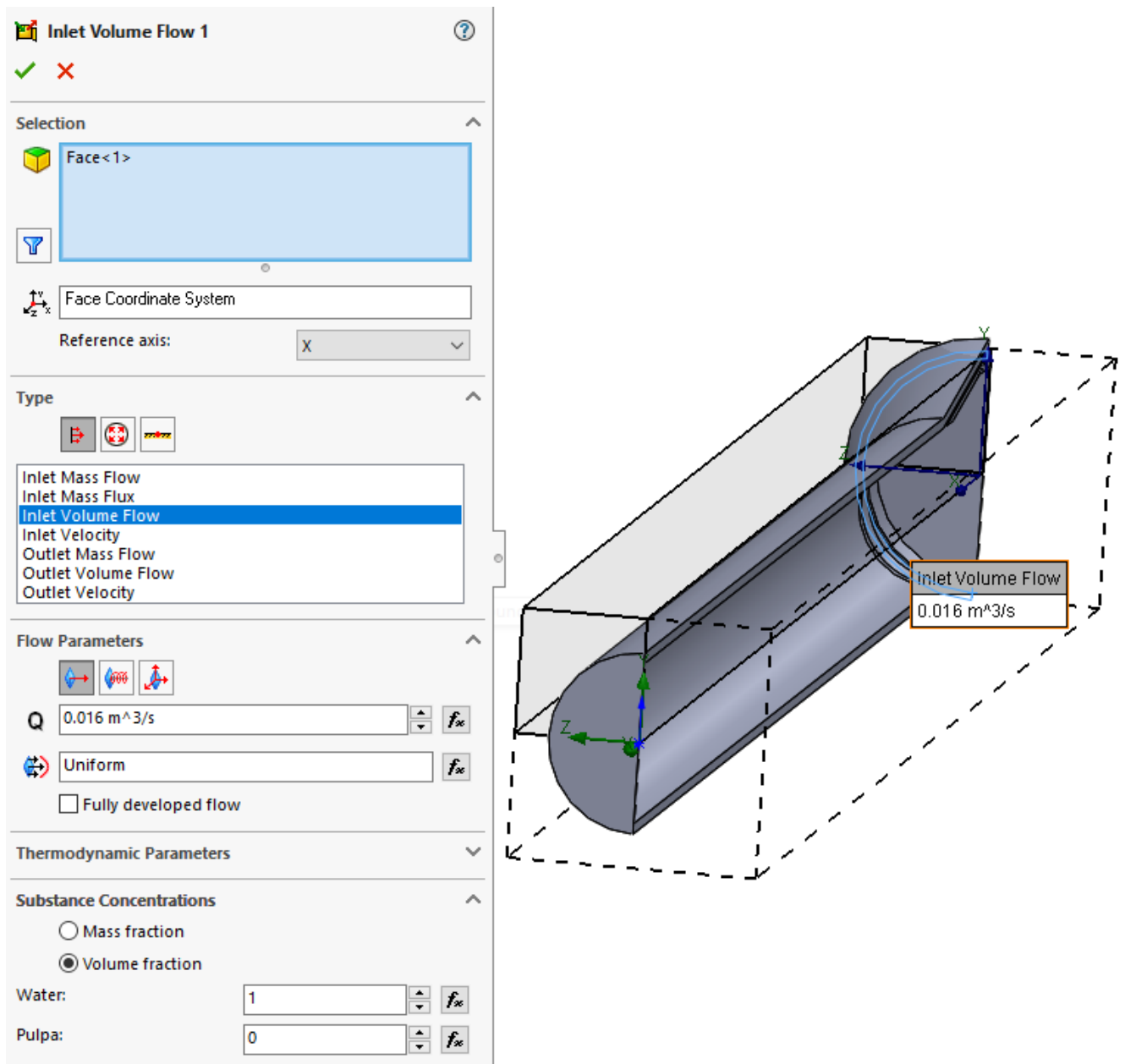


Рис 2.18 – Гранична умова втікання

8. Заздалегідь визначаємо параметри, які будуть отримуватися з перетину витікання суміші з насосу у результаті розрахунку (рис 2.20). У списку Parameters відмічаємо Density (щільність), Pressure (тиск), Velocity (швидкість), Volume Flow Rate (об'ємна витрата).
9. Визначаємо параметри, які будуть отримуватися з перетину втікання пульпи у насос у результаті розрахунку (рис 2.21). У списку Parameters відмічаємо Density (щільність), Pressure (тиск), Velocity (швидкість), Volume Flow Rate (об'ємна витрата).

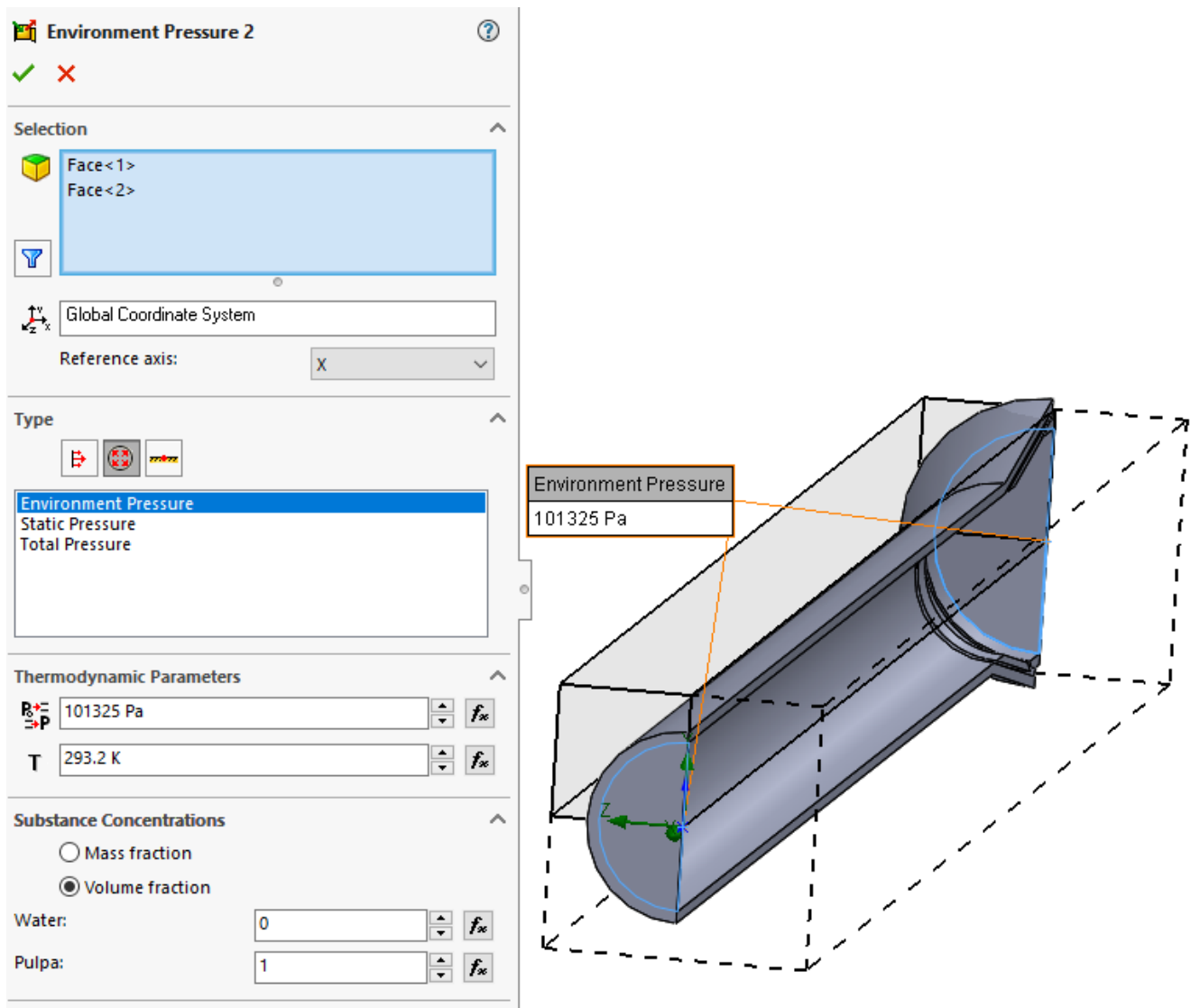


Рис 2.19 – Области вільної течії

10. Визначаємо параметри, які будуть отримуватися з перетину втікання води у насос у результаті розрахунку (рис 2.22). У списку Parameters відмічаємо Density (щільність), Pressure (тиск), Velocity (швидкість), Volume Flow Rate (об'ємна витрата).
11. У параметрах сітки встановлюємо тип побудови сітки – Automatic, у розділі Settings встановлюємо 7 рівень точності. Додатково ставимо відмітку Advanced channel refinement для покращення відпрацювання каналів.

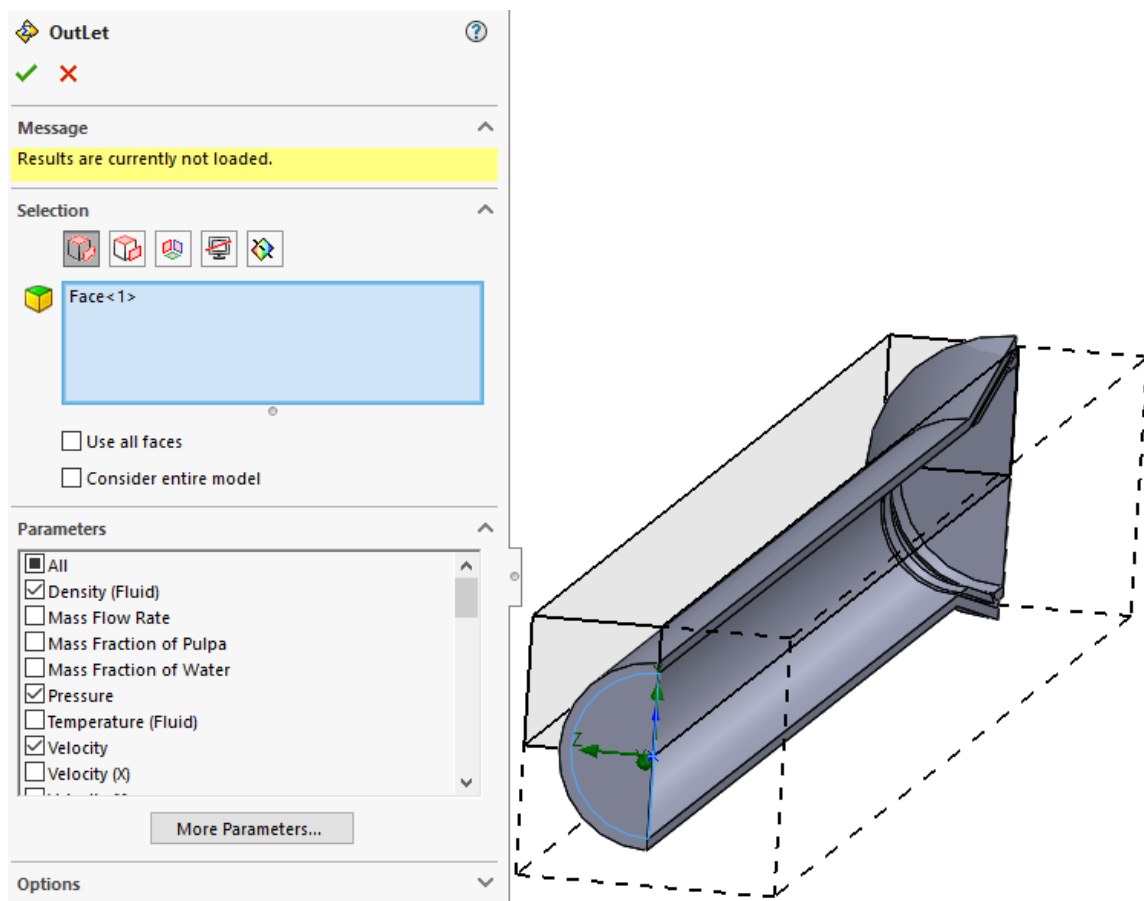


Рис 2.20 – Визначення параметрів зони витікання суміші

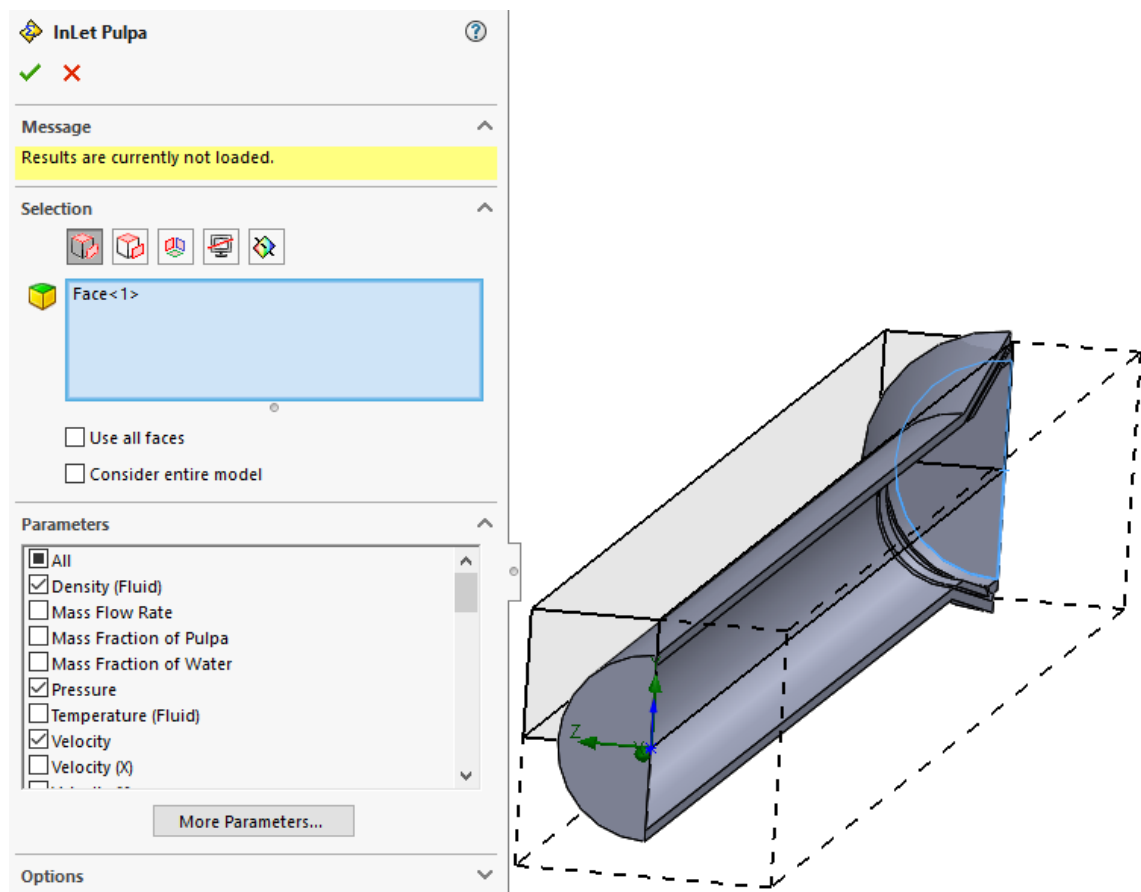


Рис 2.21 – Визначення параметрів зони втікання пульпи

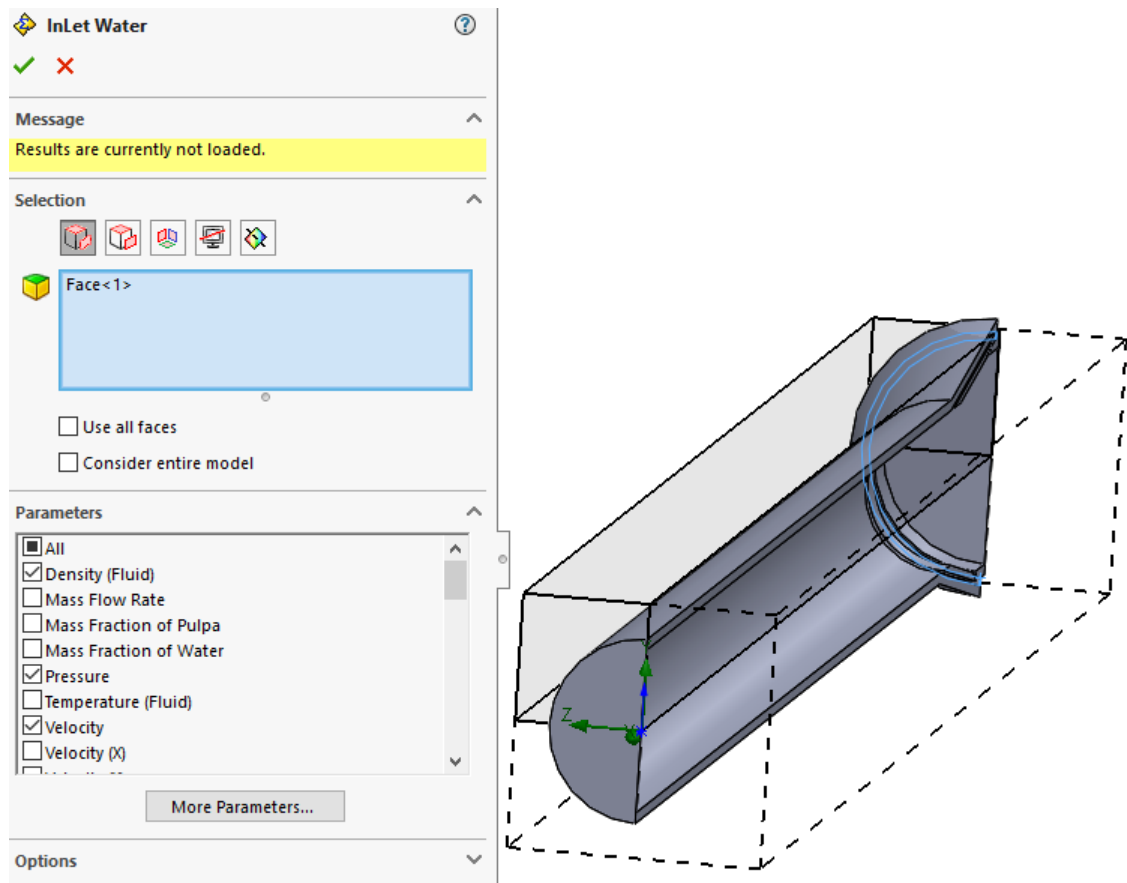


Рис 2.22 – Визначення параметрів зони втікання води

Задля забезпечення можливості розробки методики проектування потрібно змінити варійовані чинники на безрозмірні параметри наступним чином:

X1 – витрата води  $Q_B$ ;

X2 – коефіцієнт площі  $k_s$  - відношення площі вхідного патрубку пульпопроводу до площу патрубку подачі води;

X3 – коефіцієнт ширини  $k_k$  - відношення ширини першого каналу до ширини другого каналу.

## Висновки до розділу 2

1. Розроблено загальну методику подальшого дослідження, що дозволяє досягти поставленої мети роботи покращити режим роботи інерційних грохотів за рахунок обґрунтування раціональних експлуатаційних параметрів;
2. Проведено аналіз існуючих конструкції гідроструменевих насосів. Визначено найпростішу конструкцію, що не має у поперечному перерізу труби ніяких додаткових елементів конструкції. Найпростішою є конструкція, що являє собою звичайну трубу пульпопроводу, у якій послідовно розташовані дві колові щілини у які подається робоча рідина;
3. Розроблено методику подальшого дослідження параметрів гдроструменевого насосу на основі комп'ютерного моделювання;
4. У якості сталих чинників виступають: діаметр вхідного патрубка  $D_{in} = 0,2$  м; діаметр вихідного патрубка  $D_{out} = 0,15$  м; щільність пасивної рідини (пульпа) -  $\rho_p = 1800$  кг/м<sup>3</sup>; щільність робочої рідини (вода) -  $\rho_v = 1000$  кг/м<sup>3</sup>; кут нахилу першої щілини до осі  $\alpha_1 = 30$  град; кут нахилу другої щілини до осі  $\alpha_2 = 10$  град;
5. У якості варійованих чинників виступають: витрата води  $Q_v$ ; коефіцієнт площі  $k_s$  - відношення площі вхідного патрубку пульпопроводу до площу патрубку подачі води; коефіцієнт ширини  $k_k$  - відношення ширини першого каналу до ширини другого каналу.
6. У якості функцій відгуку виступають: тиск пасивної рідини на вході у насос  $P_p$ , Па; тиск суміші на виході з насосу  $P_c$ , Па; тиск робочої рідини на вході у насос  $P_v$ , Па; швидкість пасивної рідини на вході у насос  $v_p$ , м/с; швидкість суміші на виході з насосу  $v_c$ , м/с; швидкість робочої рідини на вході у насос  $v_v$ , м/с; щільність суміші на виході з насосу  $\rho_c$  кг/м<sup>3</sup>; витрата пасивної рідини на вході у насос  $Q_p$  м<sup>3</sup>/с; витрата суміші на виході з насосу  $Q_c$  м<sup>3</sup>/с; швидкість зношення окремих ділянок насосу.

### 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОСТРУМЕНЕИХ НАСОСІВ

#### 3.1. Результати моделювання гідроструменевих насосів щілинного типу

Задля автоматизації обчислень при проведенні 27 запланованих дослідів було використано інструмент What if Analysis, що дозволяє автоматизувати зміну варійованих чинників та отримання результатів за заданим планом (рис 3.1)

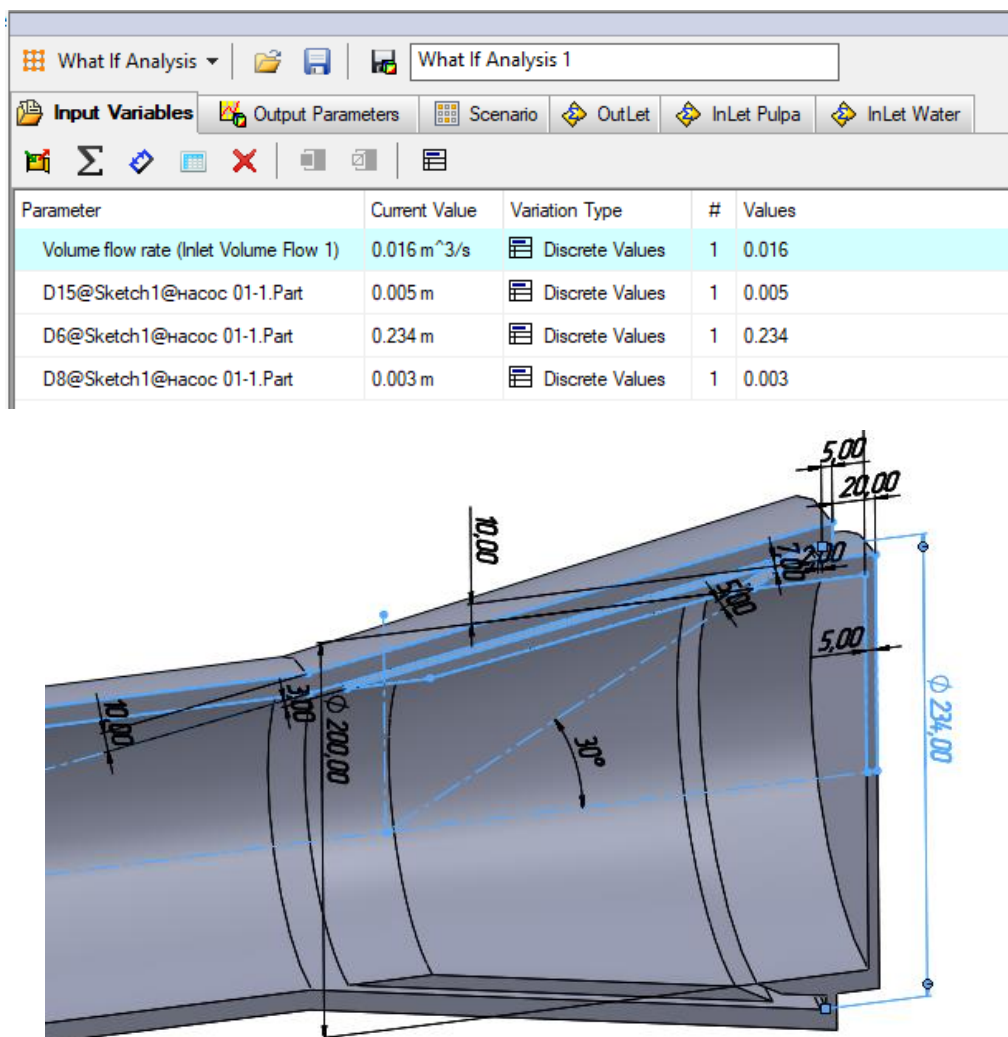


Рис 3.1 – Варійовані чинники в інструменті What if Analysis

The figure shows the 'What If Analysis' tool interface with a summary table. The table has the following data:

Summary	* Design Point 1	* Design Point 2	* Design Point 3	* Design Point 4	* Design Point 5
Volume flow rate (Inlet Volume Flow 1) [m <sup>3</sup> /s]	0.01	0.02	0.03	0.01	0.02
D15@Sketch1@насос 01-1.Part [m]	0.003	0.003	0.003	0.005	0.005
D6@Sketch1@насос 01-1.Part [m]	0.242	0.242	0.242	0.249	0.249
D8@Sketch1@насос 01-1.Part [m]	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
Status	Not calculated	Not calculated	Not calculated	Not calculated	Not calculated
Run at	[auto]	[auto]	[auto]	[auto]	[auto]
Number of cores	[use all]	[use all]	[use all]	[use all]	[use all]
Recalculate	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Take previous results	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Рис 3.2 – План експерименту

Результати дослідження наведені у табл. 3.1, 3.2, 3.3.

Таблиця 3.1 - Робоча рідина на вході

№	X1 $Q_p$ , $m^3/c$ ;	X2 $h_1$ , мм	X3 $h_2$ , мм	тиск робочої рідини на вході у насос $P_B$ , Па;	швидкість робочої рідини на вході у насос $v_B$ , м/с;
1	0,01	3	3	181560.1	5.012979
2	0,02	3	3	413948.7	10.02596
3	0,03	3	3	802320.4	15.03894
4	0,01	5	3	157828.7	3.744972
5	0,02	5	3	321239.8	7.489944
6	0,03	5	3	589812.6	11.23492
7	0,01	7	3	132047	2.972231
8	0,02	7	3	214677.1	5.944462
9	0,03	7	3	348867.3	8.916693
10	0,01	3	5	149793.5	3.744972
11	0,02	3	5	287382.7	7.489944
12	0,03	3	5	513641.1	11.23492
13	0,01	5	5	132178.4	2.972231
14	0,02	5	5	220266	5.944462
15	0,03	5	5	365063.8	8.916693
16	0,01	7	5	122069	2.516128
17	0,02	7	5	180900.5	5.032257
18	0,03	7	5	278191.6	7.548385
19	0,01	3	7	132884	2.971495
20	0,02	3	7	223388.8	5.94299
21	0,03	3	7	369938.6	8.914485
22	0,01	5	7	122057.3	2.516128
23	0,02	5	7	182244.8	5.032257
24	0,03	5	7	280292.1	7.548385
25	0,01	7	7	115752.6	2.146278
26	0,02	7	7	156644.3	4.292555
27	0,03	7	7	225010.2	6.438833



Таблиця 3.2 - Пасивна рідина на вході

№	X1 $Q_p$ , $m^3/c$ ;	X2 $h_1$ , мм	X3 $h_2$ , мм	тиск пасивної рідини на вході у насос $P_{п}$ , Па	швидкість пасивної рідини на вході у насос $v_{п}$ , м/с	витрата пасивної рідини на вході у насос $Q_{п}$ $m^3/c$
1	0,01	3	3	100189.5908	1.122887405	0.008811836
2	0,02	3	3	96625.5714	2.284506511	0.017928595
3	0,03	3	3	90582.38413	3.454062289	0.027107511
4	0,01	5	3	100794.1	0.767978	0.006028
5	0,02	5	3	99122.64	1.56418	0.012279
6	0,03	5	3	96273.24	2.369006	0.018596
7	0,01	7	3	101073.2	0.528953	0.004152
8	0,02	7	3	100255.8	1.089933	0.008556
9	0,03	7	3	98862.44	1.654104	0.012985
10	0,01	3	5	100638.7	0.873156	0.006854
11	0,02	3	5	98479.78	1.777901	0.013956
12	0,03	3	5	94796.17	2.693204	0.021141
13	0,01	5	5	101002.7	0.598346	0.004696
14	0,02	5	5	99969.48	1.227187	0.009633
15	0,03	5	5	98206.34	1.861416	0.014609
16	0,01	7	5	101150.1	0.440766	0.003461
17	0,02	7	5	100576.1	0.912174	0.007162
18	0,03	7	5	99586.33	1.389884	0.010912
19	0,01	3	7	100896.7	0.689804	0.005416
20	0,02	3	7	99540.98	1.407887	0.011054
21	0,03	3	7	97222.42	2.135	0.016762
22	0,01	5	7	101100.8	0.499098	0.003918
23	0,02	5	7	100377.8	1.025829	0.008053
24	0,03	5	7	99140.86	1.557773	0.01223
25	0,01	7	7	101214.7	0.350019	0.002748
26	0,02	7	7	100843.7	0.731298	0.005742
27	0,03	7	7	100201.5	1.117295	0.008773

Таблиця 3.3 – Суміш на виході

№	X1 $Q_p$ , $m^3/c$ ;	X2 $h_1$ , мм	X3 $h_2$ , мм	тиск суміші на виході з насосу $P_c$ , Па	швидкість суміші на вході у насос $v_c$ , м/с	витрата суміші на виході з насосу $Q_c$ $m^3/c$	щільність суміші на виході з насосу $\rho_c$ кг/м <sup>3</sup>
1	0,01	3	3	101325	4.272507	0.01885	1370.433
2	0,02	3	3	101325	8.610155	0.038	1374.533
3	0,03	3	3	101325	12.96296	0.05721	1376.253
4	0,01	5	3	101325	3.632709	0.01603	1299.257
5	0,02	5	3	101325	7.317562	0.03229	1302.446
6	0,03	5	3	101325	11.01623	0.04861	1304.403
7	0,01	7	3	101325	3.201745	0.01413	1234.987
8	0,02	7	3	101325	6.463243	0.02852	1239.709
9	0,03	7	3	101325	9.726343	0.04292	1241.887
10	0,01	3	5	101325	3.823345	0.01687	1322.542
11	0,02	3	5	101325	7.702859	0.03399	1326.095
12	0,03	3	5	101325	11.60026	0.05119	1328.152
13	0,01	5	5	101325	3.330804	0.0147	1253.985
14	0,02	5	5	101325	6.71364	0.02963	1258.909
15	0,03	5	5	101325	10.10509	0.04459	1261.156
16	0,01	7	5	101325	3.044303	0.01343	1206.414
17	0,02	7	5	101325	6.145379	0.02712	1211.433
18	0,03	7	5	101325	9.252958	0.04083	1214.356
19	0,01	3	7	101325	3.490988	0.01541	1279.99
20	0,02	3	7	101325	7.030568	0.03103	1284.092
21	0,03	3	7	101325	10.58822	0.04674	1285.983
22	0,01	5	7	101325	3.1497	0.0139	1225.37
23	0,02	5	7	101325	6.347552	0.02801	1230.093
24	0,03	5	7	101325	9.552937	0.04215	1232.409
25	0,01	7	7	101325	2.882586	0.01272	1172.85
26	0,02	7	7	101325	5.822221	0.0257	1178.624
27	0,03	7	7	101325	8.767332	0.0387	1181.548

Задля забезпечення можливості розробки методики проектування потрібно змінити варійовані чинники на безрозмірні параметри наступним чином:

X1 – витрата води  $Q_B$ ;

X2 – коефіцієнт площі  $k_s$  - відношення площі вхідного патрубку пульпопроводу до площу патрубка подачі води;

X3 – коефіцієнт ширини  $k_k$  - відношення ширини першого каналу до ширини другого каналу.

Для обробки експериментальних даних використовуємо ПКА MathCAD.

XXX :=	(0.01 3 3)	Yinw :=	(181560.1 5.012979)
	0.02 3 3		413948.7 10.02596
	0.03 3 3		802320.4 15.03894
	0.01 5 3		157828.7 3.744972
	0.02 5 3		321239.8 7.489944
	0.03 5 3		589812.6 11.23492
	0.01 7 3		132047 2.972231
	0.02 7 3		214677.1 5.944462
	0.03 7 3		348867.3 8.916693
	0.01 3 5		149793.5 3.744972
	0.02 3 5		287382.7 7.489944
	0.03 3 5		513641.1 11.23492
	0.01 5 5		132178.4 2.972231
	0.02 5 5		220266 5.944462
	0.03 5 5		365063.8 8.916693
	0.01 7 5		122069 2.516128
	0.02 7 5		180900.5 5.032257
	0.03 7 5		278191.6 7.548385
	0.01 3 7		132884 2.971495
	0.02 3 7		223388.8 5.94299
	0.03 3 7		369938.6 8.914485
	0.01 5 7		122057.3 2.516128
	0.02 5 7		182244.8 5.032257
	0.03 5 7		280292.1 7.548385
	0.01 7 7		115752.6 2.146278
	0.02 7 7		156644.3 4.292555
	0.03 7 7)		225010.2 6.438833)
	Qb h1 h2		Pb vb

Y <sub>pin</sub> :=	100189.5908	1.122887405	0.008811836	Y <sub>out</sub> :=	101325	4.272507	0.01885	1370.433		
	96625.5714	2.284506511	0.017928595		101325	8.610155	0.038	1374.533		
	90582.38413	3.454062289	0.027107511		101325	12.96296	0.05721	1376.253		
	100794.1	0.767978	0.006028		101325	3.632709	0.01603	1299.257		
	99122.64	1.56418	0.012279		101325	7.317562	0.03229	1302.446		
	96273.24	2.369006	0.018596		101325	11.01623	0.04861	1304.403		
	101073.2	0.528953	0.004152		101325	3.201745	0.01413	1234.987		
	100255.8	1.089933	0.008556		101325	6.463243	0.02852	1239.709		
	98862.44	1.654104	0.012985		101325	9.726343	0.04292	1241.887		
	100638.7	0.873156	0.006854		101325	3.823345	0.01687	1322.542		
	98479.78	1.777901	0.013956		101325	7.702859	0.03399	1326.095		
	94796.17	2.693204	0.021141		101325	11.60026	0.05119	1328.152		
	101002.7	0.598346	0.004696		101325	3.330804	0.0147	1253.985		
	99969.48	1.227187	0.009633		101325	6.71364	0.02963	1258.909		
	98206.34	1.861416	0.014609		101325	10.10509	0.04459	1261.156		
	101150.1	0.440766	0.003461		101325	3.044303	0.01343	1206.414		
	100576.1	0.912174	0.007162		101325	6.145379	0.02712	1211.433		
	99586.33	1.389884	0.010912		101325	9.252958	0.04083	1214.356		
	100896.7	0.689804	0.005416		101325	3.490988	0.01541	1279.99		
	99540.98	1.407887	0.011054		101325	7.030568	0.03103	1284.092		
	97222.42	2.135	0.016762		101325	10.58822	0.04674	1285.983		
	101100.8	0.499098	0.003918		101325	3.1497	0.0139	1225.37		
	100377.8	1.025829	0.008053		101325	6.347552	0.02801	1230.093		
	99140.86	1.557773	0.01223		101325	9.552937	0.04215	1232.409		
	101214.7	0.350019	0.002748		101325	2.882586	0.01272	1172.85		
	100843.7	0.731298	0.005742		101325	5.822221	0.0257	1178.624		
	100201.5	1.117295	0.008773		101325	8.767332	0.0387	1181.548		
		P <sub>n</sub>	v <sub>n</sub>		Q <sub>n</sub>		P <sub>c</sub>	v <sub>c</sub>	Q <sub>c</sub>	ro_c

X1 - витрата води Q<sub>v</sub> м<sup>3</sup>/с  $X3^{(0)} := XXX^{(0)}$

Сумарна площа щілин, м<sup>2</sup>

$$Sinw_1 := 2 \cdot \pi \cdot 0.214 \cdot \frac{(XXX_{i,1} + XXX_{i,2})}{1000}$$

Площа вхідного патрубку, м<sup>2</sup>

$$Sinp := \pi \cdot \frac{0.2^2}{4} = 0.031$$

X2 - відношення площі вхідного патрубку пульпопроводу до площі патрубку подачі води

$$X3_{i,1} := \frac{S_{inp}}{S_{inw}_1}$$

X3 - відношення ширини першого каналу до ширини другого каналу

$$X3_{i,2} := \frac{XXX_{i,1}}{XXX_{i,2}}$$

Функції відгуку

Y1 - швидкість потоку сімші на виході з насосу, м/с

$$Y3^{(0)} := Y_{out}^{(1)}$$

Y2 - витрата пульпи м3/с

$$Y3^{(1)} := Y_{pin}^{(2)}$$

Y3 - щільність вихідної суміші кг/м3

$$Y3^{(2)} := Y_{out}^{(3)}$$

	0	1	2
0	0.01	3.894	1
1	0.02	3.894	1
2	0.03	3.894	1
3	0.01	2.921	1.667
4	0.02	2.921	1.667
5	0.03	2.921	1.667
6	0.01	2.336	2.333
7	0.02	2.336	2.333
8	0.03	2.336	2.333
9	0.01	2.921	0.6
10	0.02	2.921	0.6
11	0.03	2.921	0.6
12	0.01	2.336	1
13	0.02	2.336	1
14	0.03	2.336	1
15	0.01	1.947	1.4
16	0.02	1.947	1.4
17	0.03	1.947	1.4
18	0.01	2.336	0.429
19	0.02	2.336	0.429
20	0.03	2.336	0.429
21	0.01	1.947	0.714
22	0.02	1.947	0.714
23	0.03	1.947	0.714
24	0.01	1.669	1
25	0.02	1.669	1
26	0.03	1.669	1

X3 =

	0	1	2
0	4.273	$8.812 \cdot 10^{-3}$	$1.37 \cdot 10^3$
1	8.61	0.018	$1.375 \cdot 10^3$
2	12.963	0.027	$1.376 \cdot 10^3$
3	3.633	$6.028 \cdot 10^{-3}$	$1.299 \cdot 10^3$
4	7.318	0.012	$1.302 \cdot 10^3$
5	11.016	0.019	$1.304 \cdot 10^3$
6	3.202	$4.152 \cdot 10^{-3}$	$1.235 \cdot 10^3$
7	6.463	$8.556 \cdot 10^{-3}$	$1.24 \cdot 10^3$
8	9.726	0.013	$1.242 \cdot 10^3$
9	3.823	$6.854 \cdot 10^{-3}$	$1.323 \cdot 10^3$
10	7.703	0.014	$1.326 \cdot 10^3$
11	11.6	0.021	$1.328 \cdot 10^3$
12	3.331	$4.696 \cdot 10^{-3}$	$1.254 \cdot 10^3$
13	6.714	$9.633 \cdot 10^{-3}$	$1.259 \cdot 10^3$
14	10.105	0.015	$1.261 \cdot 10^3$
15	3.044	$3.461 \cdot 10^{-3}$	$1.206 \cdot 10^3$
16	6.145	$7.162 \cdot 10^{-3}$	$1.211 \cdot 10^3$
17	9.253	0.011	$1.214 \cdot 10^3$
18	3.491	$5.416 \cdot 10^{-3}$	$1.28 \cdot 10^3$
19	7.031	0.011	$1.284 \cdot 10^3$
20	10.588	0.017	$1.286 \cdot 10^3$
21	3.15	$3.918 \cdot 10^{-3}$	$1.225 \cdot 10^3$
22	6.348	$8.053 \cdot 10^{-3}$	$1.23 \cdot 10^3$
23	9.553	0.012	$1.232 \cdot 10^3$
24	2.883	$2.748 \cdot 10^{-3}$	$1.173 \cdot 10^3$
25	5.822	$5.742 \cdot 10^{-3}$	$1.179 \cdot 10^3$
26	8.767	$8.773 \cdot 10^{-3}$	$1.182 \cdot 10^3$

Y3 =

$$\begin{aligned}
 V_c(Q_b, k_c, k_k) = & -0,673 + 206,712 \cdot Q_b + 0,589 \cdot k_c - 0,211 \cdot k_k + \\
 & + 52,588 \cdot Q_b^2 - 0,098 \cdot k_c^2 + 0,114 \cdot k_k^2 + \\
 & + 62,819 \cdot Q_b \cdot k_c - 0,047 \cdot k_c \cdot k_k - 14,146 \cdot Q_b \cdot k_k
 \end{aligned}
 \quad (3.1)$$

Коефіцієнт кореляції експериментальних та розрахункових даних

$$\text{corr}(Y_3^{(0)}, \overrightarrow{V_c(X_3^{(0)}, X_3^{(1)}, X_3^{(2)})}) = 1$$

Похибка апроксимації %

$$\epsilon_1 = \frac{\sum_{i=0}^{26} \left( \frac{|Y_{3,i,0} - V_c(X_{3,i,0}, X_{3,i,1}, X_{3,i,2})|}{Y_{3,i,0}} \right)}{27} \cdot 100 = 0,575$$

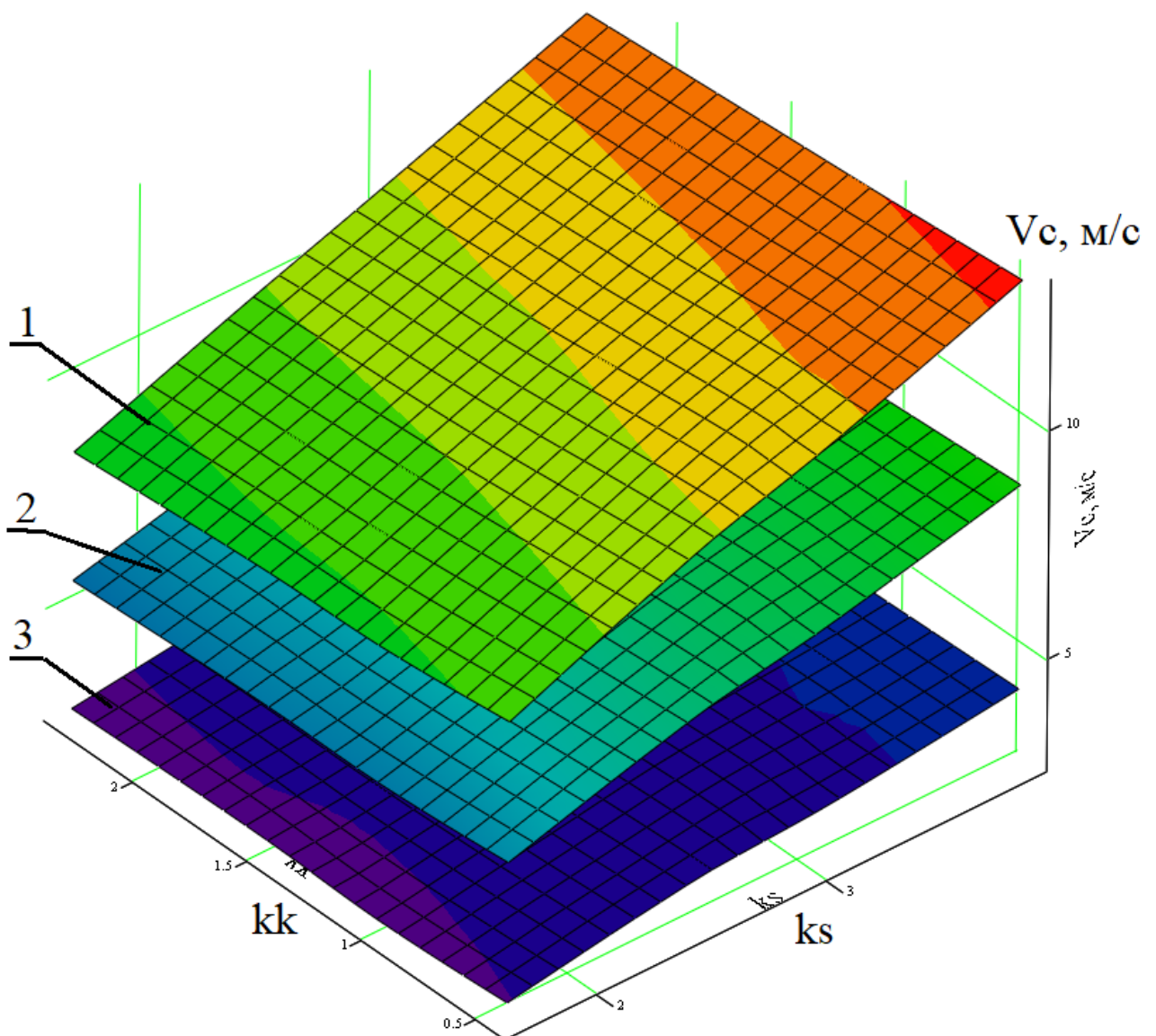


Рис 3.3 – Швидкість суміші на виході з насоса: 1 –  $Q_B = 0,03$  м/с; 2 –  $Q_B = 0,02$  м/с; 3 –  $Q_B = 0,01$  м/с

Встановлена залежність другого порядку між швидкістю руху суміші з насосу від подачі води, коефіцієнтів площі та ширини (рис 3.3). похибка апроксимації 0,575%.

Побудова регресію рівняння визначення витрати пульпи на вході у насос

	0
0	3
1	3
2	2
3	-0.062
4	$-1.868 \cdot 10^{-4}$
5	$5.238 \cdot 10^{-4}$
6	$-1.028 \cdot 10^{-3}$
7	0.274
8	$-4.221 \cdot 10^{-4}$
9	$2.514 \cdot 10^{-3}$
10	$-2.805 \cdot 10^{-3}$
11	-0.082
12	0.263

$$Q_{inp} := \text{regress}(X3, Y3^{(1)}, 2) =$$

$$\begin{aligned}
 Q_p(Q_6, k_c, k_k) = & -2,8 \cdot 10^{-3} - 0,082 \cdot Q_6 + 2,514 \cdot 10^{-3} \cdot k_c - 1,028 \cdot 10^{-3} \cdot k_k + \\
 & + 0,263 \cdot Q_6^2 - 4,221 \cdot 10^{-4} \cdot k_c^2 + 5,238 \cdot 10^{-4} \cdot k_k^2 + \\
 & + 0,274 \cdot Q_6 \cdot k_c - 1,868 \cdot 10^{-4} \cdot k_c \cdot k_k - 0,062 \cdot Q_6 \cdot k_k
 \end{aligned} \quad (3.2)$$

Коефіцієнт кореляції експериментальних та розрахункових даних

$$\text{corr}(Y3^{(1)}, \overrightarrow{Qp(X3^{(0)}, X3^{(1)}, X3^{(2)})}) = 1$$

Похибка апроксимації %

$$\epsilon_2 := \frac{\sum_{i=0}^{26} \left( \frac{|Y3_{i,1} - Qp(X3_{i,0}, X3_{i,1}, X3_{i,2})|}{Y3_{i,1}} \right)}{27} \cdot 100 = 1.9$$

Встановлена залежність другого порядку між витратою пульпи на вході насосу від подачі води, коефіцієнтів площі та ширини (рис 3.4). похибка апроксимації 1,9%.

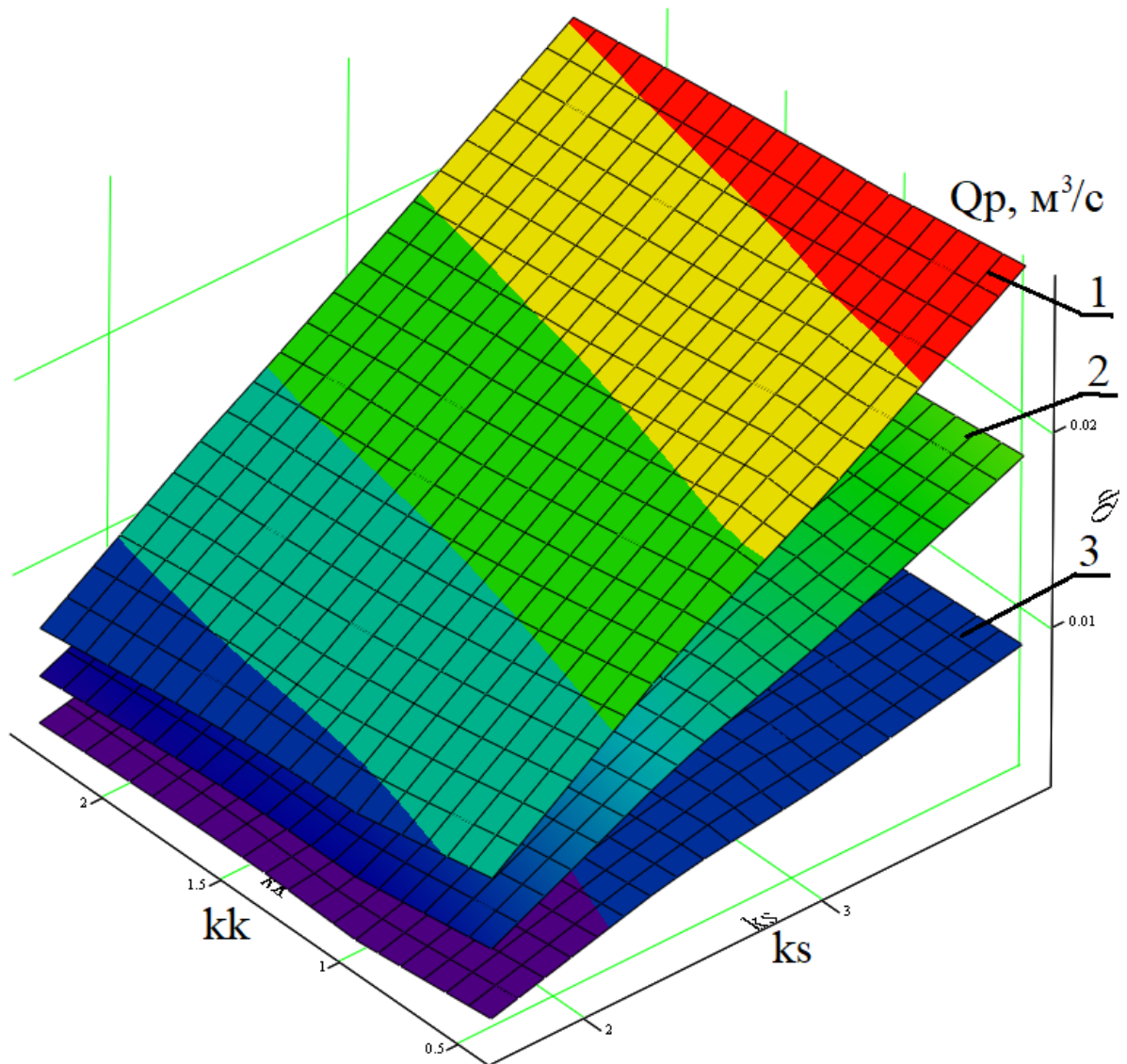


Рис 3.4 – Витрата пульпи на вході у насос: 1 –  $Q_B = 0,03 \text{ м}^3/\text{с}$ ; 2 –  $Q_B = 0,02 \text{ м}^3/\text{с}$ ; 3 –  $Q_B = 0,01 \text{ м}^3/\text{с}$

Побудова регресіюного рівняння визначення щільність вихідної суміші

$$\text{ros} := \text{regress}(X3, Y3^{(2)}, 2) =$$

	0
0	3
1	3
2	2
3	7.138
4	5.408
5	10.374
6	-63.387
7	-66.111
8	-20.942
9	198.419
10	941.558
11	932.991
12	$-1.105 \cdot 10^4$



$$\begin{aligned} \rho_c(Q_s, k_c, k_k) = & 941.558 + 933 \cdot Q_s + 198,42 \cdot k_c - 63,387 \cdot k_k - \\ & - 1,105 \cdot 10^{-4} \cdot Q_s^2 - 20,942 \cdot k_c^2 + 10,374 \cdot k_k^2 - \\ & - 66,1 \cdot Q_s \cdot k_c + 5,408 \cdot k_c \cdot k_k + 7,138 \cdot Q_s \cdot k_k \end{aligned} \quad (3.3)$$

Коефіцієнт кореляції експериментальних та розрахункових даних

$$\text{corr}\left(Y3^{(2)}, \overrightarrow{\rho_s(X3^{(0)}, X3^{(1)}, X3^{(2)})}\right) = 0.999$$

Похибка апроксимації %

$$\epsilon_3 := \frac{\sum_{i=0}^{26} \left( \frac{|Y3_{i,2} - \rho_s(X3_{i,0}, X3_{i,1}, X3_{i,2})|}{Y3_{i,2}} \right)}{27} \cdot 100 = 0.175$$

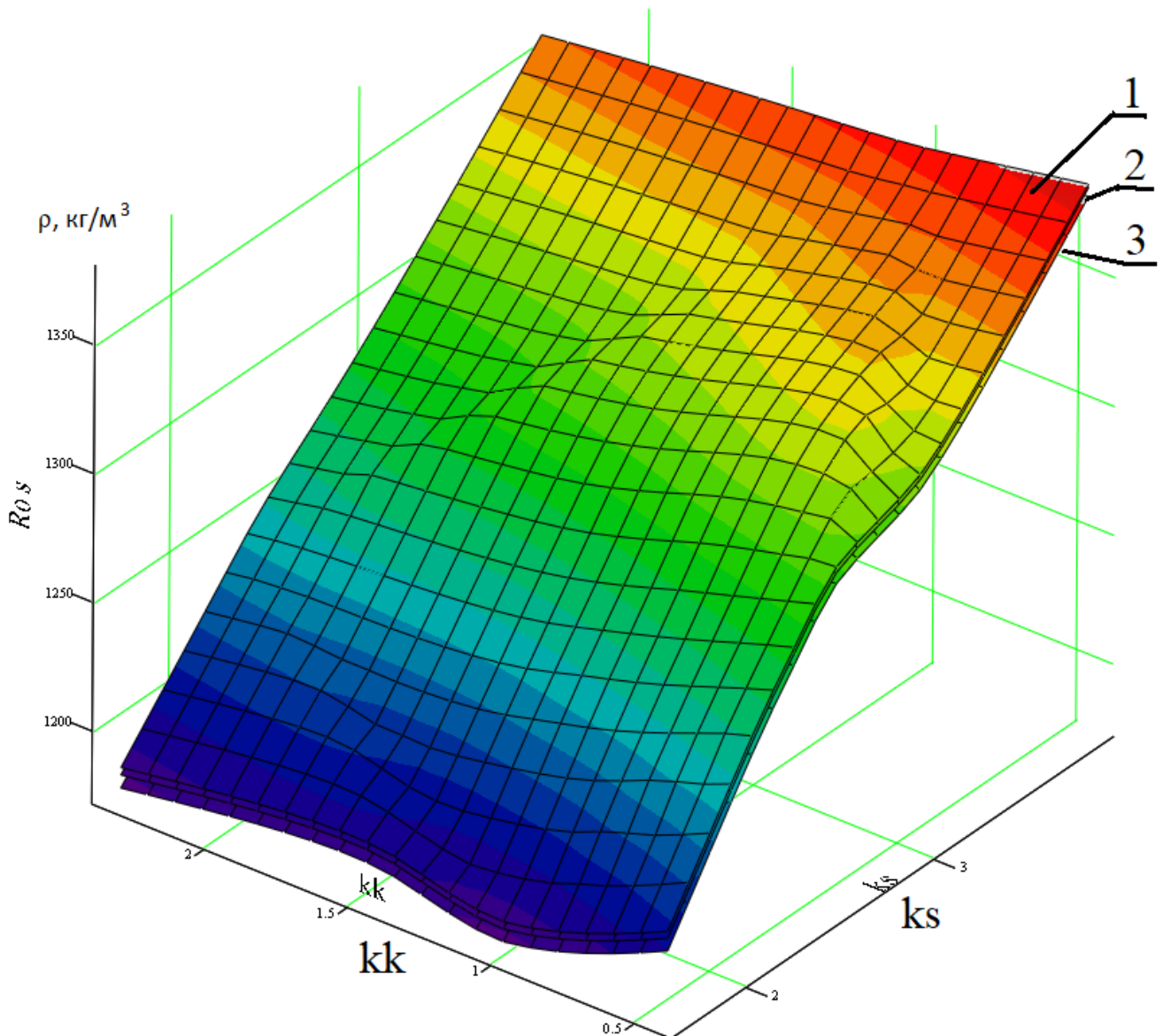


Рис 3.5 – Щільність суміші на виході з насосу: 1 –  $Q_B = 0,03$  м/с; 2 –  $Q_B = 0,02$  м/с; 3 –  $Q_B = 0,01$  м/с;

Встановлена залежність другого порядку між щільністю суміші на виході з насосу від подачі води, коефіцієнтів площі та ширини (рис 3.5). похибка апроксимації 0,175%.

Визначимо додаткові параметри струменевого насосу.

Потрібна потужність насосу для подачі робочої рідини (води), кВт

$$Nw_i := \frac{X_{i,0} \cdot Y_{inw_{i,0}}}{1020}$$

Напір струменевого насосу, м

$$H_{p_i} := \frac{Y_{out_{i,0}} - Y_{pin_{i,0}}}{Y_{out_{i,3}} \cdot 9.8} + \frac{(Y_{out_{i,1}})^2 - (Y_{pin_{i,1}})^2}{2 \cdot 9.8} + 2$$

Кінетична енергія, Дж

$$E_i := 9.8 \cdot 1800 \cdot 2 + (Y_{out_{i,0}} - Y_{pin_{i,0}}) + \frac{1800 \cdot (Y_{out_{i,2}})^2}{2} \cdot \left[ \frac{1.1}{\left(\frac{\pi \cdot 0.15^2}{4}\right)^2} - \frac{1.01}{\left(\frac{\pi \cdot 0.2^2}{4}\right)^2} \right]$$

ККД насосу

$$\eta_i := \frac{1800 \cdot E_i \cdot Y_{out_{i,2}}}{1000000 \cdot Nw_i}$$

	0
0	3.721·10 <sup>4</sup>
1	4.323·10 <sup>4</sup>
2	5.338·10 <sup>4</sup>
3	3.639·10 <sup>4</sup>
4	3.983·10 <sup>4</sup>
5	4.565·10 <sup>4</sup>
6	3.598·10 <sup>4</sup>
7	3.818·10 <sup>4</sup>
8	4.189·10 <sup>4</sup>
9	3.661·10 <sup>4</sup>
10	4.072·10 <sup>4</sup>
11	4.77·10 <sup>4</sup>
12	3.609·10 <sup>4</sup>
13	3.861·10 <sup>4</sup>
14	4.287·10 <sup>4</sup>
15	3.586·10 <sup>4</sup>
16	3.768·10 <sup>4</sup>
17	4.077·10 <sup>4</sup>
18	3.624·10 <sup>4</sup>
19	3.923·10 <sup>4</sup>
20	4.43·10 <sup>4</sup>
21	3.594·10 <sup>4</sup>
22	3.799·10 <sup>4</sup>
23	4.146·10 <sup>4</sup>
24	3.575·10 <sup>4</sup>
25	3.725·10 <sup>4</sup>
26	3.977·10 <sup>4</sup>

E =

	0
0	0.709
1	0.364
2	0.233
3	0.679
4	0.368
5	0.23
6	0.707
7	0.466
8	0.315
9	0.757
10	0.442
11	0.291
12	0.737
13	0.477
14	0.32
15	0.724
16	0.519
17	0.366
18	0.772
19	0.5
20	0.343
21	0.751
22	0.536
23	0.382
24	0.721
25	0.561
26	0.419

η =

	0
0	1.78
1	8.117
2	23.598
3	1.547
4	6.299
5	17.347
6	1.295
7	4.209
8	10.261
9	1.469
10	5.635
11	15.107
12	1.296
13	4.319
14	10.737
15	1.197
16	3.547
17	8.182
18	1.303
19	4.38
20	10.881
21	1.197
22	3.573
23	8.244
24	1.135
25	3.071
26	6.618

Nw =

	0
0	2.952
1	5.865
2	10.761
3	2.685
4	4.78
5	8.301
6	2.53
7	4.159
8	6.889
9	2.76
10	5.085
11	8.997
12	2.574
13	4.333
14	7.285
15	2.478
16	3.947
17	6.416
18	2.632
19	4.563
20	7.813
21	2.512
22	4.081
23	6.713
24	2.427
25	3.744
26	5.955

H<sub>p</sub> =

Отриманий набір параметрів струменевого насосу дозволяє провести багатокритерійну оптимізацію та визначити оптимізацію його параметрів.

Постановка завдання багатокритерійної оптимізації:

Визначити такі проектні параметри

- коефіцієнт площі  $k_s$  - відношення площі вхідного патрубку пульпопроводу до площу патрубка подачі води;
- коефіцієнт ширини  $k_k$  - відношення ширини першого каналу до ширини другого каналу.

при яких

- витрата робочої рідини (води)  $\rightarrow \min$ ;
- потрібна потужність насосу для води  $\rightarrow \min$ ;
- витрата пульпи на вході  $\rightarrow \max$ ;
- швидкість суміші на виході з насосу  $\rightarrow \max$ ;
- ККД  $\rightarrow \max$ ;
- напір  $\rightarrow \max$ .

Для розв'язання задачі багатокритерійної оптимізації використаємо метод сортування.

1. Створюємо таблиці критеріїв та факторів і зазначенням мети кожного критерію (табл 3.4);
2. Сортуємо таблиці критеріїв у напрямі їх прагнення (при прагненні до максимуму – сортування за спаданням, при прагненні до мінімуму – сортування за зростанням (табл 3.5).
3. Починаємо паралельний пошук у відсортованих таблицях випадків з однаковим набором проектних параметрів (табл 3.6)
4. Визначаємо компромісні проектні параметри.

	ks	kk		Q <sub>B</sub> -min		V <sub>c</sub> -max		Q <sub>c</sub> -max		nu-max		N <sub>B</sub> -min		H <sub>c</sub> -max
1	3,894	1,000	1	0,010	1	4,273	1	0,009	1	0,709	1	1,780	1	2,952
2	3,894	1,000	2	0,020	2	8,610	2	0,018	2	0,364	2	8,117	2	5,865
3	3,894	1,000	3	0,030	3	12,963	3	0,027	3	0,233	3	23,598	3	10,761
4	2,921	1,667	4	0,010	4	3,633	4	0,006	4	0,679	4	1,547	4	2,685
5	2,921	1,667	5	0,020	5	7,318	5	0,012	5	0,368	5	6,299	5	4,780
6	2,921	1,667	6	0,030	6	11,016	6	0,019	6	0,230	6	17,347	6	8,301
7	2,336	2,333	7	0,010	7	3,202	7	0,004	7	0,707	7	1,295	7	2,530
8	2,336	2,333	8	0,020	8	6,463	8	0,009	8	0,466	8	4,209	8	4,159
9	2,336	2,333	9	0,030	9	9,726	9	0,013	9	0,315	9	10,261	9	6,889
10	2,921	0,600	10	0,010	10	3,823	10	0,007	10	0,757	10	1,469	10	2,760
11	2,921	0,600	11	0,020	11	7,703	11	0,014	11	0,442	11	5,635	11	5,085
12	2,921	0,600	12	0,030	12	11,600	12	0,021	12	0,291	12	15,107	12	8,997
13	2,336	1,000	13	0,010	13	3,331	13	0,005	13	0,737	13	1,296	13	2,574
14	2,336	1,000	14	0,020	14	6,714	14	0,010	14	0,477	14	4,319	14	4,333
15	2,336	1,000	15	0,030	15	10,105	15	0,015	15	0,320	15	10,737	15	7,285
16	1,947	1,400	16	0,010	16	3,044	16	0,003	16	0,724	16	1,197	16	2,478
17	1,947	1,400	17	0,020	17	6,145	17	0,007	17	0,519	17	3,547	17	3,947
18	1,947	1,400	18	0,030	18	9,253	18	0,011	18	0,366	18	8,182	18	6,416
19	2,336	0,429	19	0,010	19	3,491	19	0,005	19	0,772	19	1,303	19	2,632
20	2,336	0,429	20	0,020	20	7,031	20	0,011	20	0,500	20	4,380	20	4,563
21	2,336	0,429	21	0,030	21	10,588	21	0,017	21	0,343	21	10,881	21	7,813
22	1,947	0,714	22	0,010	22	3,150	22	0,004	22	0,751	22	1,197	22	2,512
23	1,947	0,714	23	0,020	23	6,348	23	0,008	23	0,536	23	3,573	23	4,081
24	1,947	0,714	24	0,030	24	9,553	24	0,012	24	0,382	24	8,244	24	6,713
25	1,669	1,000	25	0,010	25	2,883	25	0,003	25	0,721	25	1,135	25	2,427
26	1,669	1,000	26	0,020	26	5,822	26	0,006	26	0,561	26	3,071	26	3,744
27	1,669	1,000	27	0,030	27	8,767	27	0,009	27	0,419	27	6,618	27	5,955

	Q <sub>B</sub> -min
1	0,010
4	0,010
7	0,010
10	0,010
13	0,010
16	0,010
19	0,010
22	0,010
25	0,010
2	0,020
5	0,020
8	0,020
11	0,020
14	0,020
17	0,020
20	0,020
23	0,020
26	0,020
3	0,030
6	0,030
9	0,030
12	0,030
15	0,030
18	0,030
21	0,030
24	0,030
27	0,030

	V <sub>c</sub> -max
3	12,963
12	11,600
6	11,016
21	10,588
15	10,105
9	9,726
24	9,553
18	9,253
27	8,767
2	8,610
11	7,703
5	7,318
20	7,031
14	6,714
8	6,463
23	6,348
17	6,145
26	5,822
1	4,273
10	3,823
4	3,633
19	3,491
13	3,331
7	3,202
22	3,150
16	3,044
25	2,883

	Q <sub>c</sub> -max
3	0,027
12	0,021
6	0,019
2	0,018
21	0,017
15	0,015
11	0,014
9	0,013
5	0,012
24	0,012
18	0,011
20	0,011
14	0,010
1	0,009
27	0,009
8	0,009
23	0,008
17	0,007
10	0,007
4	0,006
26	0,006
19	0,005
13	0,005
7	0,004
22	0,004
16	0,003
25	0,003

	nu-max
19	0,772
10	0,757
22	0,751
13	0,737
16	0,724
25	0,721
1	0,709
7	0,707
4	0,679
26	0,561
23	0,536
17	0,519
20	0,500
14	0,477
8	0,466
11	0,442
27	0,419
24	0,382
5	0,368
18	0,366
2	0,364
21	0,343
15	0,320
9	0,315
12	0,291
3	0,233
6	0,230

	N <sub>B</sub> -min
25	1,135
16	1,197
22	1,197
7	1,295
13	1,296
19	1,303
10	1,469
4	1,547
1	1,780
26	3,071
17	3,547
23	3,573
8	4,209
14	4,319
20	4,380
11	5,635
5	6,299
27	6,618
2	8,117
18	8,182
24	8,244
9	10,261
15	10,737
21	10,881
12	15,107
6	17,347
3	23,598

	H <sub>c</sub> -max
3	10,761
12	8,997
6	8,301
21	7,813
15	7,285
9	6,889
24	6,713
18	6,416
27	5,955
2	5,865
11	5,085
5	4,780
20	4,563
14	4,333
8	4,159
23	4,081
17	3,947
26	3,744
1	2,952
10	2,760
4	2,685
19	2,632
13	2,574
7	2,530
22	2,512
16	2,478
25	2,427

	Qв-min	Vс-max	Qс-max	nu-max	Nв-min	Hс-max
1	0,010	3 12,963	3 0,027	19 0,772	25 1,135	3 10,761
4	0,010	12 11,600	12 0,021	10 0,757	16 1,197	12 8,997
7	0,010	6 11,016	6 0,019	22 0,751	22 1,197	6 8,301
10	0,010	21 10,588	2 0,018	13 0,737	7 1,295	21 7,813
13	0,010	15 10,105	21 0,017	16 0,724	13 1,296	15 7,285
16	0,010	9 9,726	15 0,015	25 0,721	19 1,303	9 6,889
19	0,010	24 9,553	11 0,014	1 0,709	10 1,469	24 6,713
22	0,010	18 9,253	9 0,013	7 0,707	4 1,547	18 6,416
25	0,010	27 8,767	5 0,012	4 0,679	1 1,780	27 5,955
2	0,020	2 8,610	24 0,012	26 0,561	26 3,071	2 5,865
5	0,020	11 7,703	18 0,011	23 0,536	17 3,547	11 5,085
8	0,020	5 7,318	20 0,011	17 0,519	23 3,573	5 4,780
11	0,020	20 7,031	14 0,010	20 0,500	8 4,209	20 4,563
14	0,020	14 6,714	1 0,009	14 0,477	14 4,319	14 4,333
17	0,020	8 6,463	27 0,009	8 0,466	20 4,380	8 4,159
20	0,020	23 6,348	8 0,009	11 0,442	11 5,635	23 4,081
23	0,020	17 6,145	23 0,008	27 0,419	5 6,299	17 3,947
26	0,020	26 5,822	17 0,007	24 0,382	27 6,618	26 3,744
3	0,030	1 4,273	10 0,007	5 0,368	2 8,117	1 2,952
6	0,030	10 3,823	4 0,006	18 0,366	18 8,182	10 2,760
9	0,030	4 3,633	26 0,006	2 0,364	24 8,244	4 2,685
12	0,030	19 3,491	19 0,005	21 0,343	9 10,261	19 2,632
15	0,030	13 3,331	13 0,005	15 0,320	15 10,737	13 2,574
18	0,030	7 3,202	7 0,004	9 0,315	21 10,881	7 2,530
21	0,030	22 3,150	22 0,004	12 0,291	12 15,107	22 2,512
24	0,030	16 3,044	16 0,003	3 0,233	6 17,347	16 2,478
27	0,030	25 2,883	25 0,003	6 0,230	3 23,598	25 2,427

У результаті використання методу сортування при розв'язанні задання багатокритерійної оптимізації встановлені компромісні значення проектних параметрів, а саме  $k_s = 2.336$ ;  $k_k = 1$ .

### 3.2. Методика проектування гідроструменевих насосів щілинного типу

Вихідні дані:

- подача по пульпі,  $Q_p$ , м<sup>3</sup>/ч;
- напір суміші  $H_c$ , м;
- діаметр вхідного патрубку пульпопроводу  $D_p$ , м.

Методика розрахунку.

1. Потрібна витрата робочої рідини (води).

Витрата робочої рідини визначається з рівняння (3.2) та оптимальних умов

$$k_c = 2,336$$

$$k_k = 1$$

$$Q_p = -2,8 \cdot 10^{-3} - 0,082 \cdot Q_e + 2,514 \cdot 10^{-3} \cdot k_c - 1,028 \cdot 10^{-3} \cdot k_k + \\ + 0,263 \cdot Q_e^2 - 4,221 \cdot 10^{-4} \cdot k_c^2 + 5,238 \cdot 10^{-4} \cdot k_k^2 + \\ + 0,274 \cdot Q_e \cdot k_c - 1,868 \cdot 10^{-4} \cdot k_c \cdot k_k - 0,062 \cdot Q_e \cdot k_k$$

$$Q_p = -2,8 \cdot 10^{-3} - 0,082 \cdot Q_e + 2,514 \cdot 10^{-3} \cdot 2,336 - 1,028 \cdot 10^{-3} + \\ + 0,263 \cdot Q_e^2 - 4,221 \cdot 10^{-4} \cdot 2,336^2 + 5,238 \cdot 10^{-4} + \\ + 0,274 \cdot Q_e \cdot k_c - 1,868 \cdot 10^{-4} \cdot k_c \cdot k_k - 0,062 \cdot Q_e \cdot k_k$$

$$Q_p = 0,5 \cdot Q_e + 0,263 \cdot Q_e^2 - 0,00017 \quad (3.4)$$

Розв'язуючи рівняння, отримуємо потрібну витрату робочої рідини

$$Q_e = 1,9 \cdot \sqrt{1,052 \cdot Q_p + 0,246} - 0,943 \quad (3.5)$$

2. Площа перетину патрубку подачі робочої рідини (води), м<sup>2</sup>

$$S_e = \frac{\pi \cdot D_{II}^2}{4 \cdot 2,336} \quad (3.5)$$

Оскільки патрубок подачі робочої рідини має кільцеподібну форму, остаточній діаметри розраховують виходячи з товщини матеріалу труб.

3. Розмір щілин (за умови компромісного оптимального рішення обидві щілини мають бути однакові) , м

$$h_1 = h_2 = \frac{S_e}{2 \cdot \pi \cdot D_e} \quad (3.6)$$

де  $D_e$  – еквівалентний діаметр, на якому розташовано щілини.

### Висновки до розділу 3

1. Встановлена залежність другого порядку між швидкістю руху суміші з насосу від подачі води, коефіцієнтів площі та ширини з похибкою апроксимації 0,575%;
2. Встановлена залежність другого порядку між витратою пульпи на вході насосу від подачі води, коефіцієнтів площі та ширини з похибкою апроксимації 1,9%;
3. Встановлена залежність другого порядку між щільністю суміші на виході з насосу від подачі води, коефіцієнтів площі та ширини з похибкою апроксимації 0,175%;
4. Визначено додаткові параметри струменевого насосу: кінетична енергія струменя  $E$  від 35750 до 47700 Дж, потрібна потужність насосу для перекачування води від 1,2 кВт до 23 кВт; напір від 2,4 до 10,7; ККД від 0,23 до 0,757;
5. Проведено багатокритерійну оптимізацію та визначено оптимальні параметри гідроструменевого насосу. Проектні параметри: коефіцієнт площі  $k_s$  - відношення площі вхідного патрубку пульпопроводу до площу патрубка подачі води; коефіцієнт ширини  $k_k$  - відношення ширини першого каналу до ширини другого каналу. Критерії оптимізації: витрата робочої рідини (води)  $\rightarrow \min$ ; потрібна потужність насосу для води  $\rightarrow \min$ ; витрата пульпи на вході  $\rightarrow \max$ ; швидкість суміші на виході з насосу  $\rightarrow \max$ ; ККД  $\rightarrow \max$ ; напір  $\rightarrow \max$ . Для розв'язання задачі багатокритерійної оптимізації використаємо метод сортування.
6. У результаті використання методу сортування при розв'язання задання багатокритерійної оптимізації встановлені компромісні значення проектних параметрів, а саме  $k_s = 2.336$ ;  $k_k = 1$ .
7. Розроблено методика проектування гідроструменевих насосів щілинного типу з оптимальними параметрами.



## ВИСНОВКИ

У магістерській роботі розв'язано актуальне науково-технічне завдання, що полягає в підвищенні ефективності гідро транспортування пульпи на гірничо-збагачувальних підприємствах за рахунок обґрунтування раціональних параметрів гідроструменевих насосів.

5. Розроблено загальну методику подальшого дослідження, що дозволяє досягти поставленої мети роботи покращити режим роботи інерційних грохотів за рахунок обґрунтування раціональних експлуатаційних параметрів;
6. Проведено аналіз існуючих конструкції гідроструменевих насосів. Визначено найпростішу конструкцію, що не має у поперечному перерізу труби ніяких додаткових елементів конструкції. Найпростішою є конструкція, що являє собою звичайну трубу пульпопроводу, у якій послідовно розташовані дві колові щілини у які подається робоча рідина;
7. Розроблено методику подальшого дослідження параметрів гдроструменевого насосу на основі комп'ютерного моделювання;
8. У якості сталих чинників виступають: діаметр вхідного патрубка  $D_{in} = 0,2$  м; діаметр вихідного патрубка  $D_{out} = 0,15$  м; щільність пасивної рідини (пульпа) -  $\rho_n = 1800$  кг/м<sup>3</sup>; щільність робочої рідини (вода) -  $\rho_v = 1000$  кг/м<sup>3</sup>; кут нахилу першої щілини до осі  $\alpha_1 = 30$  град; кут нахилу другої щілини до осі  $\alpha_2 = 10$  град;
5. У якості варійованих чинників виступають: витрата води  $Q_v$ ; коефіцієнт площі  $k_s$  - відношення площі вхідного патрубка пульпопроводу до площу патрубку подачі води; коефіцієнт ширини  $k_k$  - відношення ширини першого каналу до ширини другого каналу.
6. У якості функцій відгуку виступають: тиск пасивної рідини на вході у насос  $P_n$ , Па; тиск суміші на виході з насосу  $P_c$ , Па; тиск робочої рідини на вході у насос  $P_v$ , Па; швидкість пасивної рідини на вході у насос  $v_n$ , м/с; швидкість суміші на виході з насосу  $v_c$ , м/с; швидкість робочої рідини

на вході у насос  $v_B$ , м/с; щільність суміші на виході з насосу  $\rho_c$  кг/м<sup>3</sup>; витрата пасивної рідини на вході у насос  $Q_{п}$  м<sup>3</sup>/с; витрата суміші на виході з насосу  $Q_c$  м<sup>3</sup>/с; швидкість зношення окремих ділянок насосу.

8. Встановлена залежність другого порядку між швидкістю руху суміші з насосу від подачі води, коефіцієнтів площі та ширини з похибкою апроксимації 0,575%;
9. Встановлена залежність другого порядку між витратою пульпи на вході насосу від подачі води, коефіцієнтів площі та ширини з похибкою апроксимації 1,9%;
10. Встановлена залежність другого порядку між щільністю суміші на виході з насосу від подачі води, коефіцієнтів площі та ширини з похибкою апроксимації 0,175%;
11. Визначено додаткові параметри струменевого насосу: кінетична енергія струменя  $E$  від 35750 до 47700 Дж, потрібна потужність насосу для перекачування води від 1,2 кВт до 23 кВт; напір від 2,4 до 10,7; ККД від 0,23 до 0,757;
12. Проведено багатокритерійну оптимізацію та визначено оптимальні параметри гідроструменевого насосу. Проектні параметри: коефіцієнт площі  $k_s$  - відношення площі вхідного патрубку пульпопроводу до площу патрубка подачі води; коефіцієнт ширини  $k_k$  - відношення ширини першого каналу до ширини другого каналу. Критерії оптимізації: витрата робочої рідини (води)  $\rightarrow \min$ ; потрібна потужність насосу для води  $\rightarrow \min$ ; витрата пульпи на вході  $\rightarrow \max$ ; швидкість суміші на виході з насосу  $\rightarrow \max$ ; ККД  $\rightarrow \max$ ; напір  $\rightarrow \max$ . Для розв'язання задачі багатокритерійної оптимізації використаємо метод сортування.
13. У результаті використання методу сортування при розв'язання задання багатокритерійної оптимізації встановлені компромісні значення проектних параметрів, а саме  $k_s = 2.336$ ;  $k_k = 1$ .
14. Розроблено методіку проектування гідроструменевих насосів щілинного типу з оптимальними параметрами.