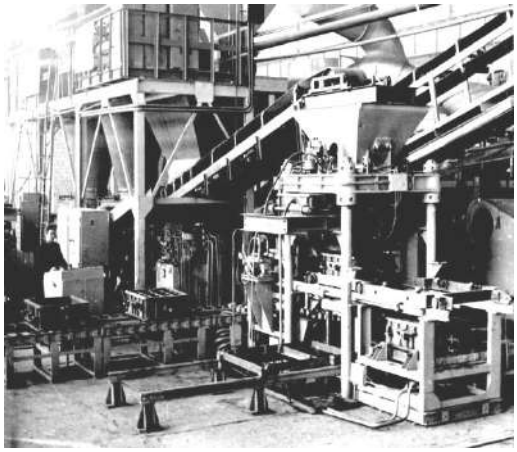


О.І. Пономаренко, І.І. Гунько, С.В. Порохня, Н.С. Євтушенко

АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ФОРМУВАЛЬНИХ ТА СТРИЖНЕВИХ МАШИН

УДК 621.744.4

ББК 34.61я72

А22

Рецензенти:

В.В. Луньов, д-р техн. наук, проф.,завідувач кафедри машини і технологія ливарного виробництва, директор фізико-технічного інституту Запорізького Національного технічного університету;

В.Г. Могилатенко, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри ливарного виробництва чорних і кольорових металів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»;

В.Е. Хричіков, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри ливарного виробництва Національної металургійної академії України.

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України як навчальний посібник для студентів спеціальностей «Обладнання та технології ливарного виробництва»

Автори:

О.І. Пономаренко, І.І. Гунько, С.В. Порохня, Н.С. Євтушенко

А22 **Автоматизиване** проектування формувальних та стрижневих машин: навч. посіб. / О.І Пономаренко, І.І. Гунько, С.В. Порохня, Н.С. Євтушенко. – Х: НТУ «ХПІ», 2014. – 256 с.

Розглянуто теоритичні основи автоматизованого проектування об'єктів ливарного виробництва. Здійснено аналіз конструкцій деяких машин ливарного виробництва і їх удосконалення на прикладі струшувально-пресрвих, імпульсних формувальних машин, лопатевих змішувачів для холоднотвердіючих сумішей. Подано матеатичні й алгоритмічні моделі розрахунків вузлів і деталей ливарних машин, що дозволяють перейти до комп'ютерного об'ємного їхнього проектування. Як приклад наведено деякі комп'ютерні креслення.

Наведено методику проектування, реконструкції і підвищення ефективності об'єктів, що експлуатуються у ливарному виробництві, на основі використання методології системного аналізу, математичних методів дослідження складних систем, теорії структурної та параметричної надійності систем, а також створення на їх базі нових технічних рішень у галузі технології і обладнання ливарного виробництва.

Призначено для наукових працівників, які спеціалізуються в галузі проектування технічних систем, інженерів-проектувальників проектно-конструкторських організацій, технологів ливарних цехів, а також для студентів і аспірантів металургійних спеціальностей.

Іл. 109. Табл. 28. Бібліогр.50 назв.

УДК 621.744.4

ББК 34.61 я 72

ISBN

© О.І. Пономаренко, І.І. Гунько, С.В. Порохня,

Н.С. Євтушенко, 2014

ПЕРЕДМОВА

Важко переоцінити значення автоматизації проектування для розвитку науки, техніки і народного господарства. Саме з автоматизацією проектування пов'язані принципові можливості створення технічних об'єктів, що все більш ускладнюються. Автоматизація проектування розглядається як необхідна умова при плануванні, розробці й реалізації гнучких виробничих систем, це основний спосіб підвищення продуктивності праці інженерно - технічних працівників, зайнятих проектуванням.

Сьогодні виникла потреба в таких машинах, які відповідають сучасним уявленням людини про якість, надійність, працездатність, дизайн використовуваного об'єкта.

Відомо, що для ухвалення кращих рішень, складають технічне завдання. Технічне завдання буде оптимальним за умови, коли конструктор має максимальну інформацію про цю галузь проектування, для врахування будь-якого конструктивного варіанта. Отже, оптимальний результат проекту залежить від кваліфікації і досвіду її автора. Але навіть найкваліфікованіший фахівець не може перебрати усі можливі варіанти для складання технічного завдання, на основі якого й виконується подальше робоче проектування. Тому технічне завдання найчастіше є одностороннім і не є оптимальним.

Вихід із становища, що створилося, – це розробка систем автоматизованого проектування (САПР). Традиційна інженерна діяльність щодо проектування технічних об'єктів пов'язана з розв'язанням сукупності різноманітних завдань із дослідження, розрахунку, проведення експериментів, оформлення конструкторської документації і та інше. Розвиток САПР істотно змінює характер і стиль роботи інженера. По-перше, більшість рутинних проектних процедур розрахункового й оформлювального характеру виконуються в САПР за допомогою технічних засобів, зекономлений час інженер використовує для виконання інтелектуальних операцій з постановки завдань, вибору засобів і методів проектування й ухвалення рішень. По-друге, інженер повинен навчитися користуватися усією сукупністю нових засобів, що з'явилися у розробника: ЕОМ, периферійне устаткування, операційні системи, пакети застосовних програм, включаючи математичні моделі, методи, вхідні мови.

Такі проблеми доводиться вирішувати і створюючи ливарні машини. Раніше вже провадили роботи з автоматизованого проектування імпульсних формувальних машин [1]. Велика різноманітність формувальних сумішей,що використовуються сьогодні, призводить до появи великої кількості сумішоприготувального устаткування складної конструкції, яке має відповідати найвищим вимогам щодо точності, довговічності, надійності. Тому робота з автоматизованого проектування формувальних машин і змішувачів для холоднотвердіючих сумішей є актуальним завданням ливарного виробництва.

Одним із актуальних наукових і практичних завдань ливарного виробництва є підвищення ефективності роботи різних підрозділів ливарного цеху, оскільки їх функціонування визначає продуктивність цеху і рівень якості виливків. Для забезпечення заданої продуктивності підрозділу цеху комплектуються устаткуванням із заданими параметрами, а завдання підвищення якості розв'язується на основі оптимізації технологічних процесів.

Проте, як показує аналіз статистичних даних, використовувана сьогодні методика розв'язання завдань, пов'язаних із проектуванням підрозділів ливарного цеху, є недостатньо ефективною. Численні дослідження, проведені на заводах масового і багатосерійного виробництва України, показали, що через наявність простоїв потенційні можливості автоматичних формувальних ліній (АФЛ) реалізуються в середньому лише на 40...60%. Це призводить до колосальних збитків підприємств. Коефіцієнт використання АФЛ коливається від 0,65...0,71 на передових підприємствах і до 0,3...0,4 і менше на інших заводах.

Формування структури й основних параметрів виробничого процесу ливарного цеху відбувається на стадіях його проектування, при цьому принципова перебудова може бути здійснена тільки на стадії реконструкції цеху. Тому ефективність роботи ливарного цеху значною мірою визначається якістю й обгрунтованістю проектних рішень.

На жаль, у практиці проектування і реконструкції ливарних цехів поширений емпіричний підхід, при якому технічні й організаційні рішення грунтуються на нормативних даних і професійному досвіді фахівців. У той же час досвід реконструкції і проектування ливарних цехів показує, що оцінка варіантів структури і параметрів виробничого комплексу на основі знання характеристик окремих агрегатів без достатнього кількісного аналізу їх взаємодії і врахування окремих чинників на динаміку функціонування устаткування може призвести до грубих прорахунків. Тому питання синхронізації роботи підсистем ливарного цеху, а також забезпечення надійності їх роботи необхідно вирішувати вже на стадіях проектування.

Ливарний цех є складною технічною системою, функціонування якої визначається значною кількістю різнорідних підсистем, елементів і параметрів. Велика розмірність завдання створює значні труднощі для розробки інженерних методик кількісного аналізу і синтезу таких систем. Основним недоліком існуючих методик з керування ефективністю роботи ливарного цеху є те, що не враховуються системні ефекти, параметри і взаємодії, що значною мірою визначають якість функціонування системи. Через можливість використання прикладних математичних методів, обчислювальної техніки і апарату системного аналізу з'явилася можливість ефективнішого розв'язання наукових і практичних завдань такого типу.

Аналіз робіт вітчизняних і зарубіжних авторів показує, що використання ЕОМ на усіх етапах підготовки й організації виробництва є одним із головних напрямів розвитку ливарного виробництва в найближчому майбутньому. Важливим етапом у такому підході є створення математичної моделі системи, що вивчається, і використання її як інструменту для розв'язання оптимізаційних завдань на ЕОМ. Використання можливостей обчислювальної техніки для розв'язання практичних завдань ливарного виробництва дозволяє підвищити продуктивність ливарних цехів на 10...15% в дрібносерійному виробництві і на 10...25 % у великосерійному і масовому виробництві, знизити брак відливків з 5...10 % до 0,5...1,0 %, понизити масу відливків на 15...20 %, зменшити витрату електроенергії і допоміжних матеріалів на 5...10 %. Тому є актуальним використання потенціалу системного аналізу для розв'язання завдань підвищення ефективності функціонування ливарного цеху і його підсистем.

Навчальний посібник має шість розділів. Розділ 1–загальна частина, пояснює мету, завдання й актуальність; методи і методики автоматизованого проектування. Розділи 2 і 3 розкривають методику автоматизованого проектування ливарних машин на прикладах струшувальних, пресових, імпульсних машин і змішувачів ХТС. Інші розділи присвячено методології проектування підрозділів ливарного цеху. Для цього розроблено принципи і методи проектування, реконструкції і підвищення ефективності об'єктів ливарного виробництва, що експлуатуються, на основі використання методології системного аналізу, математичних методів дослідження складних систем, теорії структурної і параметричної надійності систем, а також вироблено на їх базі нові технічні рішення в галузі технології і устаткування ливарного виробництва, що забезпечують випуск заданої кількості якісних відливків.

РОЗДІЛ 1
МЕТА ТА ЗАВДАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ЛИВАРНИХ МАШИН

За останні роки різко зросла складність і трудомісткість проектування виробів. Для реальної можливості створення системи автоматизованого проектування ливарних машин із великого різноманіття сучасних критеріїв оцінки проектного об'єкта прийнято оцінювання машини за критеріями надійності, а система автоматизованого проектування (САПР) ливарних машин узята як метод конструювання об'єкта.

Система автоматизованого проектування виробництва (САПР) – це система, призначена для переробки різної буквено-цифрової і графічної інформації, необхідної в процесі конструювання і розробки технології виготовлення виробу.

Системи автоматизованого проектування належать до складних із великою різноманітністю складових елементів. Визначення стратегії вибору засобів обчислювальної техніки й основних завдань створення конкретних САПР обумовлено безліччю ознак : типом об'єкта проектування, його складністю, характером проектних документів, що випускаються, і їх кількістю, чисельністю рівнів у структурі технічного забезпечення.

Автоматизована система конструювання використовується на етапах технічного і робочого проектування для проведення уточнених розрахунків з усього виробу й окремих його елементів, а також виготовлення конструкторської документації.

Загальні властивості САПР істотно залежать від підсистем, що забезпечують:

– інформаційною – бази і масиви даних, описи стандартних проектних процедур, типових проектних рішень, типових елементів, комплектуючих виробів, матеріалів, що утримують на машинних носіях, сукупність моделей, що відбивають досвід проектування, з необхідною документацією;
– лінгвістичною – мови проектування, термінологія;
– математичною – методи, математичні моделі, алгоритми виконання процесу проектування;
– технічною – прилади обчислювальної й організаційної техніки, засоби передачі даних та ін. ;
– методичною – документи, в яких відбито склад, правила відбору й експлуатації САПР.

Функціонально САПР і їх підсистеми взаємопов'язані з різними компонентами інтегрованих систем керування підприємством.

Впровадження САПР у виробництво дозволяє:

1. Підвищити якість проектування виробів за рахунок застосування нових методів проектування, орієнтованих на використання ЕОМ, що дозволяють розв'язувати принципово нові завдання, при цьому збільшується частка

творчої праці конструктора, кількість проектних рішень і підвищується їх якість.

2. Скоротити терміни проектування виробів внаслідок зменшення часу, що витрачається на пошукові, розрахункові і допоміжні операції.

3. Знизити вартість розробки проекту в результаті скорочення чисельності фахівців із забезпечення і управління процесом розробки виробів; вивільнення фахівців, зайнятих рутинною роботою, пов'язаною з проведенням обчислень і обробкою графічної і текстової інформації; заміни ряду експериментів з натурного моделювання на дорогих установках.

4. Стимулювати розвиток теорії і методології проектування за рахунок створення і вдосконалення методів, що дозволяють формалізувати проектно-дослідні операції і приймати обгрунтовані проектні рішення; регламентації заходів, пов'язаних із випуском і проходженням проектної документації.

5. Зменшити вартість проектування, виготовлення й експлуатації виробів на основі зниження витрат у сфері дослідно-конструкторських розробок, економії ресурсів у виробництво, підвищення економічного афекту при використанні.

Відомо, що надійність має розраховуватися вже на стадії проектування так само, як це робиться для оцінки міцності, деформації й інших характеристик відповідальних виробів [2]. Надійність машини забезпечується на різних етапах створення й використання машин.

Етапи створення машин:

– проектування. Під час проектування надійність залежить від конструкції машини і її вузлів, застосовуваних матеріалів, методів захисту від різних шкідливих впливів, системи змащення, пристосованості до ремонту й обслуговування та деяких інших конструктивних особливостей;

– виготовлення. На цьому етапі роботи надійність залежить від якості виготовлення деталей, методів контролю продукції, що випускається, можливостей керування перебігом технологічного процесу, від якості процесу складання машини і її вузлів, методів випробування готової продукції й інших показників технологічного процесу;

– експлуатація. Під час експлуатації показники безвідмовності й довговічності виявляються тільки в процесі використання машини й залежать від методів і умов експлуатації машини, прийнятої системи її ремонту, методів технічного обслуговування, режимів роботи й інших експлуатаційних факторів.

Крім постійного вдосконалення конструкцій машин і їх вузлів, сучасні підприємства виконують конструкторську роботу з використанням комп'ютерної техніки й нових технологій. Один із таких шляхів і пропонують автори цього видання.

Метою роботи є – розробка методики автоматизованого проектування формувальних машин, завдяки якій при конструюванні буде можливе врахування технологічних ливарних факторів. Для досягнення зазначеної мети необхідно розв'язати такі завдання:

– виявити взаємозв'язок між технологією виробництва форм та стрижнів і конструкцією машин;

– розробити алгоритми, які дозволять робити вибір оптимальних параметрів конструкції й установити певну послідовність розрахункових завдань при проектуванні машини – основного устаткування, що входить до складу цілого комплексу;

– побудувати математичні й алгоритмічні моделі розрахунків машини;

– створити розрахункові програми оригінальних виробів;

– побудувати повну алгоритмічну модель розрахунків агрегату;

– провести об'ємне проектування на прикладі деяких вузлів машин.

1.1. Методи дослідження

Методи дослідження включають, по-перше, оцінку машин за критеріями надійності, по-друге, математичне, алгоритмічне, статистичне моделювання й об'ємне проектування.

1.1.1. Оцінка машини за критеріями надійності

Для визначення впливу точності розрахунків вузлів на надійність машини скористаємося енциклопедичним визначенням надійності [3].

Надійність– це комплексна властивість технічного об'єкта (приладу, обладнання, машини, системи), що полягає в його здатності виконувати задані функції, зберігаючи свої основні характеристики (за певних умов експлуатації) у встановлених межах. Надійність охоплює якість, технологічність конструкції, продуктивність, довговічність, працездатність.

Розглянуті методи й напрями в роботах різних авторів присвячених надійності машин, показали, що зазначена проблема дуже велика, включає багато завдань [2–4]. Тому наголос був зроблений не на теоретичну розробку окремих питань, а на їхню практичну застосовність. Особлива увага приділена розгляду таких характеристик: якості об'єкта, технологічності, довговічності, працездатності конструкції, продуктивності устаткування. Енциклопедична класифікація критеріїв оцінки надійності машин така [2]:

• технологічність конструкції розуміють як сукупність ознак, які забезпечують найбільш економічне, швидке й продуктивне виготовлення машин із застосуванням прогресивних методів обробки при одночасному підвищенні якості, точності й взаємозамінності частин;

• якість – це об'єктна й загальна характеристика об'єктів, яка виявляється в поєднанні їх властивостей;

• продуктивність устаткування – обсяг продукції (роботи), виробленої за одиницю часу цим устаткуванням відповідно до його конструктивних особливостей, технічної характеристики, визначається організаційно-виробничими умовами;

• довговічність – властивість технічного об'єкта зберігати (за умови проведення технічного обслуговування й ремонтів) працездатний стан протя-

гом певного часу аж до виконання певних обсягів робіт. Довговічність характеризується технічними ресурсами, терміном служби;

• працездатність – це стан виробу, при якому воно здатне виконувати задані функції, зберігаючи значення заданих параметрів у межах, установлених нормативно-технічною документацією. Тобто для кожного об'єкта проектованого комплексу необхідно зробити ескіз за відомими методиками і потім розглянути кожний об'єкт у математичному виконанні.

1.1.2. Моделювання

Автоматизоване проектування починається зі складання структурної схеми машини.

При створенні системи автоматизованого проектування ливарної машини можуть бути використані різні методи:

– математичне моделювання;

– алгоритмічне моделювання;

– статистичне моделювання;

– об'ємне проектування.

Ознайомимося коротко з кожним методом і виберемо найбільш доцільний метод.

Математичне моделювання. Згідно з різними теоріями математичного моделювання [4, 5], проектуванню передує аналітичне й цифрове моделювання, які являють собою безліч функціональних і логічних відношень, що описують функціонування технічної системи або її частин. Аналітичне моделювання зводиться до застосування апарату аналітичної механіки й методів динамічних аналогій, а цифрове моделювання – це замкнена модель системи алгебраїчних рівнянь, що перетворює вхідні дані у вихідні.

Розробка математичної моделі починається з побудови розрахункової схеми. У цьому випадку машину розглядаємо у вигляді об'єкта, який складається з ряду складальних одиниць, логічно описаних так, щоб у процесі дослідження не могло виникнути ускладнень, і які можна спростити й схематизувати.

Одним із різновидів математичного моделювання є подання послідовності розв'язку завдання у вигляді блок-схеми.

Алгоритмічна модель – це графічне зображення алгоритму у вигляді блок-схеми. У нашому випадку проектування здійснюється за допомогою ПЕОМ, для проектування на комп'ютері необхідно скласти алгоритм програмування.

Алгоритм – це сукупність дій із точно визначеними правилами виконання, а також це формальний опис способу розв'язання завдання шляхом дроблення його на кінцеву за часом послідовність дій (елементарних операцій). Словом "формальний" означає, що опис абсолютно повний й ураховує всі можливі ситуації, які можуть зустрітися під час розв'язання. Елементар-

ну операцію розуміють як дію, що за заздалегідь певними критеріями не має сенсу деталізувати.

Алгоритмічне моделювання полягає в складанні алгоритмічних моделей кожного окремого вузла проектованої машини: станини, траверси та ін. Складаються алгоритмічні моделі для кожного вузла окремо. На основі отриманих алгоритмічних моделей складається програма для автоматизованих розрахунків вузлів і проектування за допомогою ПЕОМ.

Статистичне моделювання. Статистика встановлює закономірності, яким підпорядковані масові випадкові явища. Статистика заснована на вивченні методів теорії імовірності статистичних даних – результатів спостережень.

Математична статистика розробляє способи визначення кількості необхідних випробувань до початку дослідження (планування експерименту) під час дослідження (послідовний аналіз).

Основними завданнями математичної статистики є:

– зазначення способу збору й групування статистичних відомостей, отриманих у результаті спостережень і спеціально поставлених експериментів;

– розробка методів аналізу статистичних даних залежно від цілей дослідження.

Метою статистичного аналізу є добування максимуму інформації з результатів експерименту, перевірка вірогідності одержуваної залежності й оцінка її точності. Для перевірки статистичних гіпотез використовують параметричні й непараметричні критерії порівняння. Параметричні критерії порівняння застосовують у тих випадках, якщо характер розподілу результатів експериментів нормальний або близький до нього.

Непараметричні критерії використовуються при аналізі експериментальних даних незалежно від характеру їх розподілу. Статистична обробка результатів експерименту є обов'язковою й невід'ємною частиною будь-якого дослідження.

Неодмінною умовою випуску якісної продукції є використання при проектуванні прогресивних технологій виготовлення, точне дотримання технологічності конструкції, ретельний контроль виготовлення деталей і контроль складання машини.

Таким чином, математичне моделювання з розглянутої методики автоматизованого проектування є основою для проведення подальших розробок. Математичні моделі використовуються для створення алгоритмічної, а на основі алгоритмічної моделі складають програми для ЕОМ. У свою чергу автоматизоване проектування передбачає отриманий результат (розрахунки, схему й вид конструкції), використовуваний для проведення статистичної обробки, яка дає результат про точність проведених розрахунків і надійність використовуваної конструкції. Надійність машин, у першу чергу, визначається міцністю й твердістю конструкції.

Надалі необхідно використовувати математичні моделі при систематизації даних і прогнозуванні для побудови трифакторної залежності.

1.2. Існуючі методики автоматизованого проектування

Сучасне проектування грунтується на добре відпрацьованих методиках, які дозволяють упорядкувати більшу інформацію про об'єкт, відповідно до логічної схеми побудови об'єкта й системного зв'язку між елементами розв'язуваного завдання.

1.2.1. Технологія проектування

Загальна технологія проектування різних об'єктів, процесів, систем складається з таких основних стадій:

– формулювання завдання, визначення напряму пошуку розв'язку;
– вибору й оптимізації, шляхів розв'язку завдання;
– інженерного синтезу (моделювання й оптимізації), ескізного проектування, оцінки проекту, прийняття рішень;
– технічного проектування, виготовлення робочої документації, оцінки проекту;
– прийняття рішень;
– перевірки й обґрунтування рішення, уточнення розв'язку завдання й корекції технічної документації.

1.2.2. Оптимальне проектування

При проектуванні технічних обладнань велике значення має визначення оптимальних варіантів конструкцій машин і апаратів, режимів роботи технологічного устаткування та ін. Поява й швидкий розвиток електронної техніки зробили практично можливим автоматизоване оптимальне проектування.

Залежно від призначення проектованого виробу можуть бути зазначені критерії якості (або ефективності) для розроблюванної машини. Природним є прагнення в процесі проектування отримати найкраще значення цього критерію. Тому такий критерій будемо називати критерієм оптимальності проектованого об'єкта. Як критерій оптимальності, залежно від характеру й призначення проектованого об'єкта, може бути прийнята його маса, споживана потужність, вартість або інша більш складна характеристика.

Зменшення (або збільшення) значення критерію оптимальності обмежене необхідністю виконання вимог стандартів, технічних умов і технології виготовлення, які обмежують значення певних параметрів і характеристик проектованого виробу.

При оптимальному проектуванні необхідно визначити й обґрунтувати критерій оптимальності проектованого виробу й чітко виділити показники й характеристики, прийняті за обмеження. Оскільки конструктор нерідко формує своє уявлення про критерій оптимальності в оптимальному варіанті ви-

робу в процесі проектування, доцільно коректувати визначення комплексного критерію за результатами серії оптимізаційних розрахунків.

Вихідними даними при проектуванні машини є габарити опок, необхідна продуктивність машини, міцність суміші, маса виливка, габарити виливка, серійність виробництва. Загальна постановка завдання оптимального проектування машини припускає одночасний пошук оптимальних параметрів (зокрема, розмірів) конструктивних частин машини. Однак при цьому завдання ускладнюється.

Критерієм ефективності машини є:

– мінімальна собівартість окремих конструктивних елементів машини, що випливає у результаті досягнення оптимуму в показниках міцності;

– вартість використовуваного матеріалу окремого конструктивного елемента, при необхідних техніко-експлуатаційних характеристиках;

– мінімальні енергетичні витрати при роботі машини;

– мінімальна швидкість переміщення окремих механізмів.

Таким чином, використання при розрахунках ПЕОМ дозволить систематизувати розрізнені дані й знайти оптимальне рішення для цієї проблеми.

1.2.3. Програмний комплекс проектування

Складність проектованих інженерно-технічних об'єктів призводить до необхідності використання значної кількості методів оптимізації, а також формування комбінованих алгоритмів, орієнтованих на зміну методів пошуку залежно від геометрії припустимої області й швидкості убування (зростання) критерію оптимальності. Реалізація зазначених процедур на ПЕОМ потребує створення складного програмного комплексу.

Основні вимоги до такого комплексу:

– гнучка система введення інформації, яка дозволяє вносити оперативні зміни в модель проектованого об'єкта, а також вихідні дані, як за результатами обчислень, так і в процесі рахування (система має працювати як у режимі пакетної обробки, так і в діалоговому режимі);

– забезпечення ефективного використання алгоритмів оптимізації, включених у систему, шляхом реалізації процесів адаптації при пошуку, які передбачають своєчасну зміну алгоритмів під час розв'язку завдання оптимального проектування;

– можливість розширення системи за рахунок включення до-+ неї алгоритмів минулих випробувань на тестових і практичних завданнях;

– простота керуючої мови системи з метою зробити систему доступною для інженерів-проектувальників, не знайомих із програмуванням на ПЕОМ;

– можливість використання програмного комплексу автоматизації оптимального проектування в системах колективного користування.

Отже, система керування комплексом програм автоматизованого оптимального проектування може розглядатися як деяка проблемно-орієнтована операційна система. Вона призначена для пошуку оптимуму конструктивних параметрів при довільних обмеженнях на межі їх зміни.

Припинення пошуку виробляється на основі порівняння результатів розрахунків двох або декількох послідовних ітерацій. У цій області [6] найпоширенішими оцінками є норма різниці значень двох послідовних ітерацій *xk* і *xk +1* і модуль різниці двох послідовних значень критерію оптимальності. Так, пошук оптимуму припиняється, якщо норма різниці

$$\varepsilon^k = \left| F\left(x^k\right) - F\left(x^{k+1}\right) \right| \qquad (1.1)$$

стає меншою за задане значення. Така оцінка заснована на припущенні монотонного убування *εk* залежно від кількості ітерацій.

Система мінімальних керуючих вказівок з боку користувача (інженера-проектувальника) має виконувати такі операції: формувати модель об'єкта, вибирати для будь-якого конкретного завдання проектування найбільш ефективні методи розв'язку й здійснювати їхнє застосування в необхідній послідовності.

Для формування робочої моделі об'єкта й пошукової програми система має використовувати такі ознаки, які визначають характер і особливості розв'язуваного завдання оптимального проектування:

– модифікацію проектованого об'єкта (зазначення використовуваних модулів програмної моделі об'єкта, список обмежень);

– критерій оптимальності (у випадку декількох критеріїв мають бути зазначені відношення пріоритету);

– вказівка на дискретну або безперервну область зміни окремих конструктивних параметрів;

– вимоги до точності розв'язку.

Описаний метод можна застосовувати для пошуку оптимальних значень величин і реалізувати у програмному середовищі у вигляді циклічної операції перебору значень до знаходження оптимального з них.

1.2.4. Діалоговий метод проектування

З розвитком обчислювальної техніки все зростаючого значення набувають так звані інтерактивні (діалогові) методи проектування. Вони засновані на оперативному обміні інформацією між ПЕОМ і проектувальником у процесі оптимального проектування.

Саме діалоговий метод буде використаний при розробці програми для розрахунків конструктивних параметрів машин.

1.2.5. Об'ємне проектування

Автоматизоване проектування колись розуміли як креслення за допомогою комп'ютера. Відомо, що більшість компаній використовувала систему автоматизованого проектування (САПР) для створення двовимірних технічних розв'язків. Виглядало це так: хтось робив начерк, потім ідея переносилася на папір. Після цього складалися такі док ументи, як ECN (Engineering Change Notice – технічні зміни), зроблені в останній момент та

ін.. Створювалися один – два прототипи, і, зрештою, керівник проекту міг ухвалити рішення щодо вибору остаточної версії, за якими відбувалося копіювання креслень для відправлення на виробництво, де виготовлялися необхідні деталі. Окремі етапи розробки могли відрізнятися в різних компаніях, однак, у цілому процес був приблизно однаковим.

Більшість конструкторів визнають, що електронний офіс – серйозний крок порівняно з колишніми технологіями. Іноді електронний офіс називають цифровим або безпаперовим офісом, і при цьому практично завжди маються на увазі нові технології, орієнтовані на застосування комп'ютерів.

Сучасні програми автоматизованого проектування призначені не тільки для створення креслень – вони мають набагато більш широкі можливості й використовуються практично у всіх галузях техніки. З їхньою допомогою можна створювати моделі різних конструкцій і перевіряти їхні властивості на комп'ютері до початку їх виробництва, що істотно зменшує кількість помилок проектування й прискорює появі продукту на ринку.

Створити тривимірну модель прототипу можна за декілька годин, що дозволяє інженерові – конструкторові ознайомити зі своїм витвором. Програми аналізу допомагають перевірити зміни в моделі з урахуванням робочого навантаження, при різних деформаціях або різних температурних режимах, виявити резонансні частоти та ін. Складання конструкції, яке можна здійснити на комп'ютері, дозволяє оцінити правильність взаємодії деталей в обладнанні. І, зрештою, за допомогою комп'ютера можуть бути визначені фізичні властивості моделі, наприклад, маса, кількість матеріалу, необхідна для виробництва моделі та ін.

Для перевірки переміщення деталей у складанні (для демонстрації самого процесу складання) може бути використана анімація. Програми перевірки кінематики допомагають конструкторові візуально оцінити динамічний вплив виробу, у тому числі за наявності сили тяжіння, а також створювати документацію, яка автоматично відслідковує останні зміни, внесені в конструкцію.

Пакет об'ємного проектування Solid Works надає операторові автоматизованої системи проектування засоби для створення прототипів, складань, перевірки динаміки впливу виробів і визначення їх фізичних властивостей. У наш час ці програми перетворюються у звичайний інструмент розроблювача. Щоб зберегти конкурентоспроможність, необхідно стежити за змінами технологій.

Робота в пакеті об'ємного проектування Solid Works істотно відрізняється від звичайних програм для автоматизованого проектування і являє собою параметричну програму створення моделей твердих тіл, що складаються з елементів.

Модель твердого тіла розуміється як реальна тривимірна модель тіла, яке має щільність і масу, що можна відчути руками. Ці властивості відбито в моделі, створеній комп'ютером, за винятком можливості потримати в руках. Однак комп'ютерну модель можна вважати реальною в будь-яких умовах.

Для неї можна вказати щільність, яка залежить від матеріалу, з якого вона створена. Модель має центр тяжіння, а також має вагу й об'єм, моменти інерції щодо різних осей, принаймні, з погляду комп'ютера. Модель можна повертати на екрані так само, як і в руках. Її можна виміряти й одержати про неї інформацію, навіть більш простим способом, ніж обмір реальної деталі.

Найбільш важлива властивість Solid Works полягає в тому, що ця програма – інструмент конструктора. Можливість повернення на більш ранні етапи процесу проектування й внесення змін шляхом редагування ескізу, заміни значень розмірів надзвичайно важлива для конструктора. Саме ці переваги виділяють Solid Works порівняно з непараметричними конструкторськими програмами.

У середовищі Solid Works процес починається так: винахідник, у голові якого дозріла певна ідея, починає зі створення ескізу, використовуючи програму Solid Works. Термін «ескіз» тут цілком підходить, оскільки ескізом називається грубий первісний начерк загального вигляду деталі.

Таким чином, кінцевою метою проекту є одержання готової конструкторської документації за допомогою програми автоматизованого проектування Solid Works 2006.

Контрольні запитання

1. Класифікація критеріїв оцінки надійності машин.
2. Що включає алгоритмічне моделювання?
3. Основні завдання математичної статистики.
4. З яких основних стадій складається загальна технологія проектування різних об'єктів?
5. Критерії оптимальності проектованого виробу.
6. Основні вимоги до програмного комплексу.
7. Які ознаки використовують для формування робочої моделі об'єкта і пошукової програми системи?
8. Переваги об'ємного проектування виробу.

РОЗДІЛ 2
МЕТОДИКА АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ЛИВАРНОГО УСТАТКУВАННЯ

2.1. Методика автоматизованого проектування струшувальних і пресових машин

Пояснимо в загальному вигляді логіку автоматизованого проектування, якою користуємося в цій роботі.

Для роботи в системі автоматизованого проектування ливарних машин використовуємо різні методики: математичне, алгоритмічне, статистичне моделювання.

Система за мінімальними керуючими вказівками з боку користувача (інженера-проектувальника) має виконувати такі операції:

– формувати модель об'єкта (автоматизоване проектування починається зі складання структурної схеми машини; для цього необхідно зробити ескіз об'єкта за відомими методиками [1,2], у нашому випадку, у наступних главах, на прикладах струшувальної, імпульсної машин і змішувача ХТС):

– вибирати для кожного конкретного завдання проектування найбільш ефективні методи розв'язку;

– здійснювати застосування обраних методів розв'язку в необхідній послідовності.

Для формування робочої моделі об'єкта й пошукової програми система має використовувати такі ознаки, що визначають характер і особливості розв'язуваного завдання оптимального проектування:

– модифікацію проектованого об'єкта;

– зазначення використовуваних модулів програмної моделі об'єкта.

У загальному вигляді структуру програмного комплексу оптимального проектування наведено на рис. 2.1.

Після створення структури програмного комплексу оптимального проектування скористаємося так званими інтерактивними (діалоговими) методами проектування. Вони засновані на оперативному обміні інформацією між ПЕОМ і проектувальником у процесі роботи.

Так, для проектування формувальної машини необхідно знати габарити використовуваних опок. Кожний об'єкт у роботі розглядаємо в математичному виконанні.

Розробка математичної моделі починається з побудови розрахункової схеми. У цьому випадку формувальну машину подаємо у вигляді об'єкта, що складається з ряду складальних одиниць, які можна легко логічно описати, спростити й схематизувати: імпульсної головки, станини, траверси, колон.

Методики математичних і алгоритмічних моделей названих складальних одиниць опубліковано авторами в роботах [1–3, 7].

Потім проводиться розробка оригінальних програм для проектування й розрахунків основних параметрів ливарних машин або використовуються вже наявні програми й пакети програм.

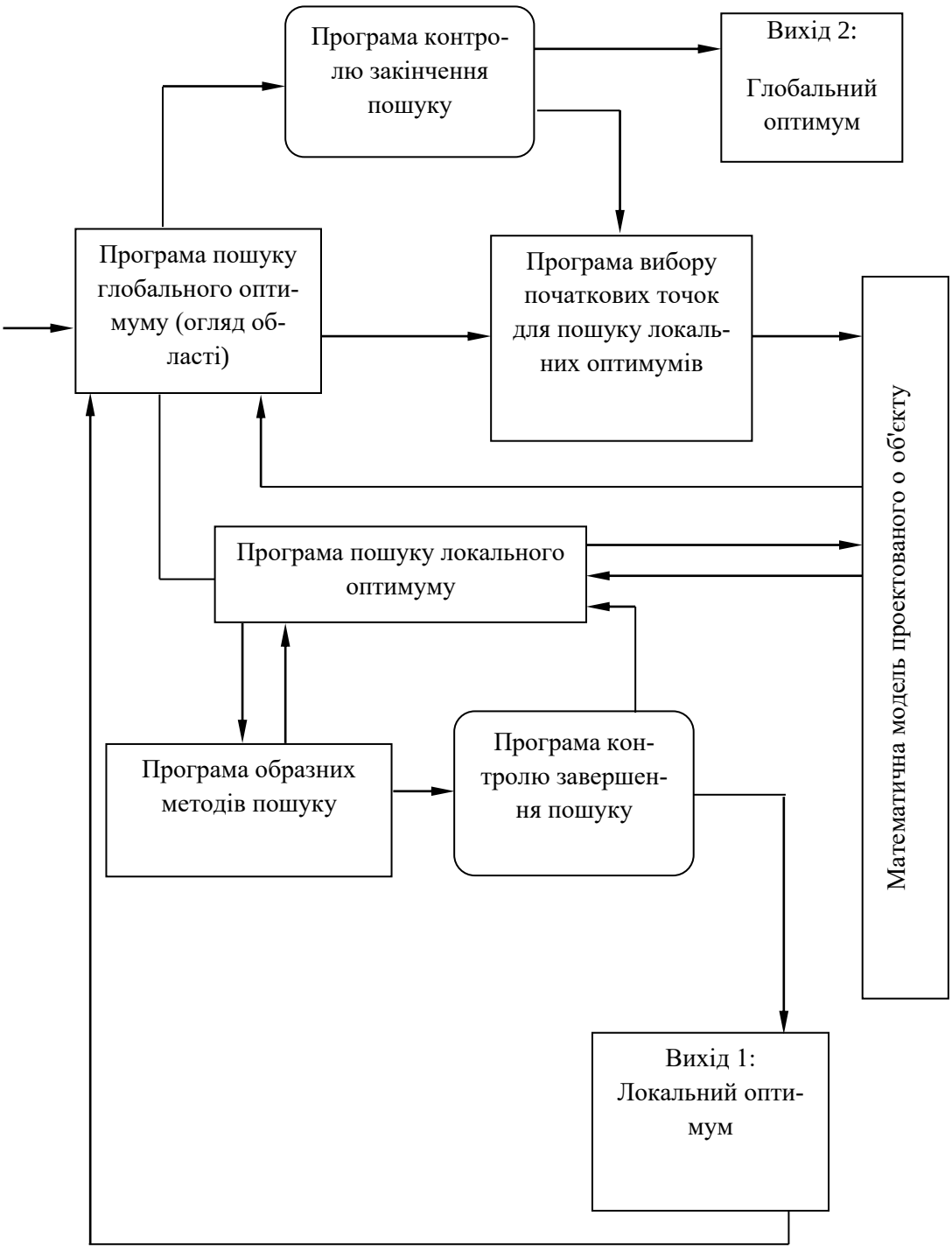


Рис. 2.1. Структура програмного комплексу оптимального проектування

2.1.1. Критичний аналіз конструкцій струшувально-пресових формувальних машин

Історично струшувальні формувальні машини з'явилися з індустріалізацією промисловості на початку 20 століття. Відомо, що при ущільненні формувальної суміші в опоці на струшувальні машині стіл машини разом із опокою при кожному ударі піднімається на висоту до 100 мм, падаючи із цієї

висоти, ударяється об перешкоду [1]. Ущільнення суміші в опоці відбувається при ударі стола під дією сил інерції суміші. Найголовнішою особливістю такого навантаження суміші в момент удару є короткочасність дії стискаючих напруг або сил інерції суміші. Тривалість дії стискаючих напруг у формі при ударі струшувального стола досить мала. Тому за час одного удару процес ущільнення суміші відбутися не встигає, і з кожним новим ударом струшування ступінь ущільнення буде збільшуватися. Наростання ущільнення буде походити від удару до удару доти, доки при деякій великій кількості зроблених ударів буде досягатися стабілізація ущільнення. Подальше струшування з тієї ж силою вже не дасть більшого збільшення ступеня ущільнення. Зазвичай практична кількість ударів становить 30...50, що значно менше граничної кількості ударів, за якої ущільнення стабілізується.

Верхні шари суміші в опоці при струшуванні ущільнюються недостатньо й потребують додаткового ущільнення, яке проводиться підпресуванням форми. Внаслідок того, що операція струшування забирає значний час, раціонально для підвищення продуктивності машини проводити ущільнення, передусім за рахунок підпресування, зменшуючи при цьому кількість ударів струшування на одну форму. Для цього формувальна машина повинна мати досить потужний підпресувальний механізм. Один із варіантів комбінації струшування із пресуванням – метод струшування ливарних форм при одночасній дії тиску, що пресує. Найпоширеніші моделі пресово-ударних і струшувально-пресових формувальних машин наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Класифікація моделей струшувально-пресових машин

Назва машини	Модель	Розмір опок, мм
Струшувально-пресові з амортизацією ударів		
без повороту півформ	22111 22112 22113 22114	500…400 600…500 800…700 1000…800
з поворотом півформ	22211 22212 22213	500…400 600…500 800…700
Струшувально-пресові без амортизації ударів		
без повороту півформ	265 267 253	800…700 1000…800 500…400
з поворотом півформ	254 255	800…700 1000…800
Струшувально-пресові з перекидним столом		
без амортизації ударів	234 235	1600…1200 1800…1200

Схеми найпоширеніших моделей пресово-ударних і струшувально-пресових формувальних машин подано на рис. 2.2.

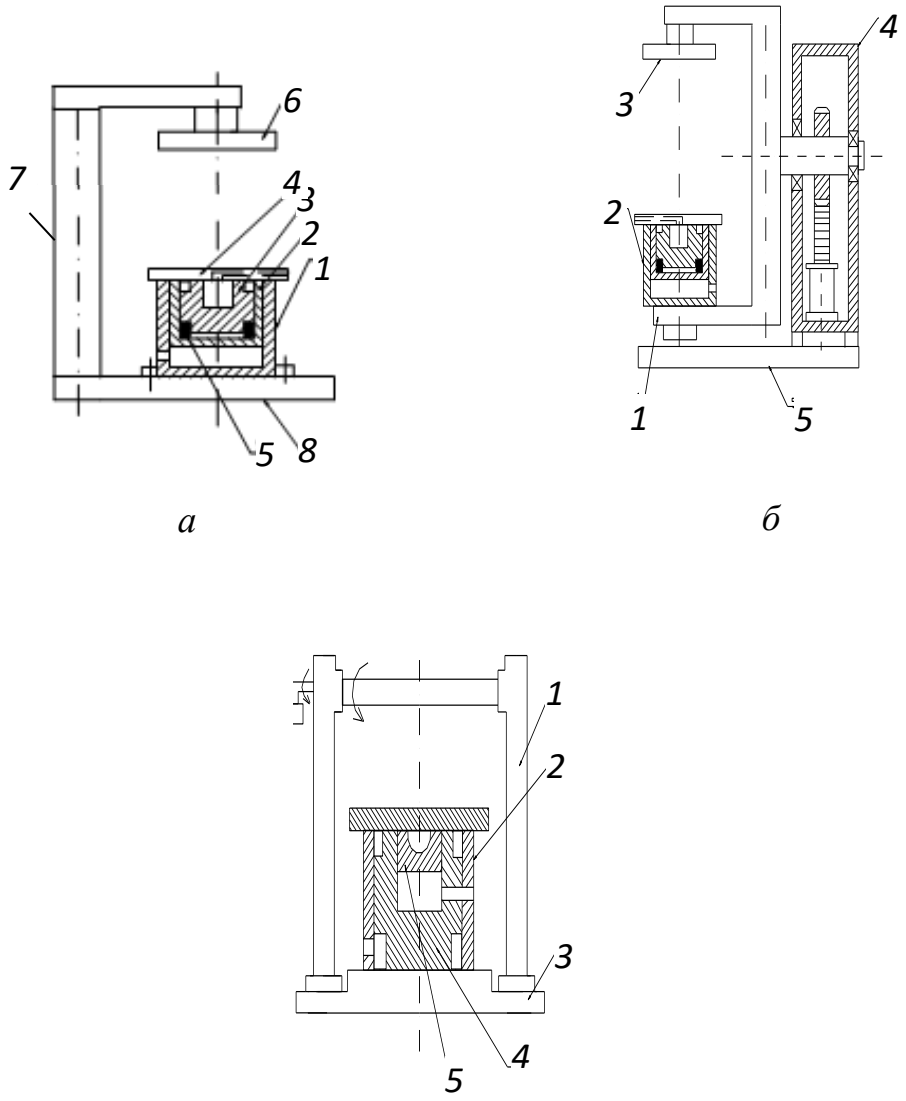


Рис. 2.2. Схеми найпоширеніших моделей пресовоударних і струшувально-пресових формувальних машин:

а – модель 22111: 1 – корпус механізму ущільнення, 2 – пресовий цліндр, 3– бойок,4 – стіл, 5 – пружини, 6 – колодка із траверсою, 7 – колона, 8 – станина; б – модель 22211: 1 – скоба, 2 – струшувальний механізм, 3 – колодка, 4 – поворотний механізм, 5 – плита; в – модель 253: 1 – поворотний стіл, 2 – струшувальний механізм, 3 –станина, 4 – піднімальний циліндр; 5 – ударний (струшувальний) механізм.

Перші дві моделі (рис. 2.2 *а, б)*–пресово-ударні, працюють за одним принципом ущільнення півформи, але друга модель *б* виконує протягання моделі після перевороту півформи, що підвищує якість форми, оскільки вона

не руйнується механізмом протягання. Пояснимо на прикладі роботи машини моделі 22111.

На робочий стіл (рис. 2.2, *а*) *4* установлюється оснащення (модельна плита, опока, наповнювальна рамка). Піднімальний (він же пресовий) циліндр *1* піднімає попередньо засипане оснащення (механізація операцій складання оснащення, її засипання в машині відсутнє) до пресової колодки й ущільнює пресуванням.

Струшування починається одночасно із пресуванням. Починає роботу циліндр *3*: повітря, що надходить під нього, давить на бойок, який відкочується вниз, стискаючи пружини; відкривається вихлопний отвір і тиск падає, пружини розтискаються, бойок відкочується й ударяє по столу *4*, при багаторазових ударах бойком знизу по столу відбувається струшування. Потім усе вертається на вихідні позиції. Протягання півформи проводиться штировим підйомником (на штирях півформа піднімається вверх, а модельна плита залишається на столі). Одночасне пресування й струшування дає більш рівномірне ущільнення півформи й більш точний відбиток, що дозволяє зменшити припуски на механічну обробку.

Однак протягання моделі штировим механізмом може спричиняти обвалення суміші, тому що вектори сил тяжіння ущільненої суміші (униз) і сила переміщення півформи (нагору) спрямовані в різні сторони.

Друга наведена модель 22211 процес ущільнення проводить аналогічно машині моделі 22111, а протягання здійснює за рахунок перевороту (скоби) основної частини машини (рис. 2.2, *б)* механізмом протягання 4, зберігаючи притиснення ущільненої півформи до колодки, скоба 1 перевертається на 180 °. Механізм підйому 2 опускає циліндр на вихідну позицію, витягаючи модельну плиту з півформи, яка залишається на колодці в перевернеому (робочому) стані; відбувається протягання. При такому способі протягання вектори сил тяжіння ущільненої суміші (униз) і сила переміщення півформи (униз) спрямовані в одну сторону й руйнування півформи не відбувається.

Описані моделі машин через особливості своїх механізмів протягання застосовують для малих форм сьогодні легко заміняються машинами, що працюють на основі інших способів ущільнення. Моделі 253 і 234 безнадійно застаріли через свою громіздкість, слабку механізацію, високу руйнівну силу струшування.

2.2. Удосконалення струшувальних машин

У цей час залишаються незамінними струшувально-пресові машини для великого масивного лиття, так звані струшувальні столи. Сучасні маши-

ни цього типу мають бути не багато позиційними, тобто виконувати операції складання оснащення, засипання суміші, ущільнення струшуванням із ущільненням пресування і протягання моделі. Що правда, процес протягання моделі легко можна передати кантувачу, для чого буде потрібна формувальна лінія. Якщо у формувальний багатопозиційний агрегат увести плаваюче змінне оснащення, то такий формувальний блок, та й лінія, можуть застосовуватися в індивідуальному виробництві великого лиття.

В описаних формувальних агрегатах основними ущільнювальними механізмами, як і раніше залишаються струшувальні й пресові циліндри, які повинні бути виконані за сучасними вимогами:

– струшувальні механізми повинні бути з амортизацією ударів і використовувати під час роботи відсічення й розширення повітря;

– пресові циліндри повинні бути не пневматичними, а гідравлічними.

Знаходження оптимальних конструкцій таких механізмів можливе, якщо використовувати шлях автоматизованого проектування, запропонований у цій роботі.

Схему вдосконаленої трипозиційної струшувально-пресової машини для великих форм подано на рис. 2.3. Формувальна машина складається з литої станини, литої траверси, колон пресово-струшувального механізму, піднімальних механізмів та ін.Робота формувальної машини здійснюється в такий спосіб: модельна плита з моделлю надходить по рольгангові так само, як і опока. На I позиції відбувається складання оснащення. Піднімальний механізм збирає модельну плиту з опокою, переміщаючи їх вверх на рівень конвеєра позиції II, потім штовхач зіштовхує опоку з позиції I на конвеєр, який переміщає зібране оснащення на позицію II.

У той же час відбувається переміщення оснащення, дозатор позиції II заповнюється готовою формувальною сумішшю. Роботу починає другий піднімальний механізм і переміщає опоку вверх до стикування з дозатором. Суміш засипається з дозатора в опоку так, що в опоці утворюється виступаючий ком, що дозволяє обійтися без наповнювальної рамки при переході модельного комплекту з позиції II на позицію III. На позиції III першим починає роботу пресово-струшувальний механізм. Циліндр піднімається до стикування з опокою й починає струшувати. Після виконання процесу струшування опоку допресовуємо за допомогою багатоплунжерної головки. У той час поки виконується процес ущільнення, привідний конвеєр розходиться, і опока з моделлю опускається нижче. Далі розташована наступна секція рольганга, на яку переходить опока, а робочий стіл з модельною плитою опускається нижче. Ще нижче розташовується чергова секція рольганга, яка має таке розташування роликів, що модельна плита з моделлю зачіпається й іде із зони дії формувальної машини, а стіл вертається у вихідне положення.

2.2.1. Вплив технологічних факторів на конструктивні параметри струшувально-пресових формувальних машин

Критерієм оптимальності проектування струшувально-пресової формувальної машини може бути необхідна продуктивність машини, міцність суміші, маса виливка, габарити виливка, габарити опок, серійність виробництва.

Основою струшувально-пресової машини є механізм для ущільнення ливарної півформи, це – струшувальний і пресовий циліндри. Тому, щоб побудувати оптимальну конструкцію струшувальної й пресової частин машини, потрібно визначити залежність габаритів струшувальних і пресових циліндрів від ступеня ущільнення ливарної форми. Для цього необхідно скористатися відомими теоріями побудови індикаторних діаграм [1].

Для побудови індикаторних діаграм пресового й струшувального циліндрів необхідно знати конструктивні розміри циліндра (хід поршня, висоту шкідливого простору, висоту наповнювальної рамки й ін.). З безлічі розмірів визначити один надзначущий, і від нього зробити залежними всі інші розміри конструкції циліндра; у даному вузлі це внутрішній діаметр корпусу циліндра (він же діаметр поршня). Потім задатися необхідною щільністю готової ливарної форми, при якій неможливе обвалення форми за будь-яких функціональних операцій, і в той же час форма зберігала б необхідні технологічні властивості, наприклад газопроникність. По відомій теорії П.Н.Аксьонова відшуковуємо по точках діаграму, у якій буде використано і діаметр поршня, і необхідну щільність форми.

За різницею енергій, що витрачені на удар і на відбиття при струшуванні ливарного оснащення, можна знайти оптимальний діаметр поршня струшувального циліндра, змінюючи цю різницю площ відповідних енергій (за рахунок зміни діаметра поршня) доти, доки вона хоча б не зрушиться у бік зменшення.

За відношенням площ (на діаграмі пресового циліндра) корисної роботи й загальної витраченої (к. п. д.) можна знайти оптимальний діаметр поршня пресового циліндра, змінюючи це співвідношення (за рахунок зміни діаметра поршня) доти, доки воно не наблизиться до 100 % або хоча б не зрушиться у бік збільшення співвідношення.

Для того щоб простежити, як сказане діє на побудову оптимальної конструкції циліндрів, необхідно виконати такі дії: побудувати математичні, алгоритмічні моделі, здійснити розрахунки за авторськими програмами ЕОМ, виконати креслення в комп'ютерних пакетах.

2.2.2. Побудова математичних моделей вузлів і деталей струшувальних і пресових машин

Розробка математичної моделі починається з побудови розрахункової схеми. У цьому випадку формувальну машину подаємо у вигляді об'єкта, який складається з ряду складальних одиниць, які можна легко логічно описати, а схему машини спростити й схематизувати: пресово-струшувального механізму, станини, траверси; колон.

Математичне моделювання пресового циліндра. Математичне моделювання пресового циліндра являє собою сукупність методик аналітичного моделювання.

Процес пресування належить до статичних методів виготовлення форм. Опока з надлишком заповнюється пухкою піщано-глинистою формувальною сумішшю. Щільність пухкої суміші знаходиться в межах δ = 1,0...1,2 кг/см^3.

При пресуванні надлишок суміші запресовується в опоку. Середній ступінь ущільнення суміші становить δ = 1,7...1,8 кг/см^3. При високому тиску пресування ступінь ущільнення суміші у формі досягає 1,9 кг/см^3. Процес ущільнення форми пресуванням відбувається в умовах внутрішнього й зовнішнього тертя суміші. Тертя суміші об стінки опоки й моделі знижують ефект пресування. Через цей недолік метод ущільнення форм пресуванням обмежений і застосовується для низьких опок (висота опоки до 300 мм).

Пресові циліндри у формувальних машинах можуть розташовуватися як зверху, так і знизу. Машини з розташуванням пресового циліндра внизу, на станині, є найпоширенішим типом пресових машин і механізмів пресування. Такі машини за характером процесу пресування виконують як із верхнім, так і з нижнім пресуванням.

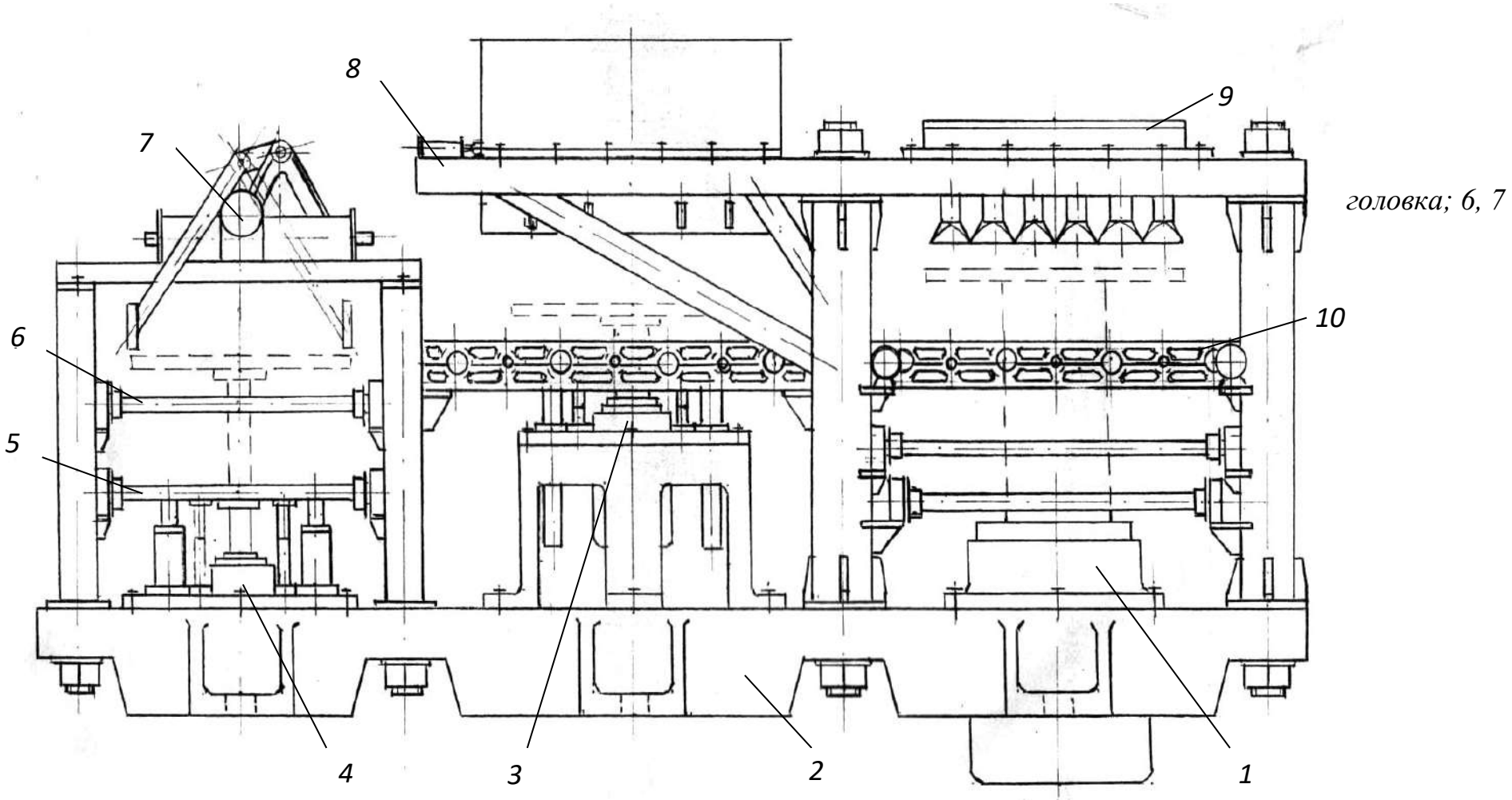
У випадку, коли пневматичний пресовий циліндр установлений на станині, пуск повітря в пресовому циліндрі проводиться автоматично. Із цією метою машина забезпечується автоматичним клапаном тиску, який викликає механізм після досягнення заданого тиску пресування.

Аналітичною моделлю для розрахунків пресового циліндра формувальної машини є рівняння П.Н. Аксьонова [1]:

$$\delta = 1 + C \cdot p^{0,25}, \qquad (2.1)$$

де δ – середня об'ємна маса формувальної суміші, кг/см^3; C – коефіцієнт ущільнення; p – тиск пресування, кгс/см^2.

Середня об'ємна маса формувальної суміші δ, яку оцінюємо ступенем ущільнення суміші, становить для добре ущільненої форми 1,6...1,8 кг/см^3.



головка; 6, 7

1 – пресово-струшувальний механізм; 2 – траверса; 3 – станина; 4 – штовхач; 5 – багатоплунжерна головка; 6, 7 – рольганг; 8, 9 – піднімальний механізм; 10 – привідний рольганг

Для дуже пухкої засипки в опоку суміші початкова щільність δ_0 (до ущільнення форми) становить 1,0 кг/см^3; для суміші, що потрапила в опоку з бункера або дозатора, δ_0 = 1,15...1,2 кг/см^3.

У рівнянні П.Н. Аксьонова початкову щільність суміші δ_0 приймаємо рівною 1 кг/см^3. Тиск пресування виражений у кгс/см^2.

Коефіцієнт ущілнення C = 0,4...0,6; його величина залежить від властивостей суміші й розмірів пресованої форми. Зі збільшенням висоти суміші в опоці H_0 (висота суміші до пресування) коефіцієнт ущільненості зменшується згідно з залежністю:

$$C \cdot H_0^{\,0,19} = 0,92. \qquad (2.2)$$

Така залежність можлива через те, що в більш високій опоці більш значна частка роботи пресування поглинається тертям суміші об стінки опоки.

Математичне моделювання струшувального циліндра. Ущільнення форми струшуванням відбувається під дією сил інерції суміші. Піднімаючись на певну висоту, стіл струшувальної машини разом із опокою, наповненою сумішшю, падає, ударяючись об перешкоду. При цьому кінетична енергія, що передається суміші, переходить у роботу її ущільнення. Процес струшування належить до динамічних методів виготовлення форм. Найбільшого ущільнення набувають нижні шари суміші, що прилягають до модельної плити й до моделі; ущільнення вищезміщених шарів менше. Тому для підвищення густини суміші у верхній частині форми застосовуємо допресування.

Струшувальні механізми формувальних машин класифікуються за різними ознаками: за родом приводу; за ступенем амортизації ударів; за характером робочого пресування; за типом повітророзподілення.

Струшувальний механізм може бути без амортизації ударів, із повною амортизацією ударів, із частковою амортизацією ударів. За великих розмірів машин удари при струшуванні спричиняють струс ґрунту, тому в сучасних машинах використовують амортизатори. У цьому випадку струшувальний поршень рухається в масивному циліндрі-амортизаторі, що опирається внизу на пружини. Після впуску повітря в простір під струшувальний поршень, так званий шкідливий простір, поршень піднімається на величину ходу. Амортизатор при цьому опускається на ту саму величину ходу, стискаючи пружини, що перебувають під ним.

При зворотному ході струшувальний поршень падає, а амортизатор під дією стислих пружин піднімається. Відбувається удар – струшувальний стіл (усією своєю вагою) ударяється об фланець амортизатора із взаємним поглинанням сил. При цьому на фундамент машини ніякого удару не передається.

Аналітичною моделлю для розрахунків струшувального циліндра формувальної машини є рівняння П.Н. Аксьонова [1]:

$$\delta = 1 + K \cdot a^{0,3}, \qquad (2.3)$$

де K – коефіцієнт ущільнення форми струшуванням, K = 0,35...0,55;
a – питома робота, кгс•см/см^2.

Рівняння показує залежність середнього ступеня ущільнення δ формувальної суміші від питомої роботи струшування. Зміна висоти струшування H у межах 20–100 мм не впливає на одержуваний ступінь ущільнення δ за умови сталості питомої роботи a. Однак при збільшенні H відбувається та сама робота, питома робота a передається суміші за меншої кількості n ударів, і продуктивність машини зростає.

Математичне моделювання станини й траверси. Станина являє собою литу деталь коробчастого перерізу, розділену ребрами жорсткості на ряд сполучених між собою відсіків. Вона витримує всі навантаження, що на неї діють, має прямокутну форму. Машина обрана трипозиційна. Тому на першій позиції й на третій станина має порожнину, у якій розташовуються циліндри (піднімальний і пресово-струшувальний). У станині машини є також гнізда, виконані у вигляді циліндричних припливків, які служать для кріплення восьми колон.

Траверса може мати різну форму й бути поворотною, неповоротною, литою, звареною і т.д. У цьому випадку вибираємо траверсу складної литої коробчастої форми. Кутові циліндричні припливки на траверсі служать для кріплення її до колон. Тому зусилля пресування сприймається припливками. Траверса формувальної машини служить для установки на ній пресової колодки або багатоплунжерної головки й сприймає зусилля пресування, передаючи його на колони. Сприймаючи більшу силу пресування й працюючи на вигин, траверса має великий момент опору.

Нерухливі траверси зміцнюють на двох, трьох, чотирьох колонах. Пресована опока, наповнена формувальною сумішшю, підводиться під траверсу й при пресуванні (відбувається підйом опоки за допомогою циліндра) давить на неї.

Аналітичною моделлю для розрахунків станини є рівняння:

$$\sigma_р \le 1,1 \cdot [\lfloor \sigma_р \rfloor]; \qquad (2.4)$$

$$\sigma_р = \frac{G_{н.ч.} \cdot l \cdot h}{2 \cdot \sum_{i=1}^{n} (I_i + F_i \cdot C_i^2)} \le 1,1 [\sigma_р], \qquad (2.5)$$

де $\sigma_р$ – найбільше розрахункове за абсолютною величиною напруги в небезпечному перерізі, МПа; $[\sigma]_р$ – допустиа напруга на розтяг матеріалу траверси, МПа [8];$G_{н.ч.}$ – маса навантажувальних частин, кг; l – довжина, по якій діє навантаження щодо опори, мм; h – висота перерізу (висота станини), мм; I_i –

момент інерції елементів перерізу щодо осей, що проходять через центри тяжіння цих елементів.

$$I = \sum_{i=1}^{n}(I_i + F_i \cdot C_i^2), \tag{2.6}$$

де F_i – площа елементів перерізу; C_i – відстань від центру тяжіння елемента до загального центру тяжіння; n – кількість елементів перерізу.

Ця формула підходить для розрахунків на міцність будь-якої станини й траверси, а рівняння є математичною моделлю для розрахунків траверси й станини.

2.3. Побудова алгоритмічних моделей вузлів і деталей струшувальних і пресових циліндрів

Наведено побудову алгоритмічних моделей машини в цілому, струшувальних і пресових циліндрів, станини й траверси, колони для того, щоб на основі отриманих алгоритмічних моделей скласти програму для автоматизованого розрахування вузлів і об'ємного проектування за допомогою відомих пакетів програм ПЕОМ.

2.3.1. Побудова алгоритмічних моделей формувальної машини в цілому

Вхідними даними для початку проектування є: продуктивність машини (П), маса виливка (M), габарити виливка (L, B, H).

Блок I (рис. 2.4) – Вплив габаритів виливка на вибір оснащення.

Маючи виливок певної маси M_i, необхідно визначити габарити опоки, яку використовуємо при виготовленні виливка. Вибір габаритів опоки здійснюємо за табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Габарити опок

Вагові групи виливків, кг	Розміри опок у світлі, мм	Середня висота форми, мм
до 20	500×400	75...300
20...100	800×700	100...400
50...150	1000×800	120...500
50...250	1200×1000	150...600
100...500	1400×1000	150...600
100...1000	1600×1200	150...600
500...1000	2000×1600	150...600
500...1500	2500×1600	175...800
1000...2000	2500×2000	175...800

Якщо умова не виконується, то габарити опоки розраховуємо за відомими методиками [2] розрахунків технологічного процесу. Розрахунки починаємо з характеристики сплаву, який використовували при виготовленні виливка. За кресленням виливка робимо аналіз технологічності конструкції, вибираємо розташування виливка у формі й проводимо розрахування ливникової системи, додаткыв і випорів, припусків на механічну обробку, час охолодження. Для проведення більш точного розрахунків усіх показників скористаємося програмою «FOUNDRY», розробленою на кафедрі ЮРБ ДГМА. Після розрахунків основних параметрів необхідно підібрати вид формування.

Блок II (рис. 2.4) – вплив габаритів опоки на вибір виду формування.

Критерієм оцінювання, що впливають на вибір виду формовки, є габарити опоки (у цьому випадку висота опоки). Якщо висота опоки знаходиться у межах $200 \le H \le 300$ (мм), то можна призначити методи ущільнення, такі як імпульсний низького тиску або пресування. Якщо висота опоки знаходиться у межах $400 \le H \le 500$ (мм), то таке співвідношення виконується для формування імпульсом високого тиску, струшуванням і пресово-струшувальний способом. Відомо [9], що вакуумно-плівковий метод формування використовують при невеликих опоках від 500×400 до 800×700 мм. Таким чином, визначається вид формування. Після вибору методу формування авторська програма «Система керування» вибирає вид формовки.

Блок III – визначення навантаження на робочий циліндр.

На пресово-струшувальний механізм під час роботи виявляє свою дію вага частин, що піднімаються, вага оснащення із сумішшю й сила тертя поршня об стінки циліндра. Залежність набирає вигляду:

$$Q_{заг} = Q_{осн} + Q_{пч} + R, \qquad (2.7)$$

де $Q_{заг}$ – загальне навантаження на поршень, кг;

$Q_{осн}$ – навантаження на поршень від оснащення, кг;

$Q_{пч}$ – навантаження, що діє на циліндр від частин, що піднімаються, кг;

R – сила тертя поршня об стінки циліндра, кг.

$$Q_{осн} = m_{оп} + V_{оп}\,\gamma_{сум}, \qquad (2.8)$$

де $m_{оп}$ – маса опоки, кг;

$V_{оп}$ – об’єм опоки, см^3;

$\gamma_{сум}$ – питома вага розпушеної суміші, $\gamma_{сум}$ =1,2 кг/см^3;

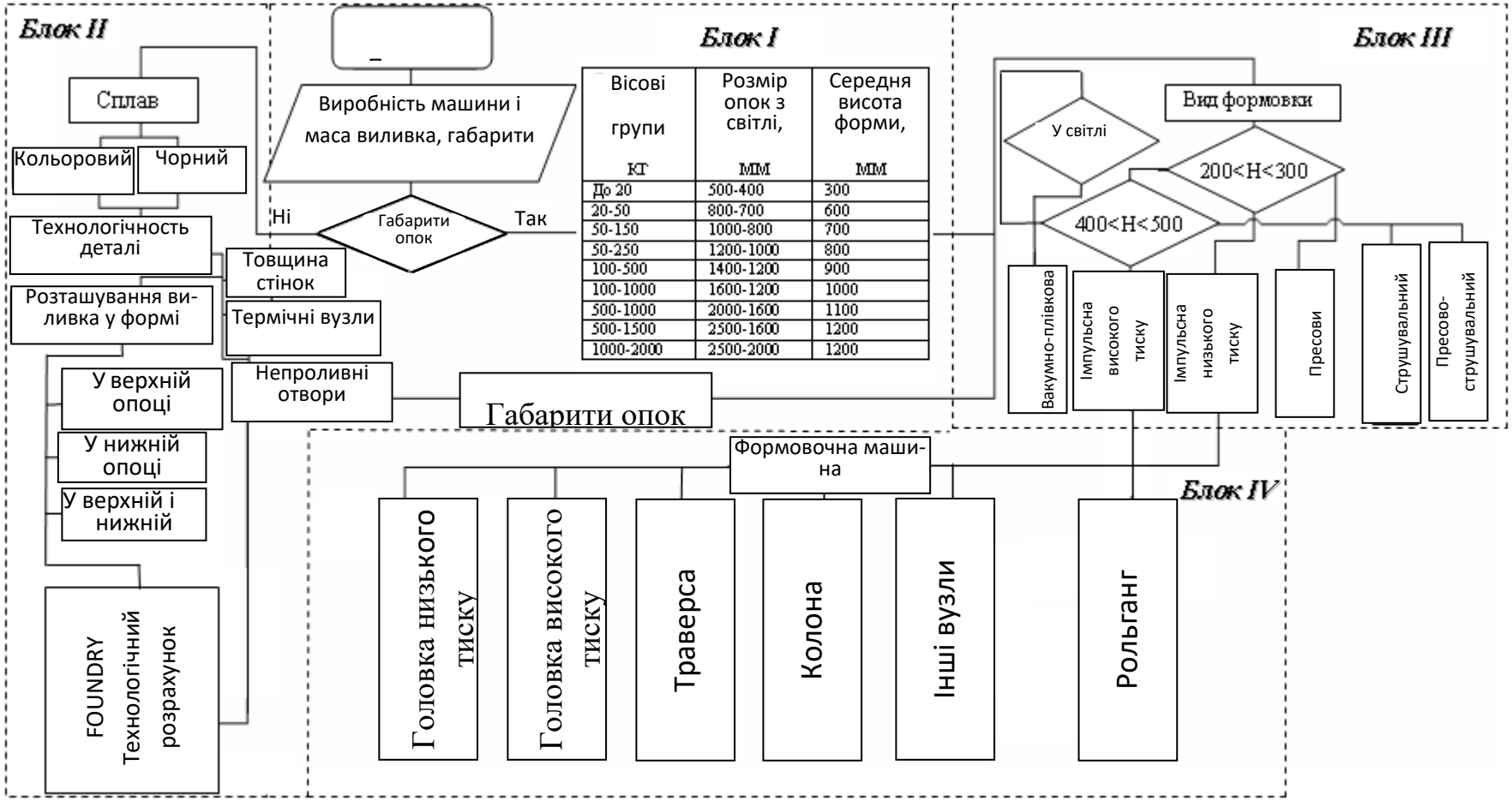


Рис. 2.4. Повний алгоритм програми

Приймаємо значення навантаження

$$Q_{\text{пч}} = (0{,}1 \div 0{,}3) \cdot Q_{\text{осн}}; \tag{2.9}$$

Нехай значення сили тертя

$$R = (0{,}1 \div 0{,}4)\ (Q_{\text{осн}} + Q_{\text{пч}}). \tag{2.10}$$

Таким чином, можна провести оптимізацію основних факторів розглянутого об'єкта. Для визначення оптимальних факторів скористаємося пакетом програм Statistic. Підсумки реалізованого плану у вигляді параметрів оптимізації занесено до табл. 2.3.

Деякі досліди повторюються, у результаті чого з'являється можливість виявити помилки експерименту. За методикою пакета програм Statistica підраховуємо коефіцієнт регресії кожного з розглянутих факторів.

Таблиця 2.3 – Параметри оптимізації

Фактори	Інтервал варіювання			Крок
	основний	нижній	верхній	
1	2	3	4	5
$Q_{\text{пч}}$	0,2	0,1	0,3	0,05
R	0,25	0,1	0,4	0,05

Фактор, що незначно впливає на параметр оптимізації, тобто коефіцієнти регресії менші за довірчий інтервалу відсівали. У результаті обробки даних одержали найкращі показника факторів у табл. 2.3 у графі 4 для навантаження від частин, що піднімаються, і в графі 2 для сили тертя поршня об стінки циліндра. При цьому дисперсія відтворюваності лінійного наближення для основних факторів не перевищує табличне значення критерію Фішера при 5 %-му рівні значимості. Фактори набувають значення:

$$Q_{\text{пч}} = 0{,}3 \cdot Q_{\text{осн}}, \tag{2.11}$$

$$R = 0{,}25 \cdot (Q_{\text{осн}} + Q_{\text{пч}}). \tag{2.12}$$

Таким чином, із проведених експериментів і розрахунків випливає, що довірчий інтервал від 0,1 до 0,3 і від 0,1 до 0,4 дають у підсумку необхідні значення, й можна провести оптимізацію основних факторів розглянутого об'єкта.

Пресово-струшувальний механізм складається із двох циліндрів: пресового й струшувального, тому розрахунки проводимо за двома циліндрами окремо. Пресовий циліндр може бути пневматичним і гідравлічним:

– гідравлічний може бути з мультиплікатором або складним і застосовується для більш навантажених механізмів;

– пневматичний застосовують для менш навантажених конструкцій.

Основним показником роботи пресового механізму є відношення роботи стисненого повітря, витраченого на чисте пресування, до роботи сил тертя, що виникають у процесі пресування. Визначити оптимальне відношення зручніше шляхом побудови оптимальної індикаторної діаграми. Оцінкою роботи пресового циліндра є співвідношення площ індикаторної діаграми:

$$\frac{F_{\text{пр}}}{F_{\text{заг}}} \geq 0{,}6, \tag{2.13}$$

де $F_{\text{пр}}$ – площа роботи пресування, од. пл.;

$F_{\text{заг}}$ – загальна площа роботи пресування й тертя ($F_{\text{лів}}$), одиниці площі;

$$F_{\text{заг}} = F_{\text{пр}} + \text{F}_{\text{лів}}. \tag{2.14}$$

Результатом співвідношення є коефіцієнт корисної дії механізму, який не повинен перевищувати 60 %.

Ефективність струшувального механізму може бути оцінена його продуктивністю, тобто віддачею кожного кубічного метра витраченого повітря й перетворення його на корисну роботу ущільнення суміші.

Вивчення струшувальних механізмів, вибір і аналіз варіантів конструктивних розв'язків зручніше за все проводити шляхом побудови індикаторних діаграм, що є зображенням процесів, які повинні проходити в циліндрі машини.

Енергія, що передається поршню при падінні струшувального стола і його підйомі, може бути визначена шляхом аналізу індикаторної діаграми. Так, при русі стола вниз уся енергія, що передається поршню, або робота рушійних сил, віднесена до одиниці площі поршня

$$A_{\text{руш}} = \frac{Q - R}{F} \cdot S, \tag{2.15}$$

де $A_{\text{дв}}$ – робота рушійних сил;

F – площа поршня.

Енергія може бути виражена площею на індикаторній діаграмі. Робота сил опору при цьому дорівнює роботі стисненого повітря, що перебуває під

поршнем і чинить певний протитиск. Ця робота виражається площею. Енергія удару e є різницею площ

$$e = F_{\text{лів}} - F_{\text{пр}}. \tag{2.16}$$

При русі стола вверх робота рушійних сил дорівнює роботі стисненого повітря й роботі відбиття стола e' після попереднього удару. Робота сил опору при цьому

$$A_{\text{оп}} = \frac{Q+R}{F} \cdot S. \tag{2.17}$$

Енергія може бути виражена площею. Робота рушійних сил виражається площею на індикаторній діаграмі. Тоді енергія відбиття e' є різницею площ

$$e' = f_{\text{лів}} - f_{\text{пр.}} \tag{2.18}$$

Співвідношення енергії відбиття й удару становить:

$$\frac{e'}{e} = 0{,}1 - 0{,}15. \tag{2.19}$$

Блок IV – Оцінка надійності роботи складальних одиниць (колон, траверси й станини). У цьому блоці робимо перевірку складальних одиниць на довговічність за навантаженнями, що діють на них. Критерієм оцінки є вираз

$$\sigma_{\text{р}} \le 1{,}1 \cdot [\sigma_{\text{р}}], \tag{2.20}$$

де $\sigma_{\text{р}}$ – розрахункова (найбільша за абсолютною величиною) напруга в небезпечному перерізі, МПа;

$[\sigma_{\text{р}}]$ – допустима напруга на розтяг прийнятого матеріалу, МПа;

1,1 – коефіцієнт запасу.

Отже розрахувавши кожний вузол окремо, маємо велику кількість результатів, які зводимо в архів результатів, де проводимо обробку й подальший друк.

2.3.2. Побудова алгоритмічних моделей пресового й струшувального циліндрів

Алгоритмічна модель пресового циліндра створена для побудови індикаторної діаграми, для одержання оптимальних конструктивних параметрів економічного пресового циліндра.

Спочатку пояснимо класичну методику побудови індикаторної діаграми. Основним показником економічності роботи пресового механізму є від-

ношення роботи стисненого повітря, витрачене власне на пресування, до загальної роботи, що складається з корисної та шкідливої,тобто роботи витраченої на тертя пресування, що виникає в процесі, усередині самого пресового механізму. Визначити це відношення зручніше шляхом побудови індикаторної діаграми.

Індикаторна діаграма ідеального пресового механізму (рис. 2.5) будується в координатах $P - S$, де S – висотні параметри механізму, якщо процес розглядається щодо одиниці площі поршня (пояснення значень крапок індикаторної діаграми наведено в табл. 2.4).

Розрахування роботи пресування проводится за класичною індикаторною діаграмою в такий спосіб. Насамперед відзначимо, що площа індикаторної діаграми – це робота, зроблена механізмом і записана у відповідному масштабі. За площею індикаторної діаграми й за її формою роблять висновки не тільки про величину корисно витраченої роботи, але й про характер несправностей у цій машині.

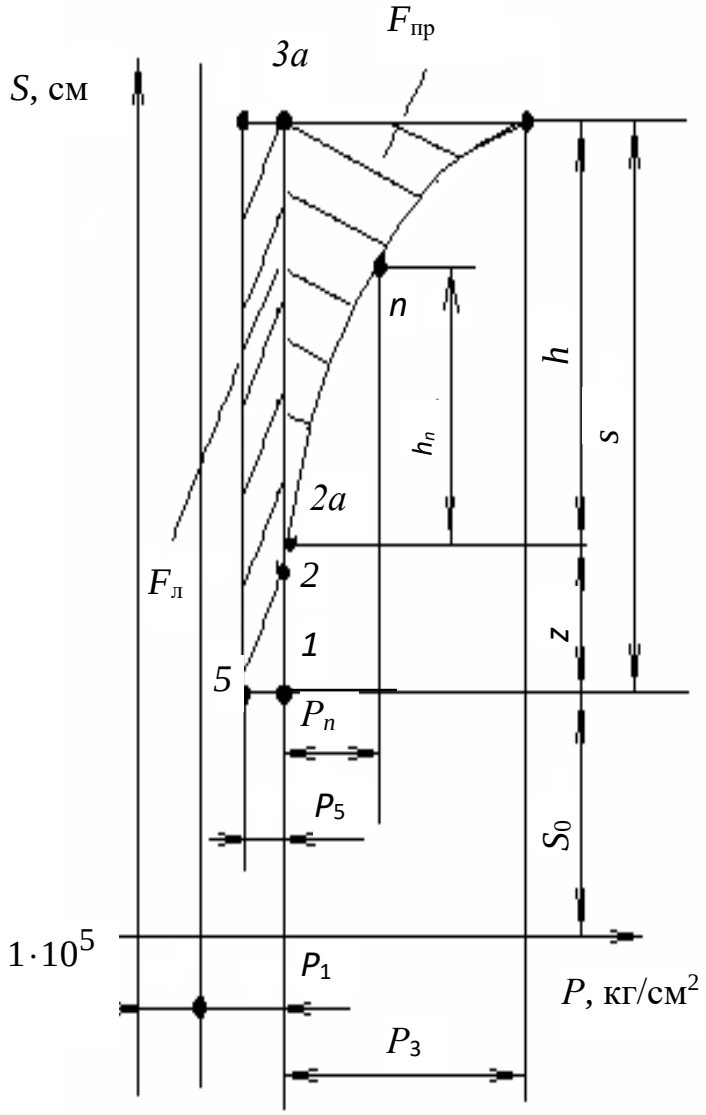


Рис. 2.5. Класична індикаторна діаграма пресового циліндра

Таблиця 2.4 – Пояснення точок індикаторної діаграми

Крапка на діаграмі	Пояснення значення точки
Точка 1	початок підйому поршня
Точка 2	висота підйому поршня, при якій вибирається зазор Z - відстань між наповнювальною рамкою й пресовою колодкою
Точка 2*a*	початок проникнення пресової колодки в об'єм наповнювальної рамки
Точка 3	закінчення процесу пресування, тобто коли пресова колодка переміститься на всю висоту наповнювальної рамки, зможе передати весь об'єм суміші, що перебував у ній, в опоку
Точка 4	тиск повітря в циліндрі різко падає через відкриття вихлопного клапана
Точка 5	повернення поршня у вихідне положення

Загальна площа f_i індикаторної діаграми за рис. 2.5 становить:

$$f_i = S(1–2–2a–3–3a–4–5–1), \quad (2.21)$$

тобто площа дорівнює роботі стисненого повітря, відповідно до 1м^2 площі поршня.

Робота пресування виражається на діаграмі площею $F_{пр}$:

$$F_{пр} = S(2–2a–3–3a–2). \quad (2.22)$$

Робота тертя виражається на діаграмі $F_{лів}$:

$$F_{лів} = S(1–3a–4–5–1). \quad (2.23)$$

Розрахунки витрати стисненого повітря, тобто визначення коефіцієнта корисної дії циліндра (КПД)

$$КПД = F_{пр}/F_{заг.} \quad (2.24)$$

За відношенням $F_{лів}/F_{пр}$, яке має перебувати в межах 0,1...0,15, можна робити висновки про досконалість конструкції пресового поршневого механізму, а також дати рекомендації зі зменшення цього співвідношення, тобто збільшення роботи пресування.

Індикаторну витрату вільного повітря на одне пресування (кубічний метр) з деякими припущеннями можна знайти, якщо з об’єму повітря в точці

3, переведеного на атмосферний тиск, відняти кількість повітря, що залишилося в шкідливому просторі після вихлопу (у точці *5*)

$$V_в = (F_п\, S - V_0)\,(P_0 + 105) - V_0, \qquad (2.25)$$

де $F_п$ – площа пресового поршня, м^2;

S – хід пресового поршня, м^2;

V_0 – об'єм шкідливого простору, м^3;

P_0 – тиск повітря в мережі, Па, P_0 = 5...105 Па.

Перерізу впускного $f_{вп}$ і випускного $f_{вип}$ отворів у пресовому циліндрі мають бути приблизно рівними й визначаються за формулою

$$f_{вп} = f_{вип} = V_{вп} / (\tau_{вп}\, V_{вп}), \qquad (2.26)$$

де $\tau_{вп}$ – час впуску (випуску) повітря в циліндр, $\tau_{вп} = \tau_{вип}$ = 4 с;

$V_{вп}$ – швидкість впуску (випуску) в (з) циліндр (а),

$$V_{вп} = V_{вип} = 20 \text{ м}^3/\text{с}. \qquad (2.27)$$

Кожний блок моделі рис. 2.6 виконує своя дію. Початок алгоритму розрахунків пресового циліндра – це введення вихідних даних. Далі блоки алгоритмічної моделі роблять окремо розрахунки кожної координати точок відповідно до методики побудови індикаторної діаграми пресового циліндра. Після визначення координат точок діаграми необхідно розрахувати площу впускного й випускного отворів. Останній блок – це висновок отриманих результатів, тобто оптимальних конструктивних параметрів: діаметра циліндра, ходу поршня, площі перерізу впускного й випускного отвору. Далі результати розрахунків роздруковуємо.

На рис. 2.6 наведено алгоритмічну модель пресового циліндра.

Опишемо алгоритм побудови діаграми. Розрахування починаємо з уведення вихідних даних: габаритів опок *L,B,H*; $Q_{сум}$ – сумарної сили частин, що піднімаються, машини з корисним навантаженням*;* R – сили тертя поршня об стінки циліндра. Потім відбувається вибір діаметра пресового циліндра: D_n – діаметр пресового циліндра, який залежить від довжини опоки й становить:

$$D_n = (0{,}2 \div 0{,}8) \cdot L\ , \qquad (2.28)$$

де L – довжина опоки.

Чи буде діаметр оптимальним для початкових умов, свідчить тільки аналіз індикаторної діаграми (рис. 2.6), а саме, чи буде КПД машини найбільшим – відношення площ (за побудованою діаграмою) корисної роботи до загальної. Тільки зміна діаметра (у межах установлених обмежень) приведе до одержання оптимального розміру внутрішнього діаметра циліндра.

Наступним параметром, для подальших розрахунків є вибір висоти наповнювальної рамки, яка залежить від висоти опоки:

$$h_{\text{нр}} = 0{,}3 \cdot H, \tag{2.29}$$

де H – висота опоки.

Змінюваним параметром, який впливає на витрату стисненого повітря, є шкідливий простір. Приймаємо шкідливий простір S_0 у межах n від 1 до 5 см, із кроком 0,5

$$S_0 = (n + 0{,}5). \tag{2.30}$$

Далі проводимо розрахування координат точок для побудови індикаторної діаграми пресового циліндра.

Точка 1 відповідає закінченню заповнення повітрям шкідливого простору, має координати S_1 і P_1, при цьому $S_1 = S_0$.

$$P_1 = \frac{Q_{\text{заг}} + R}{F_n} + 1, \tag{2.31}$$

$$F_n = \frac{\pi \cdot D_n^2}{4} \ . \tag{2.32}$$

Точка 2 відповідає висоті підйому поршня й має координати S_2 і P_2:

$$S_2 = S_1 + Z; \tag{2.33}$$

$$P_2 = P_1. \tag{2.34}$$

Змінюваним параметром у цьому випадку є відстань Z від наповнювальної рамки до багатоплунжерної головки, яка змінюється в межах від 1,0 до 15,0 см із кроком 1,0

$$Z = z + 1{,}0 \ . \tag{2.35}$$

На ділянці ходу 1–2 тиск під поршнем не змінюється. Починаючи із точки *2* і до кінця ходу вверх, відбувається пресування форми, і тиск під пресовим поршнем зростає зі збільшенням опору форми ущільненню.

Якщо початкова густина суміші була $\delta_0 = 1{,}2$ кг/см^3, то опір форми ущільненню в початковий момент пресування $P_0 = 0$.

Лінія пресування індикаторної діаграми покаже плавне наростання тиску від точки *2* до точок *2*, *а* й *3*.

Якщо початкова густина суміші $\delta > 1{,}2$ кг/см^3, то опір форми ущільненню в початковий момент пресування не дорівнює нулю й відповідає

$$P_0 = \left(\frac{\delta_0 - 1}{C} \right)^4 . \qquad (2.36)$$

У цьому випадку в момент початку пресування на індикаторній діаграмі вийде стрибок тиску в циліндрі відповідно до цієї величини P_0 між точками *2* і *2, а* діаграми.

Точка *2, а* відповідає впровадженню пресової колодки в об'єм наповнювальної рамки й має координати:

$$S_{2a} = S_2;$$

$$P_{2,a} = P_2 + \left(\frac{\sigma_o - 1}{C} \right)^4 \cdot \left(\frac{F_{оп}}{F} \right). \qquad (2.37)$$

При розрахунках координат цієї точки використовуємо питому вагу $\sigma_0 = 1{,}2$ кг/см^3 і змінюваний параметр – коефіцієнт ущільненості C:

$$C = c + 0{,}05 = 0{,}6 . \qquad (2.38)$$

Точка *3* відповідає закінченню процесу пресування й має координати S_3 і P_3

$$S_3 = h_{нр};\ P_3 = P_2 + \left(\frac{\sigma - 1}{C} \right)^4 \cdot \left(\frac{F_{оп}}{F_п} \right) . \qquad (2.39).$$

Отже, після процесу пресування можемо одержати остаточну густину δ у межах від 1,6 до 1,9 кг/см^3, а при складанні алгоритму перерахування проводимо із кроком 0,1, тобто

$$\delta = \delta_0 + 0{,}1. \qquad (2.40)$$

Точка 4 відповідає відкриттю вихлопного клапана, і координати S_4 і P_4 розраховуємо за формулами

$$S_4 = S_3;\ \ P_4 = 1 + \frac{Q - R}{F_п}. \qquad (2.41)$$

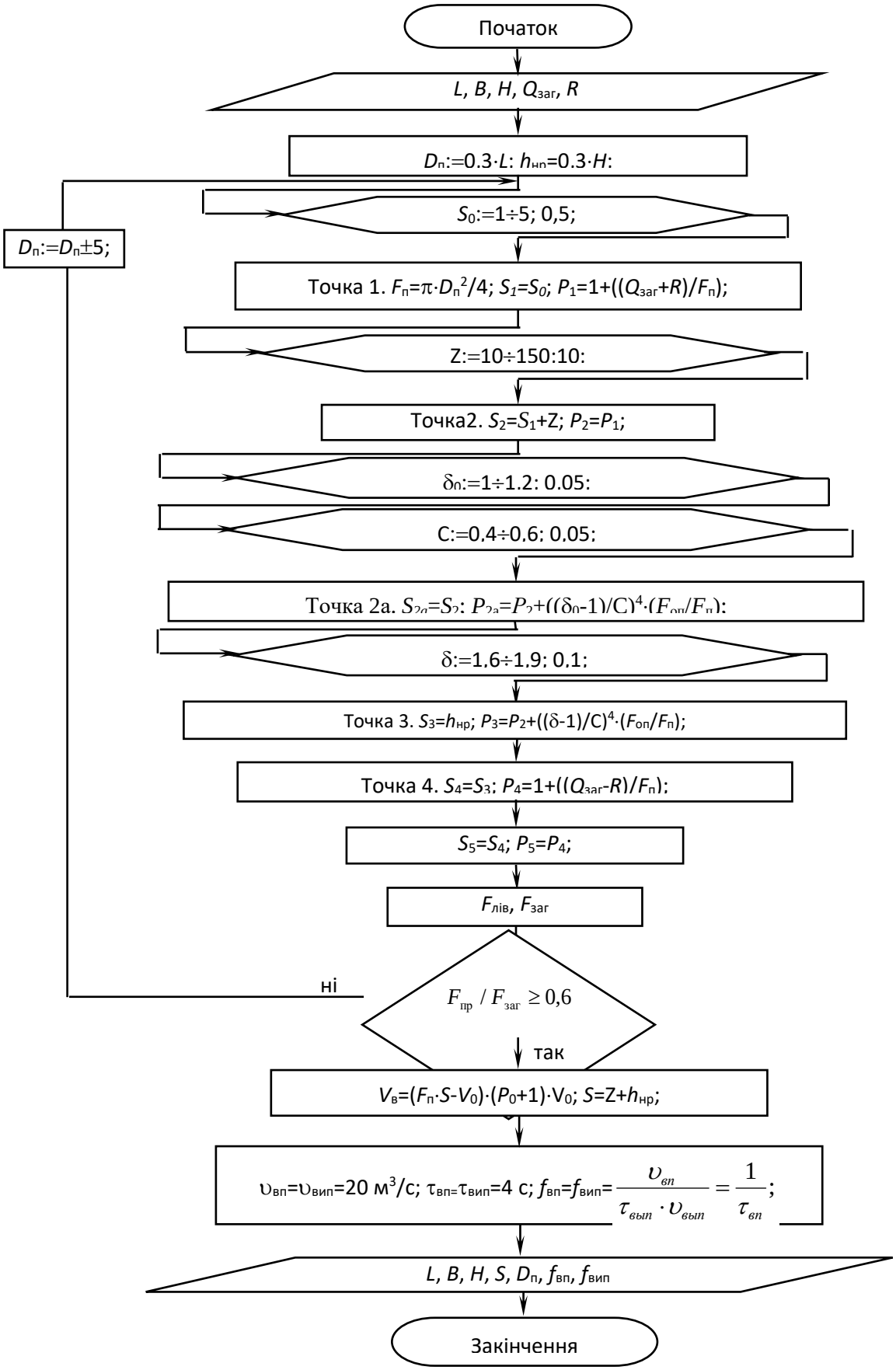


Рис. 2.6. Алгоритмічна модель розрахунків пресового циліндра

Точка 5 відповідає опусканню поршня у вихідне положення, й координати S_5 і P_5 набувають значення:

$$S_5 = S_4;\ P_5 = P_4. \tag{2.42}$$

Оцінкою роботи пресового циліндра є співвідношення площ індикаторної діаграми (рис. 6)

$$\frac{F_{\text{пр}}}{F_{\text{общ}}} \geq 0{,}6 \quad , \tag{2.43}$$

де $F_{\text{заг}}$ – загальна площа індикаторної діаграми, од. пл.;

$F_{\text{пр}}$ – площа роботи пресування, од. пл.

Результат співвідношення є коефіцієнтом корисної дії механізму, який у свою чергу не повинен перевищувати 60 %. Якщо умова не виконується, то розрахунки проводимо зі зміненим кроком за кожним параметром, що розраховується.

Для більш точного дослідження параметрів пресового циліндра проведемо оптимізацію основних факторів, що впливають на ці розрахунки. Для визначення оптимальних факторів скористаємося пакетом Statistic. Результати параметрів оптимізації зводимо до табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Параметри оптимізації

Фактори	Інтервал варіювання			крок
	основний	нижній	верхній	
$D_{\text{п}}$	0,5	0,2	0,8	0,05
S_0	3	1	5	0,5
Z	8	1	15	1,0
δ	1,75	1,6	1,9	0,1
C	0,5	0,4	0,6	0,05

Досліди проводили багато разів, тому в підсумку можна було розпізнати, які помилки було зроблено в експерименті. За методикою пакета програм Statistic підрахували коефіцієнт регресії кожного фактора окремо. Фактори, що незначно впливають на параметр оптимізації, тобто коефіцієнт регресії

менший за довірчий інтервал, відсівали. Таким чином, найкращі результати звели в табл. 2.5 у графу 2 для всіх факторів. При цьому дисперсія відтворюваності лінійного наближення для основних факторів не перевищує табличного значення критерію Фішера при 5 %-му рівні значущості [10]. Фактори набувають значення:

$$D_{\text{п}} = 0{,}5 \cdot L;$$

$$S_0 = 3 \text{ см};$$

$$\delta = 1{,}75 \text{ кг/см}^3;$$

$$Z = 0{,}5.$$

Після одержання оптимальних значень ходу поршня, діаметра циліндра знаходимо площі перерізу впускного й випускного отворів, які однакові між собою й розраховуються за формулою:

$$f_{\text{вп}} = f_{\text{вип}} = \frac{\upsilon_{\text{вп}}}{\tau_{\text{вп}} \cdot \upsilon_{\text{вп}}}, \qquad (2.44)$$

де $\tau_{\text{вп}}$ – час впуску (випуску) повітря в циліндр, $\tau_{\text{вп}} = \tau_{\text{вип}}$, с;

$\upsilon_{\text{вп}}$ – швидкість впуску (випуску) в (з) циліндр, $\upsilon_{\text{вп}} = \upsilon_{\text{вип}}$, м/с.

Таким чином, отримані результати виводимо на друк, й тим самим алгоритмічна модель закінчує працювати. Усі координати для побудови індикаторної діаграми подаємо в табл. 2.6.

Таблиця 2.6 – Побудова індикаторної діаграми пресового циліндра

Назва точок	Дослід					
	S, см	P, г/см^2	S, см	P, г/см^2	S, см	P, г/см^2
1	2	3	4	5	6	7
Точка 1. Закінчення заповнення повітрям об’єму шкідливого простору	5,0	83,0	3,0	66,0	2,0	54,0
Точка 2. Висота підйому поршня	13,0	83,0	11,0	66,0	10,0	54,0

Продовження табл.. 2.6

1	2	3	4	5	6	7
Точка 2, *а*. Відповідає проникненню пресової колодки в об'єм наповнювальної рамки	13,0	83,0	11,0	66,0	10,0	54,0
Точка 3. Закінчення процесу пресування	25,0	109,0	23,0	95,0	22,0	80,0
Точка 4. Відкриття вихлопного клапана	25,0	68,0	23,0	58,0	22,0	42,0
Точка 5. Опускання поршня у вихідне положення	5,0	68,0	3,0	58,0	2,0	42,0
Діаметр циліндра Відношення $F_{пр}/F_{лів}$	80,0 0,51		85,0 0,62		90,0 0,65	

За отриманим даними координат точок, користуючись авторською програмою, будуємо індикаторну діаграму пресового механізму (рис. 2.7), за якою визначаємо оптимальний діаметр пресового циліндра і його інші розміри.

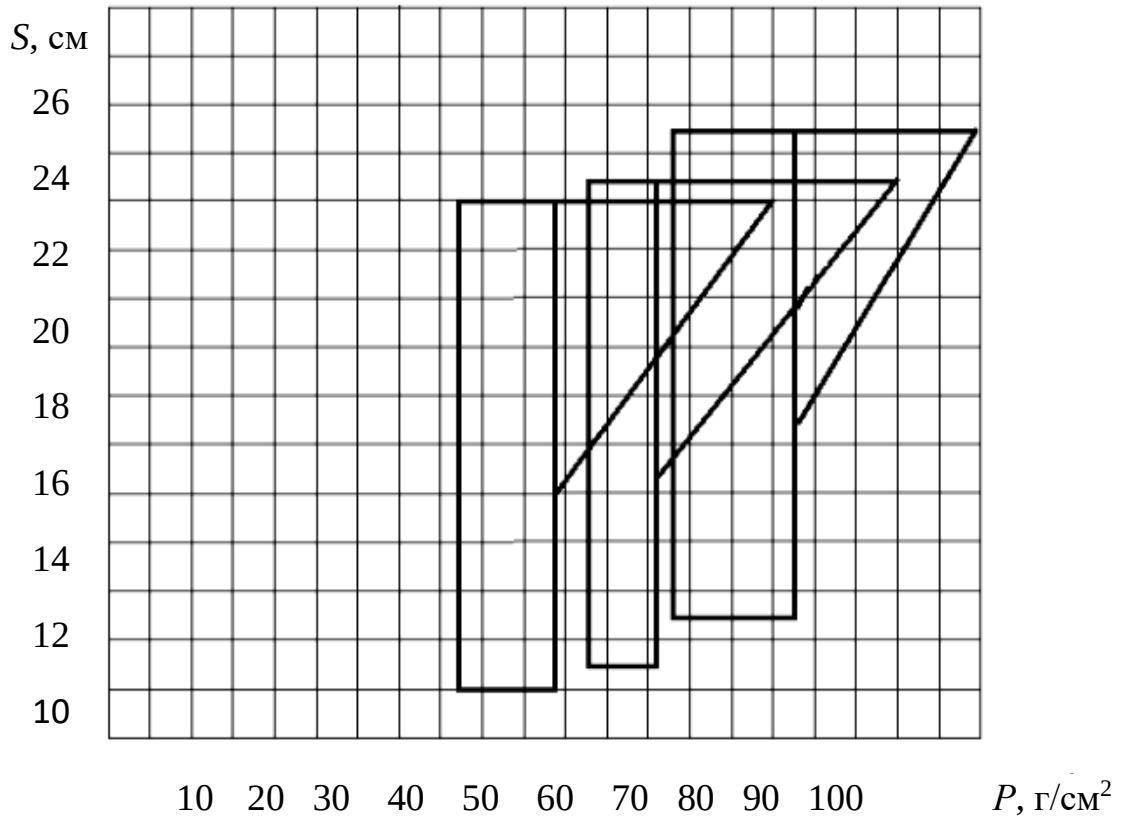


Рис. 2.7. Індикаторна діаграма пресового механізму

Оптимальний діаметр визначається в три етапи:

1 – приймаємо розмір діаметра поршня. Згідно з методикою, описаною вище, точка 1, прямо пов'язана із цим розміром, одержить своє місце на діаграмі. Відповідно інші крапки вибудують індикаторну діаграму, за площами якої можна вирахувати КПД циліндра.

2 – змінимо прийнятий параметр убік зменшення. Повторимо всі розрахунки й знову вираховуємо КПД. Якщо одержали збільшення КПД, те потрібно знову спробувати зменшити призначений діаметр циліндра. Якщо к.п.д. збільшився, то переходимо до наступного етапу роботи.

3 – змінемо прийнятий параметр (діаметр поршня) у бік збільшення, проведемо розрахунки, побудуємо діаграму, порахуємо КПД.

Виберемо варіант, що приводить до найбільшого КПД циліндра. Це й буде оптимальний параметр. Після побудови індикаторної діаграми проводиться її аналіз.

Спочатку вираховують КПД пресового механізму, для цього вираховуються площі діаграми (по клітинках на схемі – у відносних одиницях), що відповідають корисній (робота пресування) і шкідливій роботі (робота тертя).

Потім змінюємо холостий хід (по черзі зменшити, збільшити). Щоразу накреслюючи відповідну змінену діаграму й прораховуючи нові КПД, можна вибрати той хід, який приводить до збільшення КПД. Аналогічно проробити зміни шкідливого простору пресового циліндра. Вибрати те значення, яке приведе до підвищення КПД. Потім провести головну зміну – внутрішнього діаметра пресового циліндра (увага – діаметр циліндра пов'язаний із координатою точки 1). Вибрати те значення, яке приведе до підвищення КПД. Далі порахувати індикаторну витрату стисненого повітря й діаметри впускного й випускного отворів. За розрахунковими параметрами вичертити виходить оптимальну модель пресового механізму.

Ця методика закладена в алгоритм розрахунків оптимального пресового циліндра й проводиться за авторською програмою PRESS, тому на рис. 2.7 зображена не одна індикаторна діаграма, а три (залежно від кількості змінюваних параметрів), потрібно тільки вибрати варіант, що приводить до підвищення КПД.

2.3.3. Побудова алгоритмічних моделей струшувального циліндра

Перебіг міркувань для побудови алгоритмічної моделі аналогічний попередньому. Тому розглянемо класичний варіант побудови індикаторної діаграми.

Індикаторну діаграму, отриману за методом наближеної побудови за дослідними даними, розроблено П.Н. Аксьоновим щодо умов струшувального механізму з відсіканням і розширенням повітря (рис. 2.8) у координатах P – S, тобто розглянутий процес зміни тиску в механізмі щодо площі поршня, де S – висотні параметри механізму.

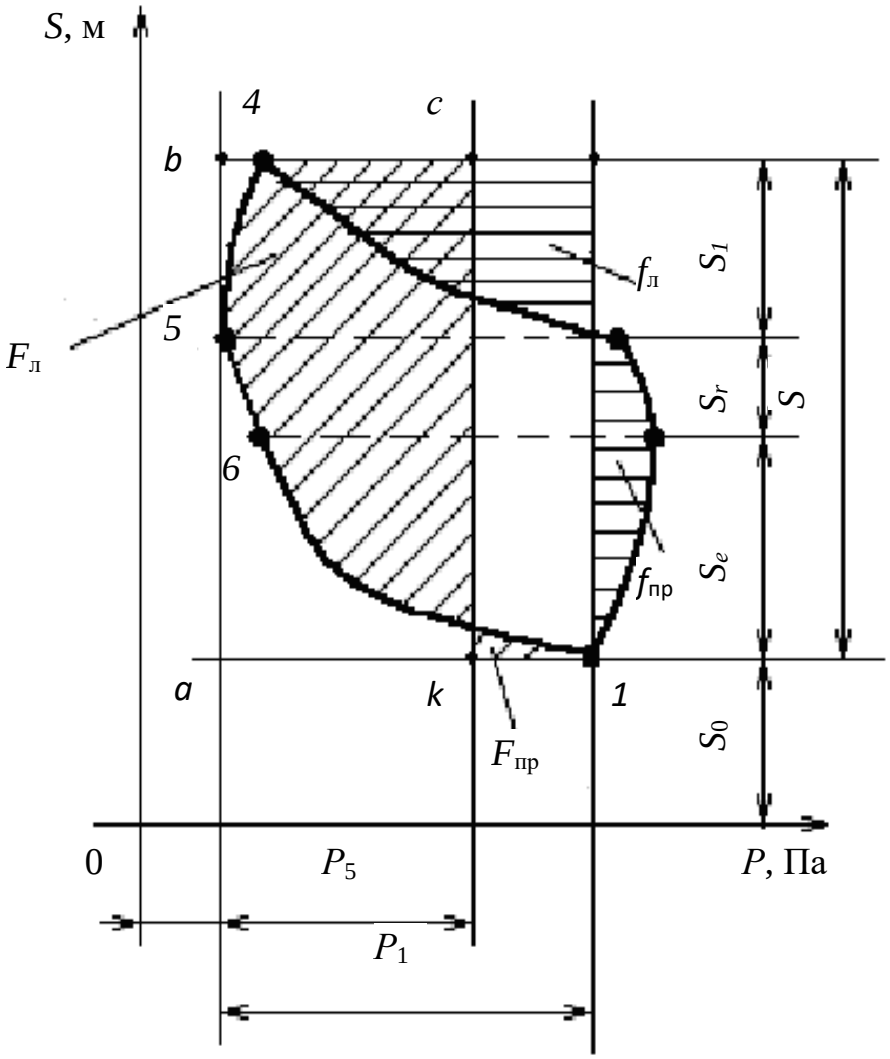


Рис. 2.8. Класична індикаторна діаграма струшу вального циліндра з відсіканням і розширенням повітря

Опис діаграми. Точка 1 діаграми відповідає закінченню заповнення повітрям об’єму шкідливого простору V_0, кубічний метр у циліндрі. Ордината точки 1 – S_1 відповідає наведеній висоті шкідливого простору S_0:

$$S_1 = S_0 = V_0/F_{\text{п}}, \tag{2.45}$$

де $F_{\text{п}}$ – площа поршня, м^2.

Для машини з поршневим повітророзподіленням S_0 зазвичай приймають (0,5...1,0)S, де S – повний хід поршня.

Тиск повітря на поршень має подолати загальну силу ваги частин машини, що піднімаються з корисним навантаженням $Q_{общ}$:

$$Q_{общ} = Q_1 + Q_2 + Q_3, \quad (2.46)$$

де Q_1 – маса оснащення,

$$Q_1 = (a \cdot b \cdot h)\, \gamma_м, \quad (2.47)$$

де a, b, h – габарити опоки;

$\gamma_м$ – густина металу опоки;

Q_2 – маса суміші, кг,

$$Q_2 = (a \cdot b \cdot h)\, \gamma_с ; \quad (2.48)$$

де $\gamma_с$ – питома вага суміші, кг/м^3;

Q_3 – маса частин, що піднімаються, машини; приймаємо

$$Q_3 = 0{,}25(Q_1 + Q_2). \quad (2.49)$$

Тоді тиск повітря на поршень перед початком його підйому має становити P_1, Па:

$$P_1 = ((Q_{общ} + R)/F_п), \quad (2.50)$$

де R – сила тертя поршня об стінки циліндра

$$R = 0{,}25\, Q_{заг}. \quad (2.51)$$

Точка 2 діаграми відповідає моменту закриття впускного отвору, тобто закінченню наповнення циліндра повітрям і початку розширення повітря. Тиск повітря P_2 має бути меншим або рівним P_0 (тиск стисненого повітря в мережі) і становить:

$$P_2 = P_1 + (0{,}5..1{,}0). \quad (2.52)$$

Ордината крапки 2:

$$S_2 = S_0 + Se, \tag{2.53}$$

де Se – довжина ходу поршня, при якій циліндр наповнюється стисненим повітрям,

$$Se = (0{,}4...0{,}5)\ S. \tag{2.54}$$

На ділянці 1–2 діаграми лінія буде мати параболічний вигляд, тому що швидкість поршня в період наповнення зростає.

Точка 3 діаграми відповідає моменту відкриття впускного отвору. На ділянці 2–3 відбувається розширення повітря. Ступінь розширення в струшувальних машинах зазвичай невеликий. Шлях розширення Sr здебільшого становить (0,2...0,4) Se шляху наповнення. Тиск повітря в точці 3:

$$P_3 = P_2[(S_0 + Se)/(S_0 + Se + Sr)]^k \quad . \tag{2.55}$$

Внаслідок швидкоплинності процесу приймаємо, що зміна стану повітря буде адіабатичною, де k =1,41 – показник адіабати.

Ордината точки 3.

$$S_3 = S_o + Se + Sr. \tag{2.56}$$

На ділянці діаграми 3–4 при відкритому випускному отворі й відсутності припливу повітря з мережі поршень продовжує рухатися вверх за рахунок сил інерції. Шлях, який проходить поршень по інерції:

$$S_i = S_o - (Se + Sr) = (0{,}6...0{,}7)\ S. \tag{2.57}$$

Точка 4 діаграми відповідає моменту, коли поршень, використавши весь запас переданої йому енергії, зупиняється й починає падати. Тиск у точці 4 приймається:

$$P_4 \le \left(1 + \frac{(Q - R)}{F_п}\right) \cdot 105. \tag{2.58}$$

Ордината точки 4:

$$S_4 = S_0 + Se + Sr + S. \tag{2.59}$$

Точка 5 діаграми відповідає моменту закриття випускного отвору при русі поршня вниз. Тиск повітря зазвичай не перевищує:

$$P_5 = [1+(0{,}1 - 0{,}15)]\cdot 105 \tag{2.60}$$

Положення поршня відповідає ординаті:

$$S_5 = S_3 = S_0+Se+Sr \tag{2.61}$$

Точка 6 діаграми відповідає моменту, в який відкривається впускний отвір, і циліндр починає наповнюватися стисненим повітрям. На ділянці 5–6 повітря в циліндрі стискується, причому тиск його в цей момент може бути визначений так само, як і для точки 3:

$$P_6 = P_5\cdot\left(\frac{(S_0 + Se + Sr)}{(S_0 + Se)}\right)\cdot k \tag{2.62}$$

$$S_6 = S_0 + Se. \tag{2.63}$$

На ділянці 6–1 діаграми циліндр наповнюється повітрям, тиск на поршень зростає й після досягнення ним значення P_1 починає підніматися. Описаний цикл повторюється.

Побудова алгоритмічної моделі струшувального циліндра полягає в побудові його індикаторної діаграми. Кожний блок алгоритмічної моделі виконує свою дію (рис. 2.9). Спочатку здійснюється введення вихідних даних. Далі блоки здійснюють розрахування кожної координати точки окремо. У підсумку одержали координати точок індикаторної діаграми. При її побудові одержуємо також площі, які виражають роботу рушійних сил і сил опору.

Енергія удару e є різницею площ:

$$e = F_{\text{лев}} - F_{\text{пр}}. \tag{2.64}$$

Енергія відбиття e' це різниця площ:

$$e' = f_{\text{лев}} - f_{\text{пр}}. \tag{2.65}$$

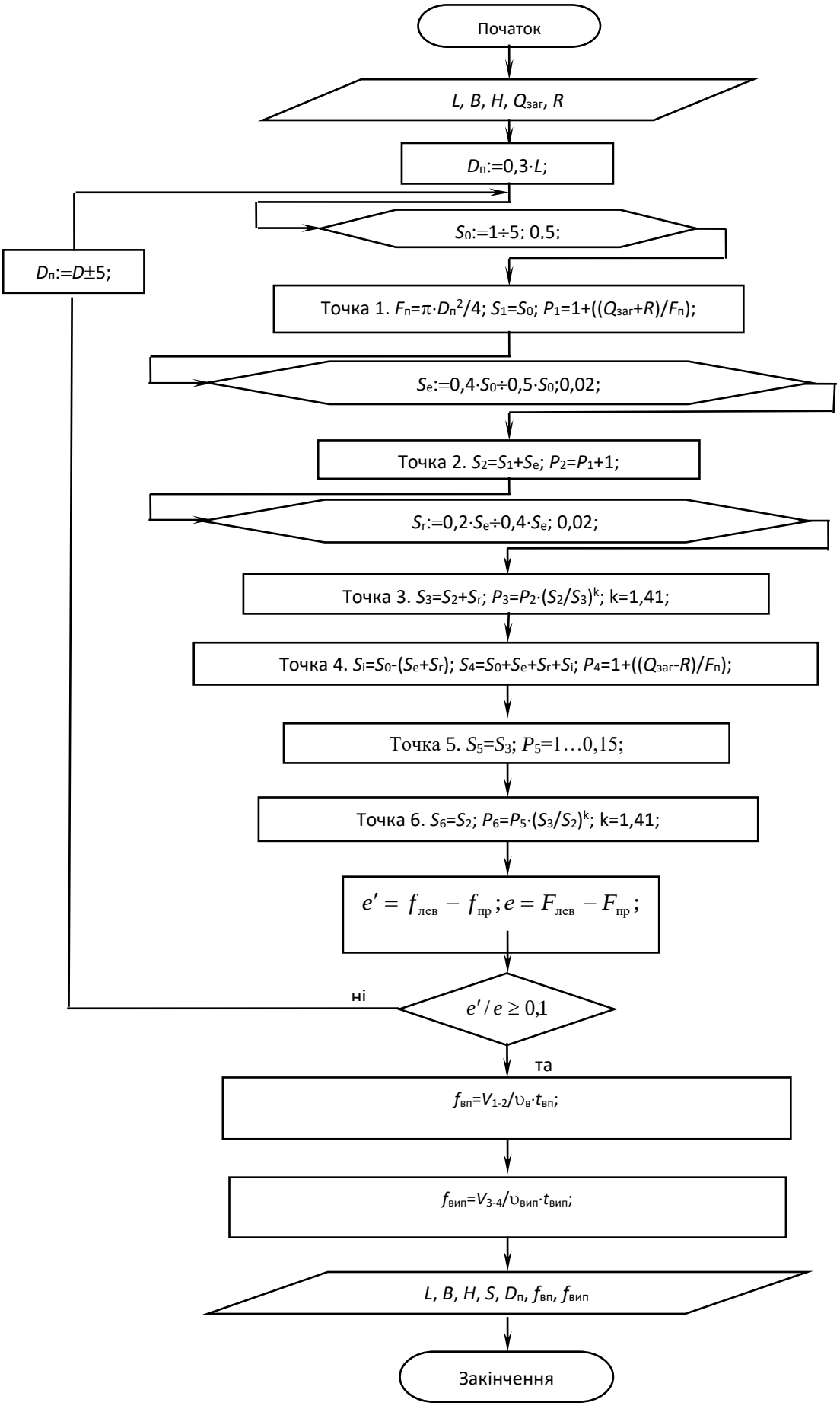


Рис. 2.9. Алгоритмічна модель струшувального циліндра

Критерієм оцінки роботи струшувального циліндра є співвідношення енергії удару й енергії відбиття:

$$\frac{e'}{e} = 0{,}1. \qquad (2.66)$$

На основі алгоритму складено програму для спрощення розрахунків. Якщо критерій при розрахунках не виконується, то програма проводить перерахування доти, доки умова не виконається.

Після проведення розрахунків одержуємо оптимальні конструктивні параметри струшувального циліндра: діаметр циліндра, хід, площу перерізу впускного й випускного отвору. Далі результати розрахунків роздруковують. Для проведення аналізу діаграми проводять ще два розрахунки за інших значень вихідних даних шкідливого простору циліндра й діаметра струшувального циліндра (збільшуючи або зменшуючи щодо заданого – це координати точки 1).

У результаті одержуємо (рис. 2.10) три варіанти індикаторної діаграми струшувального циліндра, з яких вибирається оптимальний варіант.

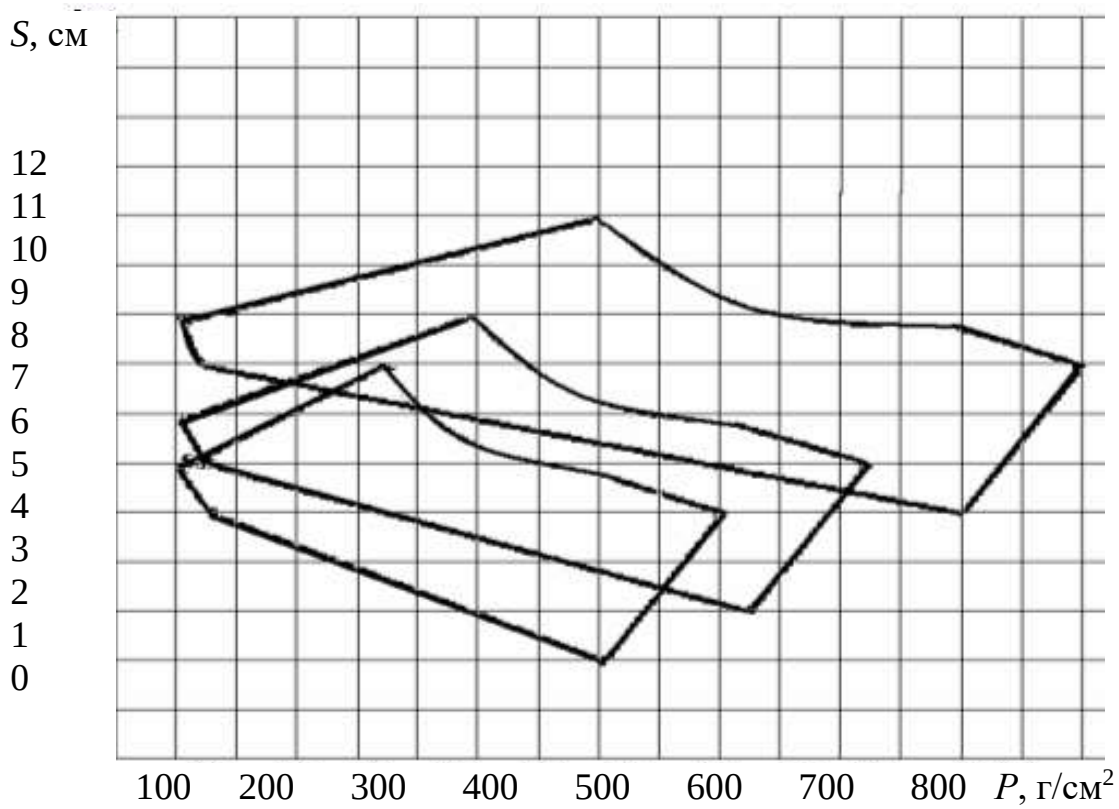


Рис. 2.10. Індикаторна діаграма струшувального механізму

Оптимальність розуміють як різницю площ енергій ущільнення й

відбиття, що збільшуються. Розрахунки можна зробити за запропонованим алгоритмом на ПЕВМ за допомогою авторської програми FORMOVKA.

2.3.4. Побудова алгоритмічних моделей станини й траверси

Алгоритмічна модель – це послідовність розрахунків. Кожний блок алгоритмічної моделі виконує свою дію. Перший блок – це блок уведення вихідних даних. Попередньо з банку даних вибирається вид конструкції. Умовно приймається конструкція у вигляді балки, закріпленої на кінцях. В основі розрахунків опорів матеріалів [4] є небезпечний переріз. Далі в блоках розраховується момент інерції, момент опору небезпечного перерізу й напруга в небезпечному перерізі. Порівнюється отриманий результат із довідковими даними [6], і робиться висновок, чи зможе витримати обраний вид станини або траверси необхідні навантаження. Якщо результат улаштовує конструктора, то в останньому блоці йде збір даних. Далі результати розрахунків роздруковують. На рис. 2.11 наведено алгоритмічну модель розрахування станини й траверси.

2.3.5. Побудова алгоритмічних моделей колони

Алгоритмічна модель являє собою блок-схему, за якою зроблено розрахування з певною послідовністю. Перший блок – це блок уведення вихідних даних. Потім конструктор здійснює вибір перерізу конструкції колони. Далі за блоками розраховується момент інерції, момент опору виду перерізу й напруга в перерізі. Отриманий результат порівнюється з літературними даними [6], і робиться висновок, чи зможе витримати обраний вид перерізу необхідні навантаження. Якщо результат задовільний, то в останньому блоці здійснюється збір результатів розрахунків, які потім роздруковують.

На рис. 2.12 наведено алгоритмічну модель розрахування колон струшувально-пресової машини. Провівши розрахування всіх вузлів формувальної машини, і вибравши при цьому оптимальний варіант, одержуємо основні параметри конструкції.

При розрахуванні кожний вузол конструкції струшувально-пресової машини перевірявся щодо одного із критеріїв надійності. Наприклад, при розрахуванні пресового циліндра випробовується, чи досягає робота вузла необхідного коефіцієнта корисної дії. При розрахуванніх станини й траверси перевіряється, міцність вузлів, що є однією з характеристик довговічності. При розрахуванні колон перевіряється міцність і технологічність конструкції, точність і взаємозамінністьі частин та ін. Отже, чим точніше буде зроблено

розрахування вузлів, тим точніше буде складено машину, тим вищою буде її експлуатаційна надійність.

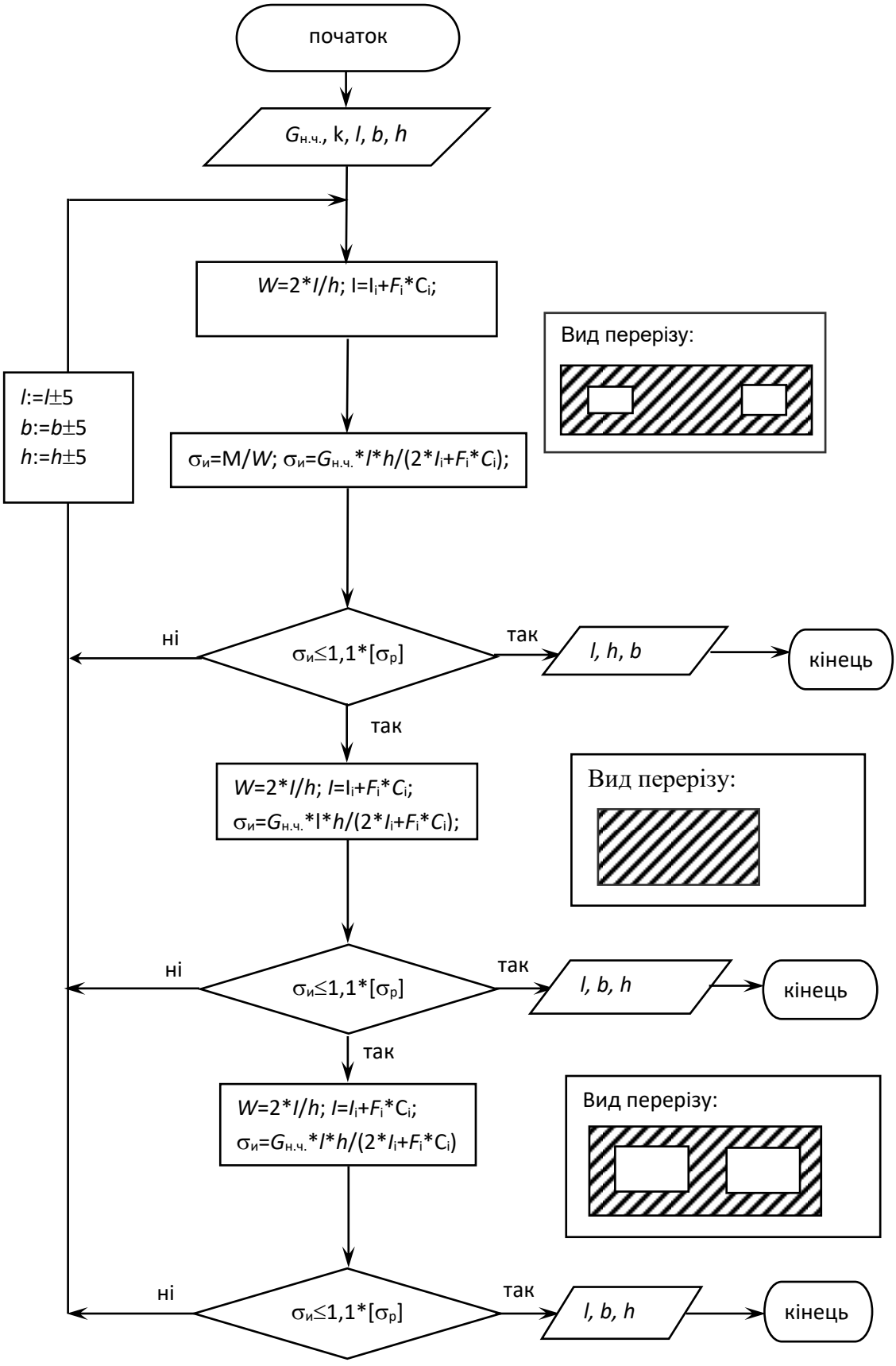


Рис. 2.11. Алгоритмічна модель розрахування станини й траверси

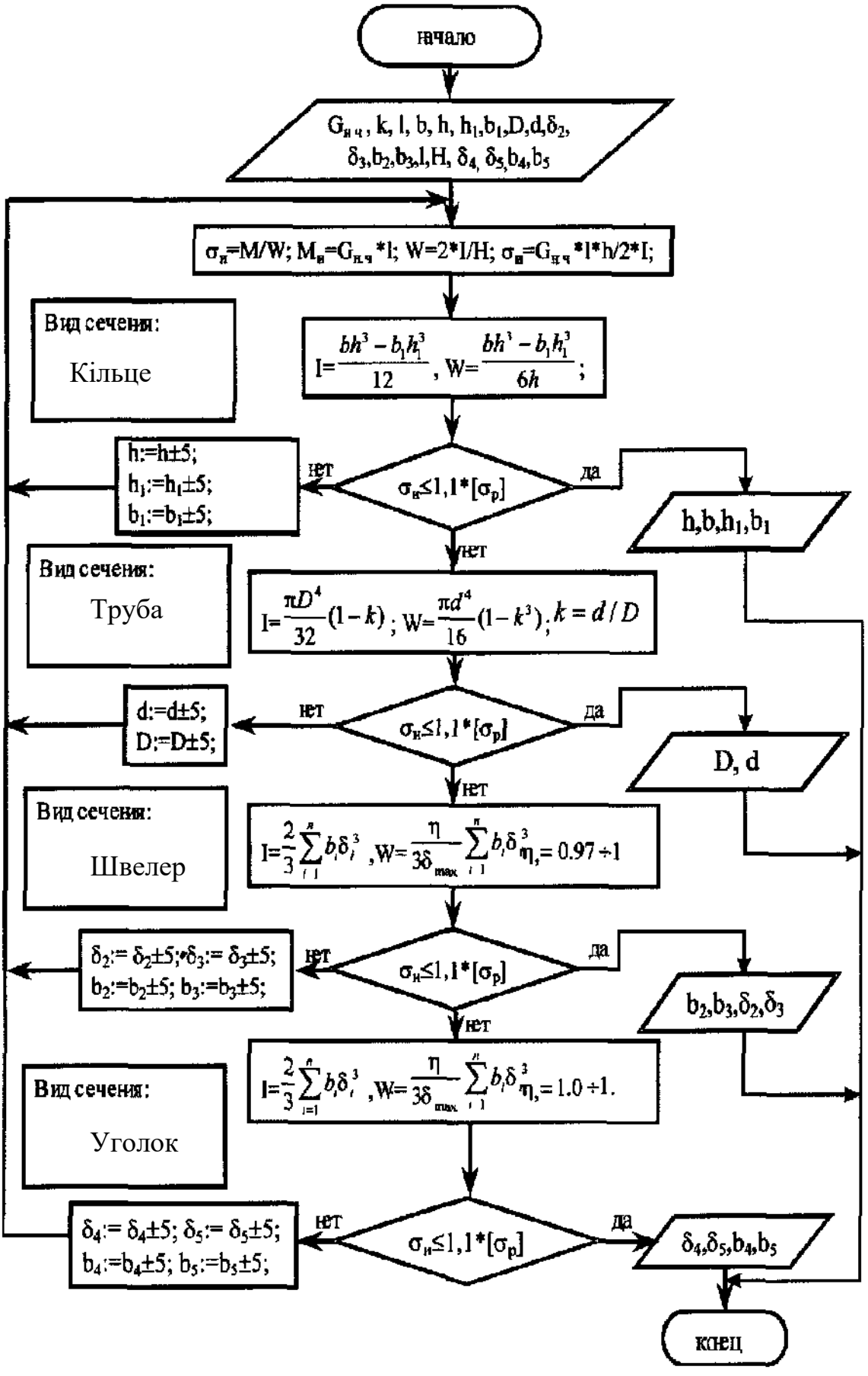


Рис. 2.12. Алгоритмічна модель розрахунків колон

2.4. Методика автоматизованого проектування імпульсної машини. Критичний аналіз конструкцій імпульсних формувальних машин

Створення ливарних форм імпульсним способом як високим, так і низьким тиском повітря залишається завдяки своїй універсальності, як і раніше, перспективним способом формоутворення. Це виявляється в можливості використання способу для всіх типів виливків, виготовлених в опоках різних габаритів за моделями різної складності, з використанням найбільш дешевої й популярної піщано-глинистої суміші, а також можливості повної автоматизації виробництва виливків навіть у різносерійному виробництві.

2.4.1. Вибір способу повітряно-імпульсного виготовлення півформи

У цей час вітчизняне ливарне виробництво перебуває в кризовому стані щодо якості вироблених заготовок, а також загальної техніко-економічної й соціально-економічної ситуації, що відбивається в промисловості нестабільністю виробництва, дорожнечею продукції, низькою її якістю й, як наслідок – загальною неконкурентноспроможністю.

Вироблені виливки за складністю, точністю, товарним виглядом не відповідають вимогам сучасного машинобудування. Задоволення потреби в литих заготовках із поліпшенням їх якості, підвищенням техніко-економічних показників виробництва, поліпшенням санітарно-гігієнічних умов праці є об'єктивно необхідним. Ціль може бути досягнута шляхом технічного переоснащення виробництва на основі впровадження формувальних машин, формувальних блоків і комплексно-механізованих ліній імпульсного формування, а також заміни існуючих формувальних машин і автоматів пресового або струшувальної дії на устаткування повітряно-імпульсного способу ущільнення суміші.

Процес повітряно-імпульсного формоутворення забезпечує:

- стабільну повторюваність ущільнення незалежно від конфігурації моделі;
- зниження маси виливків (у середньому на 12...18 %) за рахунок підвищення розмірної точності форми, раціонального розподілу густину суміші по висоті півформи;
- зниження браку через форму (у середньому на 5...7%);
- зниження трудомісткості з очищення литва;
- зберігаються існуючі моделі й формувальні суміші;
- відсутність необхідності переналагодження устаткування при переході на іншу номенклатуру

Перевага повітряно-імпульсного формування над традиційними способами формоутворення особливо виявляється в цей час в умовах загострення конкурентної боротьби на ринку заготовок.

У цей час багато фірм пропонують поєднання повітряного імпульсу з наступним пресуванням. От що пише у своєму рекламному проспекті фірма HWS про метод СЕЙАТСУ. «Після ущільнення стисненим повітрям усередині форми досягається рівномірне ущільнення, яке не досягається ніяким іншим методом. Шар піску над моделлю майже не ущільнюється, при наступному пресуванні він буде настільки стиснутий, що досягається додаткове ущільнення й нижнього шару».

Нові економічні умови потребують пошуку шляхів скорочення вартості розроблюванного устаткування за рахунок постійного вдосконалення конструкцій машин і їх вузлів, тому сучасні підприємства виконують конструкторську роботу з використанням комп'ютерної техніки й нових технологій. Один із таких шляхів і пропонують автори цієї роботи.

2.4.2. Імпульсні машини високого тиску

В останні роки накопичений значний досвід у галузі створення імпульсних машин із різним тиском для формоутворення: високого – 5...10 МПа й низького – 0,5...1,0 МПа. Краматорськими підприємствами був зроблений істотний внесок у справу подальшого розвитку імпульсної технології. Так, у 80–90-ті роки Краматорським науково-дослідним інститутом НІІПТМАШ було створено уніфіковану гаму блок-ліній, що дозволило економіти не тільки за рахунок впровадження прогресивного формувального устаткування, але й за рахунок зниження витрат на проектування [5,9]. Технічні характеристики базових моделей гами блок-ліній наведено в табл. 2.7.

Таблиця 2.7 – Базові моделі гами імпульсних блок-ліній високого тиску

Моделі машин і їх параметри	Технічні дані відомих моделей					
	Л22813	Л22815	Л22816	Л22817	Л22818	Л22819
1	2	3	4	5	6	7
Габарити опок, мм						
довжина	800	1000	1200	1600	2000	3000
ширина	700	800	1000	1200	1600	2000
висота	200...400	200...500	200...600	350...700	400...800	500...1000

Продовження табл.. 2.7

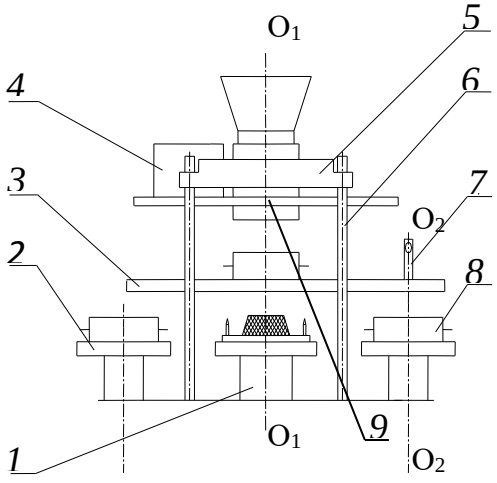
1	2	3	4	5	6	7
Продуктивність, ф/год	128	128	100	70	40	20
Робочий тиск ущільнення, МПа	6…7	6…8	7…10	9…10	9…12	10…12
Витрата повітря, $м^3/кг$	320	320	450	450	630	630
Привід	Гідравлічний і електричний					
Режим роботи	Налагоджувальний і автоматичний					
Габаритні розміри лінії, м	17×7××4,5	17×9××4,5	12×8××5,0	12×8,5××5,5	13×10××6	16×10×6
Маса лінії, т	49	50	80	155	170	200

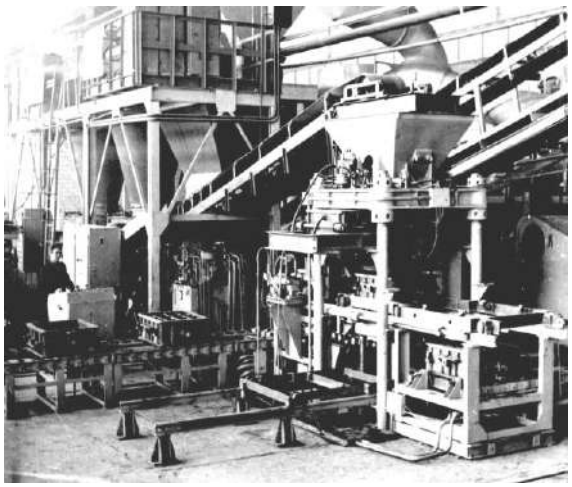
Однопозиційна імпульсна машина – найпоширеніша й проста модель, виконана за принципом агрегатування, тобто має вузлове складання, тому в літературі зустрічається її назва імпульсний агрегат. У цій моделі вперше всі технологічні операції виконувалися механізмами.

Частина підготовчих операцій виконувалася паралельно, а саме:

– подача (і зміна) модельних плит на робочий стіл *1* (рис. 2.13);

– пересування на траверсі човника *4* так, що на робочу позицію 01–01 установлюється дозатор, заповнений формувальною сумішшю (головка переміщається на запасну позицію на траверсі *5* і заповнюється стисненим повітрям);





б

Рис. 2.13. Схема (а) і загальний вигляд (б) імпульсного однопозиційного агрегату для дрібних опок: 1 – робочий стіл; 2 – піднімальний стіл порожніх опок; 3 – рольганг подачі порожніх опок; 4 – човник дозатор – імпульсна головка; 5 – траверса; 6 – колони; 7 – кантувач; 8 – приймальний стіл готових півформ; 9 – наповнювальна рамка

– подача порожніх опок на піднімальний стіл 2 і пересування їх по рольгангові *3* до робочої позиції (вісь 01–01), за якою потім проходять усі основні операції – складання оснащення (модельної плити з порожньою опокою й наповнювальною рамкою *9*, яку підвішено під траверсою *5* на своїх кронштейнах-циліндрах).

Після заповнення оснащення сумішшю, усі механізми машини працюють послідовно:

– циліндр робочого стола *1* опускається вниз на невеликий хід 5...10 мм (хід циліндра, на якому підвішена наповнювальна рамка *9*), щоб дати вільно перемістити човнику *4* свої агрегати так, щоб на робочу позицію 01–01 замість дозатора надійшла імпульсна головка;

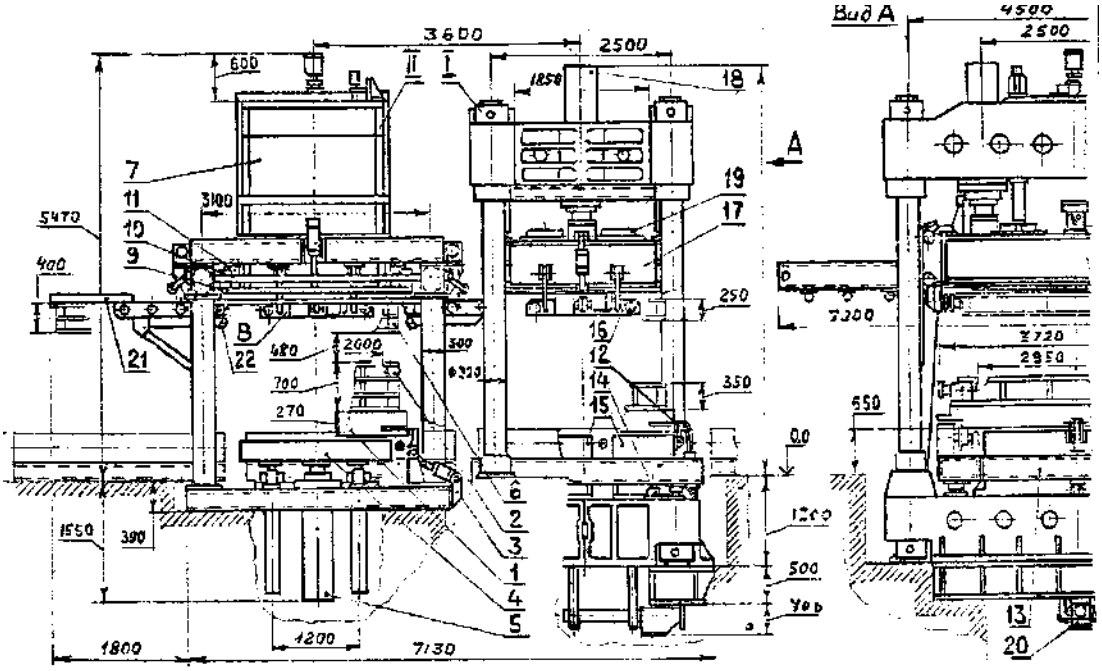
– потім циліндр стола *1* підтискає оснащення до головки, відбувається постріл, суміш ущільнюється;

– після цього всі механізми вертаються у вихідне положення, і при цьому відбувається протягання моделі, тому що модельна плита йде на початкову позицію, а готова півформа залишається на рольгангу *3* на місці порожньої опоки;

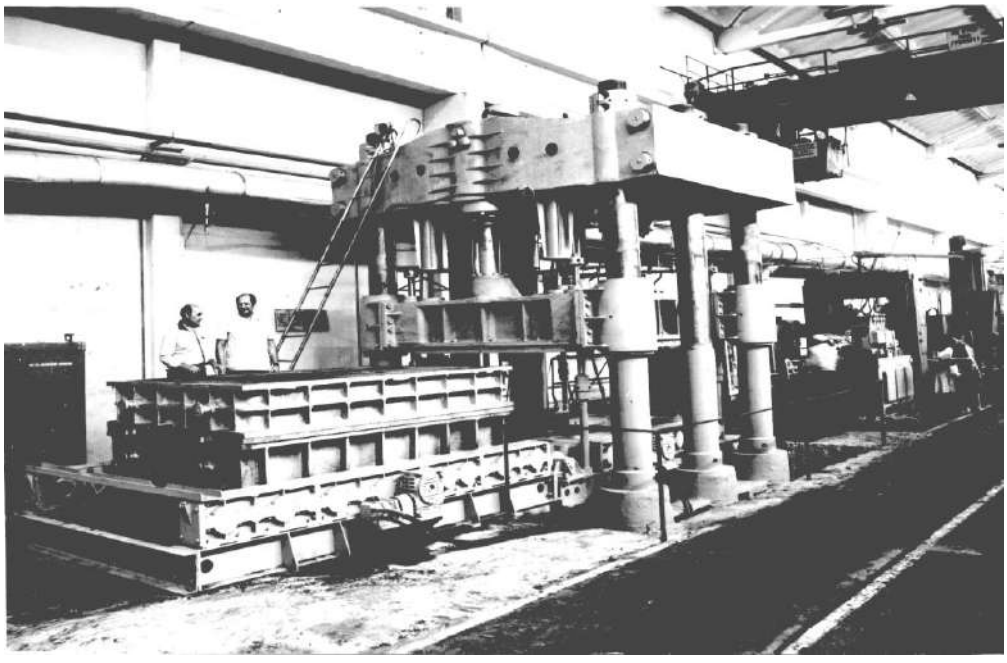
– готова нівформа переміщається до кантувача *7* і стола приймання готових півформ *8*.

У формувальній машині цієї моделі вперше стало можливо міняти модельні плити в процесі роботи, не зупиняючи машину й не користуючись ру-

чною працею. З'явилося так зване плаваюче оснащення. Тому машину можна успішно поставити в ливарну лінію й застосовувати її в індивідуальному виробництві, коли характерна часто змінювана номенклатура лиття. Однак у індивідуального виробництві поширене велике лиття, тому з'являються двопозиційні імпульсні машини (рис. 2.14).



а



б

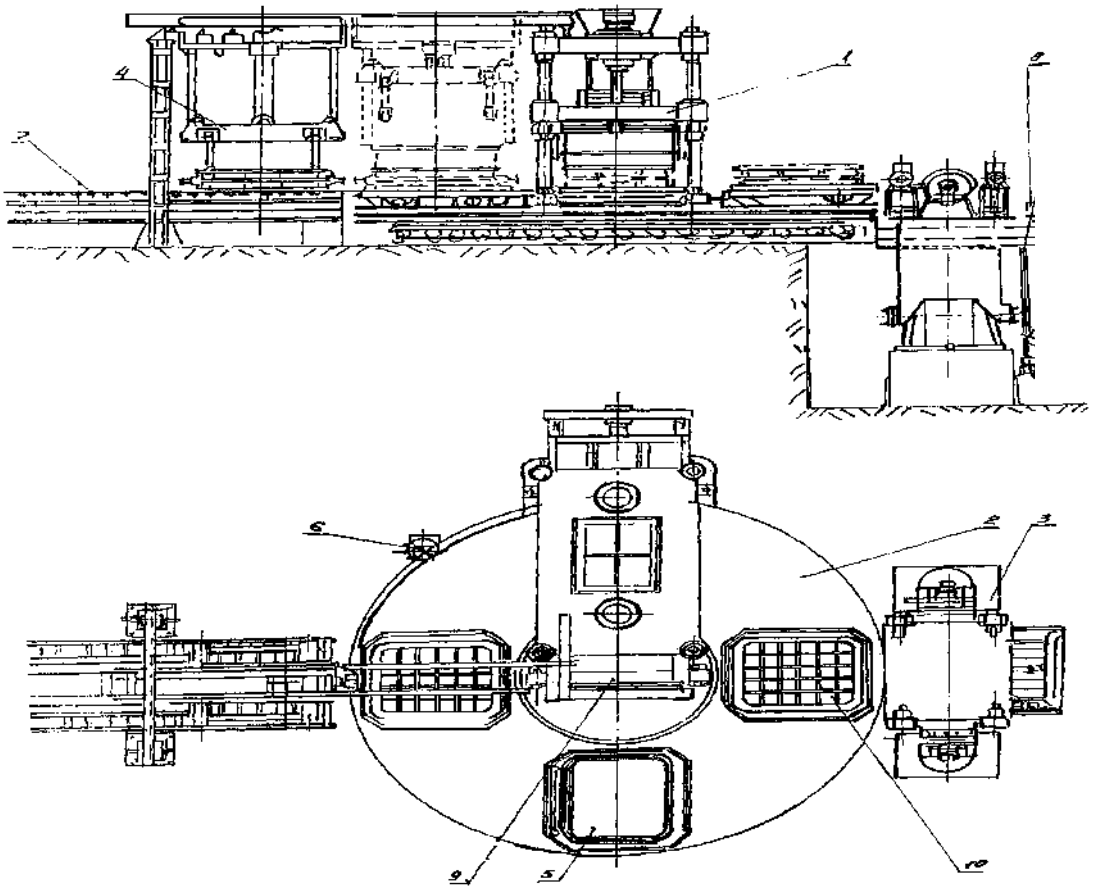
Рис. 2.14. Схема (а) і загальний вигляд (б) імпульсного двопозиційного агрегату для великих опок:

а) 1 – модельна плита; 2 – опока; 3, 16 – вимикачі; 4 – стіл;

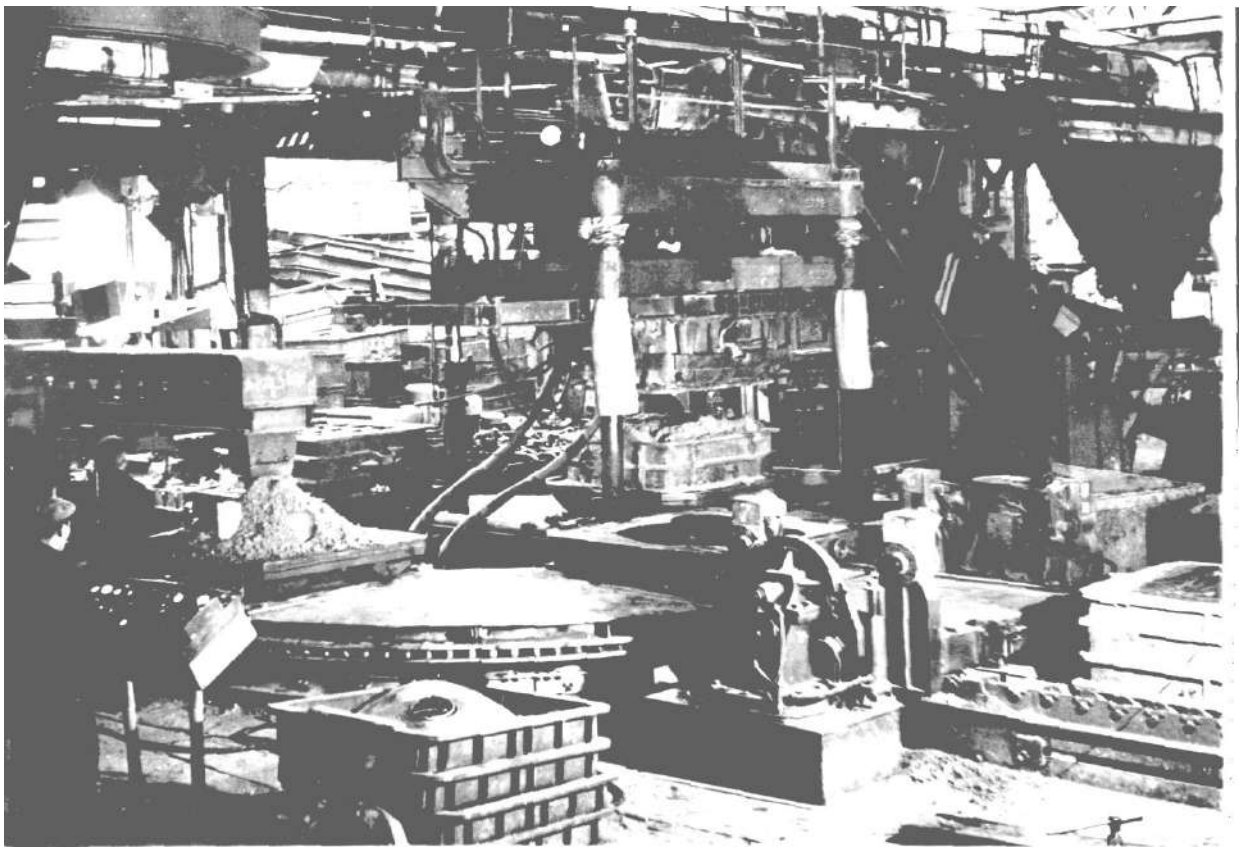
5 – циліндр; 6 – наповнювальна рамка; 7 – дозатор; 8 – циліндр притиску; 9 – човник рамки; 13 – станина; 14 – опора; 15 – рольганг; 17, 19 – імпульсна головка; 18 – циліндр; 20 – компенсатор; 21 – рольганг; 22 – кронштейн

У цих машинах позиції засипання суміші в оснащення і її ущільнення за допомогою імпульсної головки розділені. Стає можливим подача й нанесення облицювальної суміші. Човник у такій конструкції відсутній, що робить машину більш надійною. Крім того, ущільнення великих форм тепер здійснюється за рахунок опускання й притиснення до оснащення імпульсної головки, що також робить установку більш надійною, однак ускладнюється складання оснащення, особливо переміщення разом із наповнювальною рамкою. Тому ці операції в машині не виконуються, а на лінії потрібні спеціальні функціональні машини для складання оснащення й протягання моделі, що ускладнює лінію, й тому, найчастіше, ці операції навіть на лінії виконують за допомогою крана цеху. Частково проблема може вирішуватися за рахунок використання карусельних агрегатів.

На рис. 2.15 подано чотирипозиційну карусель,



а



б

Рис. 2. 15. Схема (а) і загальний вигляд (б) імпульсного карусельного агрегету:

а) 1 – ущільнювальний механізм; 2 – станина; 3 – кантувач; 4 – вантажоукладач; 5 – підмодельна плита; 6 – двигун; 7 – рольганг; 8 – штовхач; 9 – човник; 10 – готова півформа

На позиціях імпульсного карусельного агрегату відбувається зміна модельних плит поз.*1*, складання їх за допомогою маніпулятора з порожньою опокою поз. *11*, засипання дозатором сумішшю й ущільнення за допомогою імпульсної головки (човник) поз.*111*, протягання моделі й перекидання готової півформи за допомогою кантувача поз. *1V*.

2.4.3. Імпульсні машини низького тиску

Головний недолік агрегату – повільність, тому що операції можуть відбуватися хоч і паралельно, але тільки після виконання самої довгострокової з них і після повороту каруселі.

НПО ДОНМЕТ-ІМПУЛЬС (м. Краматорськ) перейшов від використання повітря високого тиску (6,0...10,0 МПа) на мережний тиск (0,5...0,6 МПа), для чого було розроблено принципово нову конструкцію імпульсної головки. Це дозволило відмовитися від придбання компресорів високого тиску, спеці-

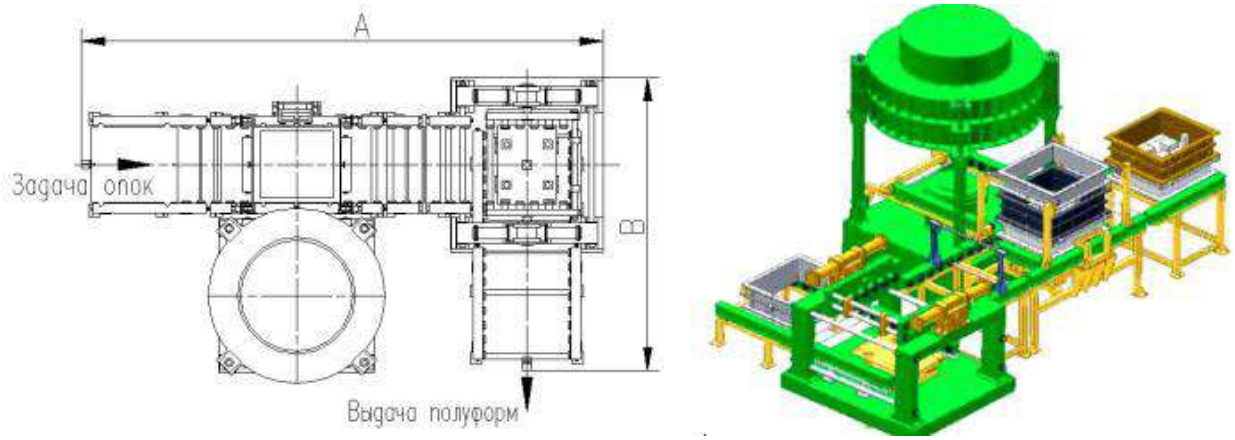
альних ресиверів і трубопроводів. Тепер усе встаткування виконується наземно: без підвалів і складних дорогих фундаментів. У рамках вибраної методики було створено гаму формувальних машин для опок від 400×500 до 2000×2100 мм.

Деякі технологічні характеристики наведено в табл. 2.8, 2.9, а їх види на рис. 2.16 і 2.17.

У запропонованих схемах імпульсних машин низького тиску імпульсна головка, займаючи окрему позицію, не робить машину багатопозиційною, тому що для виконання операції ущільнення необхідно перемістити півформу до головки, не займаючи робітничого стола, що звільнився, наступною опокою, на це місце повернеться ущільнена форма для виконання операції протягання моделі. Таке пересування оснащення призводить до зниження продуктивності машини.

Таблиця 2.8 – Базові моделі для малих опок гами імпульсних блок-ліній низького тиску

Розмір опок, мм	Габаритні розміри, А×В×Н, м	Протягання моделі	Продуктивність, півформ за годину	Маса, т
400×500	2,5×3×2,5	нижня	180	8
600×800	4,2×5,7×3,1		160	16,5
800×1000	4,2×5,7×3,1		80	16,5

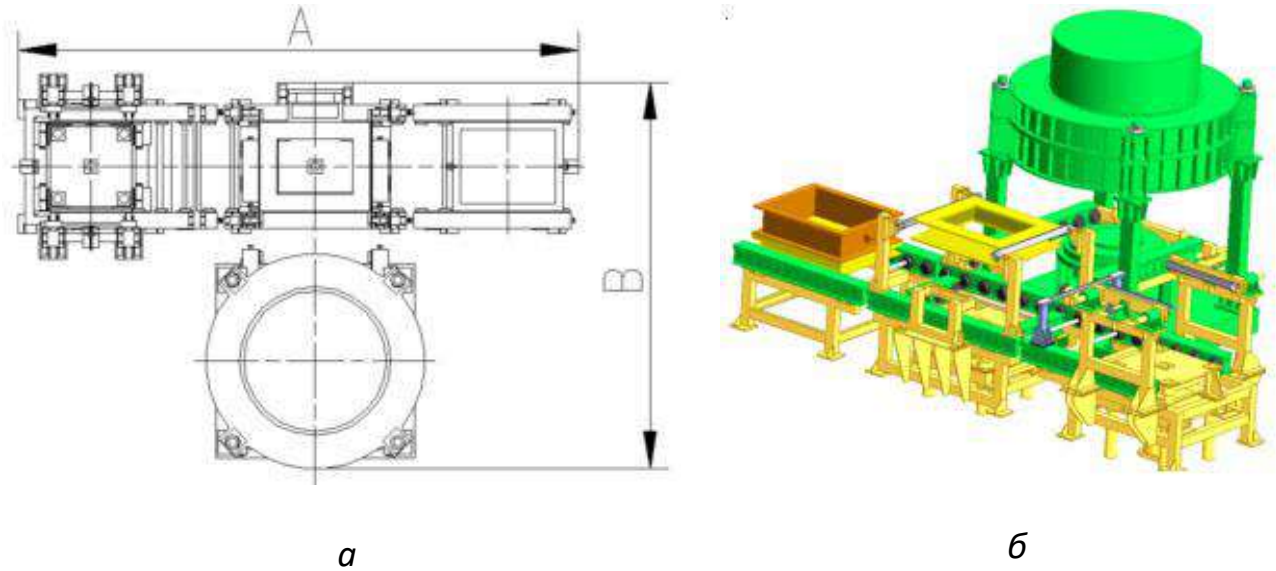


а *б*

Рис. 2.16. Креслення (а) і загальний вигляд (б) імпульсної блок–лінії низького тиску для малих опок

Таблиця 2.9 – Базові моделі для великих опок гами імпульсних блок-ліній низького тиску

Розмір опок, мм	Габаритні розміри, А×В×Н, м	Протягання моделі	Продуктивність, півформ за годину	Маса, т
1000×1200	5,5×6,5×3,5	верхня	60	45
130×1300	11×6,7×4,3		30	130
2100×2100	14,5×9,7×5		25	170



а *б*

Рис. 2.17. Креслення (а) і загальний вигляд (б) імпульсної – блок лінії низького тиску для великих опок

2.4.4. Побудова математичних моделей вузлів і деталей імпульсної машини

Критерієм оптимальності проектування струшувально-імпульсної машини може бути: габарити опок, необхідна продуктивність машини, міцність суміші, маса виливка, габарити виливка, серійність виробництва.

Згідно з різними теоріями математичного моделювання [7, 8] проектуванню програмного забезпечення передує аналітичне моделювання, що являє собою безліч функціональних і логічних відношень, які повністю описують функціонування технічної системи або її частин, що й зводиться до застосування апарата аналітичної механіки й методів динамічних аналогій, і цифрове

моделювання, що являє собою замкнену модель системи алгебраїчних рівнянь, які описують перетворення вхідних даних у вихідні.

Розробка математичної моделі починається з побудови розрахункової схеми. У цьому випадку формувальну машину подаємо у вигляді об'єкта, що складається з ряду складальних одиниць, яуі можна логічно описати, спростити й схематизувати:

– імпульсної головки;

– станини;

– траверси;

– колон.

Розглянемо методики математичних моделей складальних одиниць.

Математичне моделювання імпульсної голівки низького тиску. Для проведення розрахунків наведемо спрощені конструкції відомих імпульсних головок [5, 6]. Імпульсну головку низького тиску можна описати як прямокутну ємність за площею відповідну до ущільненої опоки F_o, за об'ємом V_P =(1...3)V_0, з безліччю випускних отворів F_{BO} ув нижній частині ємності, що з'єднується з опокою (рис. 2.18).

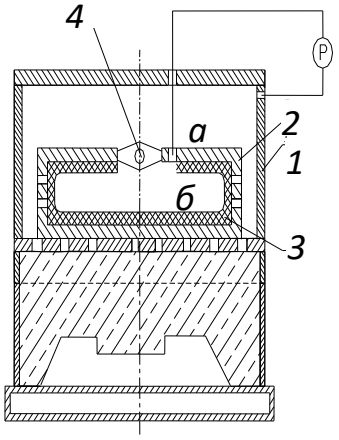


Рис. 2.18. Схема імпульсної головки низького тиску:
1 – корпус головки; 2 – корпус клапана; 3 - гумова діафрагма;
4 – днище-розсікач;
а – впускні отвори для повітря; б – випускні отвори для повітря.

Схема імпульсної головки високого тиску більш складна (рис. 2.19), має в основі пустотілу плиту-розсікач із безліччю випускних отворів F_{BO} для проходження повітря з розсікача в опоку. За площею плита-розсікач відповідає площі опоки, що ущільнюється, а за об'ємом $V_{роз}$= (1,6...2,4) V_0. Зверху на плиті-розсікачі розташований циліндр-ресивер (один, два або більше), внут-

рішня порожнина якого відокремлюється від порожнини розсікача клапаном [1, 2, 4].

В основу математичних розрахунків конструктивних параметрів головки низького тиску покладено такі співвідношення [4, 5]:

1) об'єму опоки V_0 до об'єму ресивера головки $V_Р$

$$\frac{V_0}{V_Р} = Z, \tag{2.67}$$

де Z = 0,09...0,12 (*впускні отвори для повітря*) і Z = 1...3 (*випускні отвори для повітря*);

2) площі випускного отвору ресивера $F_{ВО}$ до площі опоки $F_{оп}$

$$\frac{F_{ВО}}{F_{ОП}} = f', \tag{2.68}$$

де f' = 0,025...0,043 (а), f' = 0,15...0,2 (б);

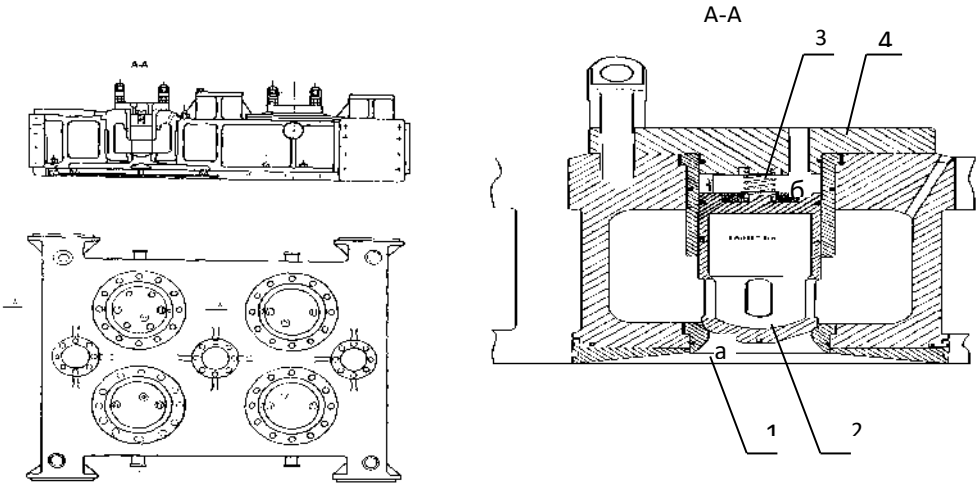


Рис. 2.19. Схема імпульсної головки високого тиску:
1 – корпус ресивера головки; 2 – клапан; 3 – пружина; 4 – кришка ресивера

3) об'єму порожнини розсікача $V_{роз}$ до об'єму опоки $V_о$

$$\frac{V_{РАС}}{V_0} = V', \tag{2.69}$$

де V' = 1,6...2,4 (а), V' = 0,04...1,5 (б).

Для створення математичної моделі використовуємо алгоритмічну форму, тобто запис відповідної моделі й обраного числового методу розв'язку у формі алгоритму.

Математичне моделювання імпульсної головки високого тиску. Розрахунки головки високого тиску починаємо з вибору об'єму ресивера головки $V_р$, що залежить від Z (чим більший об'єм опоки, що ущільнюється, тим *більше* Z). Запис проведемо в такий спосіб:

$$V_0 = a \cdot в \cdot h, \tag{2.70}$$

де a – довжина опоки, м;

b – ширина, м;

h – змінювана висота опоки від 0,2 до 0,5 м у кожному типорозмірі опоки.

Оптимальні розрахунки проводимо за такою схемою.

Якщо

$$V_0 \le 0{,}2 \cdot a \cdot в, \tag{2.71}$$

то $Z = 0{,}09$ і всі параметри головки будуть розраховані для об'єму ресивера

$$V_р = 0{,}09\ V_0\ . \tag{2.72}$$

Розрахунки ведемо доти, доки

$$V_0 \le 0{,}5 \cdot a \cdot в. \tag{2.73}$$

Після чого розрахування припиняємо, тобто необхідно змінити параметри опоки, що вводяться або переглянути технологію виготовлення виливка.

До розрахунків параметрів головки входить визначення оптимальних розмірів випускного отвору з ресивера в розсікач $D_{вип}$ рівного діаметра клапана й ходу поршня клапана H. Для визначення $D_{вип}$ наведемо об'єм ресивера імпульсної головки високого тиску як об'єм циліндра, тобто:

$$V_р = F_р \cdot H_р = \frac{\pi \cdot D_в^2}{4} \cdot H_р, \tag{2.74}$$

де $D_в$ – внутрішній діаметр ресивера; $H_р$ – висота ресивера.

Якщо прийняти, що

$$D_{вип} = 0{,}5D_в, \tag{2.75}$$

$$H_р = D_в; \tag{2.76}$$

$$\frac{V_0}{V_р} = 0{,}09 - 0{,}12, \tag{2.77}$$

тоді

$$D_в = \sqrt[3]{(0{,}12...0{,}13)V_0}\ , \tag{2.78}$$

$$D_{вип} = 0{,}5 \cdot \sqrt[3]{0{,}12 \cdot V_0}\ . \tag{2.79}$$

Хід клапана H обмежимо так, щоб над клапаном зберігалася додаткова ємність, що працює на запирання клапана й попередження його передчасного відкриття, тобто

$$H = 0{,}25D_{вип}. \tag{2.80}$$

Оптимальні розміри a, b, h, $D_в$, $H_р$, $D_{вып}$, H розраховуються, після чого здійснюється перехід до перевірочної частини розрахунків корпусу імпульсної головки на міцність.

Підбирається матеріал для корпусу ресивера. Перевірочні розрахунки проводяться з урахуванням припустимої межі міцності на розтяг

$$\sigma = [\sigma_1]. \tag{2.81}$$

Якщо дотримуються співвідношення:

$$P_{дол.ст} > P_р \tag{2.82}$$

$$P_{дол.дн} > P_р, \tag{2.83}$$

де $P_{дол.ст}$ – допустимі тиски на стінки посудини;

$P_{дол.дн}$ – допустимі тиски на стінки й днище посудини;

$P_р$ – робочий тиск, необхідний для ущільнення суміші.

Якщо співвідношення не дотримуються, то обрана конструкція непрацездатна, тому вибирається інша марка матеріалу з більш високим [σ]. У блок-схемі використано позначення: φ – коефіцієнт міцності посудини; C –

збільшення на корозію; R' – радіус контакту клапана із сідлом голівки, тобто радіус випускного отвору; h' – висота клапана, необхідно врахувати, що R' і h' вибираються за апріорними даними [2] і становлять (м), R'= 0,05...0,08; h' = 0,1...0,15 і залежать від тиску в імпульсній голівці $P_р$, тобто чим вищий тиск, тим менше розміри; d – діаметр отвору, що з'єднує порожнину головки з атмосферою; S і S_1 – товщини днища й корпусу головки; ДО – емпіричний коефіцієнт [3].

Математичне моделювання колон. Математичне моделювання колон має аналітичне моделювання й алгебраїчне вираз, на основі якого можна перевірити на міцність будь-яку колону, тобто цифрове моделювання.

Аналітичне моделювання колон – здійснюють конструктивний і силовий зв'язок траверси зі станиною. Вони сприймають зусилля пресування, передаючи його станині. На них діє вага траверси й інших деталей, закріплених на траверсі й колонах. Колони бувають різної конфігурації: круглі, квадратні, у вигляді куточка, швелера та ін.

Цифровою моделлю для вибору й розрахунків перерізу колон і перевірки його на вигин є рівняння:

$$\sigma_в \le 1{,}1 \cdot [\sigma]_р,$$

$$\sigma_в = \frac{\sigma_{н.ч.} \cdot l \cdot h}{2 \cdot I} \le 1{,}1 \cdot [\sigma]_р, \qquad (2.84)$$

де $\sigma_в$ – розрахункова найбільша за абсолютною величиною напруга в небезпечному перерізі, МПа;

$[\sigma]_р$ – напруга на розтяг матеріалу траверси, МПа [18];

$G_{нч}$ – маса навантажувальних частин (сюди входять: зусилля траверси, дозатора, пресової колодки або багатоплунжерної головки та ін.), кг;

l – відстань, на якій діє навантаження відносно опори, мм;

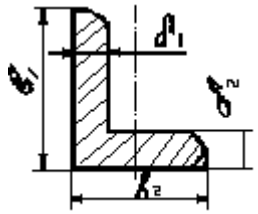
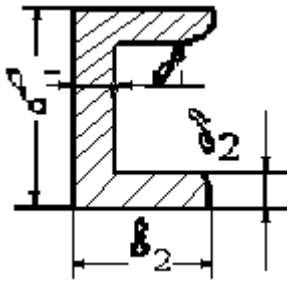
h – висота перерізу, мм;

I – момент інерції елементів перерізу, (табл. 2.10).

Математичне моделювання станини й траверси. При математичному моделюванні траверси й станини використовуємо різні методики: аналітичне моделювання; цифрове моделювання.

Розглянемо кожний вид моделювання окремо.

Таблиця 2.10 – Моменти інерції видів перерізів

Вид перерізу	Момент інерції, см^4
1	2
Порожній прямокутник	$I_x = \frac{bh^3 - b_1 h_1^3}{12}$
Труба	$I = \frac{\pi D^4}{32}(1-k)$ $k = \frac{d}{D}$
Куточок 	$I = \frac{\eta}{3}\sum b_i \delta_i^3$ $\eta_{\text{куточок}} = 0{,}97...1{,}0$
Швелер 	$I = \frac{\eta}{3}\sum b_i\, \delta_i^3$ $\eta_{\text{швелер}} = 1{,}0...1{,}3$

1. Аналітичне моделювання станини й траверси.

Станина являє собою литу деталь коробчастого, перерізу, розділену на ряд сполучених між собою відсіків. Станина витримує всі навантаження, які на неї діють, має прямокутну форму. Машина має три позиції. На першій позиції й на третій станина має порожнину, у якій розташовують циліндр (піднімальний). У станині машини є також гнізда, виконані у вигляді циліндричних приливків, і такі що служать для кріплення чотирьох колон.

Траверси можуть бути різними: поворотними, неповоротними і т.д. Як і станина, траверса являє собою складну литу деталь коробчастої форми. Кутові циліндричні приливки служать для кріплення траверси до колон. Зусилля імпульсу сприймається приливком. Траверса формувальної машини служить для кріплення головки й сприймає зусилля імпульсу, передаючи його на колони. Сприймаючи більшу силу імпульсу й працюючи на вигин, траверса має великий момент опору. Нерухливі імпульсні траверси зміцнюють на двох, трьох, чоти-

рьох колонах. Опока, наповнена формувальною сумішшю, підводиться під траверсу й виявляє зусилля на неї за допомогою циліндра.

2. Цифрове моделювання станини й траверси.

Цифровою моделлю для розрахунків станини є рівняння:

$$\sigma_p \le 1{,}1 \cdot \lfloor \sigma_p \rfloor, \tag{2.85}$$

$$\sigma_p = \frac{G_{н.ч.} \cdot l \cdot h}{2 \cdot \sum_{i=1}^{n} (I_i + F_i \cdot C_i^2)} \le 1{,}1 \cdot \lfloor \sigma_p \rfloor, \tag{2.86}$$

де $\sigma_р$ – розрахункова найбільша за абсолютною величиною напруга в небезпечному перерізі, МПа;

$[\sigma]_р$ – допустима напруга на розтяг матеріалу траверси, МПа [6];

$G_{н.ч.}$ – маса навантажувальних частин, кг;

l – довжина, по якій діє навантаження щодо опори, мм;

h – висота перерізу (висота станини), мм;

Іі – момент інерції елементів перерізу щодо осей, що проходять через центри ваги цих елементів.

Таким чином, маємо універсальні формули, за якими можна розрахувати станину, траверсу, колони для будь-якої формувальної машини.

2.5. Побудова повного алгоритму розрахунків імпульсної машини

Алгоритм – це сукупність дій із точно визначеними правилами виконання, також це формальний опис способу розв'язання завдання шляхом дроблення її на кінцеву за часом послідовність дій (елементарних операцій). Слов «формальний» означає, що опис абсолютно повний й ураховує всі можливі ситуації, які можуть зустрітися під час розв'язання. Елементарну операцію розуміють як дію, що за заздалегідь визначеними критеріями не має сенсу деталізувати.

Алгоритмічне моделювання полягає в складанні алгоритмічних моделей кожного окремого вузла проектованої машини: станини, траверси та ін.. Складемо алгоритмічні моделі для кожного вузла окремо.Повний алгоритм розрахунків машини із програмою поданий на рис. 2.20.

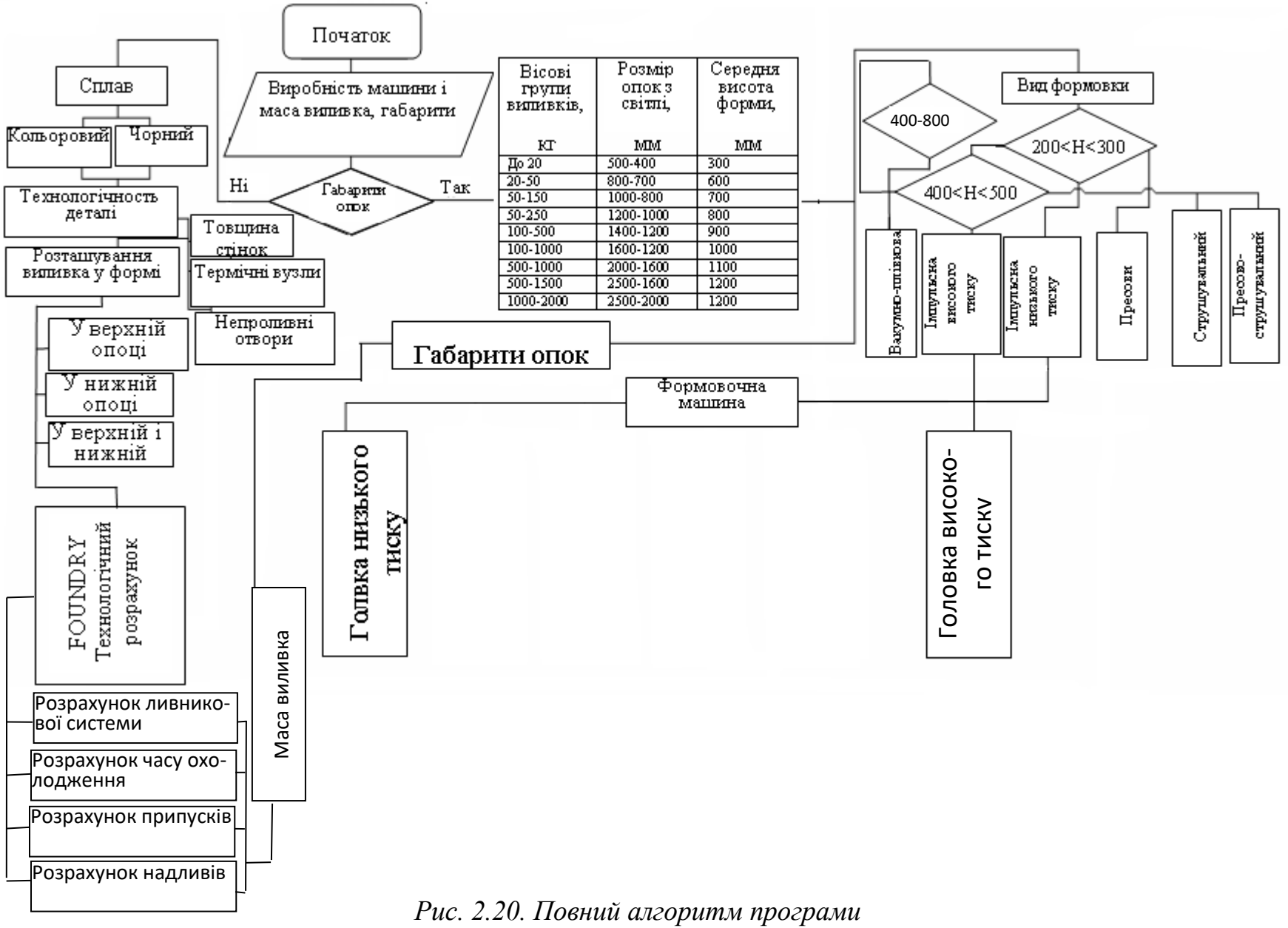


Рис. 2.20. Повний алгоритм програми

2.5.1. Побудова алгоритмів розрахунків імпульсних головок високого й низького тиску

На рис. 2.21–2.22 подано блок-схеми розрахунків імпульсних головок високого і низького тиску.

Ці блок-схеми складаються з декількох підсистем: високого тиску – із двох підсистем (від розрахунків основних оптимальних параметрів до розрахунків корпусу головки на міцність); низького тиску – з однієї підсистеми (від розрахунків необхідного тиску до вибору оптимальних конструктивних параметрів головки).

Для знаходження оптимальних розв'язків конструкцій основного ущільнювального механізму імпульсної машини – імпульсної головки використовувалися заздалегідь побудовані математичні моделі головок високого й низького тиску, на основі яких будувалися алгоритми їх розрахунків.

Конструктивні особливості, принцип роботи, методика розрахунків імпульсної головки високого тиску викладено в ряді ранніх робіт [1, 2, 4]. Після визначення параметрів головки знаходимо площу випускного отвору ресивера згідно з літературою [6], яка становить

$$F_{\text{ВО}} = 0{,}2 \cdot F_{\text{ОП}} \ . \qquad (2.87)$$

У схемах (рис. 2.21, 2.22) використано такі позначення:

U – периметр опоки;

$F_{\text{оп}}$ – площа опоки;

$P_{\text{і}}$ – миттєвий тиск у момент удару в елементарному об’ємі;

ξ – коефіцієнт бічного тиску, $\xi = 0{,}45$;

f – коефіцієнт тертя формувальної суміші об стінки опоки;

δ_0 – густина суміші до удару, $\delta_0 = 1{,}15$;

j – прискорення інерції, що діє в момент удару в шарі, j =180;

q – прискорення сили ваги, q = 10;

$F_{\text{ВО}}$ – площа випускного отвору ресивера.

$$\text{У}_{\text{р}} = h_{\text{н}} + h, \qquad (2.88)$$

де h – висота опоки;

$h_{\text{н}}$ – висота наповнювальної рамки.

По запропонованих алгоритмах складені програми, які розраховують оптимальні параметри імпульсних голівок.

Розрахунки імпульсних головок, виведених на екран, наведено на рис. 2.23 і 2.24.

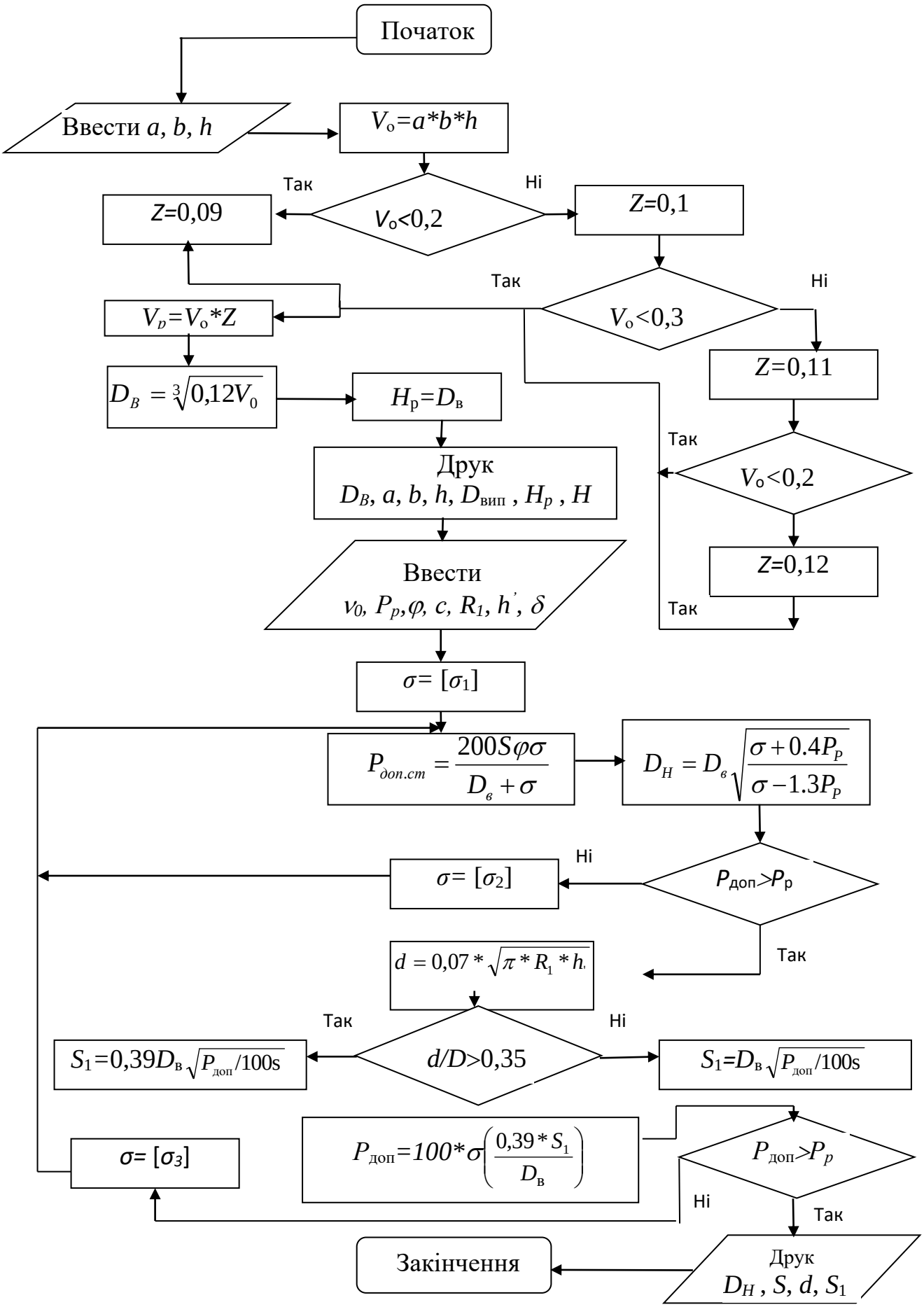


Рис. 2.21. Блок-схема вибору основних параметрів імпульсної головки високого тиску

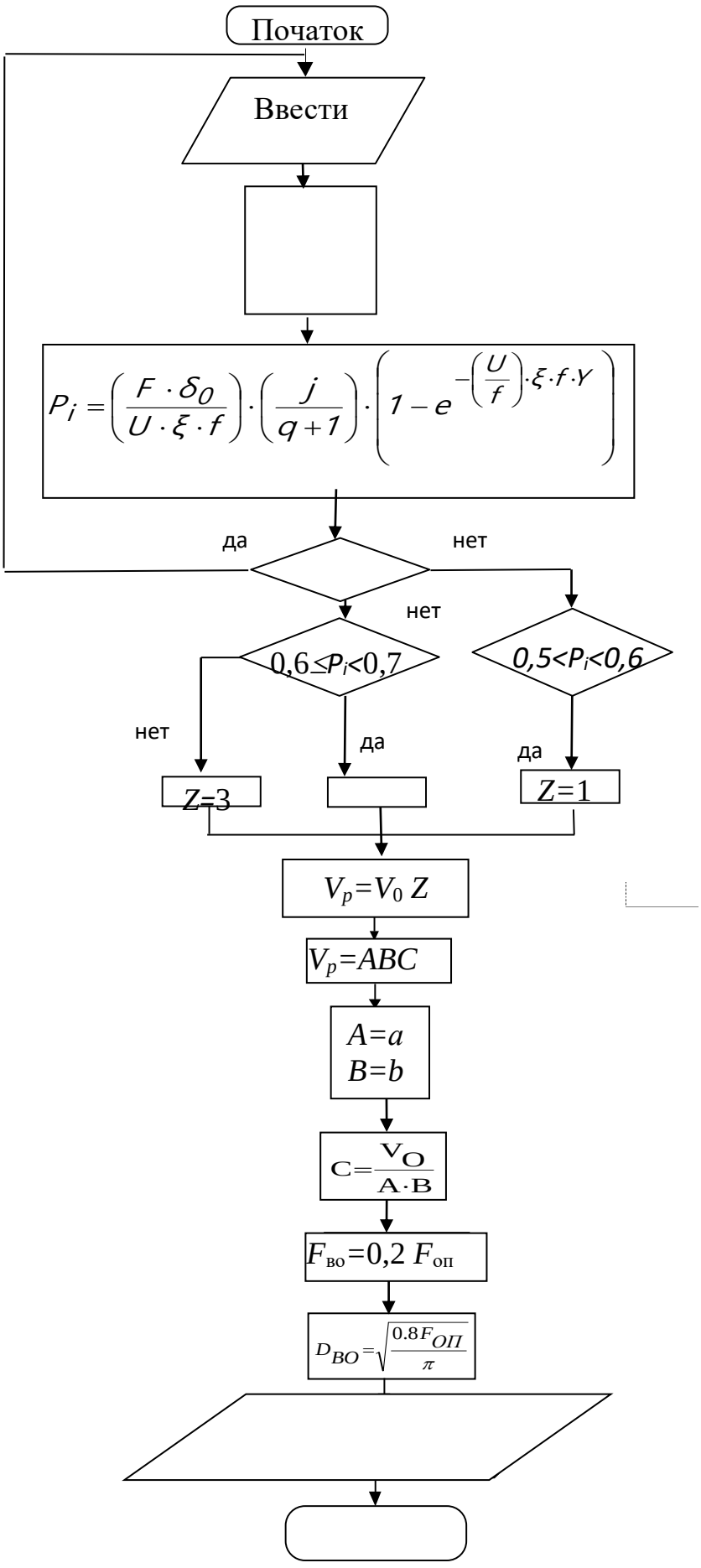


Рис. 2.22.Блок-схема вибору основних параметрів імпульсної головки низького тиску

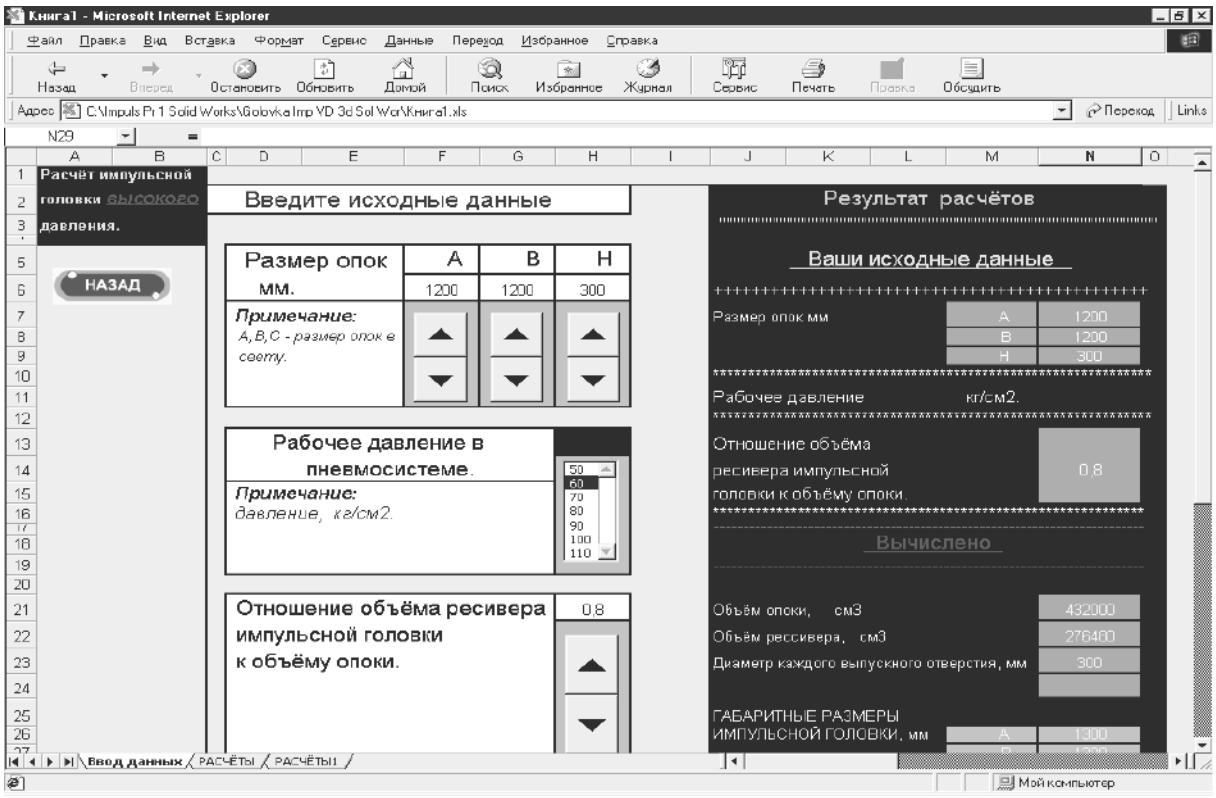


Рис. 2.23. Результати розрахунків головки високого тиску

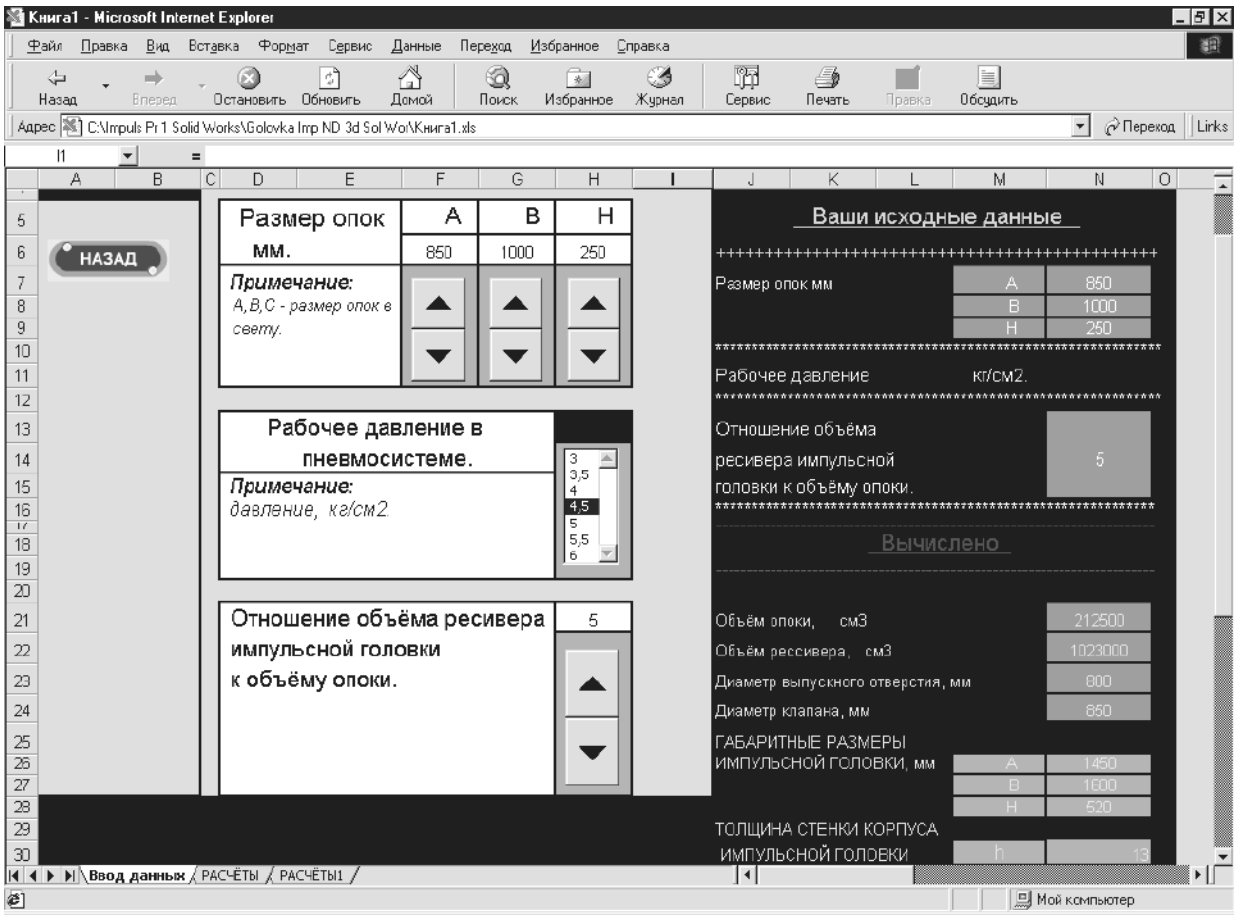


Рис. 2.24. Результати розрахунків головки низького тиску

Побудова алгоритмічної моделі розрахунків колон. Методика розрахунків пропонує визначити кількість колон, їх діаметр, з урахуванням допустимої напруги на міцність для вибраного матеріалу й виду перерізу колони. Схему розташування колон імпульсної формувальної машини наведено на рис. 2.25.

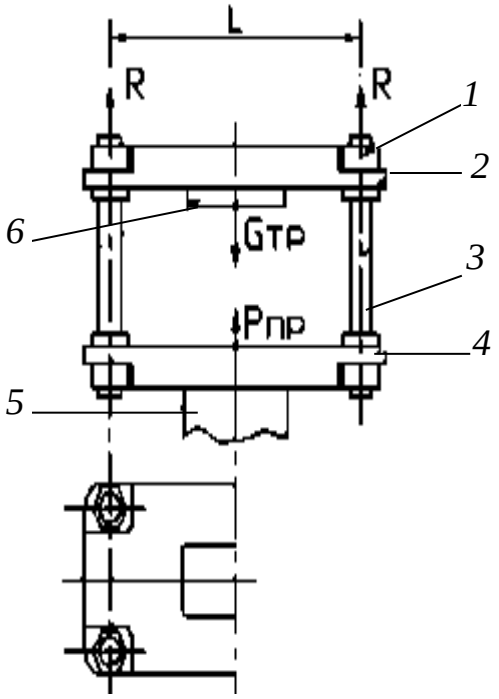


Рис. 2.25. Схема розташування колон імпульсної формувальної машини
1 – траверса; 2 – колона; 3 – гайка; 4 – станина; 5 – головка; 6 – циліндр.

У запропонованій схемі верхню траверсу *1* установлено на чотирьох колонах *2* і закріплено гайками *3*. Колони вертикальні, пустотілі. Розрахування ведеться на міцність, тому що твердість траверси й станини *4* достатньо велика, тому можливим вигином колон від деформації траверси й станини можна зневажити.

У неробочому положенні машини колони сприймають вагу траверси $G_{тр}$ і прикріплених до неї механізмів, наприклад голівки $G_{т}$. Зусилля R, що діє на колону, передається гайкою. Тому необхідно розрахувати колону на міцність, розтяг, вигин.

Перерізу колони по висоті однакові. Нейтральна вісь, що є геометричним місцем усіх небезпечних перерізів, вертикальна. Тому в різних перерізах колони будуть однакові як згинальні моменти, так і геометричні характеристики (площа й момент опору) і заздалегідь можна сказати, де напруги від вигину будуть максимальними.

Напруга на вигин визначається за формулою:

$$\sigma_в = M_i / W, \qquad (2.90)$$

де M_i – згинальний момент, Н/мм;

W – момент опору, см^4.

Для колони виконаної із труби:

$$W = \Pi \cdot D^3 \cdot \frac{\left(1 - k^3\right)}{16}, \tag{2.91}$$

$$k = \frac{d}{D} \tag{2.92}$$

де k – коефіцієнт співвідношення внутрішнього d і зовнішнього D діаметрів труби.

Для колони, виконаної зі швелера:

$$W = 1{,}2 \cdot \sum \frac{\left(b_i \cdot \delta_i\right)}{3 \cdot \delta_{\max}}, \tag{2.93}$$

де b_i – розмір полиці швелера, мм;

δ_i – товщина полиці, мм.

Для колони, виконаної із профілю прямокутного перерізу:

$$W = \frac{b \cdot h^3 - b_1 \cdot h_1^3}{6 \cdot h}, \tag{2.94}$$

де b – зовнішня довжина профілю колони, мм;

h – зовнішня ширина, мм;

b_1 – внутрішня довжина, мм;

h_1 – внутрішня ширина, мм.

Згинальний момент конструкції визначається за формулою:

$$M_в = P \cdot l \tag{2.95}$$

де l – відстань від колон до центру ваги вантажу, мм;

P – маса всіх вантажів, що діють на колони, кг;

$$P = P_д + P_{тр} + P_{тел} + P_{гол}, \tag{2.96}$$

де $P_д$ – маса дозатора, кг;

$$P_д = \left(a \cdot b \cdot h\right) \cdot j, \tag{2.97}$$

де a, b, h – габарити опоки, м;

j – питома вага металу, j = 7,8·103 кг/м^3;

$P_{тр}$ – маса траверси, кг;

$$P_{тр} = (c \cdot d \cdot f) \cdot j, \tag{2.98}$$

де c, d, f – габаритні розміри траверси, м;

$P_в$ – маса візка, кг;

$$P_в = (k \cdot m \cdot n) \cdot j; \tag{2.99}$$

де k, m, n – габаритні розміри візка, м.

Масу головки $P_{гол}$ приймемо рівною масі дозатора ($P_{гол} = P_д$).

На рис. 2.26 наведена алгоритмічна модель розрахування колон на міцність.

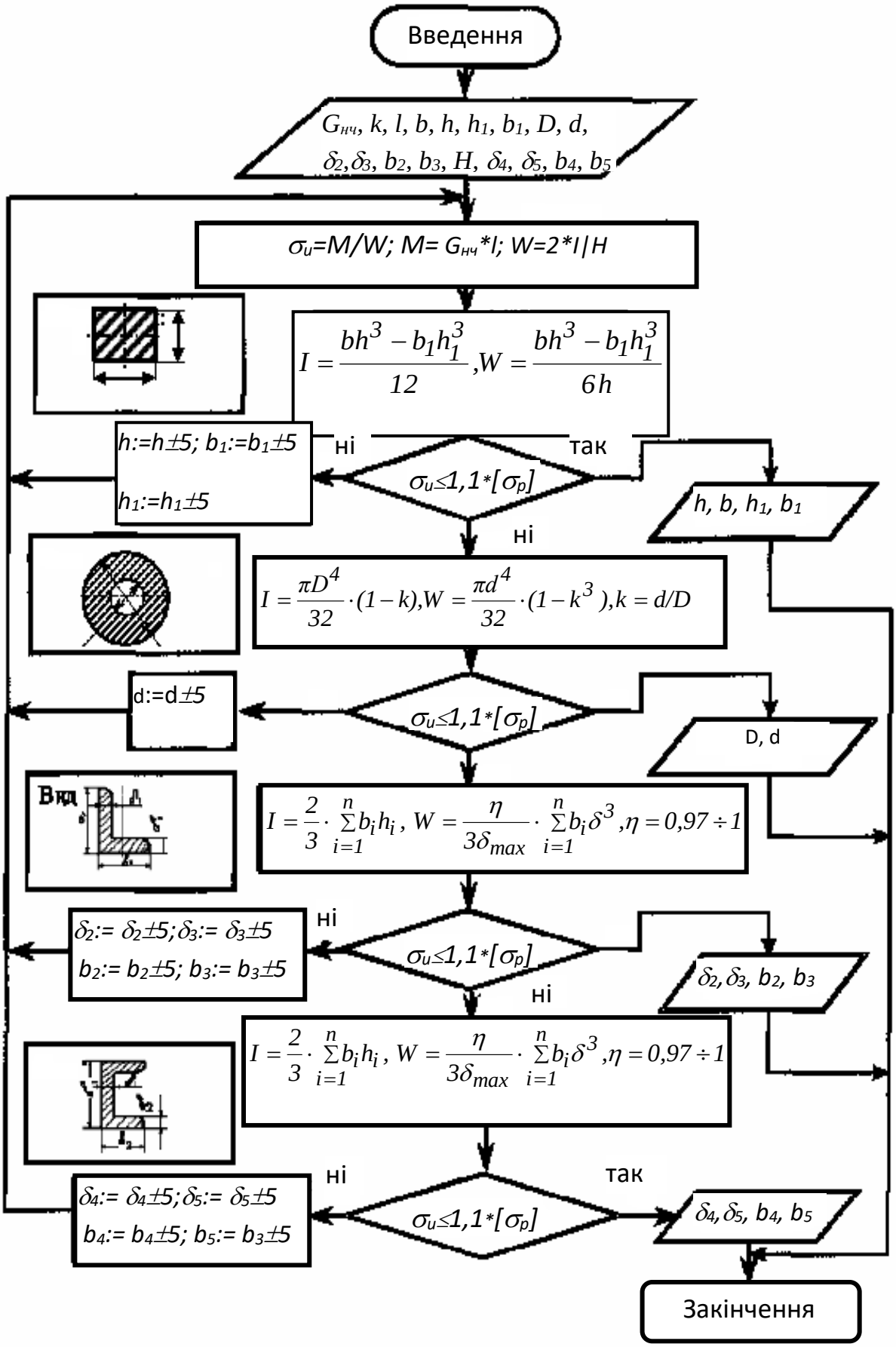


Рис. 2.26. Алгоритмічна модель розрахунків колон на міцність

На рис. 2.27 наведено алгоритмічну модель розрахунків станини. Алгоритмічна модель являє собою послідовність розрахунків. Кожний блок алгоритмічної моделі виконує свою дію. Перший блок – це блок уведення вихідних даних. Попередньо з банку даних вибирається вид конструкції.

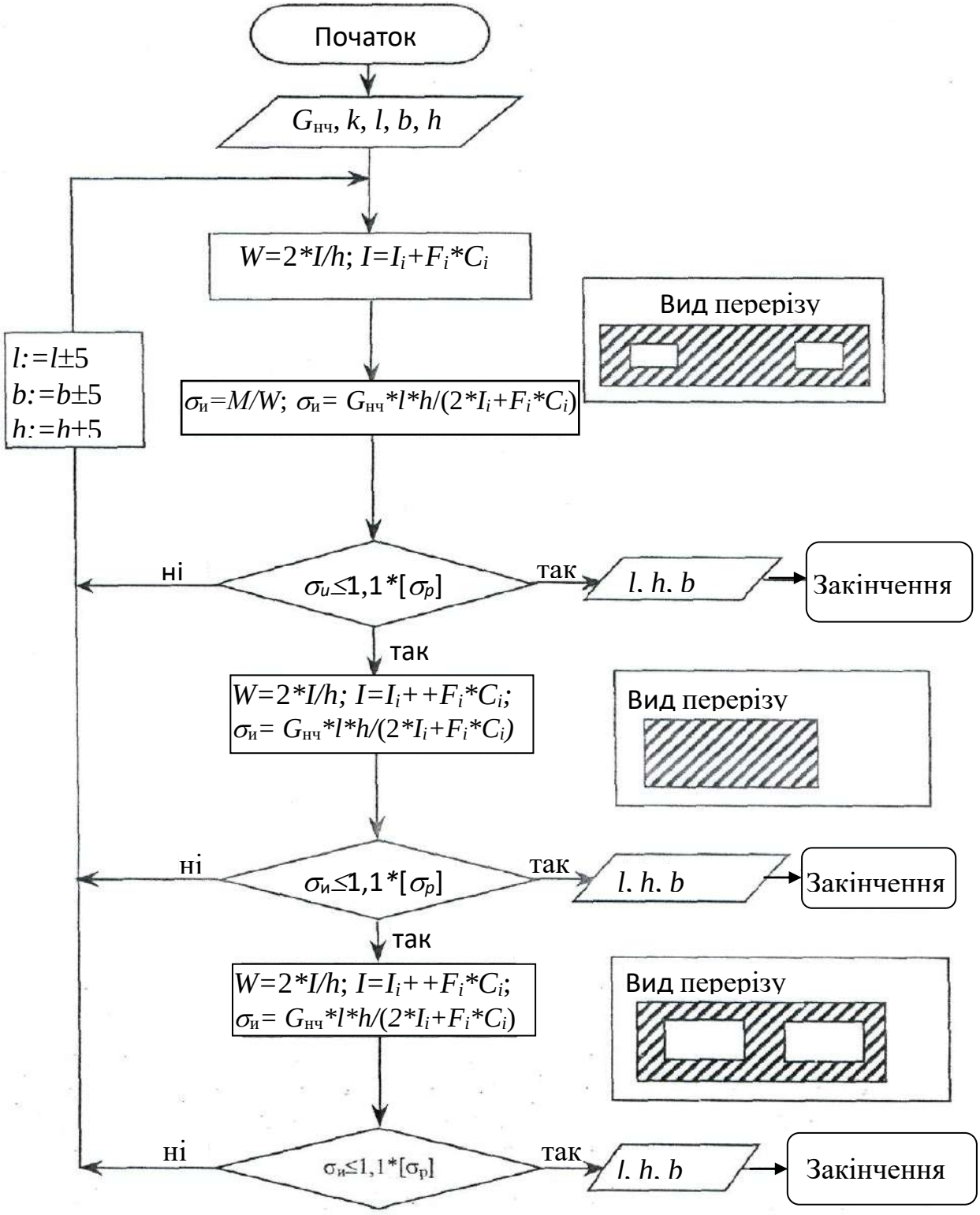


Рис. 2.27. Алгоритмічна модель розрахунків станини

Умовно приймаємо конструкцію у вигляді балки, закріпленої на кінцях. В основі розрахунків опорів матеріалів [4] перебуває небезпечний переріз. Далі розраховується момент інерції, момент опору небезпечного перерізу й напруга в небезпечному перерізі. Звіривши отриманий результат з довідковими даними [6], робиться висновок, чи зможе витримати обраний вид станини необхідні навантаження. Якщо результат нас улаштовує, то в останньому блоці йде збір вихідних даних. Далі результати розрахунків виводяться на друк.

Оптимізація несучої конструкції імпульсної формувальної машини. Траверса зазнає більші навантаження й забезпечує твердість усієї конструкції. Схему розрахункової конструкції показано на рис. 2.28.

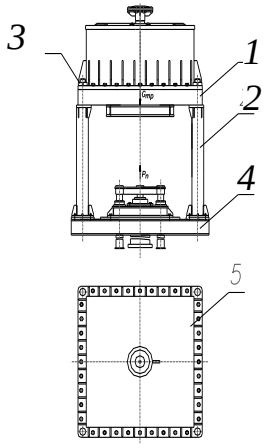


Рис. 2.28. Схема конструкції траверси:
1 – траверсу; 2 – колони; 3 – гайки; 4 – станина;5 – імпульсна головка.

Верхню траверсу *1* імпульсного агрегату встановлено на чотирьох колонах *2*, закріплено гайками *3*, на траверсі встановлено імпульсну головку *5*. Траверсу імпульсно-засипного агрегату виготовлено з балок таврового перерізу.

Визначимо максимальний прогин траверси за центральною віссю імпульсно-засипного агрегату. Цей прогин може вплинути на перебіг роботи різних механізмів машини. Схему навантаження траверси й схему її перерізу показано на рис. 2.29, 2.30 відповідно.

Максимальний прогин балки за центральною віссю імпульсно-засипного агрегату визначимо за формулою:

$$P = \frac{p \cdot a \cdot b}{3 \cdot E \cdot J \cdot L}, \qquad (2.100)$$

де p – діюче навантаження;

a, b – відстань від опор до центру балки;

E – модуль пружності;

J – момент інерції перерізу балки,
L – довжина балки.

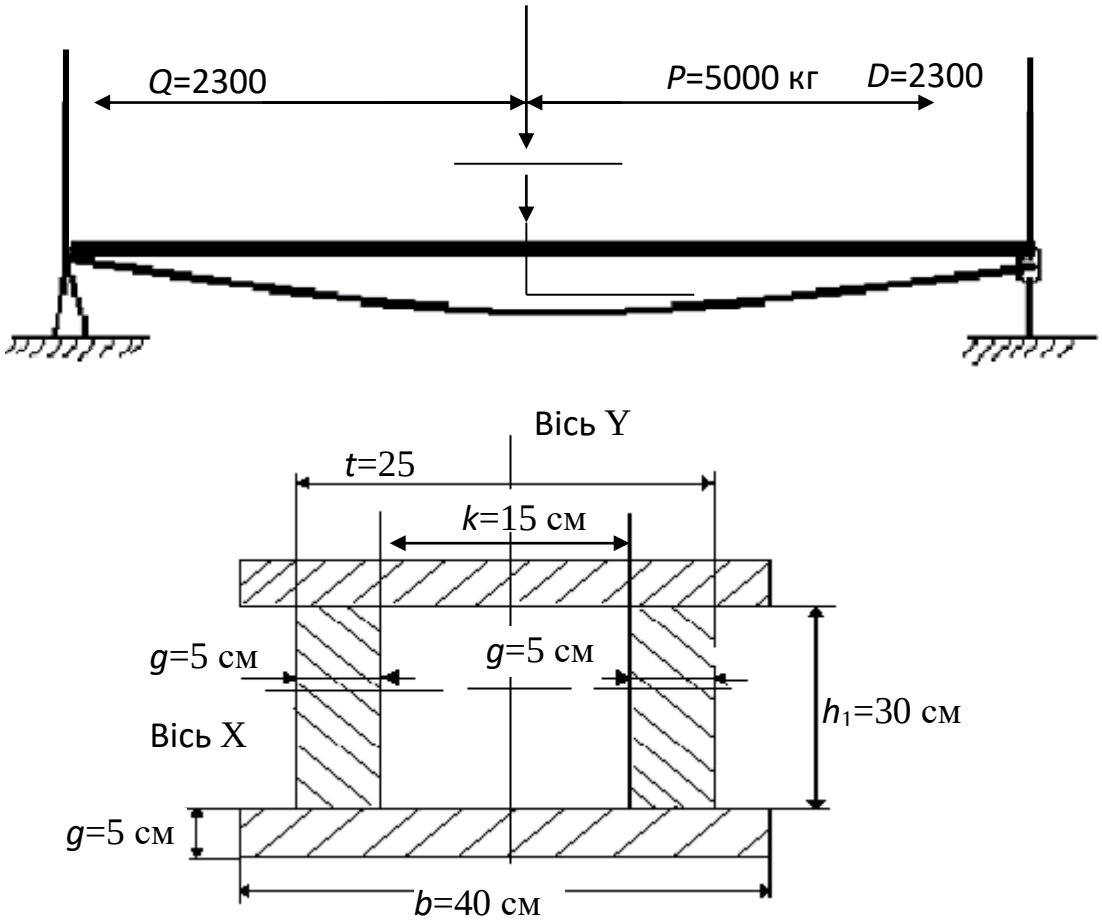


Рис. 2.30. Схема перерізу таврової балки

Момент інерції перерізу балки визначимо за формулою:

$$Jz = Jz_1 + Jz_2 + Jz_3 + Jz_4, \tag{2.101}$$

де Jz_1, Jz_2, Jz_3,Jz_4 – моменти інерції складових перерізів.

$$Jz_1 = \frac{b \cdot g}{12} + \left(\frac{h_1 + 2}{2} \right) \cdot b \cdot g \tag{2.102}$$

де *g* – товщина балки.

$Jz_1 = Jz_2$ (тому що перерізу 1 і 2 однакові).

$$Jz_3 = \frac{t \cdot h_1}{12} - \frac{k + h}{12}, \tag{2.103}$$

$Jz_3 = Jz_4$ (тому що перерізу 3 і 4 однакові).

$$Jz = Jz_1 + Jz_2 + Jz_3 + Jz_4 . \qquad (2.104)$$

Отримана величина прогину балки за центральною віссю імпульсно-засипного агрегату порівнюється із припустимою, й робиться висновок про її надійність. Виконані за розробленою методикою розрахунки траверси на вигин і розтяг для різних габаритів опок за авторськими комп'ютерними програмами наведено на рис. 2.31 і 2.32 (уведення даних і виведеня розрахункових показників).

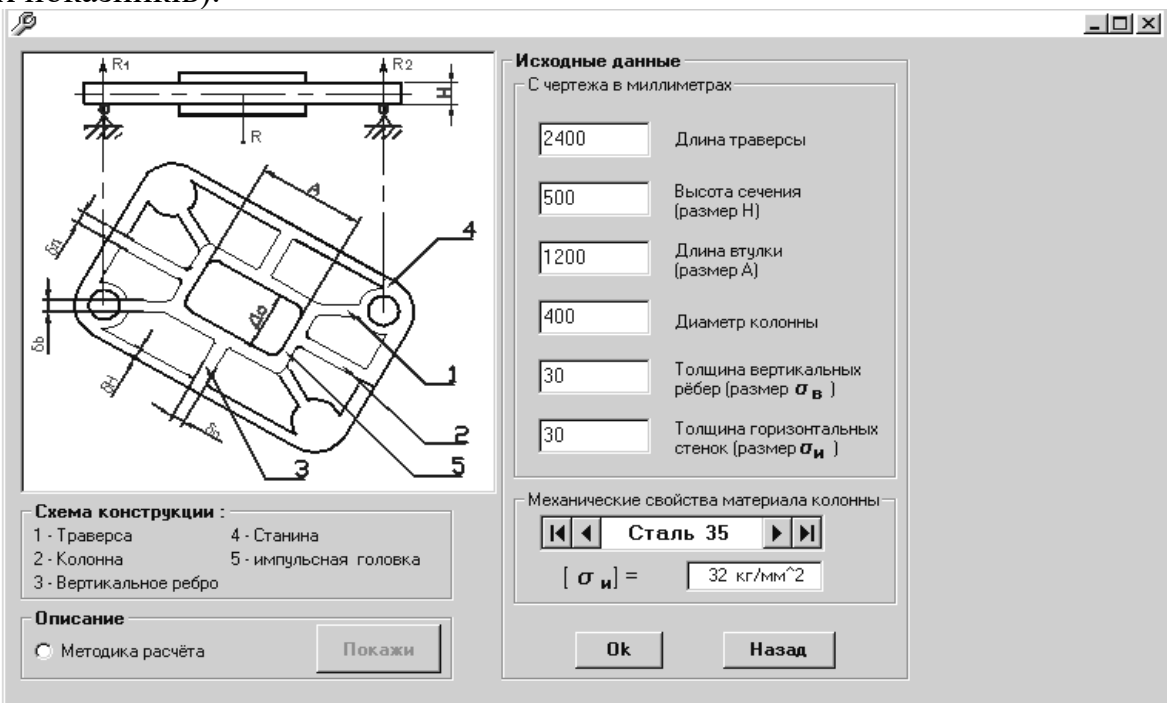


Рис. 2.31. Введення даних для розрахування на міцність верхньої траверси імпульсної формувальної машини

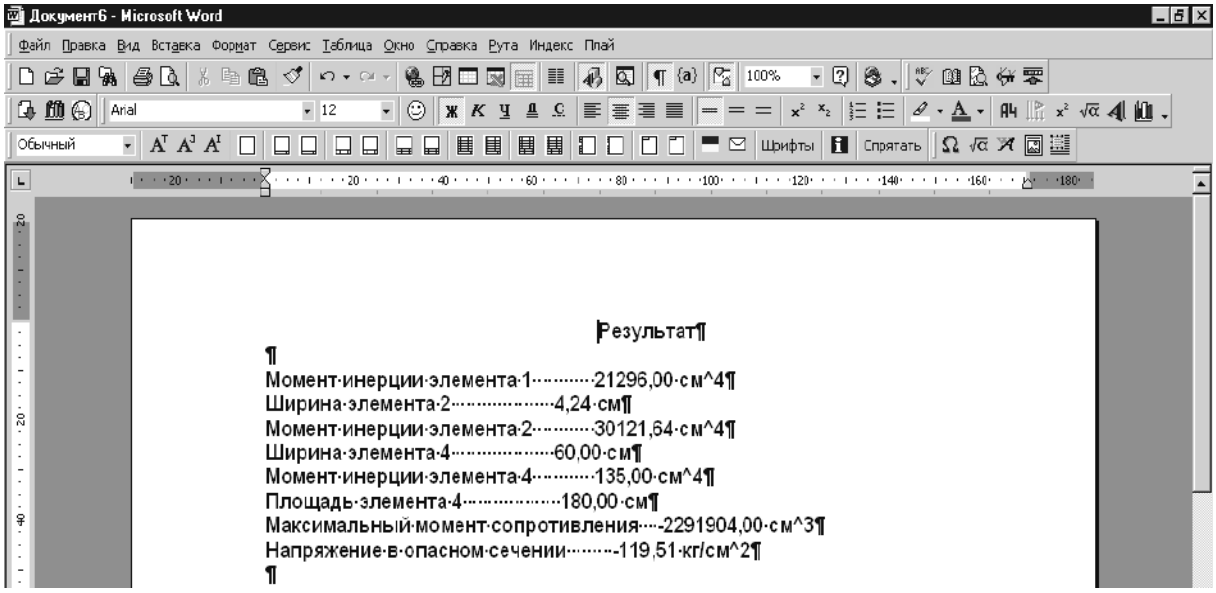
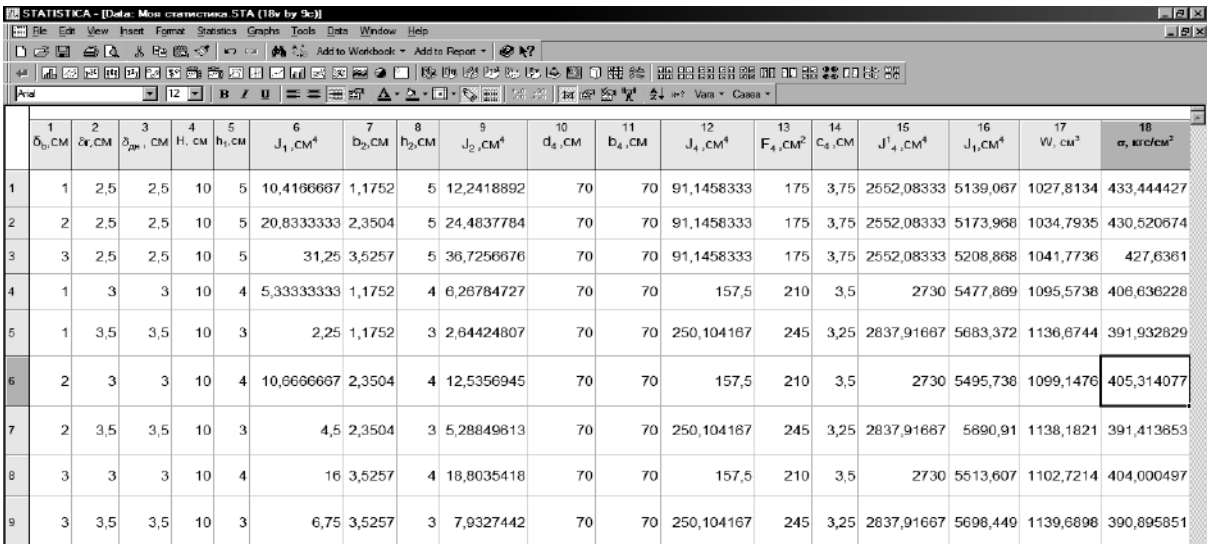


Рис. 2.32. Результат розрахунків на міцність верхньої траверси імпульсної формувальної машини

2.6. Удосконалення імпульсної машини. Розрахування траверси з вісьма ребрами жорсткості

Траверса може також бути виконана як лита деталь коробчатого перерізу, розділена перегородками на ряд сполучених між собою відсіків. На рис. 2.33 зображено робоче вікно програми STATISTICA з уведеними в неї вихідними даними й результатами розрахунків траверси з вісьмома ребрами жорсткості. За таблицею будуємо графік залежності напруг у небезпечному перерізі (рис. 2.34) $\sigma_{A\text{-}A}$ від моменту опору *W*, який зображений на рис. 2.35.



	1 δ_0,см	2 δ_r,см	3 $\delta_{дн}$, см	4 H, см	5 h_1,см	6 J_1,см^4	7 b_2,см	8 h_2,см	9 J_2,см^4	10 d_4,см	11 b_4,см	12 J_4,см^4	13 F_4,см^2	14 c_4,см	15 J'_4,см^4	16 J_1,см^4	17 W, см^3	18 σ, кгс/см^2
1	1	2,5	2,5	10	5	10,4166667	1,1752	5	12,2418892	70	70	91,1458333	175	3,75	2552,08333	5139,067	1027,8134	433,444427
2	2	2,5	2,5	10	5	20,8333333	2,3504	5	24,4837784	70	70	91,1458333	175	3,75	2552,08333	5173,968	1034,7935	430,520674
3	3	2,5	2,5	10	5	31,25	3,5257	5	36,7256676	70	70	91,1458333	175	3,75	2552,08333	5208,868	1041,7736	427,6361
4	1	3	3	10	4	5,33333333	1,1752	4	6,26784727	70	70	157,5	210	3,5	2730	5477,869	1095,5738	406,636228
5	1	3,5	3,5	10	3	2,25	1,1752	3	2,64424807	70	70	250,104167	245	3,25	2837,91667	5683,372	1136,6744	391,932829
6	2	3	3	10	4	10,6666667	2,3504	4	12,5356945	70	70	157,5	210	3,5	2730	5495,738	1099,1476	405,314077
7	2	3,5	3,5	10	3	4,5	2,3504	3	5,28849613	70	70	250,104167	245	3,25	2837,91667	5690,91	1138,1821	391,413853
8	3	3	3	10	4	16	3,5257	4	18,8035418	70	70	157,5	210	3,5	2730	5513,607	1102,7214	404,000497
9	3	3,5	3,5	10	3	6,75	3,5257	3	7,9327442	70	70	250,104167	245	3,25	2837,91667	5698,449	1139,6898	390,895851

Рис. 2.33. Робоче вікно програми STATISTICA.

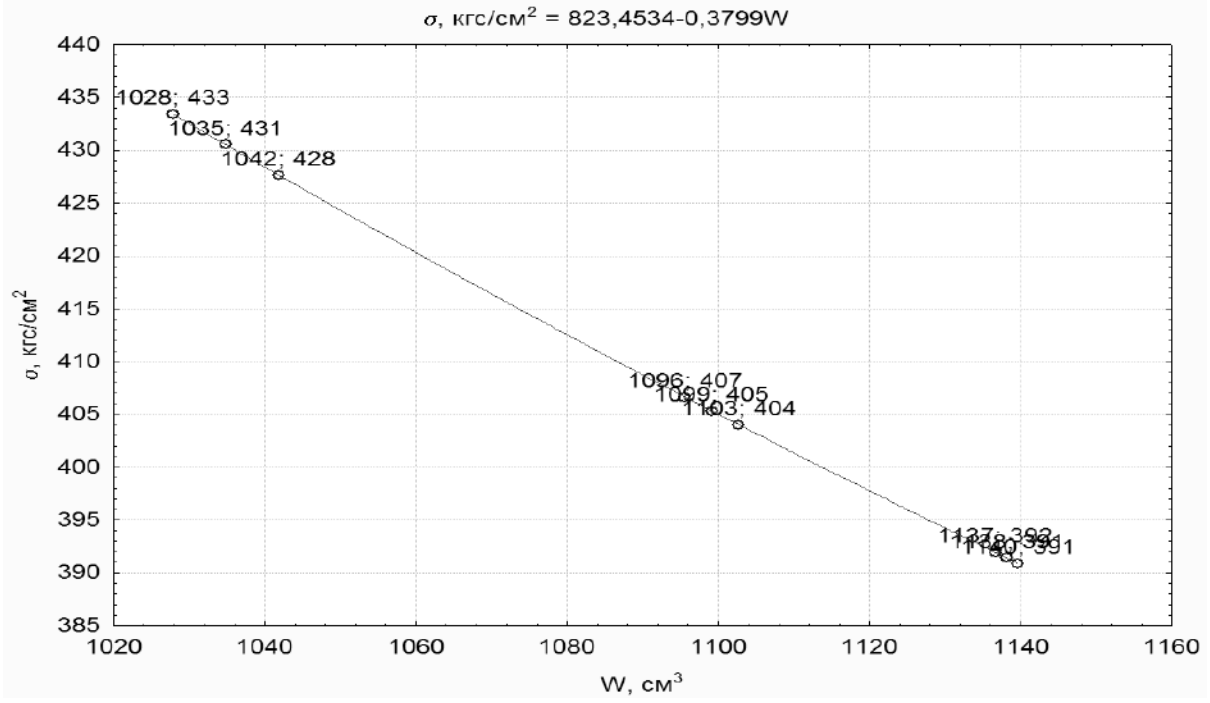


Рис 2.34. Графік залежності напруг у небезпечному перерізі $\sigma_{g\text{-}g}$ від моменту опору W

З рис. 2.34 видно, що при збільшенні моменту опору, а значить і розмірів вертикальних ребер жорсткості й висоти днища, напруги вигину падають. Щоб визначити оптимальний варіант розмірів ребер і висоти траверси для неї, будуємо об'ємний графік, зображений на рис. 2.35.

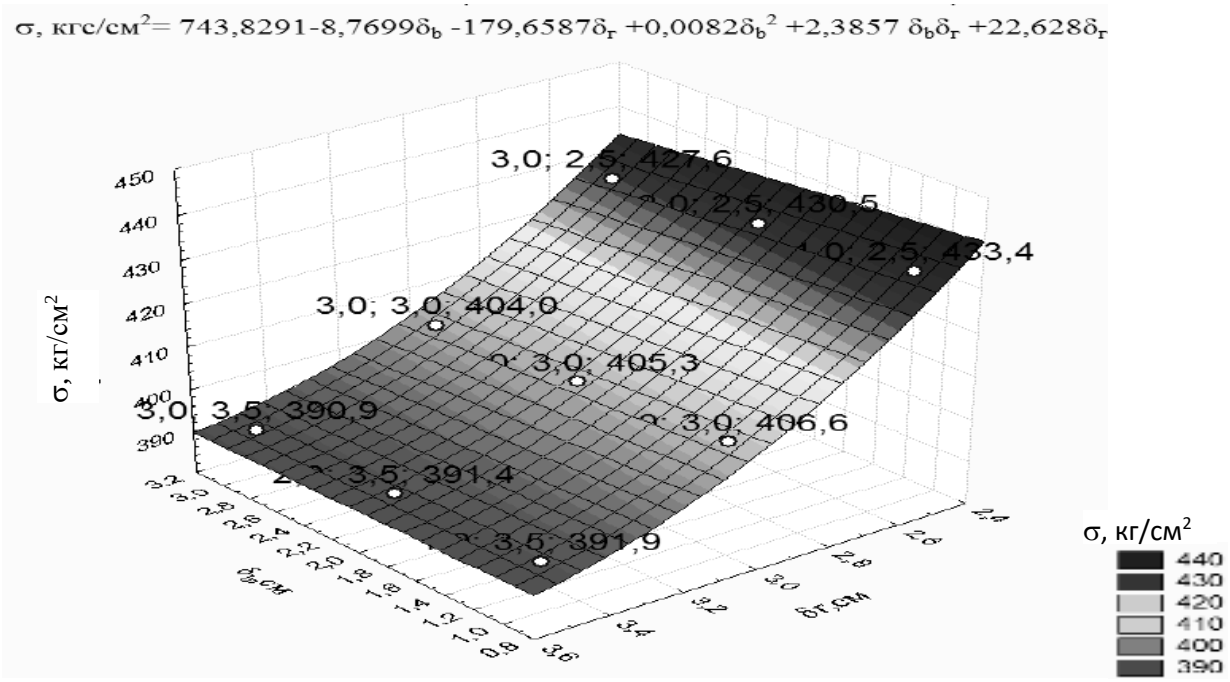


Рис. 2.35. Графік залежності напруг у небезпечному перерізі від геометричних характеристик траверси

Із цього графіка видно, що умові $\sigma_{A-A} \le [\sigma]_p$ відповідають варіанти, коли товщина вертикальних ребер δb дорівнює 30 мм, товщина днища $\delta_г$ – 35 мм і висота траверси – 200 мм.

На рис. 2.36 показаний результат розрахунків напруг, що виникають траверсі цієї конструкції, виконаний у пакеті програм Cosmosxpress.

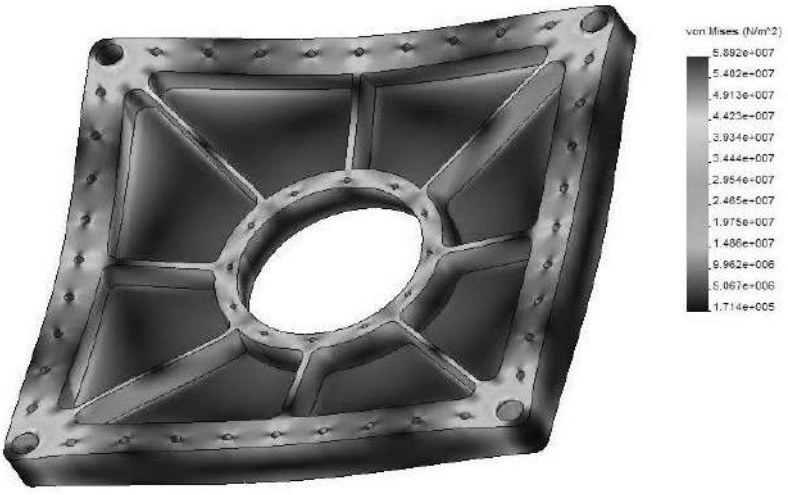


Рис. 2.36. Результат розрахунків напруг, що виникають на траверсі цієї конструкції, виконаний у пакеті програм Cosmosxpress

У результаті розрахування одержали, що найбільш доцільним варіантом за цих навантажень і конструкції траверси є установлення траверси з товщиною вертикальних ребер δb рівною 30 мм, товщиною днища ребер $\delta_г$ – 35 мм і висотою – 200 мм. При цьому напруги в небезпечному перерізі становлять 39,09 МПа

2.6.1. Розрахування траверси із чотирма ребрами жорсткості

Наведена конструкція траверси має такі особливості: по кутах станини в місцях кріплення колон і в центральній частині є втулки. Центральна втулка *3* пов'язана із чотирма втулками *2* колон ребрами *1* (товщиною $b_в$). Знизу траверси є днище, у якому втулка *5* утворює проріз для установки імпульсного клапана (рис. 2.37).

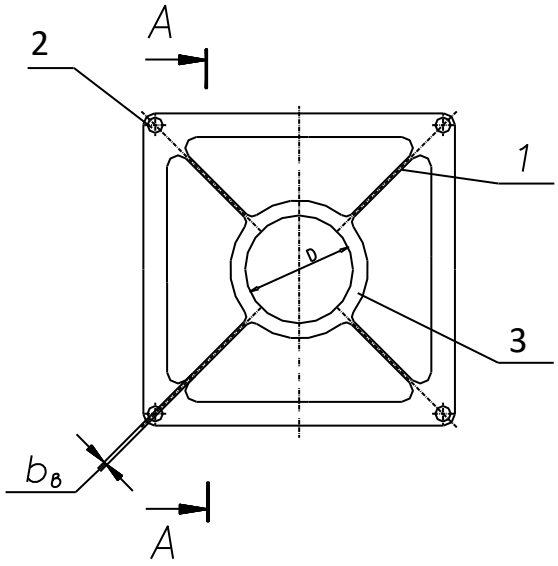


Рис. 2.37. Схема розрахування траверси

Умова працездатності конструкції:

$$\sigma_{A-A} \le [\sigma]_р \qquad (2.105)$$

де $[\sigma]_р$ –допустима напруга на розтяг матеріалу траверси;

$\sigma A{-}A$ – напруга, що діє в небезпечному перерізі.

Приймемо запас міцності рівним 1,5...2. Звідси: $[\sigma]_р = (1{,}5...2)\ \sigma_р$. Приймемо, що траверсу виготовлено зі сталі *3*, для якої $\sigma_р$ =100 МПа [5].

Небезпечний переріз *А–А* умовної балки показано на рис. 2.38. Він складається із окремих елементів: елементи 2, 3 – переріз половини поперечного ребра $b_п$; елементи *1* – переріз нижніх горизонтальних стінок $b_г$.

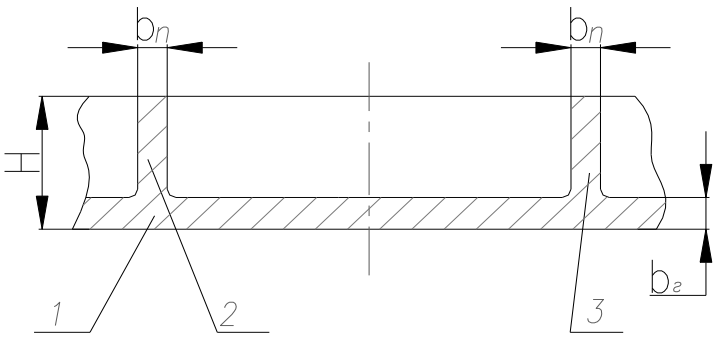


Рис. 2.38. Перетин А-А повернено

Момент опору перерізу (у загальному вигляді)

$$W = \frac{2J}{h}, \tag{2.106}$$

де J – момент інерції перерізу;

h – висота перерізу.

Момент інерції перерізу (у загальному вигляді):

$$J = \sum_{i=1}^{n}(J_i + F_i c_i^2), \tag{2.107}$$

де J_i – момент інерції елементів перетину щодо осей, що проходять через центри ваги цих елементів;

F_i – площі елементів перерізу;

c_i – відстань від центру ваги O_i елемента i до загального центру ваги перерізу *ПРО*;

n – кількість елементів перерізу.

J знаходимо за формулою:

$$J = 2J_2 + 2(J_4 + F_4 c_4^2). \tag{2.108}$$

Методику розрахування геометричних характеристик перерізу *А–А* наведено в табл. 2.12.

Таблиця 2.12 – Розрахування геометричних характеристик перерізу *А–А*

Параметр	Позначення	Розмірність	Формула
1. Товщина вертикальних ребер	$\delta_{\text{п}}$	см	–
2. Товщина горизонтальної стінки	$\delta_{\text{г}}$	см	–
3. Висота перерізу	H	см	–
4. Ширина елемента 2	b_2	см	$b_2 = \frac{\delta_b}{\sin 45^o}$
5. Висота елемента 2	h_2	см	$h_2 = H - 2\delta_{\text{г}}$
6. Момент інерції елемента 2	J_2	см^4	$J_2 = \frac{b_2 h_2^3}{12}$
7. Ширина елемента 4	b_1	см	$b_4 = 2\frac{d_4}{2} tg45^o$
8. Висота елемента 5	h_1	см	$h_4 = \delta_{\text{г}}$
9. Момент інерції елемента 4	J_1	см^4	$J_4 = \frac{b_4 h_4^3}{12}$
10. Площа елемента 4	F_1	см^2	$F_4 = h_4 b_4$
11. Відстань $\text{ПРО}_4\,\text{ПРО}_5$	c_1	см	$c_4 = \frac{H}{2} - \frac{h_{\text{г}}}{2}$
12. Момент інерції щодо центру ваги	J_{41}	см^4	$J_4^1 = J_4 + F_4 c_4^2$

Подальші розрахунки виконуємо на ЕОМ за допомогою пакета програм STATISTICA. Вибираємо діапазони розмірів вертикальних і горизонтальних ребер і висоти перерізу:

1 – для вертикальних ребер: 10, 20 і 30 мм;

2 – для товщини днища: 25, 30 і 35 мм.

Далі визначаються моменти опору W і напруги в небезпечному перерізі σ*А–А*, для кожного випадку, й будується тривимірний графік (рис. 2.39). Результати розрахунків наведено на рис. 2.39.

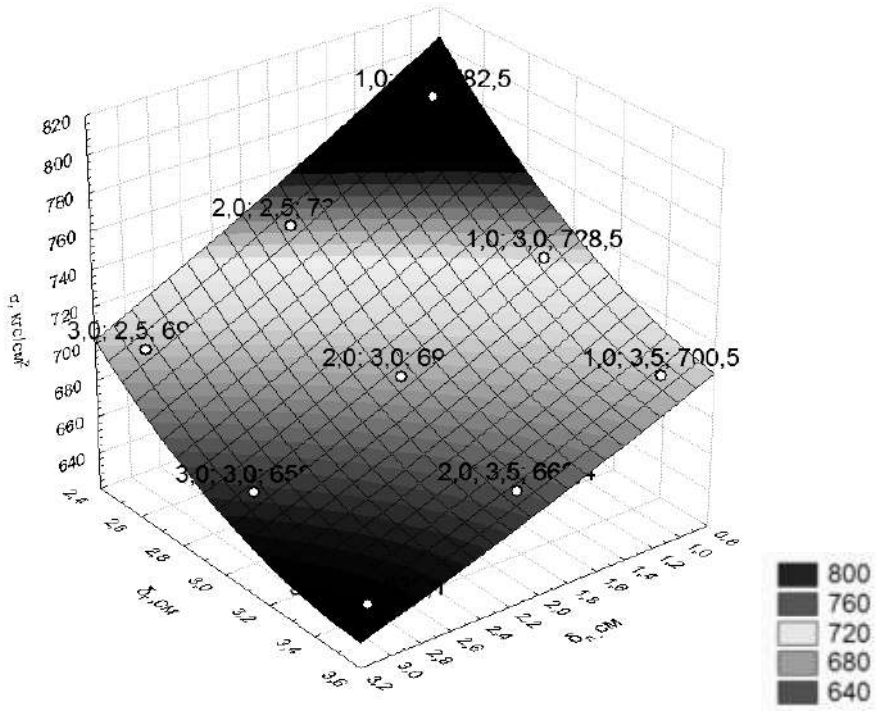


Рис. 2.39. Графік залежності напруг у небезпечному перерізі від геометричних характеристик траверси

	1 $\delta_п$,см	2 $\delta_г$,см	3 H, см	4 b_2,см	5 h_2,см	6 J_2, см^4	7 D ,см	8 J_1,см^4	9 F_1 ,см^2	10 c_1,см	11 J_1^1, см^4	12 J, см^4	13 W, см^3	14 σ, кгс/см^2
1	1	2,5	20	1,429	17,5	638	70	91,14583	175	7,5	9934,896	21145,8333	1208,3333	782,482759
2	2	2,5	20	2,857	17,5	1276	70	91,14583	175	7,5	9934,896	22421,875	1281,25	737,95122
3	3	2,5	20	4,286	17,5	1914	70	91,14583	175	7,5	9934,896	23697,9167	1354,1667	698,215385
4	1	3	20	1,429	17	584,9	70	157,5	210	7	10447,5	22064,7619	1297,9272	728,469225
5	1	3,5	20	1,429	16,5	534,8	70	250,1042	245	6,5	10601,35	22272,2619	1349,8341	700,456472
6	2	3	20	2,857	17	1170	70	157,5	210	7	10447,5	23234,5238	1366,7367	691,793821
7	2	3,5	20	2,857	16,5	1070	70	250,1042	245	6,5	10601,35	23341,8155	1414,6555	668,360609
8	3	3	20	4,286	17	1755	70	157,5	210	7	10447,5	24404,2857	1435,5462	658,634315
9	3	3,5	20	4,286	16,5	1604	70	250,1042	245	6,5	10601,35	24411,369	1479,4769	639,077225

Рис. 2.40. Результати розрахунків

З рис. 2.39 видно, що траверса цієї конструкції не може бути установлена на машину, тому що не виконується умова працездатності конструкції $\sigma_{A-A} \leq (1{,}5–2)\ \sigma_{р.}$

Розрахування напруг, що виникають на траверсі цієї конструкції, виконано у пакеті програм COSMOSXpress. Результат цього розрахування наведено на рис. 2.41.

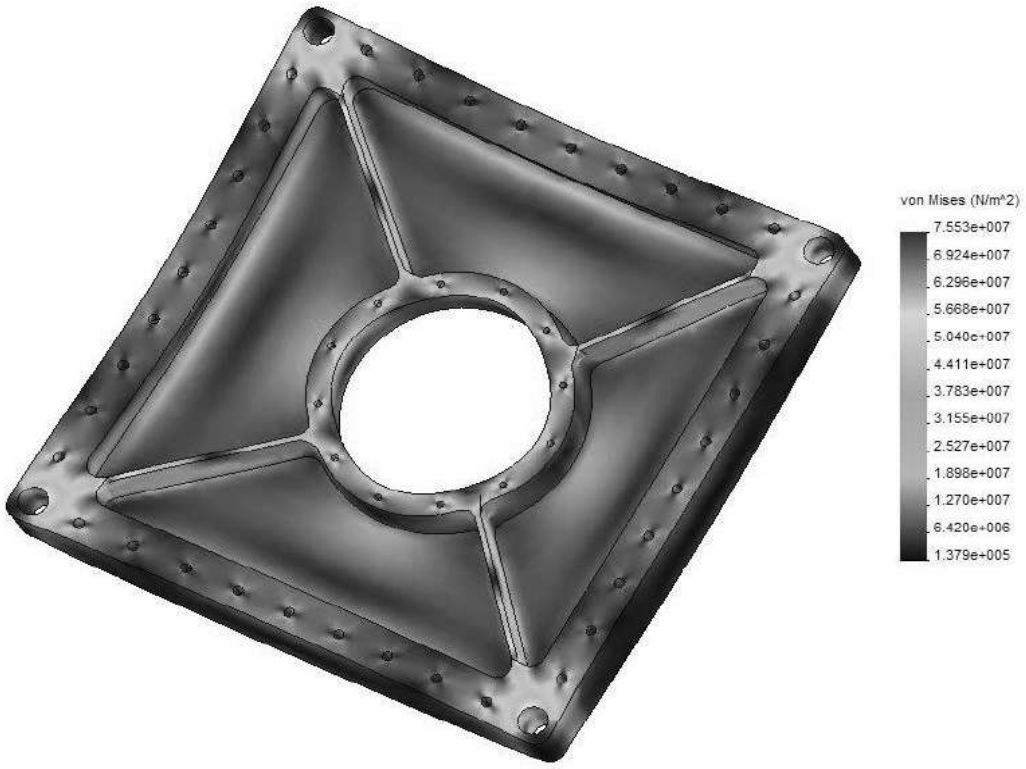


Рис. 2.41. Результат розрахування напруг, що виникають на траверсі цієї конструкції, виконаний у пакеті програм Cosmosxpress.

2.6.2. Розрахування траверси із чотирма ребрами жорсткості, посиленими горизонтальними стінками

Для проведення розрахунків траверси подамо її як умовну балку на двох опорах з навантаженням у середині прольоту (рис. 2.42). Уважаємо, що половина зусилля *R* сприймається двома колонами, розташованими по діагоналі, а інша половина – двома іншими колонами.

Умова працездатності конструкції:

$$\sigma_{A-A} \le [\sigma]_p \qquad (2.109)$$

де $[\sigma]_p$ –допустима напруга на розтяг, матеріалу траверси;

σ_{A-A} – напруга, що діє в небезпечному перерізі.

Приймемо запас міцності рівним: $[\sigma]_p = (1{,}5...2)\,\sigma_p$. Приймемо, що траверсу виготовлено зі сталі *3*. Небезпечним є переріз *A–A*, що примикає до центральної втулки, тобто який знаходиться на відстані *x* від лівої опори (рис. 2.42).

Напруга в небезпечному перерізі:

$$\sigma_{A-A} = \frac{M(X)}{W}, \tag{2.110}$$

де $M(X)$ – момент, що діє на відстані X від опори.

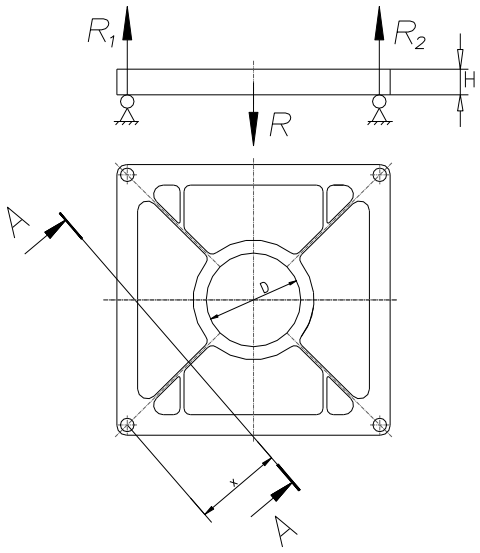


Рис. 2.42. Схема розрахування траверси

Момент, що діє на відстані X від лівої опори, (див. рис. 2.37)

$$M(X) = P_к X \tag{2.111}$$

$$P_к = \frac{R}{k} \tag{2.112}$$

де $P_к$ – реакція опори, Н ;
k – кількість колон.

$$R = 0{,}046 P_р V_о \tag{2.113}$$

де $P_р$ – робочий тиск ущільнення, кг/см^2 ;
$V_о$ – об’єм ресивера імпульсної головки, см^3 .
Максимальний момент, що діє в небезпечному перерізі:

$$M_g = P_k \cdot l_{mg}. \tag{2.114}$$

Момент опору перерізу (у загальному вигляді):

$$W = \frac{2J}{h}, \tag{2.115}$$

де J – момент інерції перерізу;

h – висота перерізу.

Момент інерції перерізу (у загальному вигляді):

$$J = \sum_{i=1}^{n}(J_i + F_i c_i^2) \tag{2.116}$$

де J_i – момент інерції елементів перерізу щодо осей, що проходять через центри ваги цих елементів;

F_i – площі елементів перерізу;

c_i – відстань від центру ваги O_i елемента i до загального центру ваги перерізу *ПРО*;

n – кількість елементів перерізу.

На рис. 2.43 зображений небезпечний переріз *А–А*.

Для визначення моменту опору $W(x)$ розглянемо прерізн *А–А*, наведений на рис. 2.43.

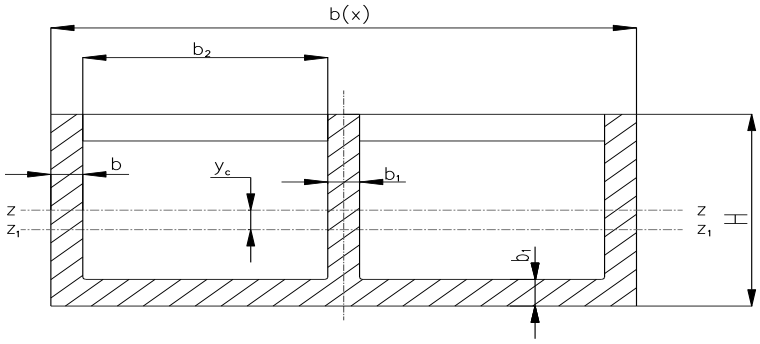


Рис.2.43. Переріз А–А

Відстань від нейтральної осі $Z_{1\text{-}Z1}$ до осі симетрії перерізу z-z дорівнює:

$$y_c = \frac{F_1 y_1 - F_2 y_2 - F_3 y_3}{F}, \tag{2.117}$$

де

$$F_1 = b(x)\, h; \tag{2.118}$$

$$F_2 = [b(x) - 2\delta - \delta_1] \cdot (h - \delta_1); \tag{2.119}$$

$$F_3 = \frac{\delta_1}{2}[b(x) - 2\,\delta - \delta_1] \tag{2.120}$$

$$F = F_1 - F_2 - F_3, \tag{2.121}$$

де h, δ, δ_1 – розміри елементів перерізу;

$b(x)$ – ширина перерізу;

y_1, y_2, y_3 – відстань від центрів ваги елементів перерізу до осі Z–Z.

Тому що $y_1 = y_2 = 0$, а

$$y_3 = \frac{h - \delta_1}{2} \tag{2.122}$$

то

$$y_c = \frac{F_3 y_3}{F} \tag{2.123}$$

Відстані від центрів ваги елементів до нейтральної осі перерізу дорівнюють

$$\begin{aligned} a_1 &= a_2 = y_C, \\ a_3 &= y_3 = y_C \end{aligned} \tag{2.124}$$

Знаходимо момент інерції перерізу щодо нейтральної осі

$$I(x) = (I_1 = a_{12} \cdot F_1) - (I_2 + a_{22} \cdot F_2) - (I_3 = a_{32} \cdot F_3), \tag{2.125}$$

де

$$I_1 = \frac{b(x)h^3}{12} \tag{2.126}$$

$$I_2 = \frac{[b(x) - 2\delta - \delta_1](h - \delta_1)^3}{12} \tag{2.127}$$

$$I_3 = \frac{\delta_{13}}{2} \times \frac{[b(x) - 2\delta - \delta_1]}{12} \tag{2.128}$$

Момент опору перерізу

$$W(x) = \frac{I(x)}{a_3} \quad . \tag{2.125}$$

Подальші розрахунки виконуються на ПЕВМ за допомогою пакета програм STATISTICA. Створюється таблиця, що складається з 17–ті змінних і 9–ти випадків. Вибираємо діапазони розмірів елементів перерізу:

– висота траверси 150, 175, 200 мм

– розміри ребер жорсткості 20, 25, 30 мм.

На рис. 2.44 наведено результати розрахунків. Щоб визначити оптимальний варіант розмірів ребер і висоти траверси, за даними рис. 2.44 будується об'ємний графік, зображений на рис. 2.45. З цього рисунку видно, що найкращому варіанту відповідає випадок, коли розміри ребер жорсткості дорівнюють 30 мм, а висота траверси – 200 мм .

Розрахунки напруг, що виникають на траверсі цієї конструкції, виконуються в пакеті програм Cosmosxpress. На рис. 2.46 показаний результат розрахунків напруг, що виникають на траверсі цієї конструкції.

	1 δ_1, см	2 δ, см	3 H, см	4 b(x), см	5 F_1, см^2	6 F_2, см^2	7 F_3, см^2	8 F, см^2	9 y_3, см	10 y_c, см	11 a_3, см	12 I_1,см^4	13 I_2,см^4	14 I_3,см^4	15 I(x),см^4	16 W(x),см^3	17 σ(x),кгс/см^2
1	3	10	20	40	800	289	25,5	485,5	8,5	0,446	8,946	26666,7	6960,08	19,13	17748,3	1983,8	415,860229
2	2,5	10	20	40	800	306,3	21,88	471,9	8,75	0,406	9,156	26666,7	7815,76	11,39	17087,1	1866,3	442,053111
3	2	10	20	40	800	324	18	458	9	0,354	9,354	26666,7	8748	6	16397,4	1753	470,612934
4	3	10	15	40	600	204	25,5	370,5	6	0,413	6,413	11250	2448	19,13	7801,69	1216,6	678,14619
5	2,5	10	15	40	600	218,8	21,88	359,4	6,25	0,38	6,63	11250	2848,31	11,39	7483,79	1128,7	730,927143
6	2	10	15	40	600	234	18	348	6,5	0,336	6,836	11250	3295,5	6	7148,66	1045,7	788,940542
7	3	10	17,5	40	700	246,5	25,5	428	7,25	0,432	7,682	17864,6	4318,89	19,13	12106,4	1576	523,493694
8	2,5	10	17,5	40	700	262,5	21,88	415,6	7,5	0,395	7,895	17864,6	4921,88	11,39	11636,1	1473,9	559,737917
9	2	10	17,5	40	700	279	18	403	7,75	0,346	8,096	17864,6	5585,81	6	11143,4	1376,4	599,399867

Рис. 2.44. Результати розрахування

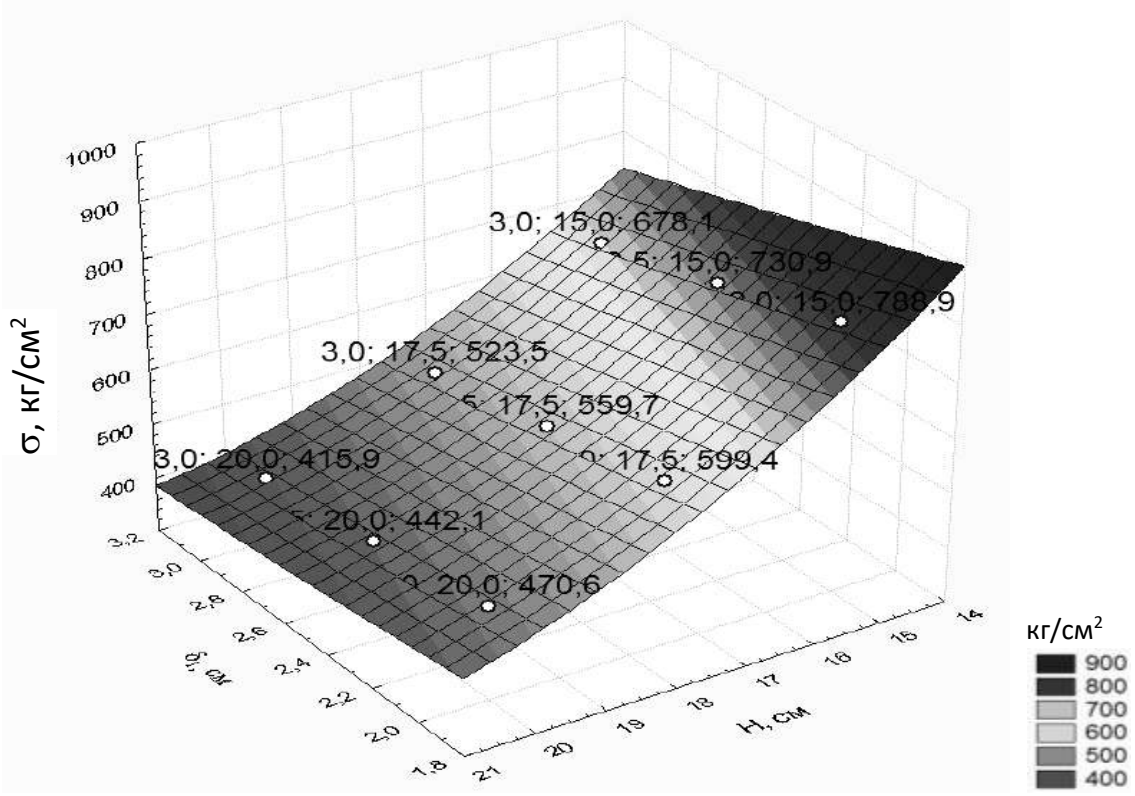


Рис. 2.45. Графік залежності напруг у небезпечному перерізі від геометричних характеристик траверси

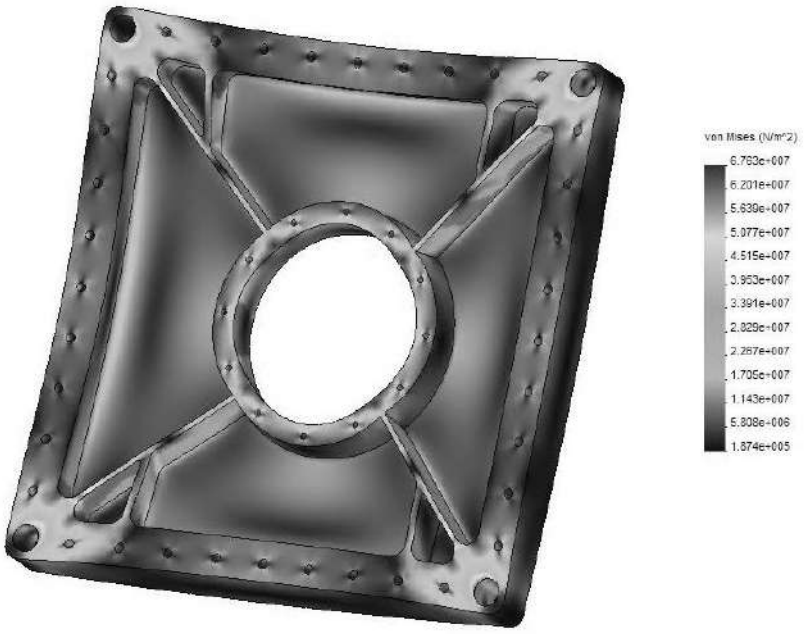


Рис. 2.46. Результат розрахування напруг, що виникають на траверсі цієї конструкції, виконаний у пакеті програм Cosmosxpress

2.6.3. Вибір оптимальної конструкції траверси

Класифікація критеріїв оцінки надійності машин:

1) технологічність конструкції розуміють як сукупність ознак, що забезпечують найбільш економічне, швидке й продуктивне виготовлення машин із застосуванням прогресивних методів обробки при одночасному підвищенні якості, точності й взаємозамінності частин;

2) якість – це об'єктна й загальна характеристика об'єктів, що виявляється в комбінації їх властивостей [1];

3) продуктивність устаткування – обсяг продукції (роботи), виробленої за одиницю часу цим устаткуванням відповідно до його конструктивних особливостей, технічної характеристики, що визначається організаційно–виробничими умовами [1];

4) довговічність – властивість технічного об'єкта зберігати (за умови проведення технічного обслуговування й ремонтів) працездатний стан із плином певного часу або аж до виконання певних обсягів робіт. Довговічність характеризується технічними ресурсами або терміном служби [1];

5) працездатність – це стан виробу, при якому він здатний виконувати задані функції, зберігаючи значення заданих параметрів у межах, установлених нормативно-технічною документацією [1].

За приведеними вище критеріями вибираємо другий варіант траверси із чотирма ребрами жорсткості, посиленими горизонтальними стінками, тому що ця конструкція витримує навантаження, що діють на неї простіша у виготовленні й має масу на 400 кг менше.

2.6.4. Побудова 3D–моделі імпульсної машини й створення конструкторської документації

Програма виконана із застосуванням як мови реалізації Microsoft Visual Basic, а також Solid Works програми для побудови бази даних готових елементів. Великий внесок зі створення програм зробили студенти спеціальності «Устаткування ливарного виробництва» В. Ковригін, А. Верба, О. Малюченко.

Вихідними даними для цієї програми служить габарит опок і продуктивність. Після введення даних починається обробка й розрахування основних параметрів імпульсної головки, потім здійснюється розрахування параметрів імпульсної головки програма й видаються рекомендації щодо компонування машини (тупикового або прохідного типу), конструкції механізму протягання моделі, робочого тиску ущільнення (високого або низького) та ін. Далі йде звертання до бази даних готових елементів, з якої, залежно від розрахованих параметрів і виданих рекомендацій, вибирається 3D–модель устаткування, додаткові компоненти, і демонструється схема роботи устаткування. Одночасно із цим з 3D версії встаткування моделюється 2D–версія, яка виводиться у вікно програми як гіперпосилання. Схему видачі рекомендацій у головному вікні програми наведено на рис. 2.47.

Рис. 2.47. Видача рекомендацій у головному вікні програми

Робота програм заснована на спеціально розроблених алгоритмах, які використовуються для побудови тривимірних робочих моделей машин зале-

жно від розрахунків машин за загальноприйнятими формулами. Обробка необхідних математичних розрахунків і логічних операцій здійснюється в спеціальних електронних таблицях, виконаних на основі програми Excel. Автоматичне тривимірне проектування й побудова двовимірних креслень виконується в програмі Solid Works.

Після проведення за оригінальними комп'ютерними програмами розрахунків конструктивних параметрів імпульсних головок за допомогою перехідних програм виконуємо до креслення в пакеті Solid Works (рис. 2.48).

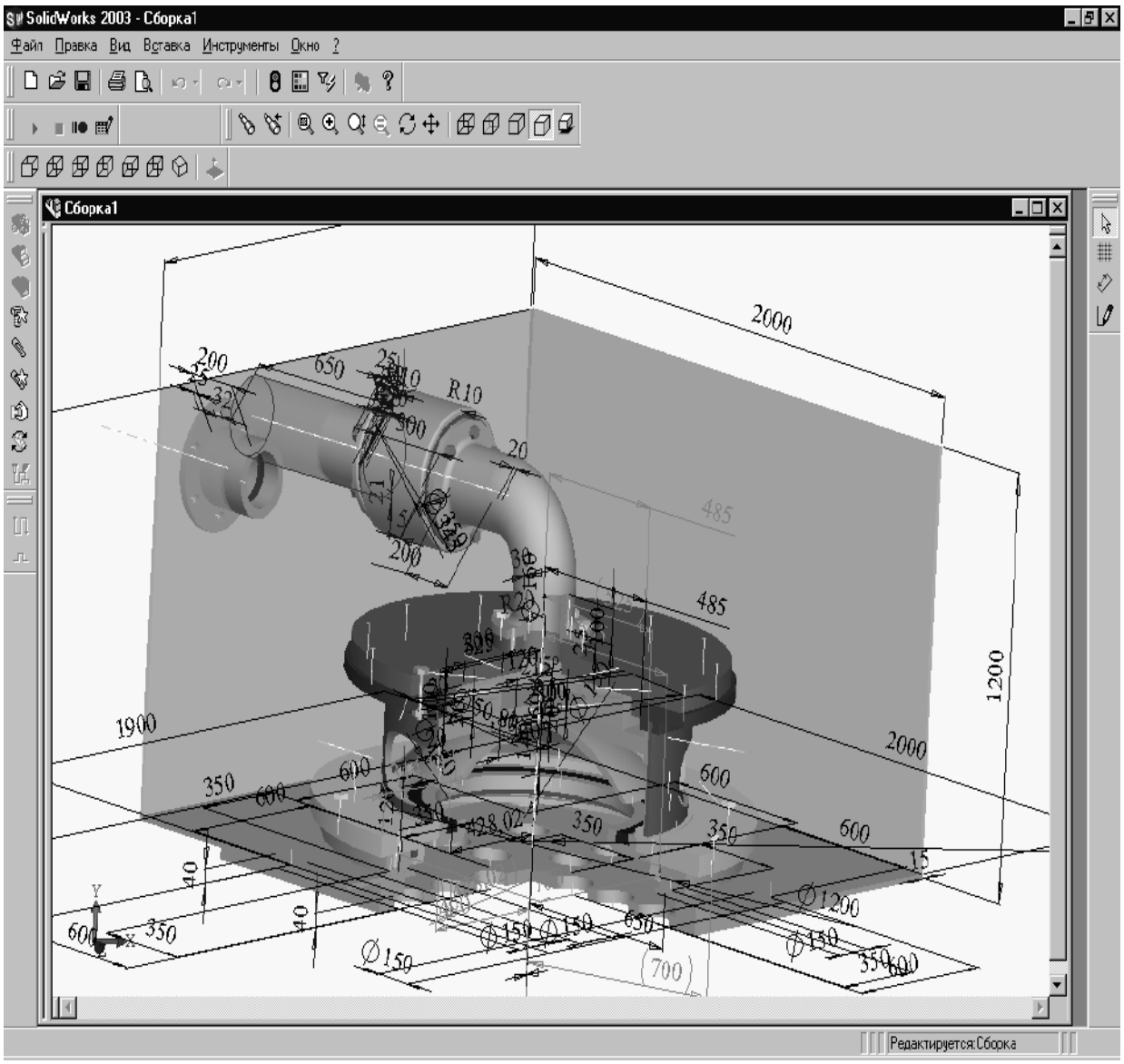


Рис. 2.48. Складальне креслення імпульсної головки низького тиску

Потім у пакеті Solid Works виконується деталювання поданої складальної одиниці. Зображення деталі клапана головки наведене на рис. 2.49, а його об'ємне зображення – на рис. 2.50.

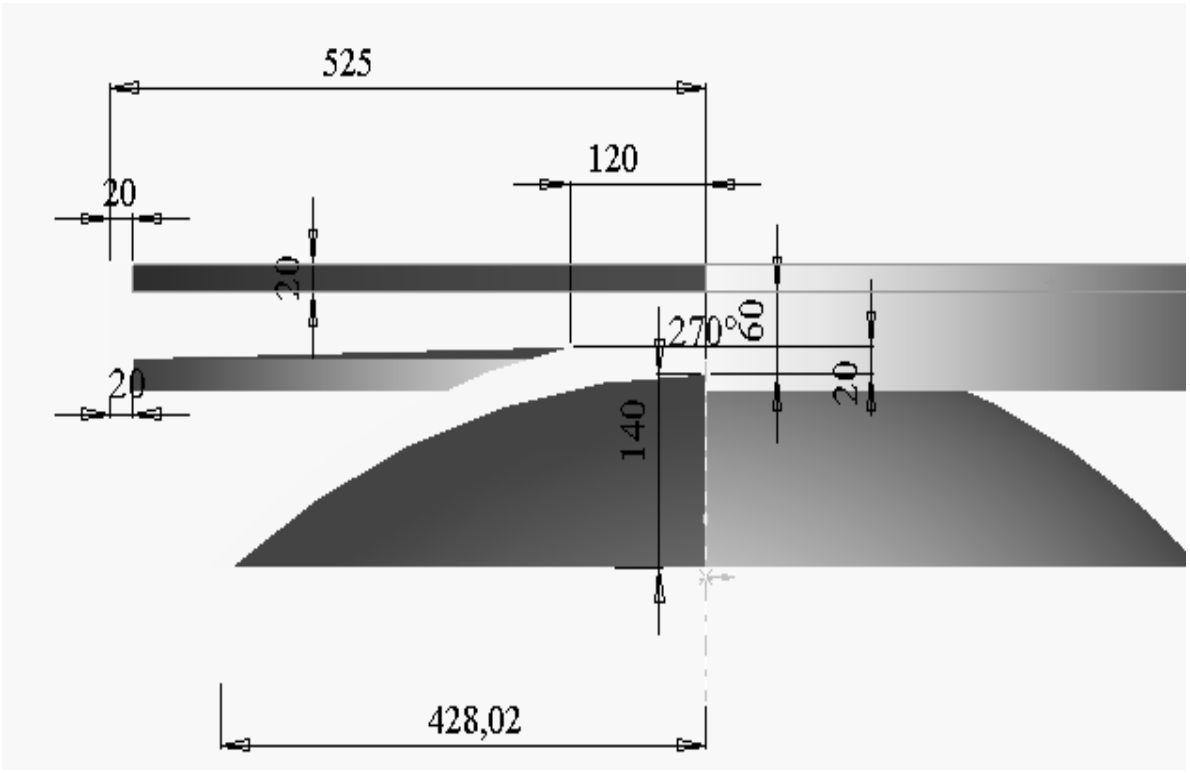


Рис. 2.49. Креслення деталі клапана головки низького тиску

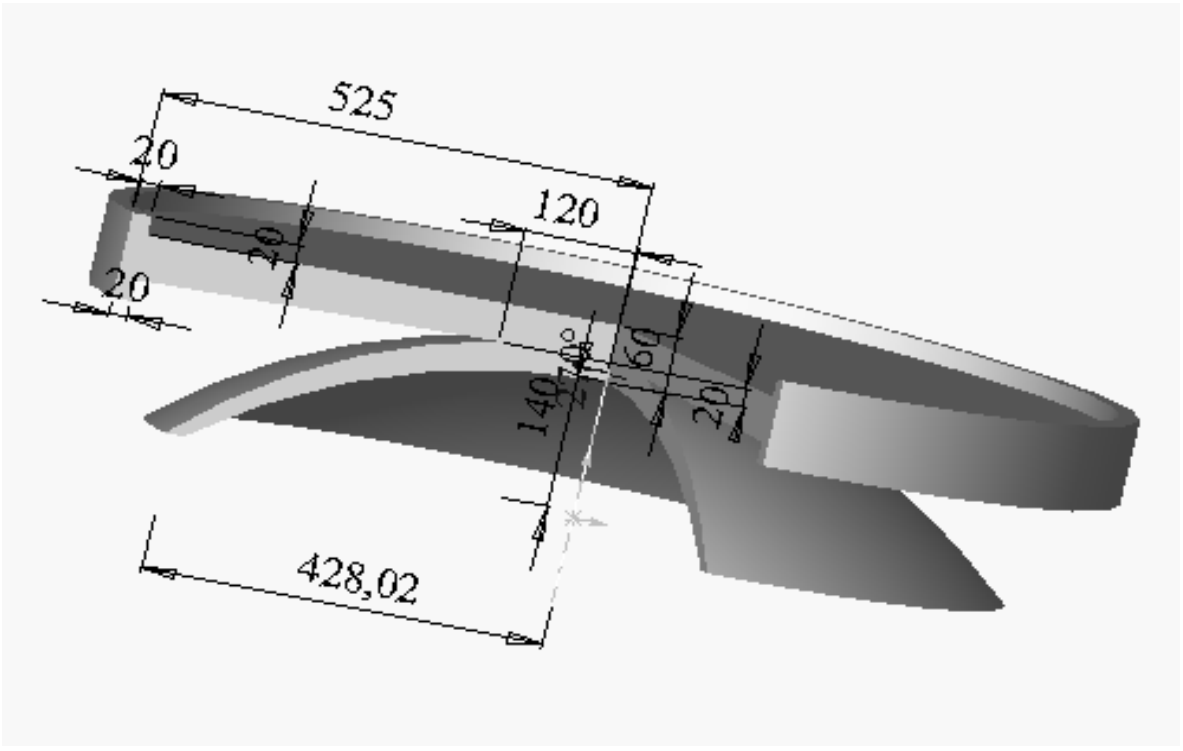


Рис. 2.50. Об'ємне зображення клапана головки низького тиску

Об'ємне зображення формувального блока з імпульсною головкою низького тиску, подачею оснащення, дозованим засипанням суміші й протяганням моделі наведено на рис. 2.51.

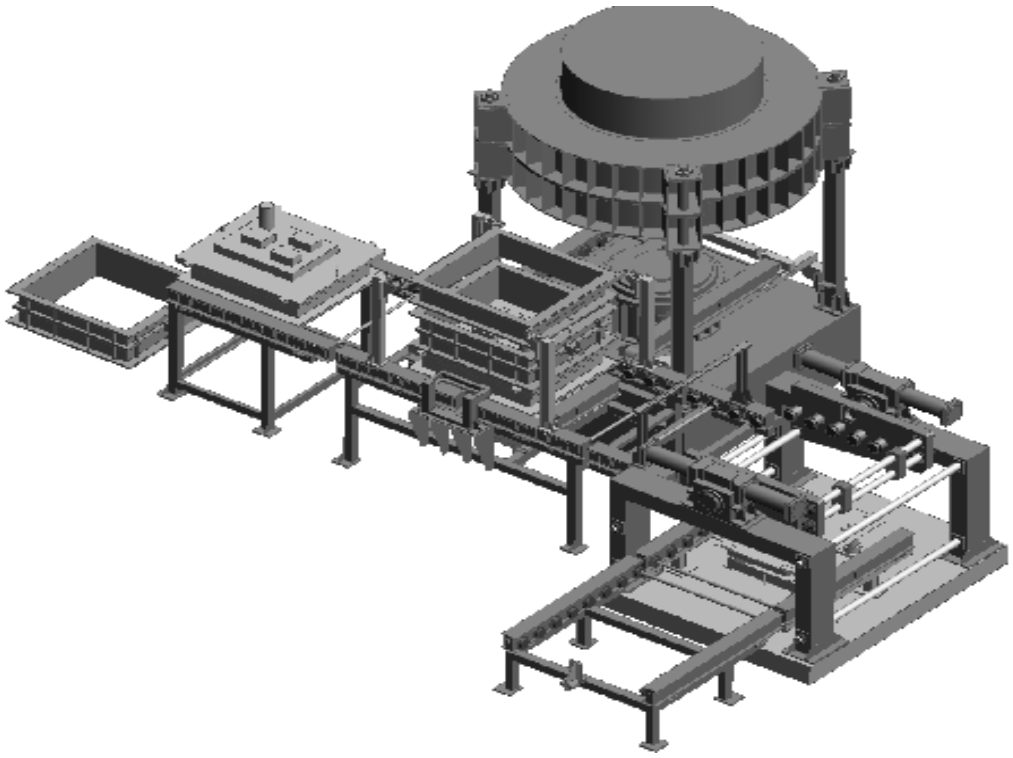


Рис. 2.51. Формувальний блок імпульсного формування низького тиску

Складальне креслення головки високого тиску наведено на рис. 2.52 і креслення її деталі – клапана (рис. 2.53).

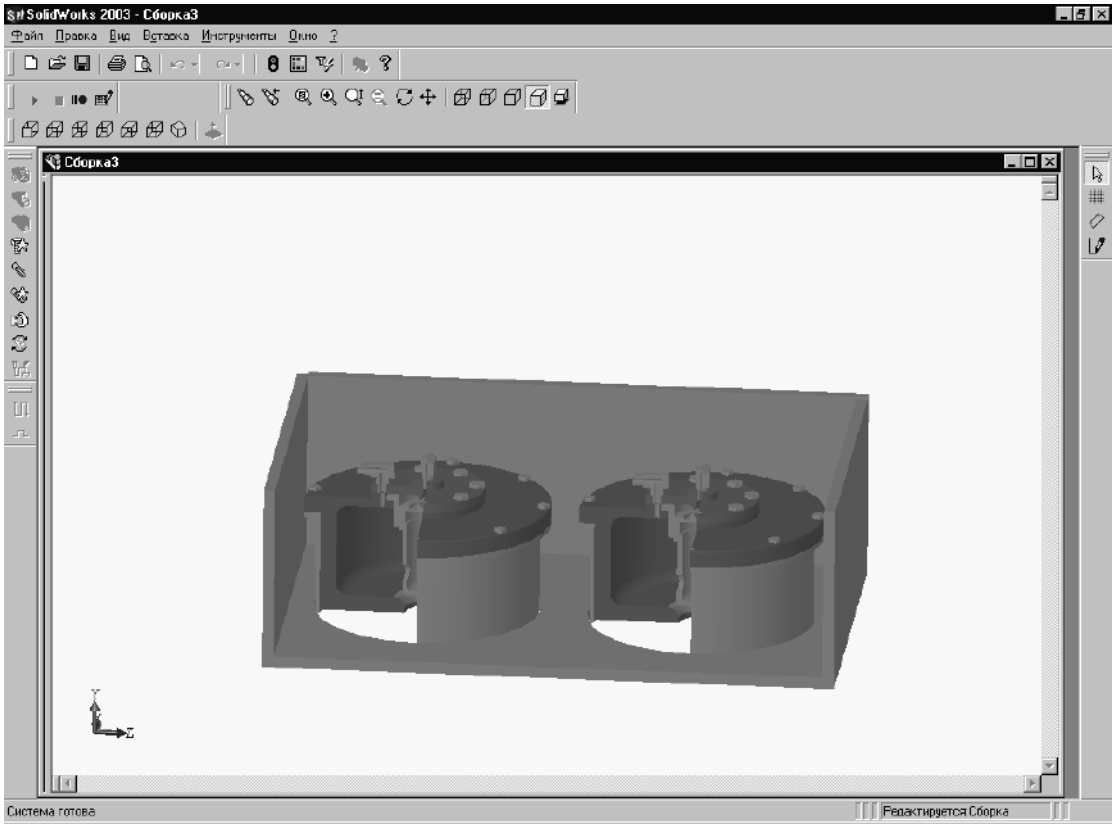


Рис. 2.52. Складальне креслення головки високого тиску

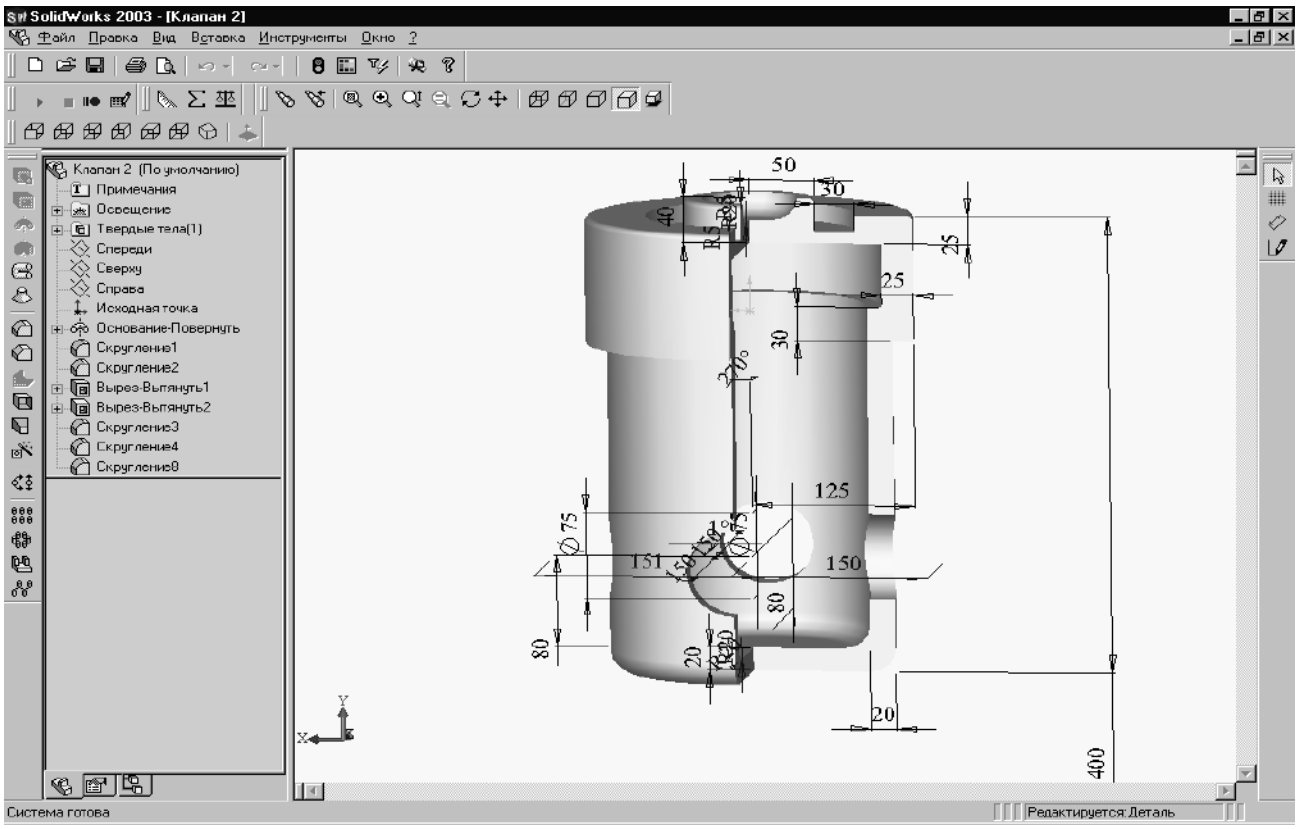


Рис. 2.53. Клапан головки високого тиску

Контрольні запитання

1. Які операції виконує система автоматизованого проектування ливарних машин за вказаними з боку користувача?
2. З чого розпочинається розробка математичної моделі машини?
3. Як здійснюється математичне моделювання пресового циліндра?
4. Як здійснюється математичне моделювання струшувального циліндра?
5. Поясніть класичну індикаторну діаграму пресового циліндра.
6. Поясніть класичну індикаторну діаграму струшувального циліндра з відсіканням і розширенням повітря.
7. Що забезпечує процес повітряно-імпульсного формоутворення?
8. Конструкція імпульсних машин високого тиску.
9. Конструкція імпульсних машин низького тиску.
10. Які параметри включає повний алгоритм розрахунку імпульсної машини?

РОЗДІЛ 3
МЕТОДИКА АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ЛОПАТЕВОГО ЗМІШУВАЧА

3.1. Критичний аналіз конструкцій лопатевих змішувачів для приготування холоднотвердіючих сумішей

Основною особливістю стрижневих сумішей, що твердіють без застосування нагрівання або іншого зовнішнього впливу, наприклад, без продування газоподібним каталізатором, є зворотний взаємозв'язок між швидкістю їх отвердження й живучістю. Це докладно висуває певні вимоги до процесу сумішоприготування й, отже, до змішувачів. По-перше, процес готування суміші має бути короткочасним (3...30 с) і по-друге, суміш повинна використовуватися негайно після готування [7].

Для готування холоднотвердіючих сумішей найбільш широко застосовують шнекові змішувачі, що забезпечують досить високу якість перемішування компонентів суміші. Максимальні значення міцності суміші, як правило, досягаються при тривалості перемішування до 0,5 хв у змішувачах безперервної дії й до 1 хв. у змішувачах періодичної дії. Конструкція змішувачів складається з таких основних частин: основи, змішувальної камери із приводом, дозатора піску, дозаторів рідких компонентів і системи керування. Змішувальна камера являє собою жолоб, у якому перебуває шнек, тобто вал із лопатями, розташованими за гвинтовою лінією. При обертанні шнека компоненти суміші одночасно перемішуються й транспортуються уздовж осі шнека, а потім вивантажуються зі змішувальної камери. Найбільш відомі моделі змішувачів, що ввійшли в довідкову літературу з ливарного устаткування, наведені в [7, 8]. У цей час у ливарних цехах працюють змішувачі моделей 4731, 4727 (рис. 3.1), 4737 і 4732 продуктивністю відповідно 1,0; 3,5; 6,0 і 16,0 т/год. До цих змішувачів входять чотири базові моделі 19641, 19653, 1655 і 19657 (табл. 3.1) відповідно продуктивністю 1,0; 2,5; 6,3 і 16 т/год.

У змішувачі безперервної дії компоненти подаються в один кінець жолоба, а суміші видаються через вікно на іншому його кінці; при цьому деякі компоненти можуть уводитися в різних зонах перемішування по всій довжині корпусу змішувача.

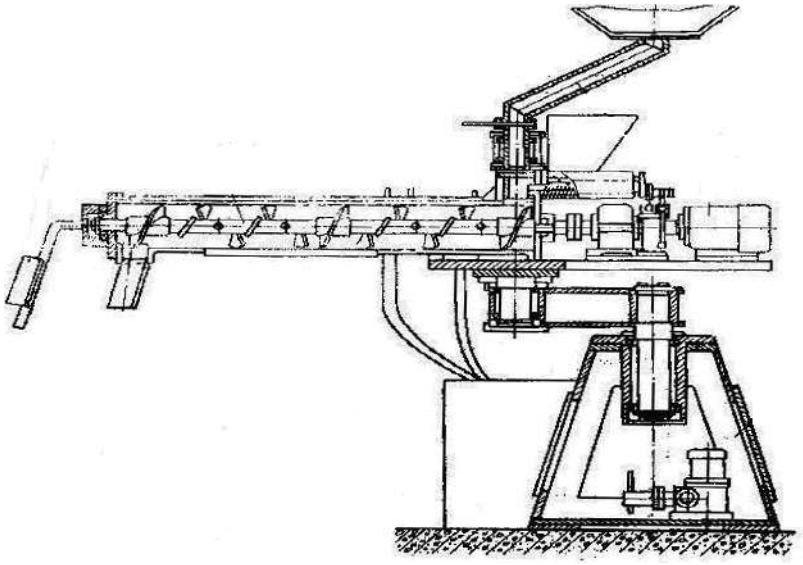


Рис. 3.1. Лопатевий змішувач моделі 4727.

Таблиця 3.1 – Характеристика змішувачів

Параметри	Модель змішувача		
	19665	19675	19677
	одноплечий	двоплечий	
Режим роботи	Налагоджувальний, безперервний		
Діапазон регулювання продуктивності, т/год	2,5–6,3	2,5–6,3	6,3–16
Найбільший радіус дії, мм	1800	5000	5000
Кут повороту першого плеча, град.	–	270	270
Кут повороту другого плеча (змішувальної камери), град.	240	300	300
Габаритні розміри, мм			
довжина	4200	7200	7200
ширина	1130	1130	1130
висота	3200	3500	3500
Маса змішувача без електрошафи, кг, не більш	2340	4550	4850

Лопатеві змішувачі мають один або два змішувальні вали в одному корпусі (одножолобні одновальні або одножолобні двовалові, рис. 3.2), а також окремі ізольовані жолоби для кожного вала при двоваловому виконанні.

Останні оснащуються додатково пескометною (змішувач 19639) або вихровою головкою, що розташовується під вікном видачі суміші. Перевага такого компонування полягає в можливості прискореного перемішування багатокомпонентних сумішей.

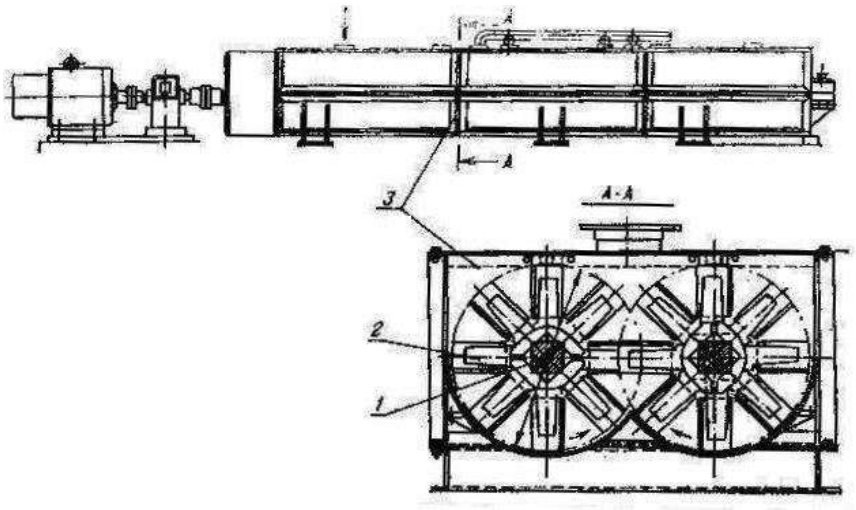


Рис. 3.2. Лопатевий двовалковий змішувач

У кожному з жолобів змішуються не регулюючі між собою компоненти, що взаємодіють між собою. Остаточне змішування відбувається у вихровій головці. Значно полегшується також наступне чищення змішувача й перехід з одного складу на інший. Для очищення вихрової головки від налиплої суміші можна застосувати дворазову продувку стисненим повітрям через вбудований колектор.

Вихрова головка являє собою конічний корпус, усередині якого обертається вертикальний вал із чотирма шарнірно закріпленими лопатками й горизонтальний диск, що несе похилі лопаті. До нижнього фланця корпуа прикріплений шиберний затвор із пневмоприводом.

Подаваний пісок проходить через дозатор, що регулює його потік зміною перерізу прохідного отвору пелюсткою, що відхиляється. Для припинення подачі піску є відсічний шибер із пневмоприводом.

Дозування рідких компонентів проводиться шестеренними насосами, установленими в основі змішувача. Регулювання кількості подаваної рідини здійснюється зміною частоти обертання насоса. Для візуального контролю витрати подаваної рідини передбачено ротаметри. Подача компонентів здійснюється через трилінійні клапани, які при короткочасних зупинках машини вимикають подачу й перемикають систему на циркулювання.

Перевагами таких змішувачів є можливість готування сумішей із невеликим циклом твердіння, різке скорочення втрат суміші, особливо за необ-

хідності подачі її невеликими порціями й при тривалих зупинках змішувача в процесі роботи. Цей тип змішувачів найбільш сучасний, з найбільшими технологічними можливостями, хоча за конструктивним виконанням більш складний.

Усі змішувачі гами можуть бути оснащені додатковим дозатором порошкоподібних добавок, подвійною насосною системою для автоматичного перемикання роботи змішувача з готування облицювальної суміші на формувальну. Наявність зазначених додаткових обладнань дозволяє суттєво розширити технологічні можливості й сферу застосування змішувачів. Типовим представником змішувачів цього класу є змішувач моделі 19655 (рис. 3.3).

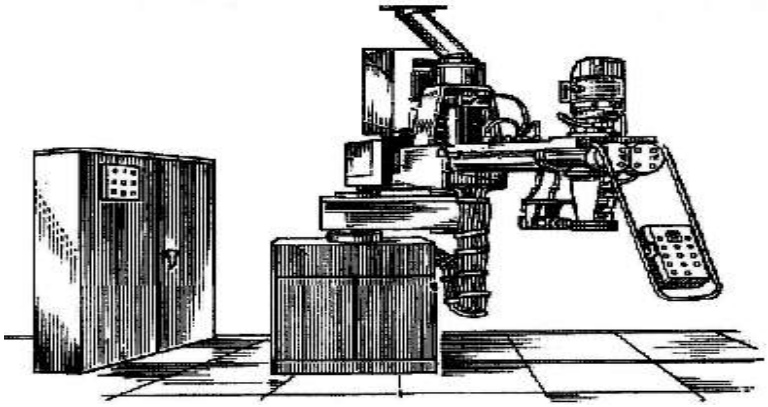


Рис. 3.3. Змішувач моделі 19655 для приготування ХТС

Отже, у конструкції проектованого змішувача (для готування стрижневої суміші) необхідно передбачити двоконтурну насосну систему подачі сполучного й каталізатора в камеру змішування.

На рис. 3.4 поданий, найбільш використовуваний у промисловості змішувач шнекового (гвинтового) типу.

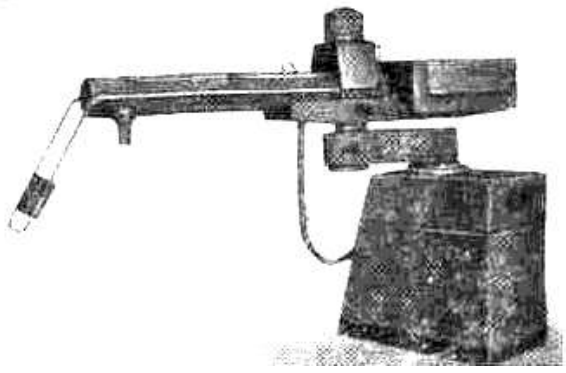


Рис. 3.4. Змішувач безперервної дії

До основних елементів конструкції належать змішувальна камера, один або два змішуваліні вали з лопатками й приводом, дозатори для подачі компонентів, витратні ємності й система керування для роботи в різних режимах (автоматичному, напівавтоматичному, налагоджувальному). Частота обертання вала зазвичай задається в інтервалі від 70 до 150 об/хв.

У цій моделі можна виділити такі особливості: компонування змішувача досить зручне (змішувач двоплечий і тому має великий радіус дії, але він однорукавний, і тому якість перемішування складових невисока).

При виробництві великих виливків, коли комбінуються суміші з різними наповнювачами, а також при використанні в складі ХТС відпрацьованих сумішей і регенерату, установки безперервної дії повинні забезпечувати можливість зміни складу наповнювача й відповідно складу суміші. Для цього передбачають подвійний бункер для наповнювачів із двома дозаторами й автоматичну систему переналагодження дозуючих обладнань на два або три склади сумішей. Таку установку наведено на рис. 3.5.

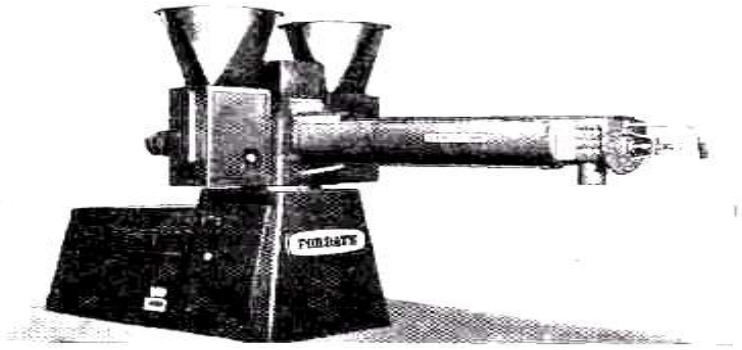


Рис. 3.5. Змішувач для роботи із двома наповнювачами

Цей змішувач може працювати із двома наповнювачами. Розглянутий змішувач зручний для великого лиття, оскільки дозволяє використовувати регенерат суміші й свіжу суміш, які одночасно надходять у камеру змішування. Однак розглянута модель – однорукавний і одноплечий змішувач без попереднього змішування сипучих компонентів. При організації виробництва стрижнів на плацу ділянки, коли стрижневі ящики розташовані на великій площі, установки виконуються двокамерними. Такий вид установки поданий на рис. 3.6.

Перша камера може бути тільки транспортною, що подає пісок, друга – змішувальною. В іншому варіанті в першій камері пісок змішується з каталізатором, у другий – у цю базову суміш уводиться сполучне. При одиничному характері виробництва, у цехах, де ускладнена або економічно невиправдана

організація потокового виробництва, двокамерні установки широко використовуються. Така конструкція змішувача зручна, коли потрібно використовувати принцип роздільного перемішування наповнювача з каталізатором і в'язуючим.

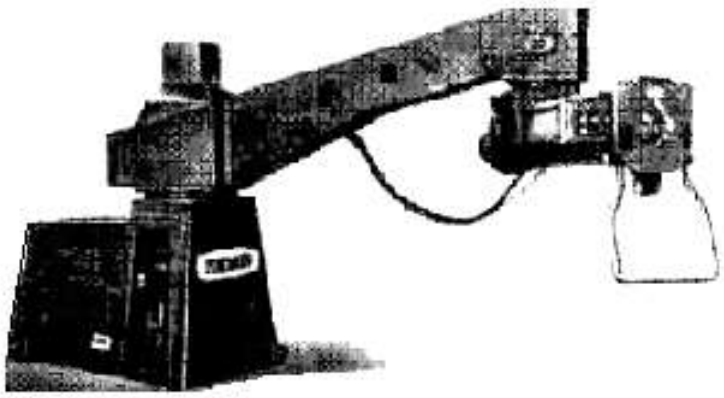


Рис. 3.6. Двокамерний змішувач безперервної дії

Однак усі раніше розглянуті змішувачі мають істотні недоліки щодо однорідності перемішування сипучих матеріалів за непрохідністю корпусу й лопаток відпрацьованим матеріалом, за недостатньо гнучким дозуванням, що впливає на якість затверділого у формі матеріалу.

3.2. Вплив технологічних факторів холоднотвердіючих стрижневих сумішей на конструктивні параметри лопатевих змішувачів

Як уже зазначено вище, для визначення оптимальної тієї або іншої конструкції необхідно знайти критерій оптимальності або, інакше кажучи, критерій якості (ефективності) ливарної машини. При оптимальному проектуванні необхідно визначити й обґрунтувати критерій оптимальності проектованого виробу й чітко виділити показники й характеристики, прийняті як обмеження.

Для створення нових конструкцій змішувачів для холоднотвердіючих сумішей, тим більше для їхнього автоматизованого проектування, необхідно дуже чітко уявляти, що являють собою ці суміші, і як їхні компоненти впливають на конструкцію змішувача. Тому, користуючись літературними відомостями, наведемо систематизацію сумішей ХТС.

3.2.1. Склад і властивості холоднотвердіючих сумішей

Загальні дані про процес ХТС було викладено й опубліковано в матеріалах ряду конференцій і з'їздів ливарників [6, 7]. Поняття «Холоднотвердіючі суміші (ХТС)» включає два принципово різні типи матеріалів. Відмінність полягає в технології їх зміцнення.

До першого типу належать суміші, що твердіють без зовнішнього впливу; до їхнього складу входить в'яжуче й отверджувач (або каталізатор). Це, так званий, No Bake-Процес. У табл. 3.2 наведено назви сполучних і каталізаторів (отверджувачів) відповідних процесів, що застосовують у промисловості, й рік їх появи.

Таблиця 3.2 – Суміші, які твердіють без зовнішнього впливу

Назва процесу	Назви в'яжучих	Назви каталізаторів (отверджувачів)
ХТС (1958 р.)	Смоли: карбамідо-формальдегідні; карбамідно-фуранові; феноло-формальдегідні; фенолофуранові;	Ортофосфорна кислота; сульфокислоти (БСК і ПТСК)
P-Set (1984 р.)	Фенольна смола + поліізоціанат	Рідкий амін
α-Set (1984 р.)	Лужна фенольна смола	Суміш складних ефірів
ХТС (1968 р.)	Рідке скло	Складний ефір або їх суміш
ХТС (1970 р.)	Оксиди магнію й заліза	Ортофосфорна кислота

Другий тип суміші – ті що твердіють під впливом зовнішнього газоподібного реагенту, який продувають через стрижень або форму. Загальний іноземнийтермін для сумішей цього типу – Cold-Box-процес. Такі процеси з відповідними сполучними й каталізаторами (отверджувачами) наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Суміші, які твердіють під впливом зовнішнього реагенту

Назва процесу	Сполучне	Каталізатор (отверджувач)
Cold-box-amin (1968р)	Фенольна смола + поліізоціанат	Газоподібний амін
P-set (1968 р)	Лужна фенольна смола	Метилформіат
Resol-CO_2 (1990 р)	Лужна фенольна смола	Вуглекислий газ
Epoxy-sog (1982 р)	Епоксидна смола + акрилат + органічний пероксид	Сірчистий ангідрид
CO_2 -процес (1952 р)	Рідке скло	Вуглекислий газ

3.2.2. Критерії оцінки стрижнів

Критерії оцінки стрижнів, виготовлених із сумішей двох типів (залежно від напрямів використання), призначаються за рядом напрямів: технічного, економічного, екологічного.

Для першого (технічного) напряму основним критерієм оцінки стрижня є – його міцність.

Міцність стрижня залежить від властивостей суміші (які за різних умов показують різні результати) і від живучості суміші (яка, насамперед, залежить від зміни одного процесу на інший, наприклад на Box-Amin-Процес).

Перелічимо умови виробництва суміші, які найбільш сильно змінюють її властивості й, отже, найбільш впливають на міцність стрижня:

1) високі температури, які визначають якість виливків, вибивальність, можливість регенерації відпрацьованих сумішей та ряд спеціальних вимог (наприклад, температуру в цеху, якість піску) і потрібні:

а) для одержання високої термостійкості сумішей (яка визначає можливі межі товщини стінок виливка, наявність теплових вузлів і вид сплаву);

б) для одержання високої вибивальності сумішей (міцність стрижня пов'язана прямо з термостійкістю). Сполучні композиції розташовані за збільшенням термостійкості й зменшенням вибивальності, яка, природно, поліпшується при зниженні термостійкості.

Поліпшити вибивальність можна, якщо застосувавти спеціальні варіанти в’яжучого. Інший шлях:

– зниження складу в’яжучого, наприклад, у Box-Amin-процесі з 1,4...1,6 до 0,9–1,0 %. Однак при цьому потрібно брати до уваги певне зниження міцності, яке припустиме для конкретної номенклатури стрижнів;

– заміна кварцового піску на спеціальні наповнювачі – циркон, хроміт, хромомагнезит, магнезит, дистенсиліманіт (діапазон вибору сумішей розширюється);

– зниження газовиділень і газоутворення. Необхідно зазначити, що газотвірність ХТС на поліуретановій основі в 1,5...2 рази нижче газотвірності сумішей гарячого отвердження (5...6 $см^3/г$ для ХТС замість 9...11 $см^3/г$ для КФ-35 або М-3).

2) Для економічного напряму основним критерієм є собівартість застосування нового процесу порівняно з обраною базою. Окремо необхідно враховуватирезерви підвищення точності виливків і пов'язані із цим:

– зниження маси виливків;

– зменшення обсягу механічної обробки;

– економію енергоресурсів;

– вартість виготовлення й ремонту оснащення;

– частку витрат на вихідні формувальні матеріали, виготовлення стрижнів і форм у собівартості виливка.

Крім цього, потрібно брати до уваги економічні аспекти, що знаходяться за межами собівартості, такі найважливіші які створення технічного потенціалу для освоєння нових видів продукції, зміцнення позицій у конкурентній боротьбі, вирішення деяких соціальних проблем, експортні можливості, сертифікація за ISO та ін.

3) В екологічному напрямі основними критеріями мають бути дані про:

– газовиділення при виготовленні стрижнів і форм (на «холодній» стадії);

– газовиділення при заливанні, охолодженні, вибіванні (на «гарячій» стадії).

У виробництві газовиділення залежать не тільки від природи сполучного, але й від складів сумішей, співвідношень «метал-форма» і «метал-стрижень», технологічного циклу, систем вентиляції та ін. Тому екологічна характеристика процесу на основі відомостей про «токсичність» сполучного завжди є умовною й попередньою, а в повному обсязі її можна одержати тільки безпосередньо в умовах діючого виробництва, заміривши фактичний склад повітряного середовища й порівнявши його з рівнем ПДК.

3.2.3. Удосконалювання процесів сумішеприготування ХТС

Удосконалювання процесу проходить у декількох напрямках:

– підвищення міцності стрижнів відразу після продування й при подальшому зберіганні за рахунок модифікування фенольної частини й раціонального добору розчинників. Суміші останнього покоління (із вмістом 1,25 % сполучного) мають міцність на розрив відразу після продування 1,0...1,2 МПа, а через 24 год : 2,0...2,1 МПа. Підвищення міцності дозволяє знизити вміст сполучного в суміші до 1,2 %, а в деяких випадках до 0,8....1 %. Це обумовлює низьку газотвірність, екологічні переваги, зниження вартості суміші, кращу регенерованість та ін;

– підвищення живучості сумішей за рахунок уведення спеціальних добавок. При використанні вуглеводневих розчинників живучість становить не менш 4–5 год, а при використанні метилових ефірів – 12...13 год. У новітніх стрижневих комплексах цикл побудований так, що живучість потрібна тільки для перерв і аварійних ситуацій, але за великих обсягів, централізованого сумішоприготування й роздачі по машинах живучість потрібна постійно;

– зниження липкості стрижнів до оснащення, для чого застосовують роздільні покриття. Однак більш технологічно й зручно вводити в сполучне

компоненти, які знижують липкість, що збільшує кількість циклів у 2...3 рази;

– підвищення стійкості сумішей проти «вологого старіння» уведенням модифікаторів, тому що суміші під час приготування схильні до деякого зневоднення при зберіганні стрижнів в умовах високої вологості (зазвичай понад 80 %). Для сполучних композицій уведено показник – міцність при зберіганні протягом 24 год при відносній вологості 100 %, який може становити 50...60 % первісної міцності. У нових композиціях його підвищено до 80...90 %;

– вирішення проблем, пов'язаних зі зниженням міцнісних властивостей при фарбуванні водними фарбами й наступному підсушуванні (стандартної технології в масовому виробництві). Відразу після виходу стрижня із сушіння його міцність («гаряча» міцність) значно знижується й відновлюється після охолодження стрижня практично до вихідного рівня.

Сучасна суміш має такі міцнісні властивості, МПа: відразу після продувки 1,1...1,2; через 5 хв 1,4...1,6; через 1 год 1,6...1,8; через 24 год 2,0...2,2; через 24 год при вологості 90 % 0,8...1,0. Гарячий пофарбований стрижень має міцність 0,4...0,5 МПа, холодний пофарбований стрижень 1,2...1,4 МПа. При модифікуванні смоли міцність гарячого пофарбованого стрижня збільшується до 0,7 МПа.

Залежно від складу отверджувача (співвідношення в ньому реагенту повільної й швидкої дії) живучість і відповідно швидкість отвердження можуть регулюватися в межах від 3...5 до 30...40 і більш хвилин. Так, для вирішення проблеми вибивальності й усунення токсичності (не потребує токсичного отвердувача) створений Resol-CO_2-процес (як альтернатива Cold-box-amin- і CO_2-процесам). Дані про цей процес наведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Суміші, що твердіють за допомогою газоподібних реагентів

Параметр	Cold-box-amin	P-set	Resol-CO_2	CO_2-процес
Витрата в’яжучого, мас.ч.*	0,8 смоли + 0,8 зоціанату + 0,15ТЕА	1,6 смоли + 0,5 метил-форміату	2,8 смоли + 1,3 CO_2	4 рідкого скла + 0,4 CO_2,
Відносна вартість в’яжучого	100	125	120	110
Текучість, % на 100 мас.ч. піску	98,5	95,5	93,0	86,0

У сумішах ХТС, отриманих Resol-CO_2-процесом, в’яжуче є водорозчинна лужна фенолформальдегідна смола, що містить менше 1 % вільного

фенолу й менше 0,1 % вільного формальдегіду. Сполучне містить «запал», який при високому вихідному рівні pH неактивний.

При введенні в суміш вуглекислого газу pH переходить у кисле середовище і настає первинне отвердження, що відповідає формуванню міцності достатньої для транспортування. При подальшій витримці стрижня на повітрі міцність збільшується. Вміст сполучного становить зазвичай 2,8...3,0 % від маси суміші, витрата вуглекислого газу 40...60 % від маси в'яжучого, зазвичай витрата газу дорівнює 200...400 дм^3/хв (залежно від об'єму стрижня). Цю технологію застосовують для виготовлення стрижнів відносно простої конфігурації при виробництві чавунних і сталевих виливків. За вартістю суміш порівнянна з іншими сумішами, які твердіють за допомогою газоподібних реагентів, що використовуються у наступних процесах.

Важливо, що текучість суміші, яку використовують у Resol-CO_2-процесі, несуттєво відрізняється від текучості сумішей, отриманих іншими процесами. На користь впровадження Resol-CO_2-процесу можна навести такі аргументи:

– у сполучному немає азоту, сірки, фосфору й досить низький вміст вільного фенолу й формальдегіду;

– при виробництві сталевих виливків відсутні такі дефекти, як блискучий вуглець, пористість, просічки й тріщини;

– відсутній захах при готуванні;

– незначні газовиділення при виготовленні стрижнів, заливанні, вибиванні;

– можна використовувати водні й спиртові протипригарні покриття;

– фарбу можна підсушувати в печах повітряного сушіння й у печах СВЧ;

– підвищується продуктивність завдяки зменшенню трудомісткості фінішних операцій і при фарбуванні стрижнів (у необхідних випадках);

– не застосовуються вибухонебезпечні й займисті матеріали Pep-set-процес.

В'яжуча композиція, так само як і для Box-Amin-процесу, являє собою трикомпонентну поліуретанову систему. Перший компонент – фенолформальдегідна смола новолачного типу в спеціальному розчиннику, другий компонент – поліізоціанат у спеціальному розчиннику, каталізатор –амінопіридинового класу.

Як правило, вміст фенольної смоли й поліізоціанату в суміші – 50/50 при загальній кількості сполучного 0,7...1,5 %. Каталізатор уводять безпосе-

редньо в суміш або попередньо у фенольну частину в кількості 5...10 % від її маси.

Для вирішення проблеми живучості суміші з'явився Pep-Set-процес. Унікальна особливість сумішей, використовуваних у Pep-Set-процесі, – співвідношення «живучість/час протягання (час досягнення такої міцності стрижня, коли можливі будь-які маніпуляції з ним)» близьке до 0,5...0,6, тоді як у всіх інших сумішей першого типу воно становить 0,05...0,2. Формування міцності починається відразу після втрати живучості й досягає 70...80% кінцевого значення протягом 1 год. Для регулювання живучості роблять чотири типи каталізаторів, що забезпечують різні властивості суміші (табл. 3.5).

Таблиця 3.5 – Залежність живучості суміші від типу каталізатора

Властивості суміші	Тип каталізатора			
	I	II	III	IV
1	2	3	4	5
Живучість, хв	5	10	16	40
Час до протягання, хв	8	16	26	75
Міцність при розриві, МПа, через 1 год,	1,6...1,8	1,1...1,3	0,8...1,0	0,3...0,4
3 год,	1,7...2,1	1,9...2,2	1,8...2,2	0,9...1,1
24 год	2,0...2,3	1,9...2,3	2,1...2,5	2,6...2,7

3.2.4. Загальні технологічні проблеми для різних типів сумішей ХТС

Розглянемо ряд загальних технологічних питань, які виникають при використанні різних типів ХТС.

1. Порядок уведення компонентів.

Ефективність перемішування й властивості сумішей залежать від порядку введення компонентів сполучної композиції. Як правило, спочатку вводять каталізатор, а потім в'яжуче. Це пояснюється тим, що каталізатор через малу в'язкість і гарне змочування легко покриває зерна наповнювача й створює умови для більш рівномірного розподілу сполучного. Відповідно при такому порядку досягається максимальна міцність.

При зворотному порядку введення швидкість отвердження виявляється більш високою, тому що гомогенізація малов'язкої рідини в більш грузькій потребує меншої енергії, ніж при зворотному процесі. Однак при цьому кін-

цева міцність суміші нижче через менш рівномірний розподіл сполучного й меншу кількість мостів між зернами в одиниці об'єму.

2. Введення різної кількості каталізаторів.

Живучість суміші можна регулювати введенням різної кількості каталізаторів. Оскільки живучість суміші невелика, то змішувач для її готування встановлюють безпосередньо на робочому місці, і суміш відразу ж після її готування використовується.

3. Транспортування, зберігання, дозування компонентів ХТС.

У цей час смоли, як і раніше, є небезпечними матеріалами, що значно ускладнює транспортування, зберігання, дозування компонентів холоднотвердіючих сумішей.

Отже, створення нових моделей змішувачів із більш досконалими дозаторами – сьогодні важливе завдання. Тенденція, що навіть з'явилася до створення менш отруйних смол, однаково не потребує значення конструкторських розв'язків.

3.3. Удосконалення лопатевого змішувача

Вдалий вибір змішувача залежить від безлічі технологічних параметрів і умов, оптимальну комбінацію яких важко визначити без використання ЕОМ. Автоматизоване проектування дозволяє впорядкувати наявну велику інформацію з цієї теми відповідно до логічної схеми побудови об'єкта і системного зв'язку між елементами завдання, що розв’язується [11]. Методика буде мати таку структуру (рис. 3.7).

Дослідження проводились у такій послідовності:

1. Розробка алгоритмічної моделі об'єкта дослідження – лопатевого змішувача. Основною в’яжучого ланкою між конструкцією й технологією є передбачувана продуктивність установки й розподіл лиття за ваговими групами, які визначають габаритні розміри машини.

2. Ключовим фактором технології є міцність суміші на розрив, тому необхідно знайти її взаємозв'язок із конструкцією. Відомо, що міцність суміші визначається в першу чергу, кількістю в’яжучого й каталізатора отвердження. Кількість пилу, що втримується в піску, сильно впливає на процентний вміст цих компонентів, а оскільки змішувач високошвидкісний, то руйнування суміші буде відбуватися досить інтенсивно.

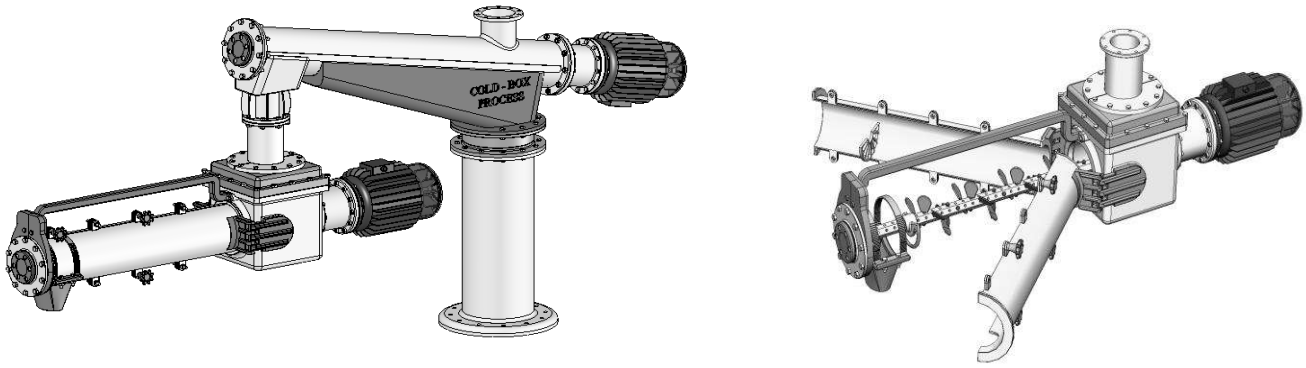
Отже, міцність суміші буде падати навіть при достатній кількості в’яжучіх компонентів. Тому потрібно визначити таку частоту обертання вала й такий кут нахилу лопаток, при яких зерна піску не будуть руйнуватися.

Рис. 3.7. Структура проектування змішувачів з урахуванням впливу технологічних параметрів

3. Проведення оптимізації конструкції машини шляхом обробки статистичних даних і побудови трифакторної залежності між такими параметрами процесу сумішоприготування, як довжина жолоба змішувача, коефіцієнт його заповнення, діаметр жолоба.

Об'єктом дослідження обраний змішувач широко відомої лопатевої безперервної дії (рис. 3.8).

До основних елементів змішувача зазначеної конструкції належать: змішувальна камера, один або два змішуваліні вали з лопатками й приводом, дозатори для подачі компонентів, витратні ємності й система керування для роботи в різних режимах (автоматичному, напівавтоматичному, налагоджувальному).



а *б*

Рис. 3.8. Лопатевий двохрукавний змішувач ХТС:
а – головний вигляд змішувача;
б – камера перемішування в розкритому вигляді.

Перша камера може бути тільки транспортною, що подає пісок, друга – змішувальною. Друга камера має вертикальне рознімання, що зручно для чищення змішувача, тому що через гвинтовий вал відбувається забивання камери.

Найбільш значущим результатом роботи стала розробка й одержання декількох деклараційних патентів на корисні моделі змішувачів, що дозволяють:

знизити ймовірність забивання ємності змішувача й створити передумови появи оптимальної моделі лопатевого змішувача [12];

– проводити точне й різноманітне дозування в процесі роботи установки, що дозволяє одержати задану міцність суміші після затвердіння у формі, [13];

– гомогенізувати склад сипучих компонентів суміші [14];

– підвищити й спростити обслуговування змішувача.

3.3.1. Змішувач із сектором для виключення можливості утворення застою суміші в камері

Найбільш близьким аналогом цього обладнання, є змішувач безперервної дії для готування холоднотвердіючих сумішей, у якого корпус змішувальної камери для підвищення коефіцієнта її заповнення має перед вихідним отвором поріг. Однак у роботі цього змішувача поріг, установленний перед вихідним отвором, є причиною утворення застою суміші в зоні перед порогом і її передчасного затвердіння.

У цій частині роботи поставлене завдання вдосконалення змішувача шляхом внесення зміни в конструкцію порога й уведенням додаткової деталі – обертового сектора.

Поставлене завдання розв’язання так: у змішувачі (рис. 3.9) поріг перед вихідним отвором виконується не суцільним, а таким, що має радіальні отвори. Крім того, поріг є знімним для зручності очищення від налиплої суміші. Для запобігання появи застою суміші перед порогом за рухом суміші, установлений обертовий сектор, що має забірну частину й спіральний паз для просування суміші через отвори в порозі.

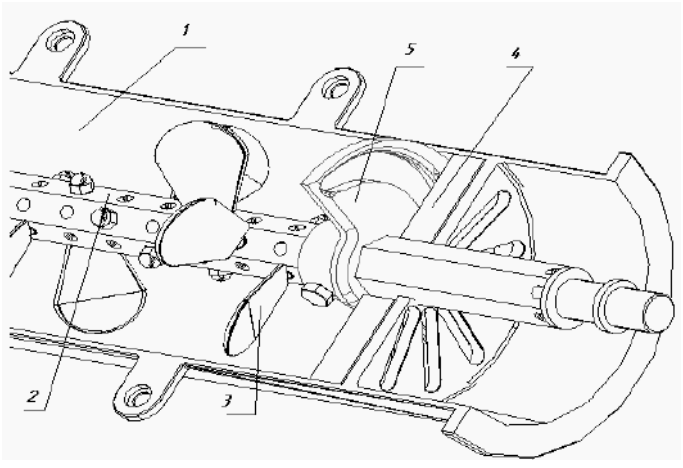


Рис. 3.9. Розроблена корисна модель змішувача

Змішувач містить камеру *1* для матеріалу, що підлягає перемішуванню, вал *2* зі спірально розташованими на ньому лопатками 3. Перед порогом *4* за

рухом суміші на валу встановлений сектор *5* так, щоб продавлювати суміш через поріг і не дозволяти суміші застоюватися перед ним. Готова суміш вивантажується зі змішувальної камери через отвір *6*.

Змішувач працює в такий спосіб. Пісок, в'яжуче й отверджувач, потрапляючи в змішувальну камеру *1*, розсікаються й перекидаються лопатями *3* вала *2*. Оскільки лопаті розташовуються за гвинтовою лінією, то суміш рухається поступально уздовж корпусу змішувача до випускного отвору *6*. Коли суміш досягає порога *4*, вона зазнає додаткового перемішування при її продавлюванні через отвір порога *4* під впливом сектора *5*. Частина суміші може проходити над порогом. Поріг підвищує коефіцієнт заповнення змішувальної камери, а сектор виключає можливість утворення застою суміші перед порогом. Поріг виконаний знімним для зручності очищення.

Запропонована конструкція забезпечує підвищення якості одержуваної суміші за рахунок того, що поріг створює підвищений рівень суміші в змішувальній камері. Крім того, суміш додатково розсікається й перемішується за допомогою обертового сектора, а знімний поріг полегшує процес очищення змішувача.

3.3.2. Змішувачі з попередньою камерою перемішування сипучих матеріалів

Конструкція змішувача, подана на рис. 3.10, працює за принципом попереднього перемішування сипучих матеріалів в аераційній камері й роздільного перемішування наповнювача з каталізатором і в’яжучим у камері з лопатевим валом [2].

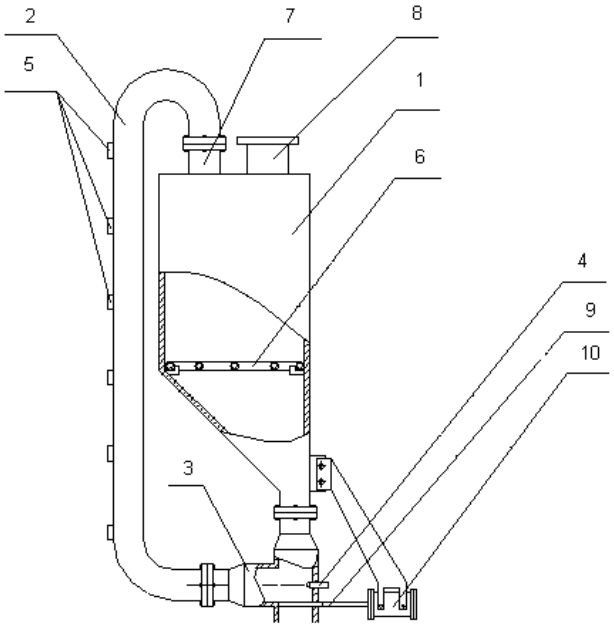


Рис. 3.10. Аераційна змішувальна камера попереднього перемішування: 1 – змішувальна камера; 2 – піскопровід; 3 – розвантажувальний патрубок; 4,5 – сопла; 6 – аерорешітка; 7 – розвантажувальне отвір; 8 – завантажувальний отвір; 9 – шиберна заслінка; 10 – гідроциліндр

3.3.3. Підвищення якості перемішування сипучих матеріалів за допомогою впливу повітряних потоків

Для виготовлення форм із ХТС найважливішою є стадія готування суміші: засипання сипучих компонентів у змішувач, перемішування, подача рідких компонентів (смоли-каталізатора, активатора). Для забезпечення заданої міцності форм і стрижнів із ХТС необхідно якісно здійснити перемішування компонентів суміші, тобто їхній рівномірний розподіл один в одному по всьому об'єму отриманої порції.

Якість перемішування залежить від конструкції змішувача, способу й часу перемішування. Перемішування компонентів суміші механічним способом не дає необхідного результату.

До недоліків механічного впливу можна віднести перетирання частиночок піску на більш дрібну фракцію, що спричиняє зменшення міцності форм і стрижнів, а також не повний розмел окремих грудок суміші, що надходять після ділянки сумішоприготування. Тому створення змішувача з попередньою камерою перемішування сипучих матеріалів є актуальною проблемою.

Відомі технології перемішування сипучих матеріалів за допомогою повітря під тиском, що забезпечують їхнє якісне перемішування, але при цьому труби пневмотранспорту при контакті з піском, що переміщається дуже швидко виходять із ладу. Отже, необхідно створити таке устаткування для попереднього перемішування сипучих, яке забезпечувало б рівномірне перемішування, але при цьому усувалася проблема швидкого зношування пневмопроводу. Авторським колективом розроблено установку, призначену для виробництва сумішей ХТС, з камерою попереднього повітряного перемішування. Конструкція камери забезпечує рівномірне перемішування сипучих (свіжих і регенерованих пісків), при цьому зменшується зношування її внутрішніх поверхонь [9].

Метою дослідження було вивчення процесу переміщення матеріалу в розробленій конструкції змішувальної камери без руйнування трубопроводу.

Як об'єкт дослідження обрано фізичну модель аераційної змішувальної камери, схема якої наведена на рис. 3.11.

Змішувальна камера *1* працює в такий спосіб: після завантаження суміші в завантажувальний отвір *8*, подається стиснене повітря в аерорешітку *6* і сопло *4*. За допомогою аерорешітки сумішзнаходиться в «киплячому» стані, що не дає їй злежуватися в нижній частині камери. При витіканні суміші до розвантажувального патрубка *3* вона підхоплюється повітрям, що виходить із сопла, і направляється по піскопроводу *2*, на якому встановлена система сопел *5*, основною функцією яких є перемішування компонентів суміші без їхнього торкання стінок піскопроводу *2*. По останньому суміш через розвантажувальний отвір *7* потрапляє в змішувальну камеру *1*, і цикл повторюється. Після закінчення перемішування гідроциліндр *10* відкриває розвантажувальний отвір за допомогою шиберної заслінки *9*, і перемішаний матеріал надходить у наступну камеру (лопатевий змішувач), де перемішуються сипучі зі смолою-каталізатором і активатором, після чого суміш надходить у стрижневий ящик або ливарну форму.

Одним із параметрів, що забезпечують довговічність пневмотранспортних установок цього типу, є крок розміщення повітропідвідних патрубків $t_{\text{п}}$ (рис. 3.11).

Ряд авторів [15–16] припустили, що якщо відстань між точками контакту піщинок з поверхнею сопел трубопроводу залежить від тиску в трубопроводі P і швидкості руху повітряного потоку V, то ці відстані L можна визначити за відомою формулою як функцію від P і V

$$L_{\text{к}} = \text{f}\,(P,V) \qquad (3.1)$$

Уважається, що рух частинки починається при досягненні повітряним потоком швидкості, більшої деякої критичної величини, що має для кожного матеріалу своє значення.

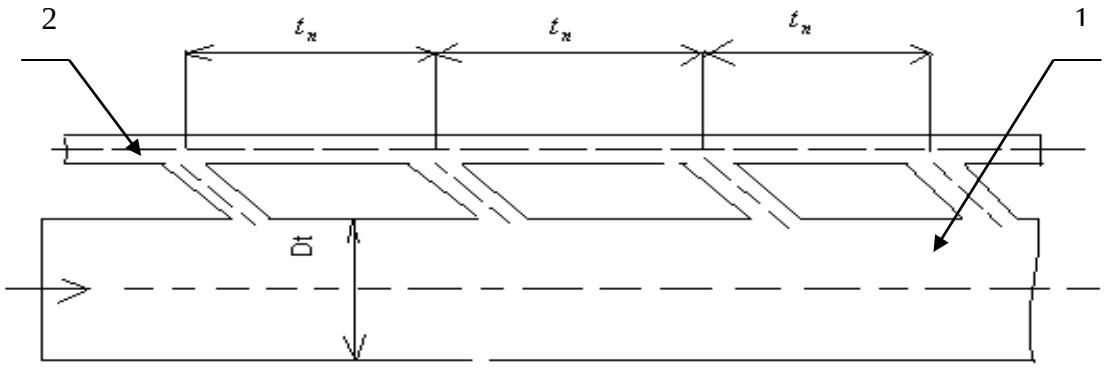


Рис. 3.11. Схема розміщення повітропідводних патрубків:
1 – піскопровід; 2 – система патрубків

Відомо, що на частинку, що рухається у гвинтовому турбулентному повітряному потоці, діє сила тертя *Ft* потоку повітря об частинку, сила тиску повітря $F_д$, аеродинамічна сила F_A, гравітаційна сила *Fg* [24]. Сили *Ft*, $F_д$, F_A залежать від швидкості руху частинки *V* і від поля швидкостей повітряного потоку *W*.

Обертовий рух повітря в транспортному трубопроводі підтримується впливом додаткового збудження повітря, яке зі швидкістю $W_р$ митікає із сопел. Якщо *Wp* – швидкість витікання повітряного потоку із сопла, то за одну одиницю часу в повітряний потік додатково подається енергія рівна:

$$E = \frac{m \cdot W_р^2}{2} = \frac{\rho \cdot W_р \cdot S_р \cdot W_р^2}{2} = \frac{\rho \cdot S_p \cdot W_р^3}{2} \qquad (3.2)$$

де $S_р$ – сумарна площа сопел-спонукачів.

Ця додаткова енергія переходить в обертовий рух повітряного потоку. Якщо прийняти інтервал між соплами-спонукачами рівним *tn*, то це є енергією обертового руху циліндричного повітряного стовпа радіусом *RT* і довиною *L*. Кінетична енергія цього обертового руху [17] дорівнює

$$E = \frac{\omega^2 \cdot I}{2} \quad . \qquad (3.3)$$

де ω – кутова швидкість обертання;

I – момент інерції стовпа повітря щодо осі обертання.

Прирівнюючи (3.1) і (3.2) та вважаючи, що

$$I = (\frac{\rho \cdot \pi}{2}) \cdot R_t^4 \cdot t_п \qquad (3.4)$$

При цьому кутова швидкість обертання потоку дорівнює:

$$\omega = \sqrt{\frac{2S_\rho W_{\rho^3}}{\pi R_t^4 \cdot t_п}} \qquad (3.5)$$

Швидкість витікання повітря із сопел дорівнює лінійній швидкості потоку уздовж труби. Аеродинамічна сила, обумовлена різницею швидкостей струменів повітря, що обтікають частинку, визначається :

$$F_A = \frac{\rho \cdot d^3}{4 \cdot g} \cdot V_{обт} \cdot \frac{dW}{dR} \ , \qquad (3.6)$$

де ρ – густина повітряного потоку;

g – прискорення сили ваги;

d – діаметр частинки матеріалу, що транспортується;

$V_{\text{обт}}$ – швидкість обтікання частинки повітряним потоком;

$\frac{dW}{dR}$ – градієнт швидкості повітряного потоку по радіусу труби.

Автор роботи [17] аналізує епюри градієнта швидкості $\frac{dW}{dR}$ і напрямку дії сили F_A, побудованої на основі рівняння (3.6). Рис. 3.12 і 3.13 показують, що при спіральному русі аеросуміші з установкою сопел–спогукачів, під дією сили F_A, створюються умови, коли сипучий матеріал розташовується по поперечному перерізу трубопроводу у формі кільцевого шару, пустотілого по осі трубопроводу й такого, що не контактує із внутрішньою поверхнею труби.

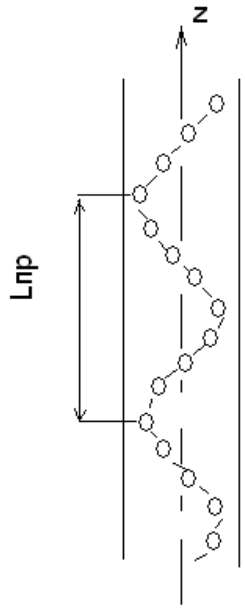


Рис. 3.12. Траєкторія руху одиночної частинки в транспортному трубопроводі

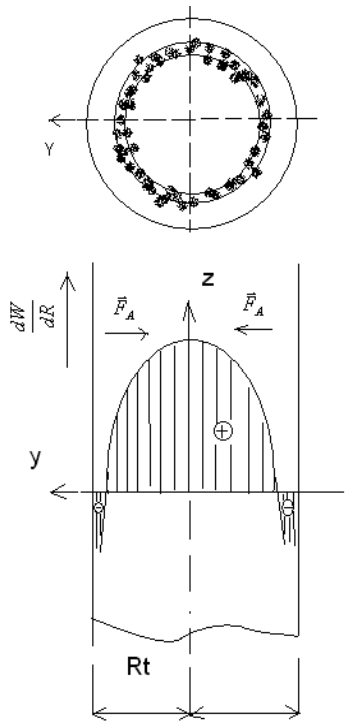


Рис. 3.13. Епюра градієнта швидкості й напрямку дії сили

Крок розміщення сопел–спонукачів при русі аеросуміші знаходиться в межах:

$$L_{\text{пр}} < t_{\text{п}} < V_{\text{в}}, \tag{3.7}$$

тобто у межах діапазону кроку контакту частинки з поверхнею трубопроводу й скалярною величиною середньої швидкості руху несучого повітряного потоку.

Експериментальна частина роботи проводилася в такий спосіб. В аераційну камеру попереднього перемішування було завантажено дві частини кварцового піску, одна з яких була пофарбована в темний колір. Перемішування суміші проводилося протягом 1 хв із різним співвідношенням компонентів (50:50, 60:40, 70:30), після чого було вилучено проби з верхньої поверхні змішаних компонентів. Як складова суміш, що збільшується, використовувався пофарбований кварцовий пісок. Отримані проби були зафіксовані знімками цифрового фотоапарата через окуляр мікроскопа при його збільшенні в 10 разів.

Подальша обробка отриманих результатів проводилася програмою Image Expert PRO 3,0, де пофарбований кварцовий пісок був затемнений у чорний колір. Мета програми полягала в процентному підрахуванні двох компонентів для визначення рівномірності перемішування. Для більш чітких результатів знімки було розбито на 9 рівних частин, у кожній з яких рахував-

ся процентний вміст зафарбованих частин від загальної зони знімка (табл. 3.6).

Таблиця 3.6 – Процентний вміст одного з компонентів пофарбованого в темний колір

№	Аераційна Камера	Киплячий шар	Механічний вплив
1	2	3	4
	50...50 %		
1	50,477	47,055	56,449
2	44,744	21,354	58,8
3	47,464	41,732	67,362
4	47,744	26,732	60,839
5	41,883	30,46	58,204
6	46,977	31,545	65,27
7	43,924	33,239	59,358

Продовження табл.. 3.6

1	2	3	4
8	47,602	35,412	63,713
9	41,32	33,592	63,99
Середнє	45,113	31,525	62,797
60...40%			
1	53,324	28,491	43,91
2	64,162	18,156	23,961
3	62,95	5,103	35,73
4	55,171	23,793	26,977
5	59,28	16,797	23,271
6	49,598	11,322	36,166

7	53,21	24,853	45,177
8	64,061	27,521	28,259
9	45,69	10,501	35,205
Середнє	48,142	18,439	35,286
70...30%			
1	61,258	17,027	39,86
2	59,523	15,67	46,752
3	53,21	16,26	55,107
4	49,986	10,163	56,322
5	53,329	6,156	38,498
6	61,527	10,821	51,576
7	61,102	12,013	44,213
8	49,141	14,278	39,138
9	57,886	23,608	41,07
Середнє	58,126	15,74	46,325

Результати отриманих даних наведено на рис. 3.14–3.16.

За отриманим даними (табл. 3.6) побудовані графіки рівномірності перемішування з використанням програми Microsoft Office Excel (рис. 3.17).

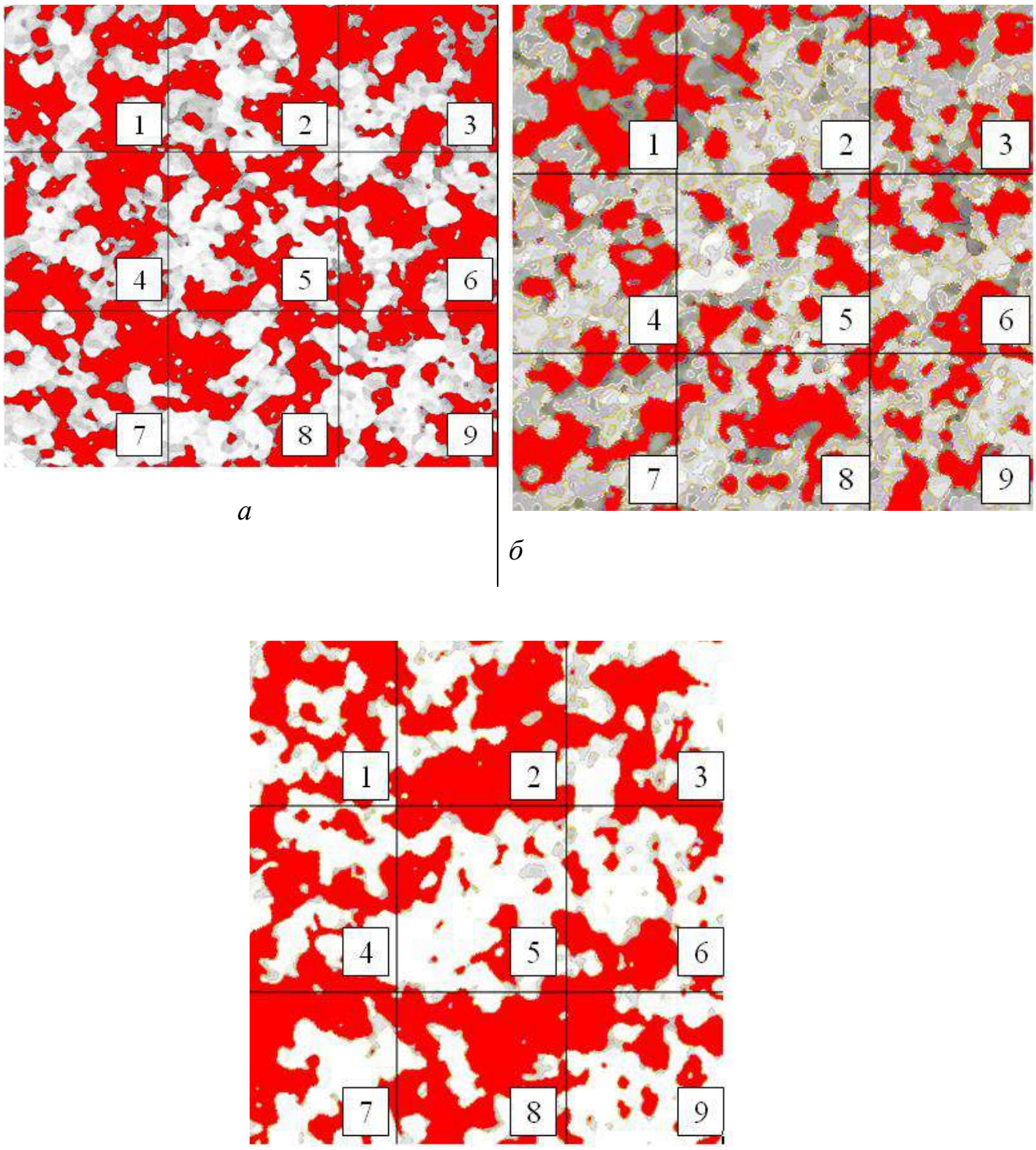
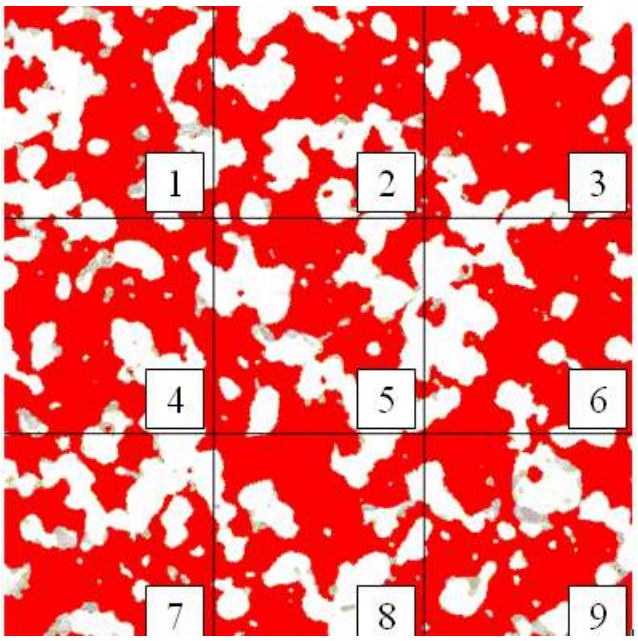
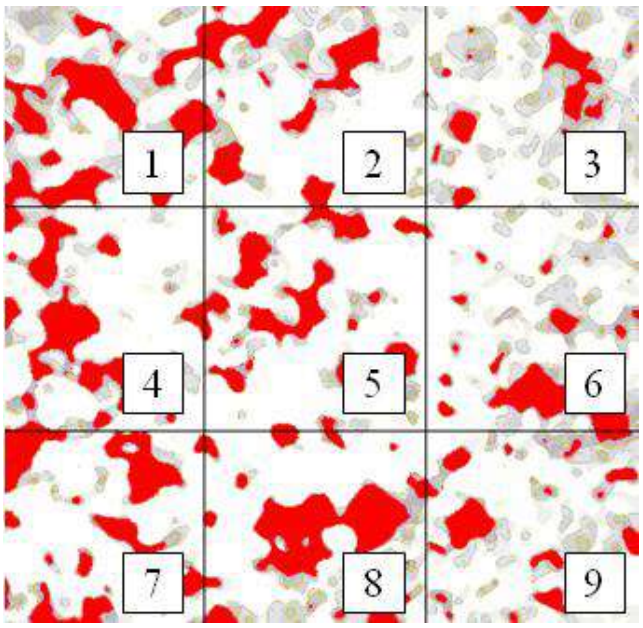


Рис. 3.14. Знімки результатів перемішування компонентів суміші в співвідношенні 50×50:

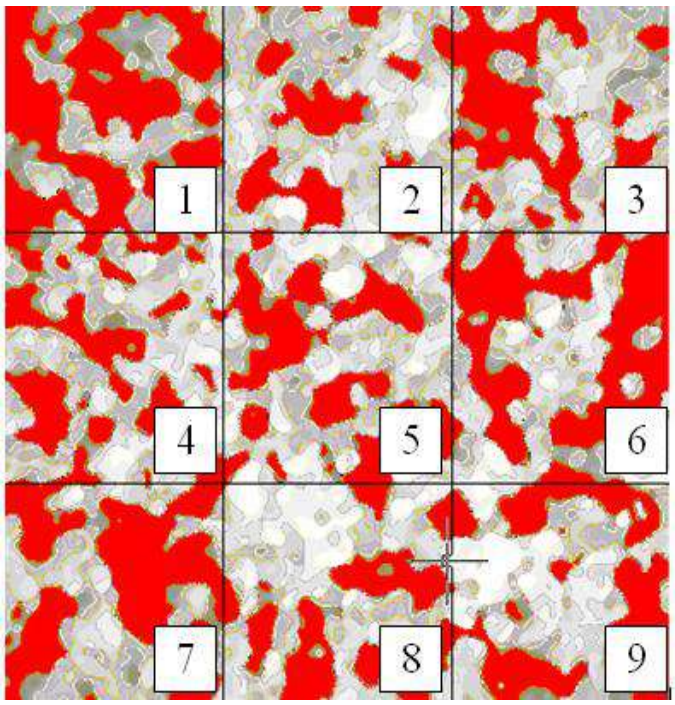
а – аераційна камера; б – киплячий шар; в – механічний вплив.



а



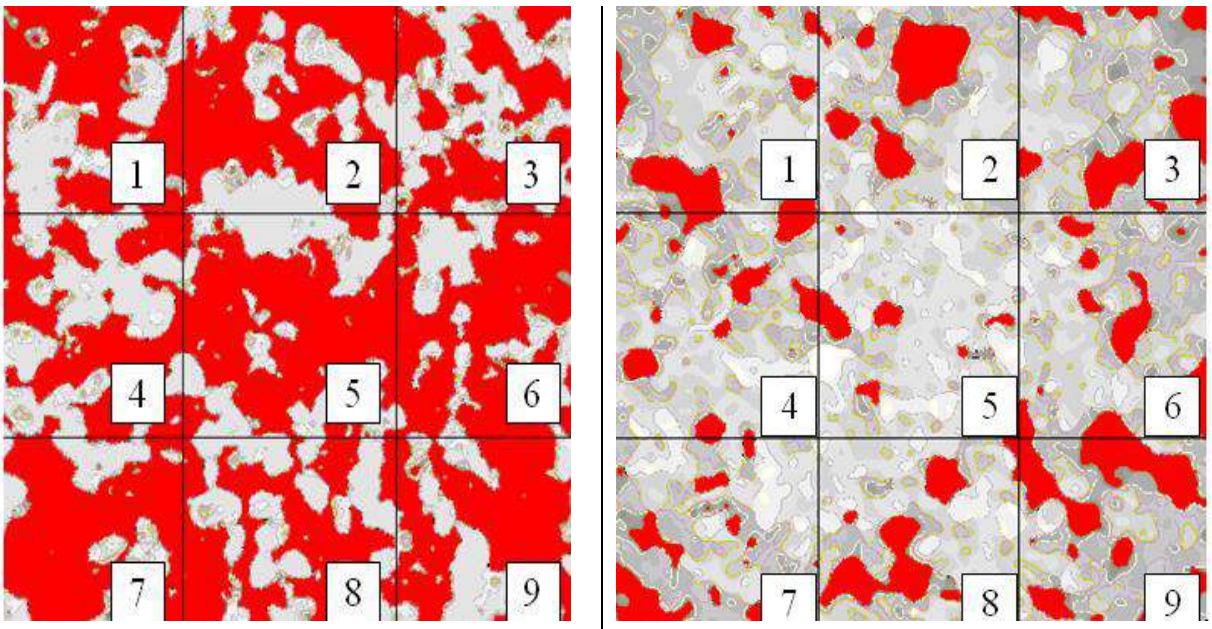
б



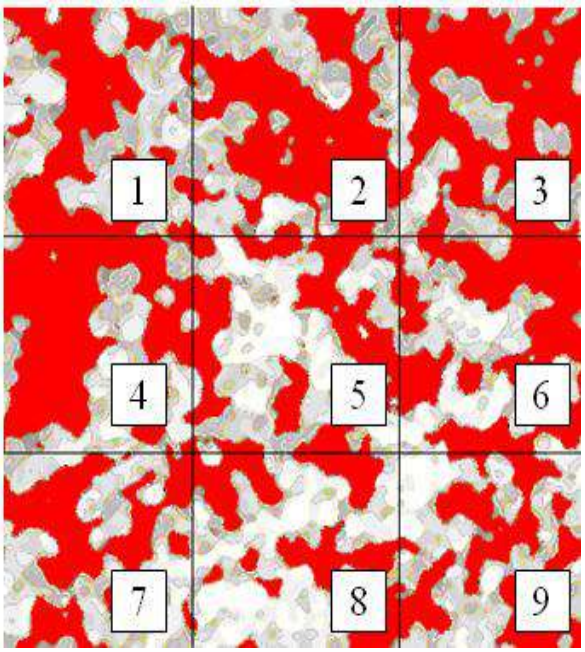
в

Рис. 3.15. Знімки результатів перемішування компонентів суміші в співвідношенні 60×40:

а – аераційна камера; б – киплячий шар; в – механічний вплив.



а *Б*



в

Рис. 3.16. Знімки результатів перемішування компонентів суміші в співвідношенні 70×30:

а – аераційна камера; б – киплячий шар; в – механічний вплив.

а

б

в

Рис. 3.17. Графіки рівномірності перемішування компонентів суміші: а – 50:50 %; б – 60:40 %; в – 70:30 %;

– механічний спосіб; – аерокамера;

– стабільність; – киплячий шар

Аналогічно проводилися експерименти при перемішуванні компонентів у камері киплячого шару й шнеком (механічним впливом).

Аналізуючи візуально рис. 3.14–3.16, можна спостерігати певну нерівномірність перемішування при використанні камери киплячого шару й шнекової камери. Це підтверджується, якщо проаналізувати отримані зображення на рис.3.17, де найменшу розбіжність рівномірності мають компоненти суміші, що перемішувалися в аерокамері. Досить непоганий результат мають суміші, перемішані шнеком при співвідношенні компонентів 50:50. Що до установки киплячого шару, то рівномірність не була досягну та через розшарування компонентів у процесі перемішування.

Таким чином, результати досліджень показали, що краща рівномірність перемішування компонентів суміші досягнута при перемішуванні в аераційній камері за рахунок впливу повітряних потоків усередині піскопроводу. Про це свідчать отримані табличні дані й побудовані на їхній основі графіки [18].

3.3.4. Змішувач із аераційним перемішуванням

У результаті опрацьованих досліджень удосконалений змішувач набув вигляду, поданий на рис. 3.18 [13].

Це однорукавний низькошвидкосний лопатевий змішувач із аераційною камерою для знепилювання й попереднього перемішування сипучих компонентів. Перша частина змішувача називається аераційною камерою попереднього перемішування. Змішувальна камера, докладний опис роботи якої подана вище (див. рис. 3.10), працює в такий спосіб: після завантаження суміші в завантажувальне вікно, подається стиснене повітря через сопло на аерорешітку. Тому суміш знаходиться в «киплячому» стані, що не дає їй злежуватися в нижній частині камери. Суміш перетікає до розвантажувального патрубка, підхоплюється повітрям, що виходить із сопла, і направляється по піскопроводу, який оснащений системою сопель для перемішування компонентів суміші без торкання стінок піскопроводу. Далі суміш через розвантажувальний отвір потрапляє в змішувальну камеру. Цикл повторюється.

Після закінчення перемішування відкривається розвантажувальний отвір за допомогою шиберної заслінки, і перемішаний матеріал надходить у наступну камеру змішувача – лопатевий змішувач.

Друга частина змішувача утворена горизонтальною гільзою, усередині якої знаходиться вал із лопатками, розташованими за гвинтовою лінією. У цій частині змішувача сипучі компоненти перемішуються зі смолою-каталізатором і активатором, що подається за допомогою дозатора оригінальної конструкції.

Рис. 3.18. Схема змішувача ХТС із аераційною камерою знепилення й попереднього перемішування

Дозатор – це поршневий насос, що забезпечує саморегуляцію дозування рідких компонентів залежно від кінцевої зміни межі міцності холоднотвердіючої суміші після затвердіння. Робота дозатора-насоса. Дозаторів на корпусі горизонтальної камери встановлюється не менш двох. Враховуючи, що шнекова камера (для зручності її очищення) має горизонтальну площину рознімання, дозатори встановлено по обидві сторони рознімання й ближче до випускного отвору суміші. Готова суміш зі змішувача надходить у стрижневий ящик або ливарну форму.

3.4. Створення дозатора нового типу

У цьому розділі роботи було поставлено мету розробити дозатор для рідких компонентів суміші ХТС, який би вводив у суміш такі порції смол і отверджувачів, при яких досягалася б необхідна міцність стрижня за оптимально можливий короткий час.

Для знаходження постійно змінної (залежно від маси стрижня) порції каталізаторів і отверджувачів необхідно знати, як отримана міцність готового затверділого стрижня впливає на їхній кількісний (об'ємний) склад. Крім того, на масу потрібної порції смол і отверджувачів впливає час твердіння стрижня, тому що від нього залежить і межа міцності стрижня. Тому, якщо прототипом дозатора буде складний циліндр, то для перетворення його в дозатор (такий циліндр, який після одержання даних про міцність стрижневої маси міг в автоматичному режимі змінювати ємності для смол і отверджувачів) необхідно провести дослідження.

3.4.1. Дослідження залежності процентного вмісту смоли на межу міцності стрижня або форми

При розгляді цього питання минулого було проведено дослідження певної кількості різних холоднотвердіючих сумішей імпортного й вітчизняного виробництва [7, 8]. У результаті збору даних складено табл. 3.7 і в пакеті Statistika побудований графік залежності межі міцності стрижня від процентного вмісту смоли в суміші ХТС (рис. 3.19).

Таблиця 3.7 – Залежність межі міцності стрижня від процентного вмісту смоли

Межа міцності на стиск, МПа	Частка смоли в суміші ХТС, %
1	2
0,62	0,10
0,90	0,15
1,16	0,20
1,40	0,25
1,63	0,30
1,83	0,35
2,00	0,40
2,16	0,45
2,30	0,50
2,43	0,55
2,53	0,60

Продовження табл.. 3.7

1	2
2,60	0,65
2,70	0,70
2,71	0,75
2,72	0,80
2,72	0,85

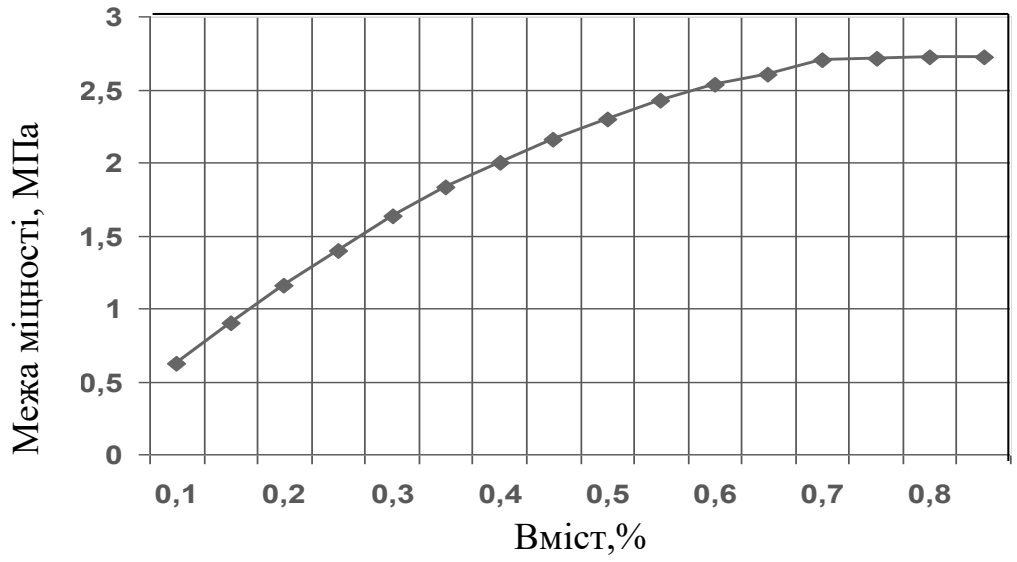


Рис. 3.19. Графік залежності межі міцності стрижня від процентного вмісту смоли в суміші ХТС

Математична модель експериментальних даних має вигляд:

$$\sigma = -4{,}03 / X^2 + 6{,}63 / X \cdot \sigma, \qquad (3.8)$$

де σ – межа міцності стрижня, виготовленого із ХТС, МПа;

X – процентний вміст смоли в суміші ХТС.

Аналізуючи цю залежність, можна знайти оптимальну комбінацію процентного вмісту смоли в суміші, який допоможе уникнути перевитрати смоли на виготовлення стрижня заданої міцності.

Наприклад, у цьому випадку для досягнення оптимальної міцності стрижня необхідно додати 0,8 % сполучного в суміш, подальше збільшення процентного вмісту смоли не дасть значного збільшення межі міцності й призведе до невиправданих витрат.

3.4.2. Дослідження впливу часу твердіння стрижня на межу його міцності

На міцність стрижнів, виготовлених із холоднотвердіючих сумішей, впливає безліч різних факторів, таких як: температура в цеху, процентна кількість глинистої складової в суміші, час твердіння стрижня перед установленням його у форму та ін. Розглянемо вплив на суміш останнього з перерахованих вище факторів [7].

У результаті проведених досліджень отримано дані залежності межі міцності на стиск зразків, виготовлених із суміші ХТС, і час їх твердіння (табл. 3.8).

Таблиця 3.8 – Експериментальні дані суміші ХТС

Межа міцності зразка на стиск, Мпа	Час твердіння зразка приготовленого із суміші ХТС, ч.
0,00	0,00
0,23	0,15
0,70	0,25
1,35	0,50
2,00	0,75
3,90	24

За даними табл. 3.8 зроблено статистичну обробку даних. Для цього скористались програмним пакетом Statistica 6.0. У програму заносилися дані табл. 3.8, і за допомогою функції точкового креслення будувався графік залежності межі міцності зразка від часу твердіння (рис. 3.20).

Із графіка (рис. 3.20) видно, що в інтервалі часу від 0 до 1,8 год крива підкоряється лінійній залежності, а від 1,8 до 24 год – логарифмічній. Застосовуючи імовірнісний метод, програма Statistica 6.0, аналізуючи графік, видає рівняння залежності двох змінних: межі міцності зразка із ХТС і часу твердіння для кожного інтервалу окремо:

– час отвердження від 0 до 1,8 год

$$\sigma = 1{,}8 / t; \tag{3.9}$$

– від 1,8 до 24 год

$$\sigma = 1{,}8 + 1{,}6248 / \log 10 (t), \tag{3.10}$$

де σ – межа міцності зразка із ХТС, МПа;

t – час отвердження зразка, год.

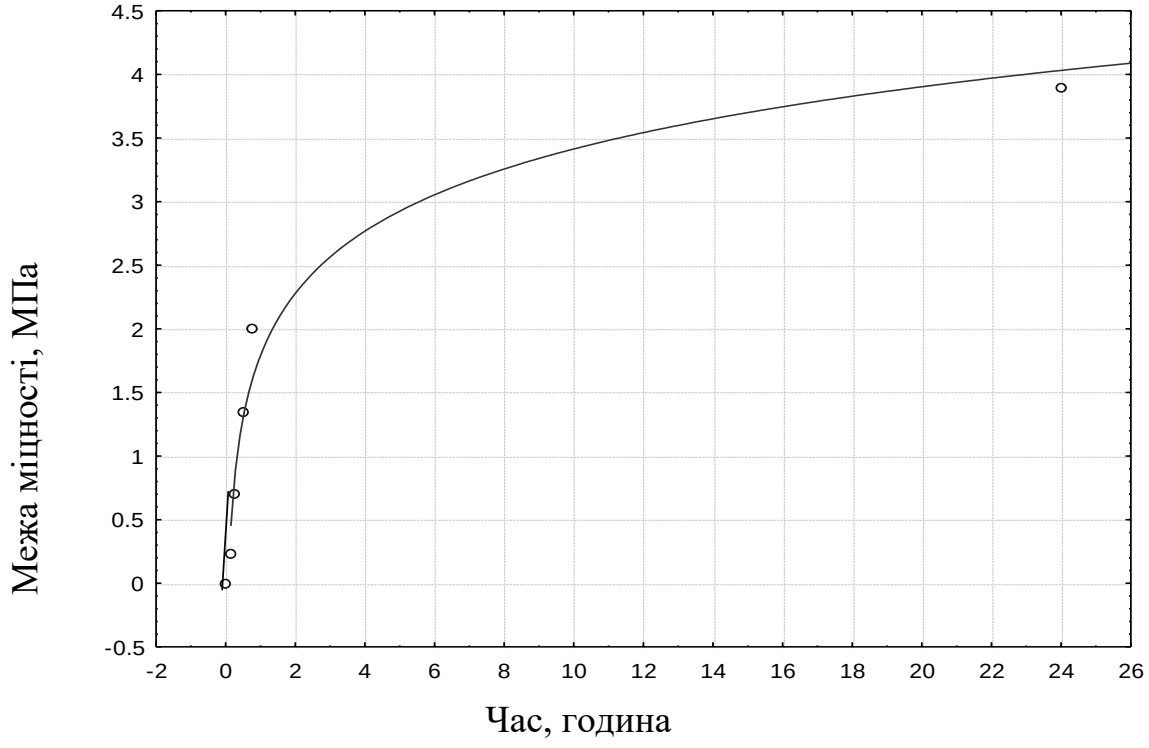


Рис. 3.20. Графік залежності межі міцності від часу твердіння зразка із ХТС

Аналізуючи ці залежності й графік, можна зробити висновок, що, знаючи початковий час твердіння й міцність суміші ХТС, можна визначити міцність суміші в будь-який момент часу, тим самим, передбачивши результат заздалегідь.

3.4.3. Дослідження залежності конструктивних параметрів змішувача ХТС один від одного

Технологічними параметрами суміші ХТС є процентний вміст смоли-каталізатора й час твердіння виробу з холоднотвердіючої суміші. Міцнісна характеристика – межа міцності виробу із ХТС на стиск.

Використовуючи рівняння (3.9) і (3.10) складемо табл. 3.9, у яку внесемо межу міцності суміші ХТС на стиск, час твердіння суміші ХТС і процентний вміст смоли в суміші.

Таблиця 3.9 –Технологічні параметри ХТС

Межа міцності суміші ХТС на стиск, МПа	Частка смоли в суміші ХТС, %	Час твердіння суміші ХТС, год
0,62	0,10	1,12
0,90	0,15	1,62
1,16	0,20	1,90
1,40	0,25	2,03
1,63	0,30	2,14
1,83	0,35	2,23
2,00	0,40	2,29
2,16	0,45	2,34
2,30	0,50	2,39

Продовження табл.. 3.9

1	2	3
2,43	0,55	2,43
2,53	0,60	2,45
2,60	0,65	2,47
2,70	0,70	2,50
2,71	0,75	2,50
2,72	0,80	2,50

Використовуючи дані табл. 3.9 і програмний пакет Statistica 6.0, побудували тривимірний графік залежності межі міцності суміші ХТС від процентної частки смоли й часу її твердіння (рис. 3.21).

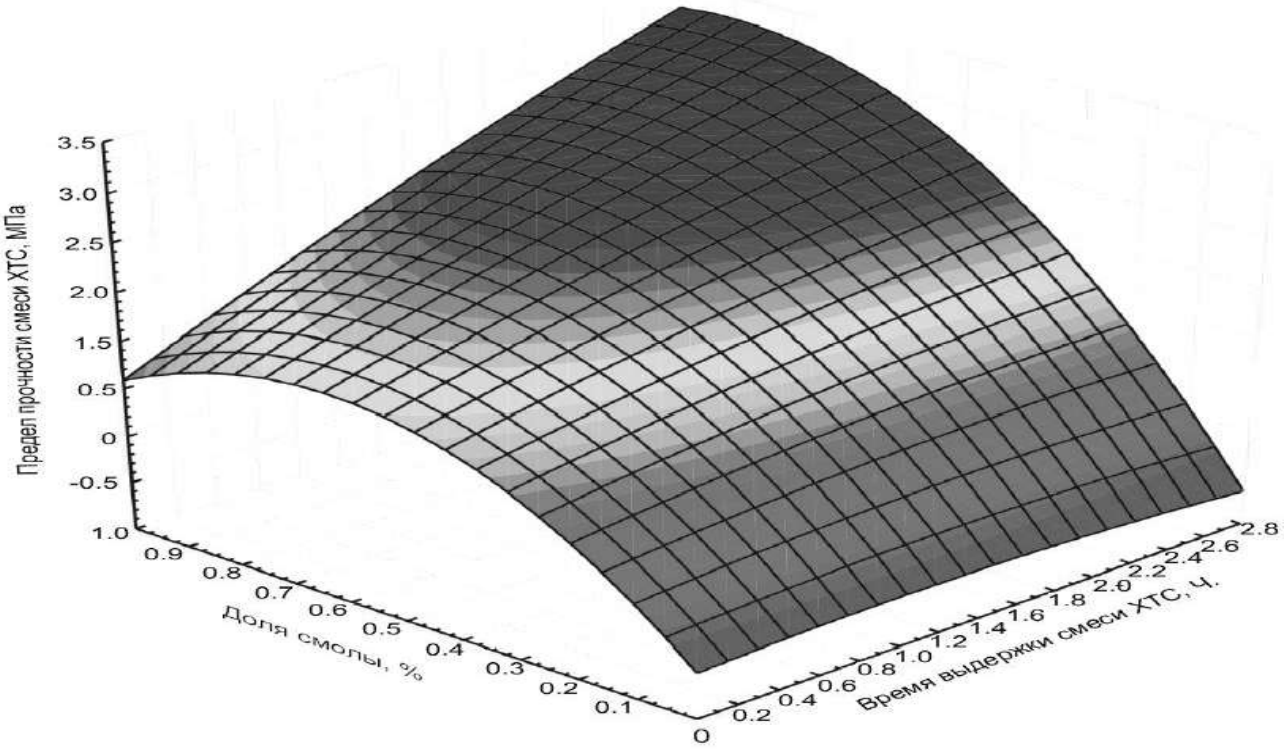


Рис. 3.21. Тривимірний графік залежності межі міцності суміші ХТС від процентної частки смоли в суміші й від часу твердіння

Математична модель експериментальних даних має вигляд:

$$\sigma = -0{,}05/t^2 - 4{,}09/x^2 + 0{,}82/t \cdot x + 4{,}53/t + 0{,}15/x\,, \qquad (3.11)$$

де σ – межа міцності суміші ХТС, МПа;
t – час твердіння суміші ХТС, год;
x – частка смоли в суміші ХТС, %.

З рівняння (3.11) випливає, що здебільшого всього збільшує міцність суміші час витримки ($4{,}53/t$). Спільний вплив кількості смоли й час витримки теж приводить до збільшення міцності суміші ($0{,}82 \cdot t \cdot x$). Графік залежності межі міцності суміші ХТС від процентної частки смоли в суміші й від часу твердіння, зображений на рис. 3.21, і рівняння 3.11 дозволяють, знаючи межу міцності суміші ХТС, визначити необхідну кількість смоли, що потрібна за певного часу отвердження. Отримані залежності дозволяють побудувати оптимальний дозатор для будь-яких варіантів суміші. Отримані рівняння залежності використовуються при складанні алгоритмічних і математичних моделей розрахунків як змішувача, так і його дозувальних насосів.

Для виготовлення форм із ХТС найважливішою є стадія готування суміші: засипання сипучих компонентів у змішувач, упорскування рідких компонентів (смоли-каталізатора, активатора), перемішування. Для створення заданої міцності ХТС необхідно приділити велику увагу готуванню суміші, тобто точному дозуванню компонентів (як сипучих, так і рідких), чіткій подачі матеріалів у змішувач, необхідному часу і швидкості перемішування.

Якість перемішування залежить від конструкції змішувача, особливо конструкції лопаток, кута їх повороту, швидкості обертання вала з лопатками [19, 20].

3.4.4. Нова конструкція дозатора

Для подальшого вдосконалювання конструкції змішувача необхідно створити дозатори для рідких компонентів, які змінювали б дози активатора й каталізатора в автоматичному режимі залежно від зміни межі міцності готової форми або стрижня, тому використовували такий шлях його створення.

Вибираємо відому конструкцію найпростішого поршневого насоса [12]. Він містить циліндр, у якому є поршень із прикріпленим на нього штоком. Передня частина циліндра має два отвори (для входу й виходу рідини). На вході закріплений всмоктувальний клапан, на виході нагнітальний. Шток кріпиться до приводу зворотно-поступальної дії. При роботі такого насоса відбувається виштовхування того самого об’єму рідини, тобто об’єм речовини, що проходить поршневу камеру, залишається постійним.

Для того щоб цей насос змінював об’єм поршневої камери, уводимо такі зміни (рис. 3.22).

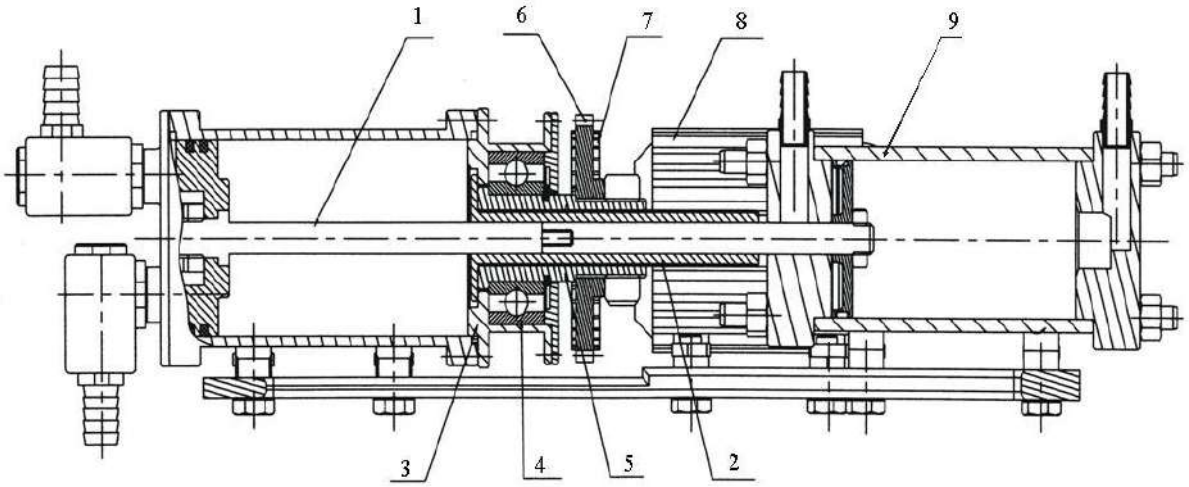
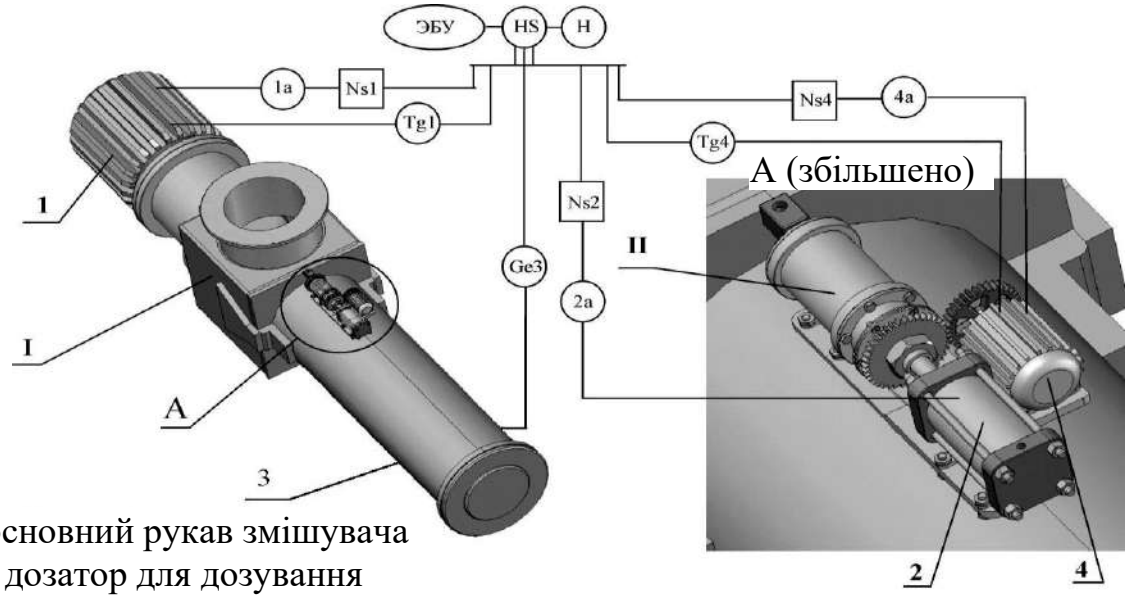


Рис. 3.22. Поршневий насос зі змінюваним об'ємом поршневої камери. 1– шток; 2– трубка; 3 – кришка задня; 4 – підшипник; 5 – втулка; 6 – ведене зубчасте колесо; 7 – ведуче зубчасте колесо; 8 – електродвигун; 9 – циліндр.

Видозмінений насос буде містити поршень, шток квадратного перерізу *1*, який фіксує поршень в осьовому напрямку. На шток насаджено трубку *2* із зовнішньою різзю. Трубка на кінці має опору у вигляді пластини. Все це встановлено в корпусі циліндра. На кришці передньої частини циліндра є два отвори для входу й виходу рідини. З'єднуються впускний і нагнітальний клапан із передньою кришкою за допомогою двох муфт. На задній кришці циліндра *3* установлено на підшипнику *4* втулку *5* з зубчастим колесом *6*. Це колесо *6* входить у зачеплення з колесом *7*, насадженим на вал електродвигуна *8*. Кінець штока *1* кріпиться до приводу *9* (привід–циліндр).

Робота запропонованої конструкції полягає в такому. При русі поршня від передньої кришки до задньої об'єм поршневої камери збільшується, що призводить до зменшення в ній тиску. Рідина з бака або резервуара через всмоктувальний клапан надходить у робочу камеру. Відбувається це доти, доки поршень не досягне основи трубки *2*. Потім поршень починає рух у зворотному напрямку, й заповнений рідиною об'єм робочої камери зменшується, а тиск у камері підвищується. Під дією тиску всмоктувальний клапан закривається, при цьому нагнітальний відкривається, рідина з робочої камери витісняється. Відстань від кришки до основи трубки *2* регулюється поворотом втулки *5*, яка вкручує або викручує трубку *2*. Крутний момент передається на втулку *5* за допомогою зубчастого колеса *6*, яке входить у зачеплення із зубчастим колесом *7*, насадженим на електродвигун *8*. Рух поршня відбувається за допомогою приводу – циліндра *9*.

Запропонований поршневий насос зі змінюваним об'ємом поршневої камери працює як дозатор. Його можна встановити на лопатевий змішувач (рис. 3.23) для готування холоднотвердіючої суміші для дозування рідких компонентів суміші ХТС.



I – основний рукав змішувача
I I – дозатор для дозування смоли

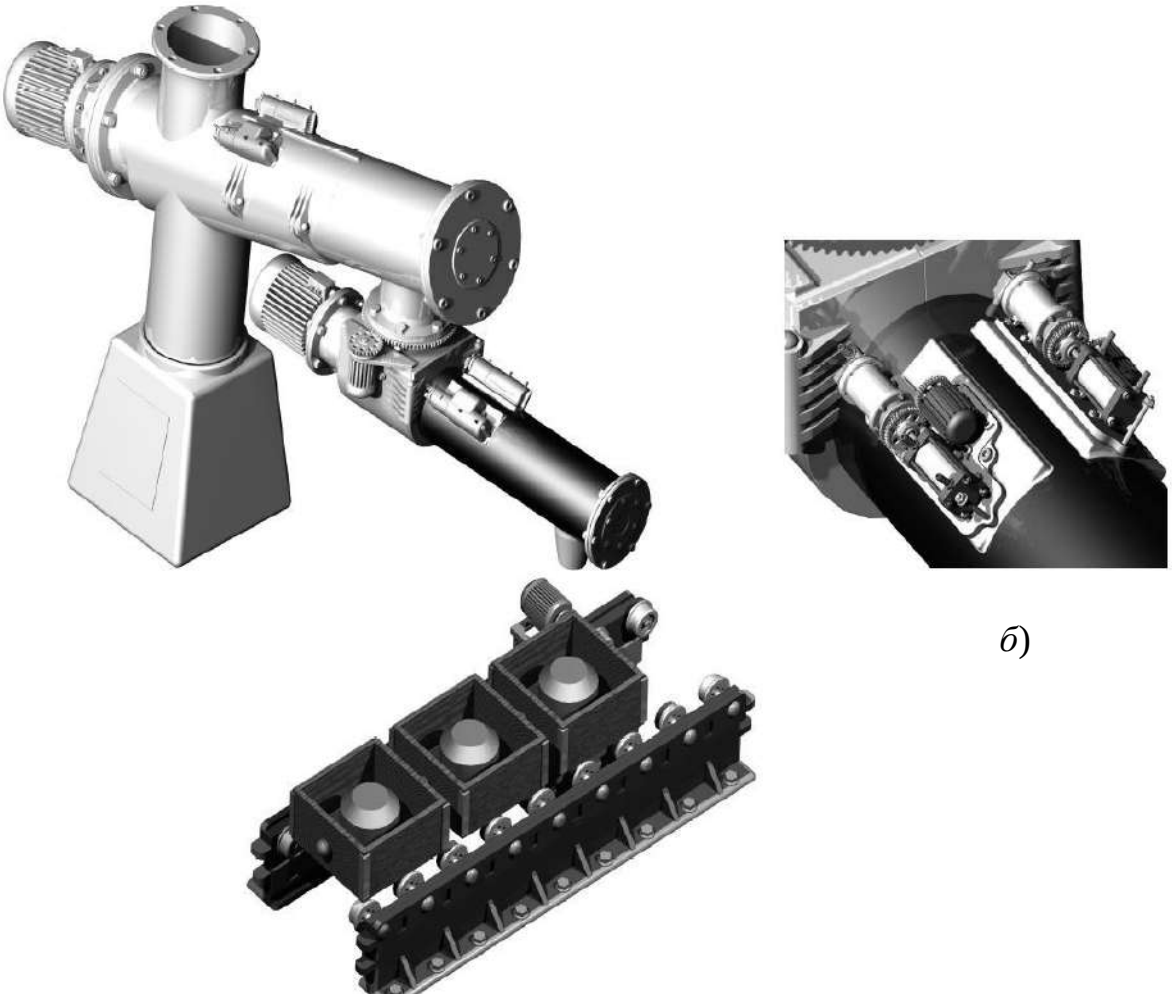
Рис. 3.23. Лопатевий змішувач для готування холоднотвердіючої суміші для дозування рідких компонентів суміші ХТС

1 – електродвигун основного рукава змішувача; 2 – привід дозатора; 3 – рукав із відбірником; 4 – електродвигун дозатора

Принцип роботи змішувача з новим дозатором в автоматичному режимі такий: по команді блока електронного керування (БЕУ) через електромагнітний пускач *NS1* вмикається електродвигун *1a* робочого рукава змішувача (оберти двигуна *1* контролює тахогенератор *TG1*), а через пускач *NS2* – привід дозатора *2a*. Відбувається перемішування сипучих і упорскування дози рідких компонентів. При роботі змішувача відбувається відбір суміші у відбірник *3*, де після закінчення заданого проміжку часу вимірюється міцність, і за допомогою датчика *GE3* інформація передається на БЭУ.

Блок електронного керування порівнює показання (задані й отримані), посилає імпульс на електромагнітний пускач *NS4*. Відбувається вмикання електродвигуна дозатора *4a*, що регулює дозу рідких компонентів суміші ХТС, залежно від межі міцності. Цей тип дозатора дозволяє точно регулювати дозу рідких компонентів суміші ХТС залежно від зміни межі міцності форми, виготовленої із ХТС, що дозволяє зробити виготовлення суміші, властивості якої залежать від твердості готового стрижня або форми (рис. 3.24) [20, 21].

Одним із найважливіших результатів роботи є одержання патенту на корисну модель «Дозатор для готування холоднотвердіючих сумішей» [12].



б)

а)

Рис. 3.24. Вигляд комплексу ХТС:
а – змішува, що здійснює заливання суміші у форму;
б – місце установки дозаторів.

3.5. Комплекс зі змішувачами ХТС

Сумішоприготувальний комплекс – це бункерна естакада із системою подачі й контролю компонентів суміші. Загальний вигляд комплексу поданий на рис. 3.25.

Комплекс оснащено двома змішувачами безперервної дії *2*, які застосовуються для готування стрижневих сумішей. Подача свіжих і регенерованих кварцових пісків проводиться з бункерів, розташованих на бункерній естакаді *1* через пневморозподільник *3*. Бункери заповнюються за допомогою пневмотранспорту. Дозування й подача пісків здійснюється камерними насосами, оснащеними пневматичними конічними затворами *4*, *5*, *6*, *7*.

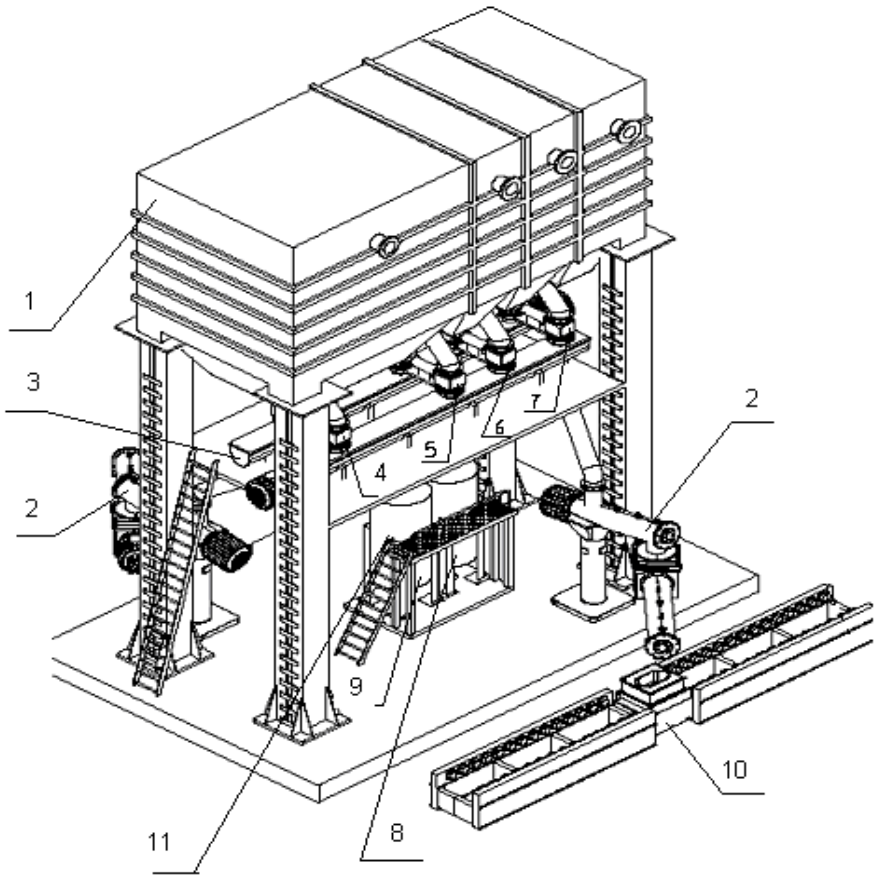


Рис. 3.25. Передбачуваний вигляд проектованого комплексу ХТС

Рідка композиція надходить у дозатори змішувача із двох ємностей *8, 9* із синтетичною смолою й отверджувачем. Готова суміш видається через вихідний отвір змішувача в стрижневий ящик, розташований на вібраційному столі *10*. Комплекс оснощений майданчиками обслуговування й сходами *11*.

3.5.1. Побудова алгоритмічних моделей вузлів і деталей лопатевого змішувача. Розрахування змішувальної камери

Схему до розрахування лопатевого змішувача наведено на рис. 3.26, на якому умовно показано камеру змішувача довжиною *L*, висотою *H* і радіусом *R* (корпус змішувача має форму труби).

Далі подано методику розрахунків усіх вузлів змішувача, щоб перейти до алгоритмічного проектування, створення розрахункових програм і, отже, до створення оптимальних комп'ютерних креслень.

Порядок визначення геометричних розмірів змішувача такий. За заданою продуктивністю змішувача визначимо його ємність за масою:

$$V_{\text{зам}} = \frac{\Pi \cdot t_{\text{пер}}}{60} \qquad (3.12)$$

де П – продуктивність змішувача, кг/год;

$t_{пер}$ – час перемішування, хв; $t_{пер}$ = 1,5 хв [1].

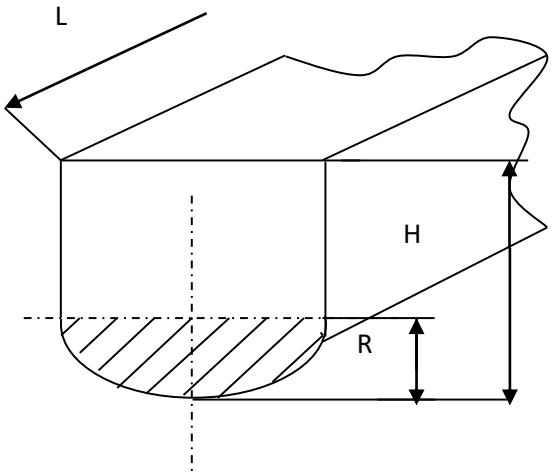


Рис. 3.26. Схема до розрахування лопатевого змішувача

Для того щоб перейти від продуктивності, м^3/год до продуктивності, в кг/год потрібно:

$$П_1 = П\rho, \tag{3.13}$$

де ρ – густина розпушеної суміші, ρ = 1400 кг/м^3.

Ємність змішувача за об'ємом суміші $V_{сум}$ визначається за формулою:

$$V_{сум} = \frac{V_{зм}}{\rho} \tag{3.14}$$

За заданою теоретичною продуктивністю змішувача визначаємо його ємність за масою й за об'ємом.

Масова ємність змішувача:

$$V_{зам} = \varepsilon FL\rho, \tag{3.15}$$

де $V_{зам}$ – масова ємність змішувача, кг;

ε – коефіцієнт заповнення корита сумішшю, ε = 0,8...1,0;

F – площа поперечного перерізу корита змішувача, м^2;

L – довжина робочої частини корита, м.

Знаючи масову ємність змішувача, знаходимо довжину робочої частини корита:

$$L = \frac{V_{зм}}{\psi \cdot F \cdot \rho} \tag{3.16}$$

де ψ – коефіцієнт заповнення змішувача (0,8...1,0).

Знаходимо площу поперечного перерізу корита змішувача:

$$F = \pi R^2, \tag{3.17}$$

де R – радіус днища змішувача, м.

Знаходимо радіус днища змішувача:

$$R = \sqrt[3]{\frac{V_{\text{сум}}}{2 \cdot \cos} \cdot \psi \cdot i_{\text{лоп}}} \tag{3.18}$$

де $V_{\text{сум}}$ – ємність змішувача за об'ємом суміші, м^3;

φ – кут нахилу лопатей до горизонту, $\varphi = 40 - 45\ ^0$ [2] ;

$i_{\text{лоп}}$ – кількість парних лопатей для змішувача безперервної дії, $i_{\text{лоп}}$ = 36...64 [2].

Знаючи радіус днища змішувача R, знайдемо площу корита F. Знаючи F і $V_{зм}$, знайдемо довжину робочої частини корита L.

Ширина (B, м) корпусу змішувача розраховується за формулою:

$$B = 2R. \tag{3.19}$$

Висота корпуса (H, м) залежить від довжини лопат і радіуса:

$$H = (2{,}3 - 2{,}4)R \tag{3.20}$$

Конструювання лопатки. У ранніх роботах [4,5] було пояснено алгоритми розрахунків конструктивних параметрів змішувальної камери й вала, але автоматизований підхід до розрахунків змішувача потребує обґрунтувань і оптимізації знаходження габаритних розмірів усіх елементів змішувача, у тому числі лопаток, установлених за формою гвинта на валу.

Скористаємося відомими теоріями [3] для обґрунтування механізму перемішування піщинок із каталізатором і отверджувачем лопатями в рукаві змішувача. Для цього уявимо захоплювану порцію суміші у вигляді трикутника з відношенням висоти до основи 1:10, хоча більш докладний аналіз показує, що об'єм формувальної суміші, розташованої на валу змішувача в полі відцентрових сил, набуває більш складного обрису вільної поверхні.

На рис. 3.27 позначимо шукану вільну поверхню порції суміші як фігуру ABC, яка з одного боку обмежена радіальною лопаткою AC, а з іншого боку – частиною напрямної дуги корпусу змішувача BP. При цьому суміш умовно приймається як ідеально сипуче тіло, що має внутрішнє тертя й не має зв'язаності.

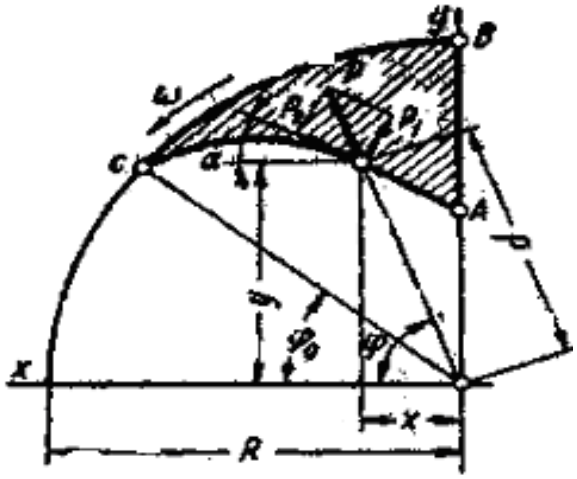


Рис. 3.27. До розрахунків форми вільної поверхні порції суміші

Одержимо диференціальне рівняння вільної поверхні:

$$\frac{P_1}{P_2} = \mathrm{tg}(\quad -\alpha), \mathrm{tg}\quad = \frac{y}{x},\ tg\alpha = \frac{dy}{dx}. \tag{3.21}$$

Якщо P – відцентрова сила частинки суміші, що знаходиться на вільній поверхні, то P_1 і P_2 – її нормальна й тангенціальна складові, а

$$\frac{P_1}{P_2} = \ln x, \tag{3.22}$$

та умова рівноваги частинки виразиться у вигляді

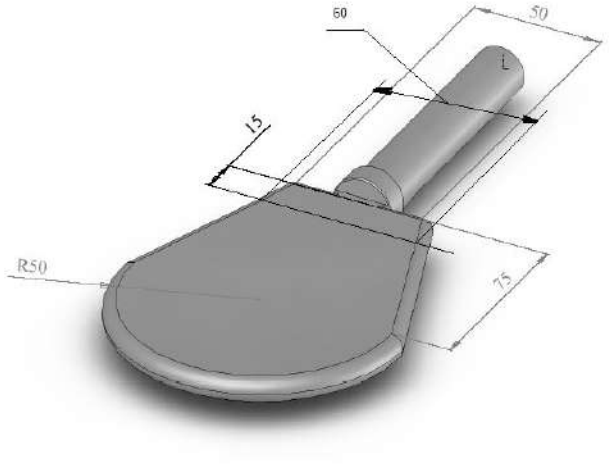
$$\mathrm{tg}(\,\mathrm{arctg}\frac{y}{x} - \mathrm{arctg}\frac{dy}{dx}) = \frac{1}{f}. \tag{3.23}$$

Однак розрахунки мають наближений характер, тому немає необхідності використовувати диференціальне вирахування. Тому пошукаємо більш просту логічну форму визначення порції суміші, що захоплюється лопаткою. Для подальших розрахунків необхідно визначити масу й форму порції суміші, що знаходиться на лопатці змішувача.

Новедемо довільну форму лопатки на рис. 3.28.

Проектований змішувач належить до класу високошвидкісних. При підвищених частотах обертання змішувального вала формувальна або стрижнева суміш у жолобі змішувача знаходиться в псевдозрідженому стані. Припустимо, що миттєва форма порції суміші буде визначатися кутом природного укосу матеріалу (цей кут становить величину приблизно 30^0 (рис. 3.28, б),

при цьому не враховується вплив на форму пакета відцентрових і інерційних навантажень.



а

б

Рис. 3.28. Лопатка змішувача до розрахування маси пакета суміші:
а – вигляд лопатки; б – до розрахування маси пакета суміші

Методика автоматизованого конструювання вигляду й габаритів лопатки залежно від змінних навантажень така.

Знайдемо коловне зусилля $P_{кол}$:

$$P_{\text{кол}} = \frac{M_{\text{вр}}}{r} \cdot K_{\text{дин}} \qquad (3.24)$$

де r – відстань від осі вала до середини лопатки, м;

$K_{\text{дин}}$ – коефіцієнт динамічності, якщо $K_{\text{дин}} = 2 - \infty$, то приймаємо $K_{\text{дин}} = 250$ [3].

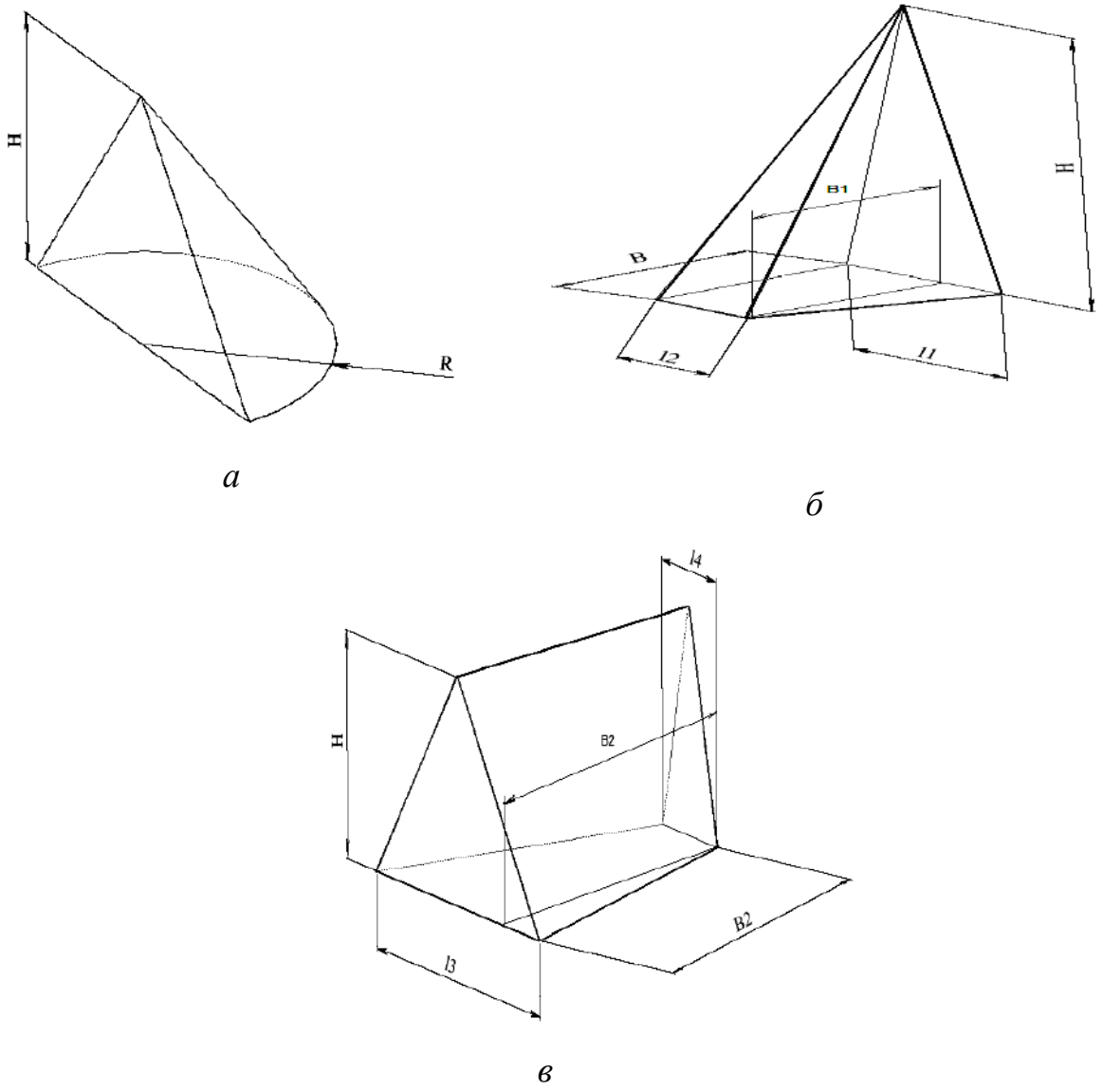
Розрахування маси пакета суміші, що знаходиться на лопатці змішувача, будемо проводити за формулою:

$$M = \rho\, V, \qquad (3.25)$$

де ρ – густина пакета суміші, кг/м^3;

V – об’єм пакета суміші на лопатці, м^3.

Для обчислення об’єму пакета суміші на лопатці розіб'ємо просторову фігуру (рис. 3.28, б) на три простіші: половину конуса й дві трапеції (рис. 3.29). Обчислимо об’єм кожного геометричного тіла окремо.



а *б* *в*

Рис. 3.29. До розрахунків об’єму пакета суміші:а – об’єму конуса суміші; б – об’єму піраміди; в – об’єму суміші піраміди

Об’єм конуса (рис. 3.29, *а*) знайдемо за формулою:

$$V_{\text{к}} = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{3}\cdot\pi\cdot R^2\cdot H\right) = \frac{1}{6}\cdot\pi\cdot R^2\cdot H\,. \qquad (3.26)$$

Об’єм піраміди (рис. 3.29, *б*) розраховуємо за формулою:

$$V_{\text{П1}} = \frac{1}{3}\cdot S_{\text{осн}}\cdot H = \frac{1}{3}\cdot\left(\frac{l_1 + l_2}{2}\cdot B_1\right)\cdot H\,. \qquad (3.27)$$

Об’єм піраміди (рис. 3.29, *в*) розраховуємо за формулою:

$$V_{П2} = \frac{1}{3} \cdot S_{осн} \cdot H = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{l_3 + l_4}{2} \cdot B_2 \right) \cdot H \,. \qquad (3.28)$$

Таким чином, загальний об’єм пакета суміші становитиме:

$$\mathrm{V} = \mathrm{V}_к + \mathrm{V}_{П2} + \mathrm{V}_{П1} = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot R^2 \cdot H + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{l_1 + l_2}{2} \cdot B_1 \right) \cdot H + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{l_3 + l_4}{2} \cdot B_2 \right) \cdot H \,. \quad (3.29)$$

Спростимо отриманий вираз:

$$\mathrm{V} = \mathrm{V}_к + \mathrm{V}_{П2} + \mathrm{V}_{П1} = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot R^2 + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{l_1 + l_2}{2} \cdot B1 \right) + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{l_3 + l_4}{2} \cdot B_2 \right) \cdot H =$$

$$= \left(0{,}5 \cdot \pi \cdot R^2 + \frac{l_1 + l_2}{2} \cdot B_1 + \frac{l_3 + l_4}{2} \cdot B_2 \right) \cdot H \qquad (3.30)$$

Тоді маса пакета суміші становитиме:

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot \left(0{,}5 \cdot \pi \cdot R^2 + \frac{l_1 + l_2}{2} \cdot B_1 + \frac{l_3 + l_4}{2} \cdot B_2 \right) \cdot H. \qquad (3.31)$$

Визначимо питомий тиск лопатки на суміш з урахуванням ваги суміші. На підставі даних про розміри лопатки (рис. 3.30) визначимо її площу. Умовно розіб'ємо площу лопатки на дві фігури: півколо й трапецію й знайдемо таким чином площу лопатки в цілому

$$S_{лоп} = S_{тр} + S_{кр} \qquad (3.32)$$

Площу трапеції визначимо:

$$S_{тр} = 1/2 \, (S_0 + S_1), \qquad (3.33)$$

а площу півкола:

$$\frac{1}{2} \cdot S_{кр} = 3 \cdot \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot R^2. \qquad (3.34)$$

Підберемо оптимальний кут повороту лопаток змішувача для забезпечення умови неруйнування частинок суміші. При цьому будемо мати на увазі, що σ = 3200 кг/см^2 [6].

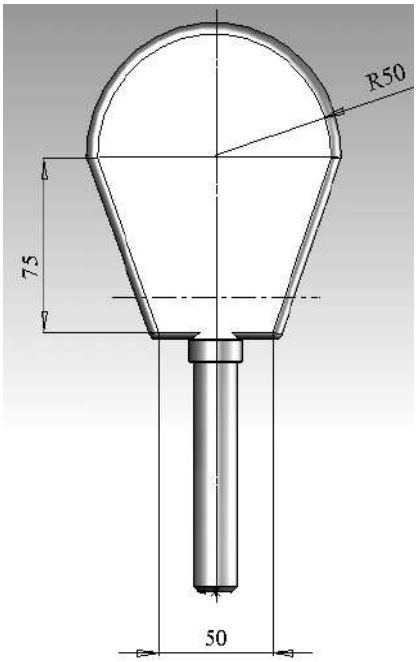


Рис. 3.30. До визначення площі лопатки

Досліджували залежність питомого тиску на суміш від кута повороту лопаток за допомогою пакета Excel (рис. 3.31).

Рис. 3.31. Залежність питомого тиску на суміш від кута повороту лопаток

Рівняння, що описує залежність питомого тиску на суміш від кута повороту лопаток має такий вигляд:

$$\sigma = 1550\ \alpha^{301}, \qquad (3.35)$$

де σ – питомий тиск на суміш лопатки, кг/см^2; α – кут повороту лопатки, град.

Величина вірогідності апроксимації – $R^2 = 0{,}9902$.

Використовуючи 3.11 і отримане рівняння (3.35), можна підібрати залежно від величини питомого тиску оптимальний кут повороту лопаток.

Таким чином, складено методику розрахунків гранично припустимих значень частоти обертання вала й кута нахилу лопаток з умови неруйнування зерен піску. Проведені теоретичні й конструкторські дослідження дозволили виробити таку методику автоматизованого розрахування параметрів лопатевих змішувачів, яка в процесі проектування робити можливим врахування змінних технологічних параметрів виробництва готування холоднотвердіючих сумішей.

У роботах [4,5] складено алгоритмічну модель проектованого об'єкта, зроблено реалізацію цієї моделі у вигляді комп'ютерної програми для розра-

хування конструктивних параметрів лопатевих змішувачів безперервної й періодичної дії. Під час статистичних досліджень проведено апроксимацію даних для оптимізації конструкції змішувача і отримано можливість знаходити оптимальну комбінацію таких параметрів змішувача, як діаметр жолоба, частота обертання змішувального вала і коефіцієнт заповнення жолоба.

Використовуючи пропонований підхід, можна перейти до побудови алгоритмічних моделей.

Алгоритмічна модель і розрахування продуктивності змішувача. Алгоритмічні моделі проектованого об'єкта містять у собі розрахування продуктивності лопатевих змішувачів, визначення площі лопатки й часу перемішування, розрахування потужності приводу змішувача деталей вузлів змішувача. Реалізація цієї моделі здійснюється за допомогою комп'ютерної програми.

Система автоматизованого розрахування основних параметрів лопатевих змішувачів для готування холоднотвердіючих сумішей складається з таких підсистем:

– визначення типу змішувача на підставі заданої продуктивності;

– розрахування продуктивності щодо суміші, виходячи із заданоїо кількості й розважування литва;

– визначення тимчасових характеристик процесу сумішоприготування;

– розрахування габаритних розмірів і вибір конструктивних параметрів змішувача;

– розрахування потужності приводу змішувача,

Визначення кількості дозаторів, установлених на рукаві змішувача;

– розрахування конструктивних параметрів дозаторів для дозування рідкої композиції суміші ХТС.

Для створення алгоритму розрахування лопатевого змішувача розбиваємо велику блок-схему на окремі блок-схеми відповідних підсистем, наведених на рис. 3.32-3.35

При розрахуванні змішувача за кількістб тонн литва за рік використовуємо відому методику [11]. Вхідними даними є: G – кількість тонн литва за рік і M – розважування литва за групами, кг. Далі визначається оптимальна витрата суміші на кожну тонну литва: V, м^3. Результат розрахунків – блок-схема продуктивності щодо суміші (т/год) подана на рис. 3.32.

Для вибору типу змішувача й визначення часу перемішування використовується річна кількість суміші (т/рік), що вводиться або отримана в результаті попередніх розрахунків. Задавшись густиною суміші ρ і річним фондом

часу роботи змішувача $Т_Д$, визначаємо годинну продуктивність змішувача – П, м^3. Визначаємо тип змішувача (періодичного або безперервної дії).

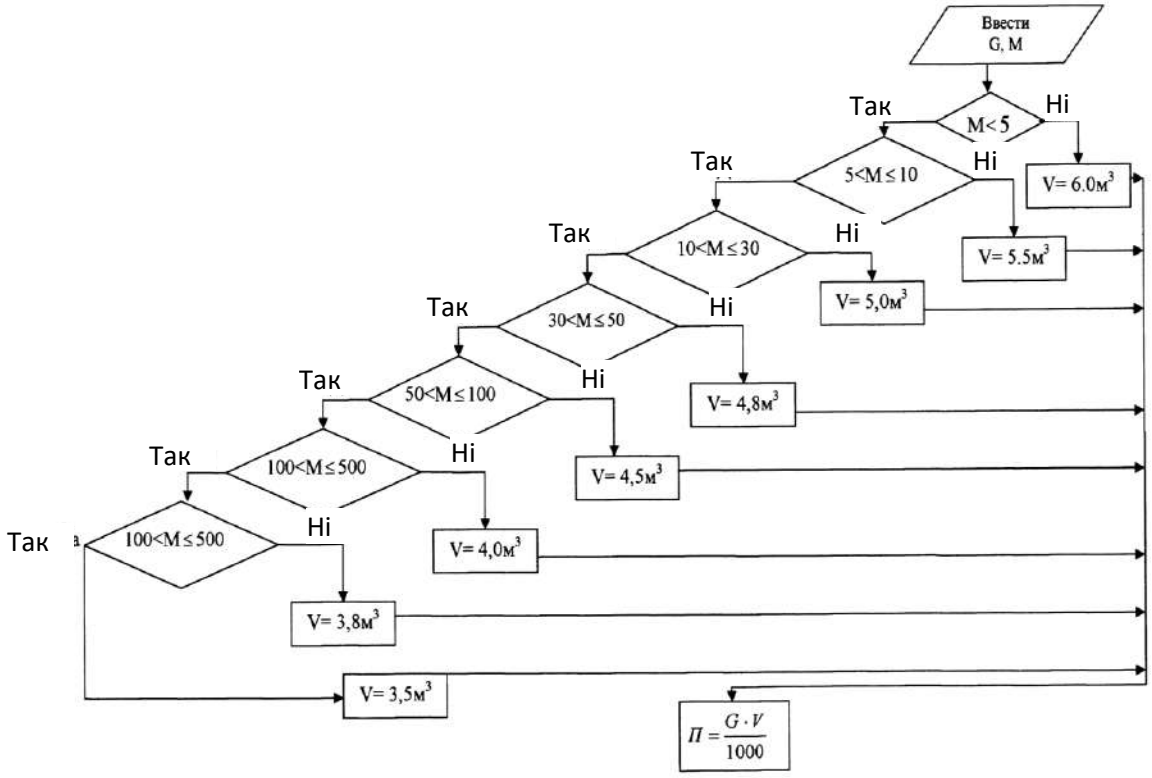


Рис. 3.32. *Блок-схема розрахування продуктивності щодо суміші*

Згідно з алгоритмом автоматично видаються рекомендації щодо часу перемішування й сумарної площі лопаток змішувача. Причому для змішувачів безперервної дії час перемішування потрібно розуміти як тривалість переміщення елементарного об’єму суміші від завантажувального до випускного отвору.

Таким чином, починаючи розрахунки із завдання потужності дільниці цеху *G*, уводячи обмеження за ваговими групами, автоматично виходимо на конкретні об’єми змішувача та його продуктивність (П, м^3/год).

Алгоритмічна модель визначення площі лопатки й часу перемішування. Порядок визначення конструктивних параметрів змішувача приймаємо такий [12]:

– для змішувачів періодичної дії: як вихідні дані розглянуто підпрограму (рис. 3.33), при цьому використовуємо отриману об'ємну годинну ємність змішувача П, м^3/год. Задавшись коефіцієнтом заповнення змішувача, зазвичай ψ = (0,8...1,0) [12], і кількістю парних лопатей $i_{лоп}$ ($2 \cdot i_{лоп}$ = 28...40) [12], на кожному валу визначаємо радіусу корпуса змішувача *R*, ширину *B* і довжину *H*, м;

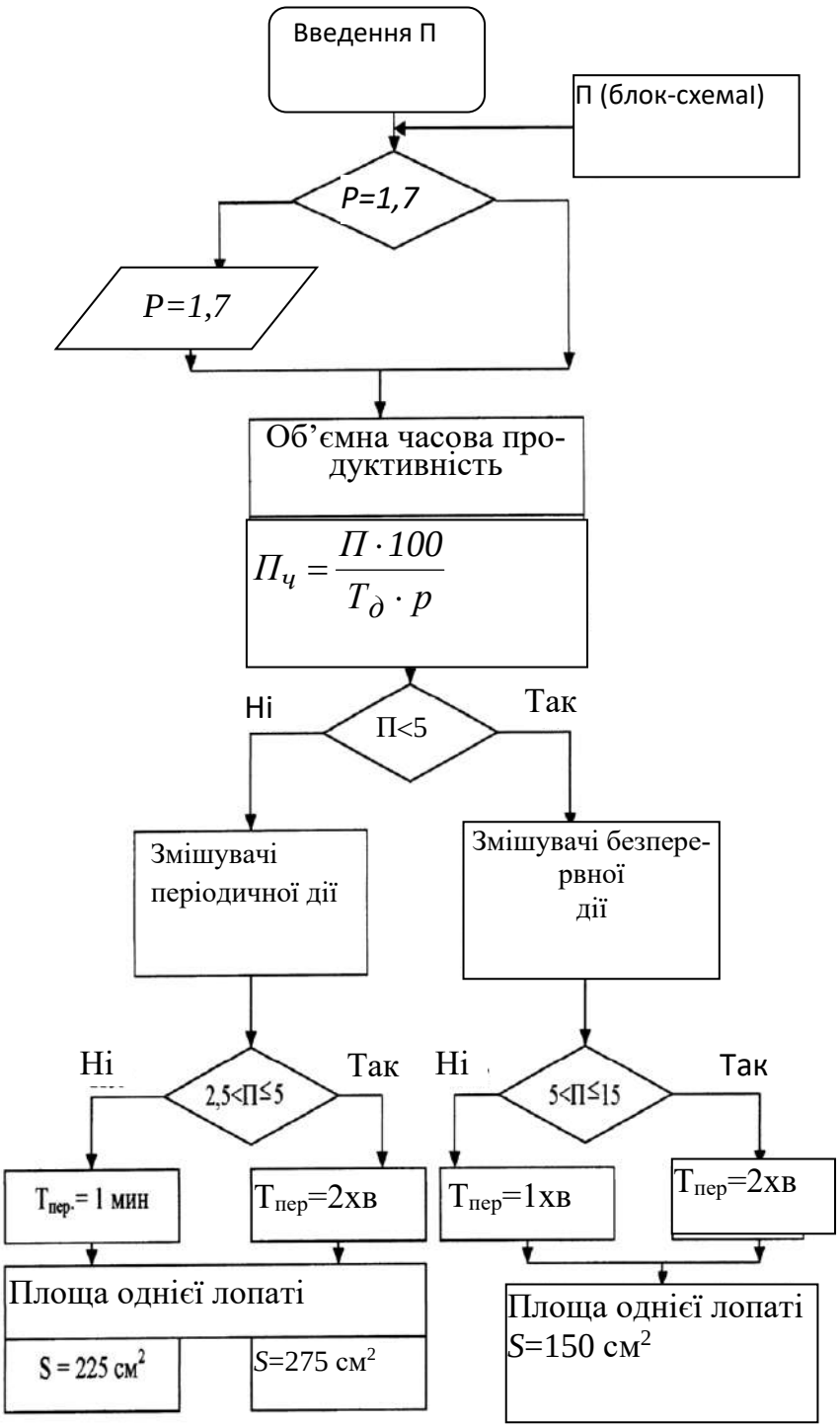


Рис. 3.33. Блок-схема визначення площі лопатки й часу перемішування

- для змішувачів безперервної дії вихідні дані аналогічні, але визначається хвилинна продуктивність змішувача $П_м$. Діаметр змішувальної камери визначаємо, задавшись співвідношенням довжини й діаметра корпусу *X*. Причому співвідношення між діаметром змішувальної камери і її довжиною вибираємо залежно від технологічно необхідного радіуса повороту змішувача (рис. 3.34).

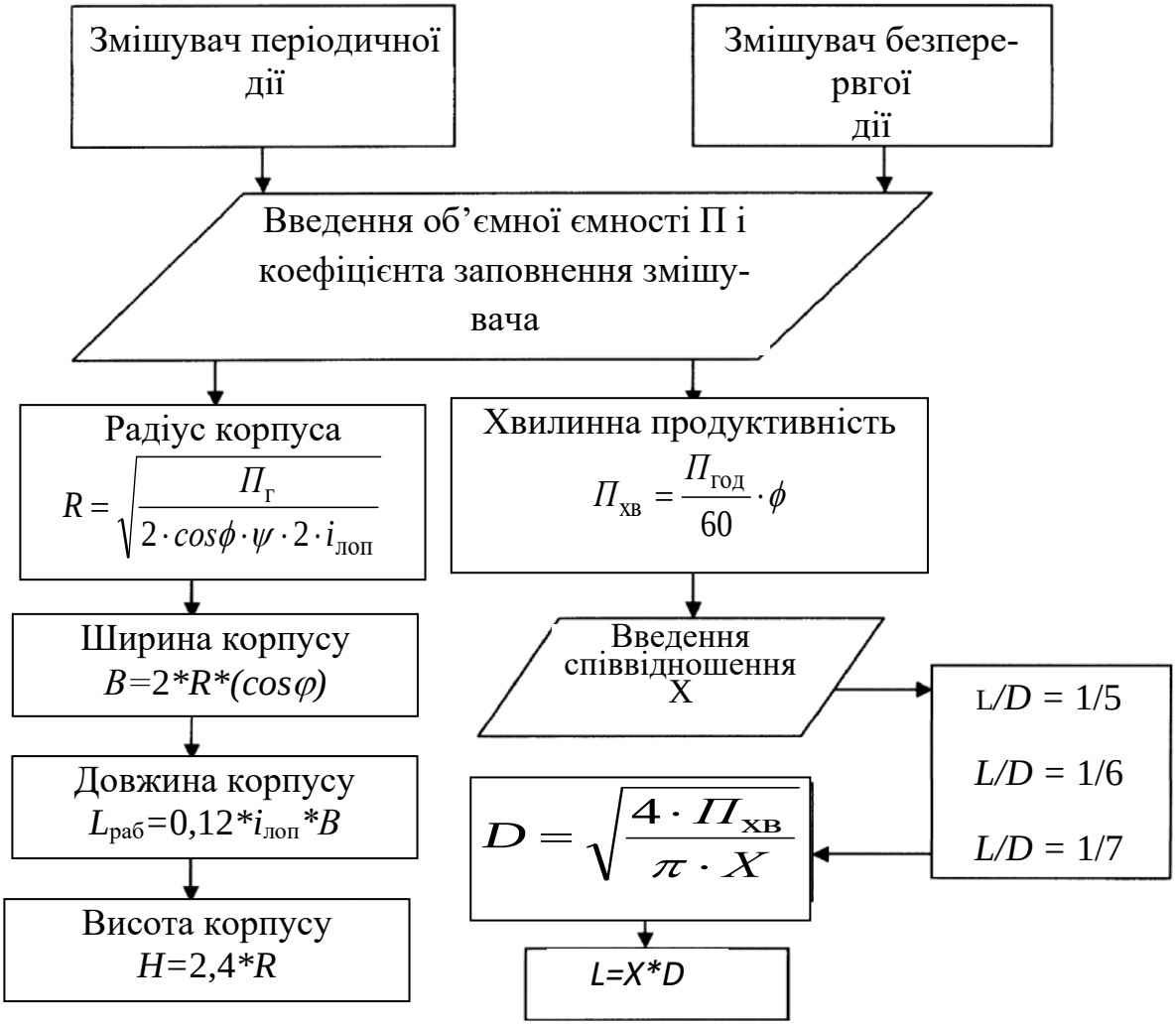


Рис. 3.34. Блок-схема розрахування конструктивних параметрів змішувача

Алгоритм передбачає відразу ж перехід від визначення площі лопатки й часу перемішування до розрахування конструктивних параметрів змішувача (довжини, ширини, висоти корпусу), тобто задаються змінні умови й автоматично визначається продуктивність змішувача, його розміри, розміри лопаток.

3.5.2. Розрахування потужності приводу змішувача

Для розрахування потужності приводу змішувача необхідно визначити частоту обертання валів змішувачів, потужність електродвигуна й діаметр вала з урахуванням його міцнісних характеристик. Вихідними даними є масова продуктивність змішувача $П_{мас}$, (т/хв) [9]. Для розрахування можна орієнтовно прийняти електродвигун асинхронний з короткозамкненим ротором із частотою обертання: n = 1460 об/хв, і на підставі цього розрахувати передатне відношення редуктора. Алгоритм розрахунків поданий на рис. 3.35.

Усі відомі конструкції змішувачів мають камери з лопатевими валами для перемішування піску зі сполучним. Завданням розрахування є визначен-

ня таких гранично припустимих значень частоти обертання вала змішувача й конструктивних параметрів лопаток, за яких частинки піску, що знаходяться у складі суміші, яка виготовляється, будуть руйнуватися менш інтенсивно, а кожна піщинкаа найбільш повно буде обволікатися наповнювачем і каталізатором.

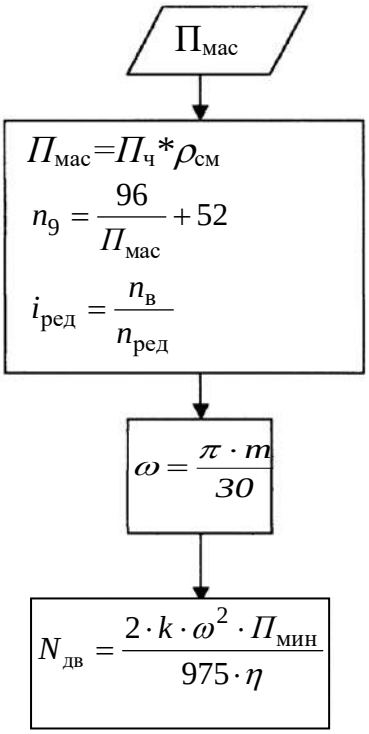


Рис. 3.35. Блок-схема визначення потужності двигуна й частоти обертання вала змішувача

При розрахуванні потужності приводу змішувача враховуємо потужність необхідну для переміщення суміші ХТС від впускного до випускного отворів [26, 27].

Потужність приводу змішувача визначається за формулою:

$$N_{прив} = K_з\,(N_1 + N_2), \qquad (3.36)$$

де $K_з$ – коефіцієнт запасу, $K_з$ = 2,5 [10];

n – кількість валів, n = 1;

N_1 – потужність, необхідна на пересування суміші в поздовжньому напрямку;

N_2 – потужність, необхідна на перелопачування суміші.

Потужність, необхідну на пересування суміші в поздовжньому напрямку, знаходимо за формулою:

$$N_1 = F\vartheta, \qquad (3.37)$$

де F – зусилля, якого необхідно прикласти до суміші, Н;

ϑ – швидкість руху суміші по валу, м/с.

Зусилля F знаходимо за формулою:

$$F = \mu m g K_1, \tag{3.38}$$

де μ – коефіцієнт тертя суміші об поверхню стінок змішувача, приймаємо, $\mu = 0{,}2$ [10]; m – маса суміші, кг;

K_1 – конструктивний коефіцієнт, що характеризує середній тиск суміші на стінки змішувача, приймаємо $K_1 = 1{,}8$ [10].

Виходячи з того, що коефіцієнт заповнення жолоба змішувача $K_{зап}$ становить 0,45, масу суміші в жолобі знаходять за формулою:

$$m = \rho \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot K_{зап}, \tag{3.39}$$

де ρ – густина суміші ХТС, $\rho = 1550$ кг/м^3 [10];

D – діаметр жолоба змішувача, D (попередньо розрахований).

Тоді зусилля F можна легко визначити за формулою (3.38) і швидкість руху суміші по валову усередині жолоба змішувача v за формулою:

$$v = \frac{L}{t_{пер} \cdot 60} \tag{3.40}$$

де L – довжина змішувача, м;

$t_{пер}$ – час перемішування, хв.

Знаючи зусилля, прикладене до суміші F, і швидкість руху суміші по валову v, можемо знайти потужність, необхідну на пересування суміші в поздовжньому напрямку N_1 за формулою (3.37).

Тепер знаходимо потужність, необхідну для перелопачування суміші за формулою:

$$N_2 = F_2 \vartheta_{сер}, \tag{3.41}$$

де F_2 – зусилля, необхідне на перелопачування суміші, Н;

$\vartheta_{сер}$ – середня швидкість руху суміші по лопатці, м/с.

Зусилля, необхідне на перелопачування суміші F_2, знаходимо зао формулою:

$$F_2 = 2\mu\, mg\cos\varphi, \tag{3.42}$$

де φ – кут нахилу лопатки, у загальному випадку приймемо $\varphi = 45\ ^0$[10].

Середню швидкість руху суміші по лопатці знаходимо за формулою:

$$\vartheta_{\text{сер}} = \frac{\omega \cdot (R_{\text{л}} + R_{\text{в}})}{2}, \quad v = \frac{\omega \cdot (R_{\text{л}} + R_{\text{в}})}{2}, \tag{3.43}$$

де $R_{\text{л}}$, $R_{\text{в}}$ – радіус лопатки, радіус вала, м;

ω – кутова швидкість обертання вала з лопатками:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}, \tag{3.44}$$

де n – частота обертання вала з лопатками.

Звідси легко визначається за формулою (3.43) середня швидкість руху суміші по лопатці й за формулою (3.42) зусилля, необхідне на перелопачування суміші F_2. Знаючи F_2 і $\vartheta_{\text{сер}}$, за формулою (3.41) знаходимо потужність N_2 і загальну потужність приводу змішувальної камери $N_{\text{прив}}$. За допомогою електронного каталогу MOTOR виконуємо вибір електродвигуна для приводу змішувача. При цьому необхідно врахувати, що передатне відношення планетарного механізму мотор–редуктора становить 4,25. Вікно програми подано на рис. 3.36.

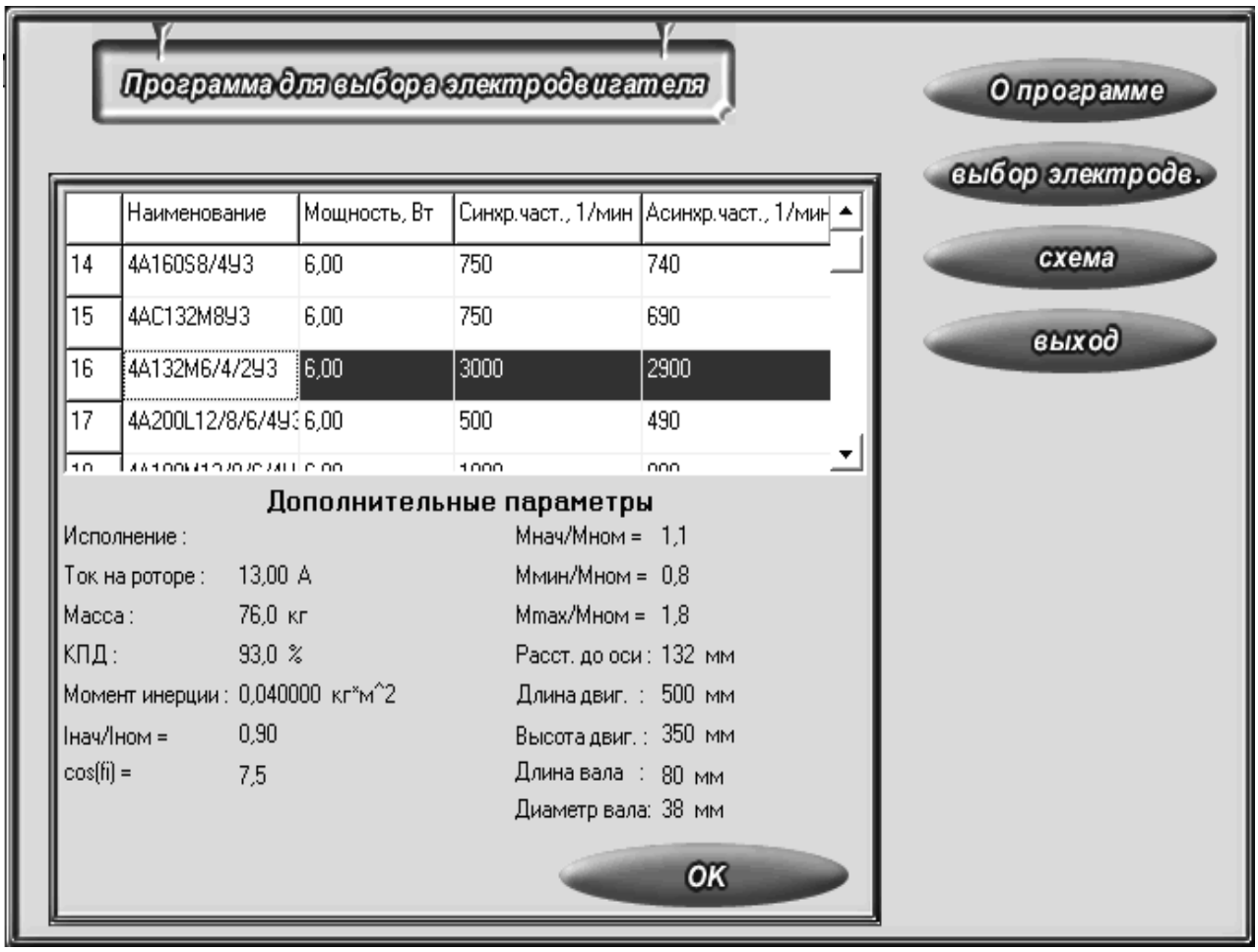


Рис. 3.36. Програма «Мотор» для підбору електродвигуна

З рис. 3.36 визначається фактична частота обертання вала приводу змішувальної камери: $n_ф$, об/хв, а потужність приводу – $P_{пр}$, кВт.

$$M_{вр} = 9{,}54 \cdot \frac{P_{пр}}{n_ф}. \qquad (3.45)$$

Потім робимо вибір моделі електродвигуна (вибираємо його габарити й зовнішній вигляд) і переносимо в пакет об'ємного проектування.

3.5.3. Побудова блок-схеми розрахунків конструктивних параметрів дозатора

У даному блоці розрахунків відбувається визначення конструктивних параметрів дозатора. Вихідними даними для розрахування є межа міцності холоднотвердіючої суміші, конструктивні параметри змішувача, час твердіння суміші, а також рівняння залежності межі міцності суміші ХТС від її технологічних параметрів (3.11). З рівняння (3.11), задавшись значеннями межі міцності суміші й часом твердіння, знаходять відсоток смоли, який визначає, яку частку становить об’єм дозатора від корисного об’єму змішувальної камери V (м^3). Далі знаходять діаметр поршня дозатора D (мм), діаметр штока d (мм), довжину ходу поршня H (мм), визначається кількість поршневих кілець N, а також конструктивні параметри заднього пристосування для зміни об’єму дози (довжина упорної трубки ΔH (мм), довжина різі на трубці L (мм), кількість витків різі N_1.

Алгоритм розрахування конструктивних параметрів дозатора подано на рис. 3.37.

Таким чином, розроблені алгоритми, дозволяють урахувати змінні технічні умови: продуктивність дільниці цеху або лінії, і в автоматизованому режимі одержувати реальні конструктивні параметри лопатевих змішувачів, що дає можливість створення тривимірних моделей проектованого об'єкта.

Отримані тривимірні графіки, математичні залежності, алгоритми в сумі дають методику оптимізації впливу існих лопатевого змішувача.

3.5.4. Побудова 3D-Моделі лопатевого змішувача

Вихідними даними для проектування є задана продуктивність машини з суміші або номенклатура виливків. Також необхідно знати річний фонд часу проектованого устаткування. Розроблено програму COLD-BOX PROCESS розрахунків конструктивних параметрів змішувача для готування холоднотвердіючої суміші. Вікно введення вихідних даних програми COLD-BOX PROCESS подано на рис. 3.38.

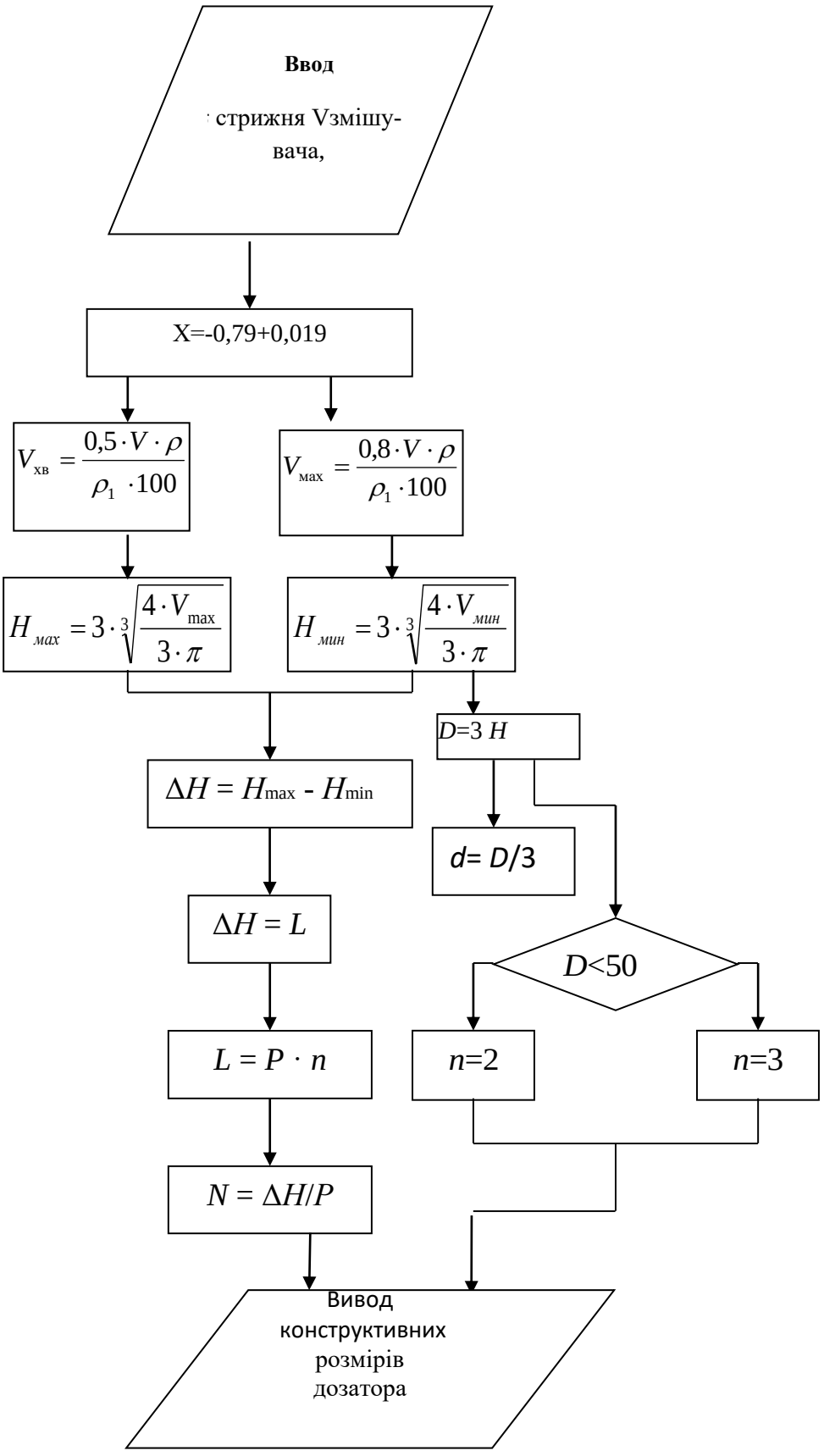


Рис. 3.37. Алгоритм розрахування конструктивних параметрів дозатора

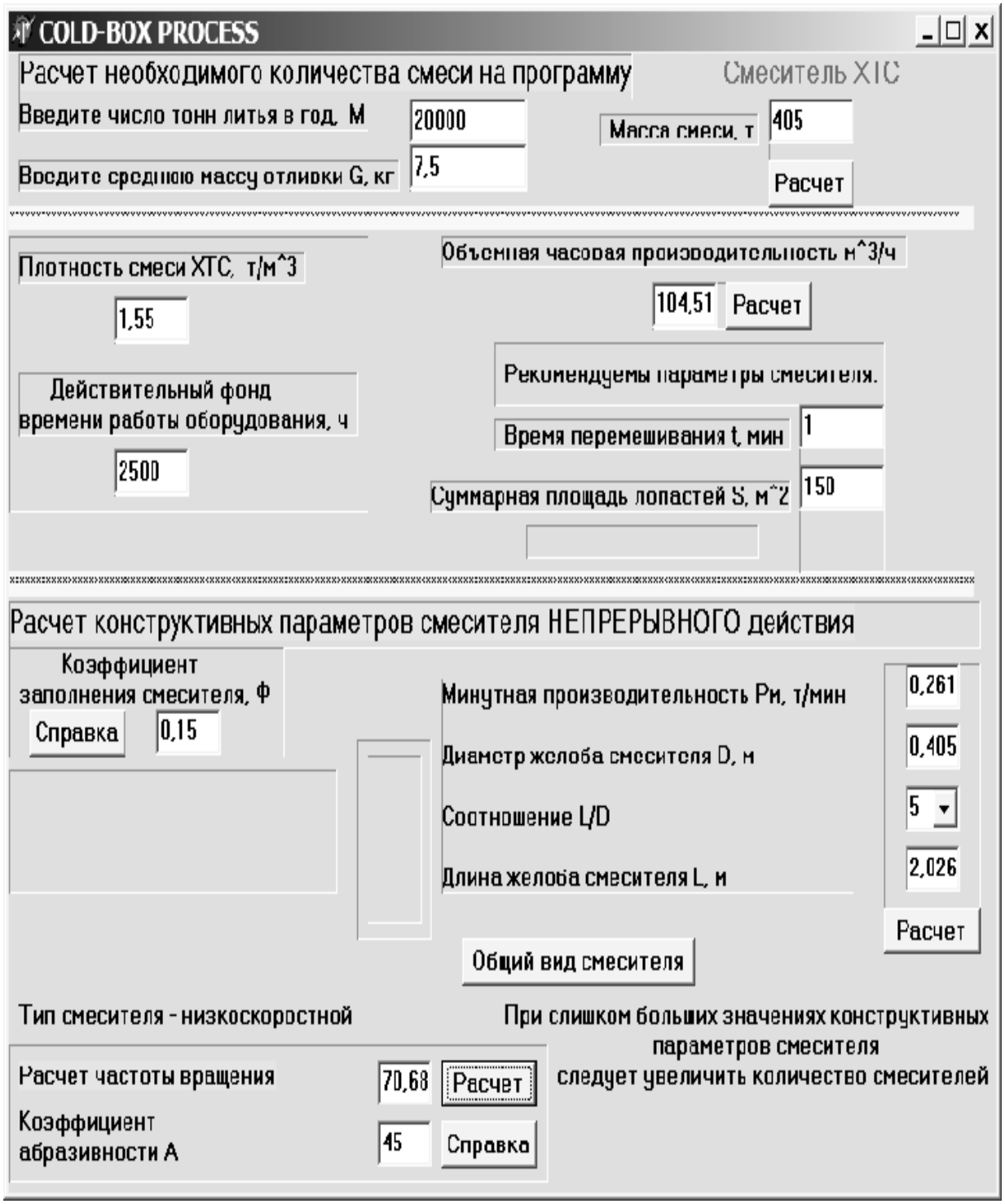


Рис. 3.38. Вихідні дані для тривимірного проектування

Початковими параметрами майбутньої машини в середовищі Solid Works (далі *SW*) є: діаметр жолоба змішувача, його довжина, а також діаметр змішувального вала для креслення деталей і складання головного рукава змішувача (рукава, у якому відбувається змішування сипучих матеріалів із рідкими компонентами).

3.5.5. Створення тривимірної моделі деталей змішувальної камери

Проектування починається зі створення тривимірної моделі вала змішувача. У цьому програмному пакеті, як і в багатьох інших, відправною точкою є ескіз профілю майбутньої деталі (рис. 3.39).

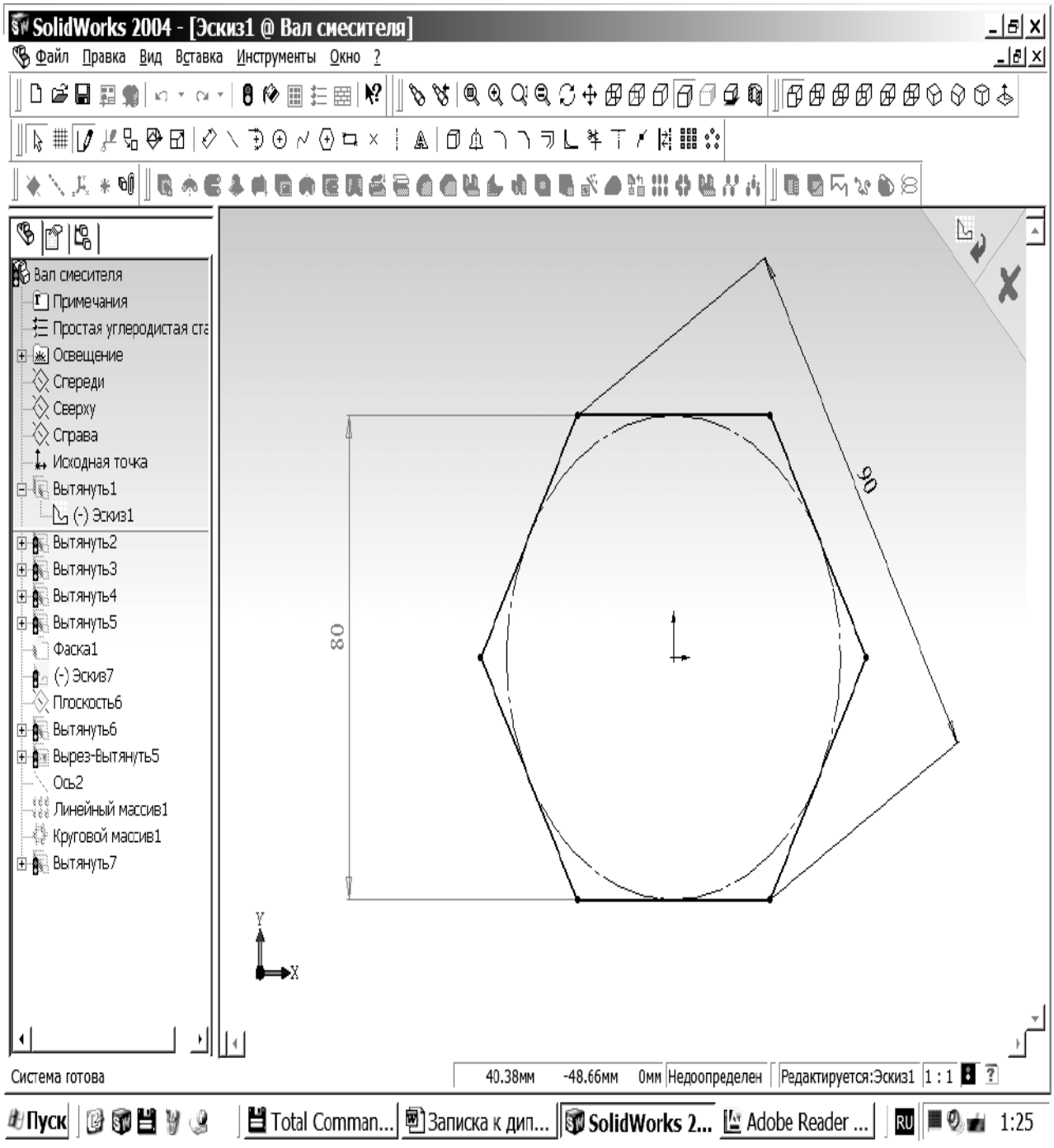


Рис. 3.39. *Ескіз перерізу лопатевого вала*

Далі перетворюємо ескіз у 3D-Модель вала (рис.3.40).

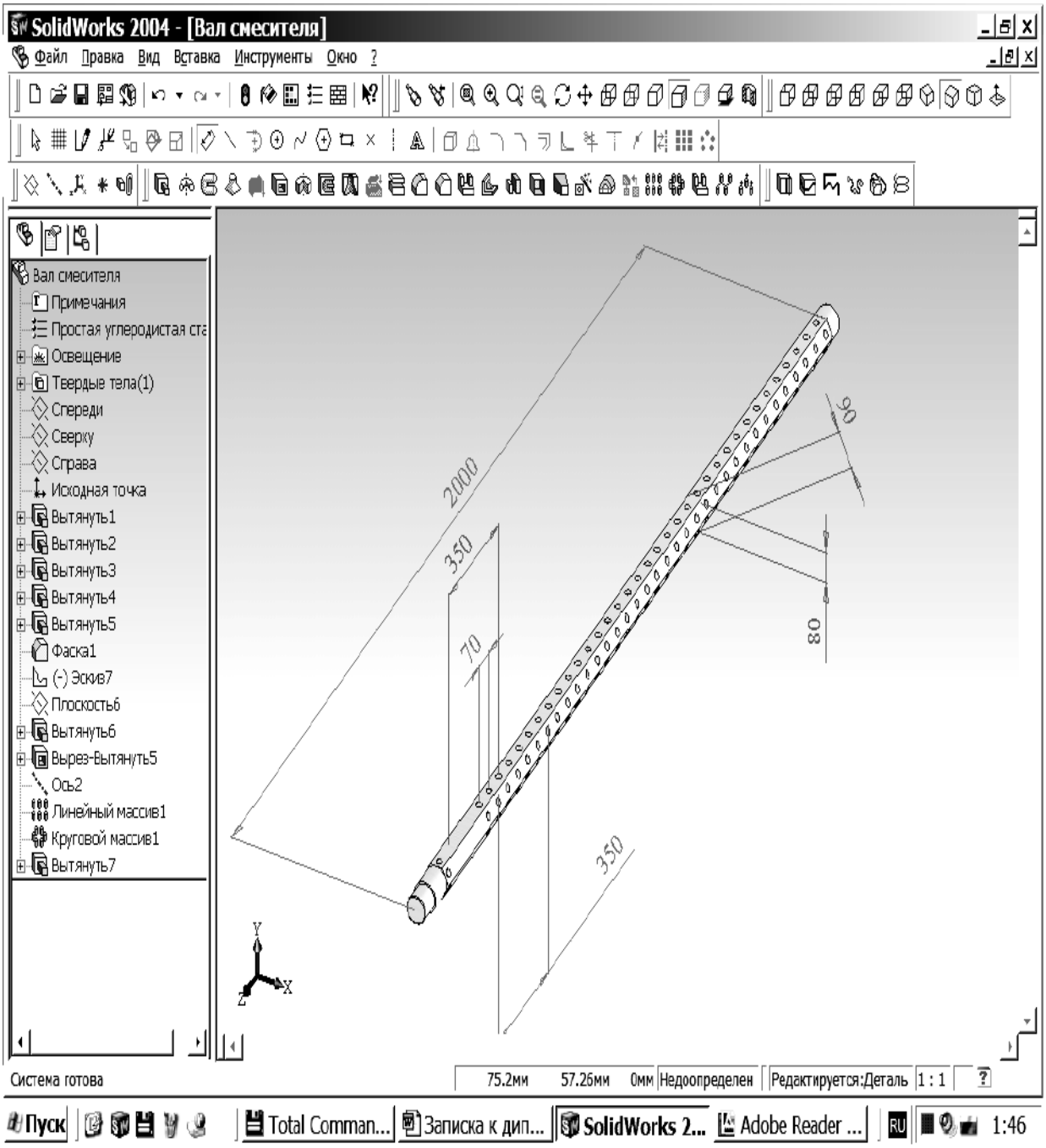


Рис. 3.40. Перша деталь машини – змішувальний вал

3.5.6. Виконання супутніх деталей змішувальної камери

Далі аналогічно виконуємо інші деталі змішувальної камери змішувача: лопатки, стакана підшипникового вузла, кришки підшипників та ін. Стандартні вироби (болти, гайки, підшипники, шайби) беремо з бібліотеки елементів Toolbox, додаткового застосування Solid Works 2004.

Після креслення всіх деталей рукава змішувача для перемішування сипучих матеріалів із закріплювачем і отверджувачем збираємо їх у складання.

У складанні деталі з'єднуються за допомогою сполучень. Сполучення вказується залежно від конфігурації деталей їх геометричної форми та ін. Складання змішувального вала подано на рис. 3.41.

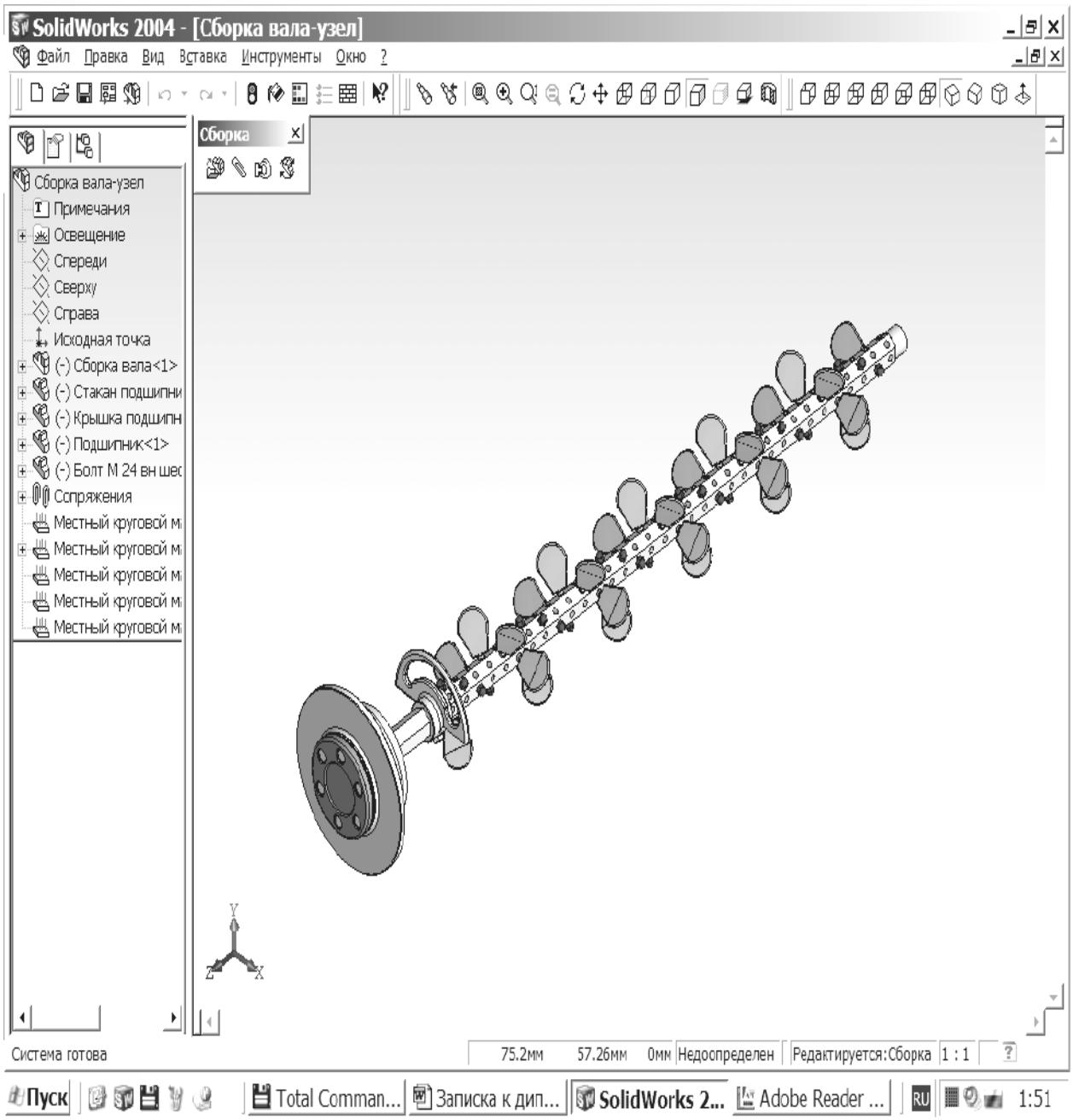


Рис. 3.41. Перше вузлове складання змішувача – вал із лопатками

Побудований головний рукав змішувача – камера для перемішування сипучих матеріалів із закріплювачем і отверджувачем – подано на рис. 3.42.

Це складання передбачає установлення зібраного вала (вал із лопатками) у корпус головного рукава змішувача й з'єднуання з мотор-редуктором.

Аналогічно будується друге плече змішувача – рукава для перемішування сипучих матеріалів і переміщення їх у головну змішувальну камеру (рис. 3.43), а потім – увесь змішувач у цілому.

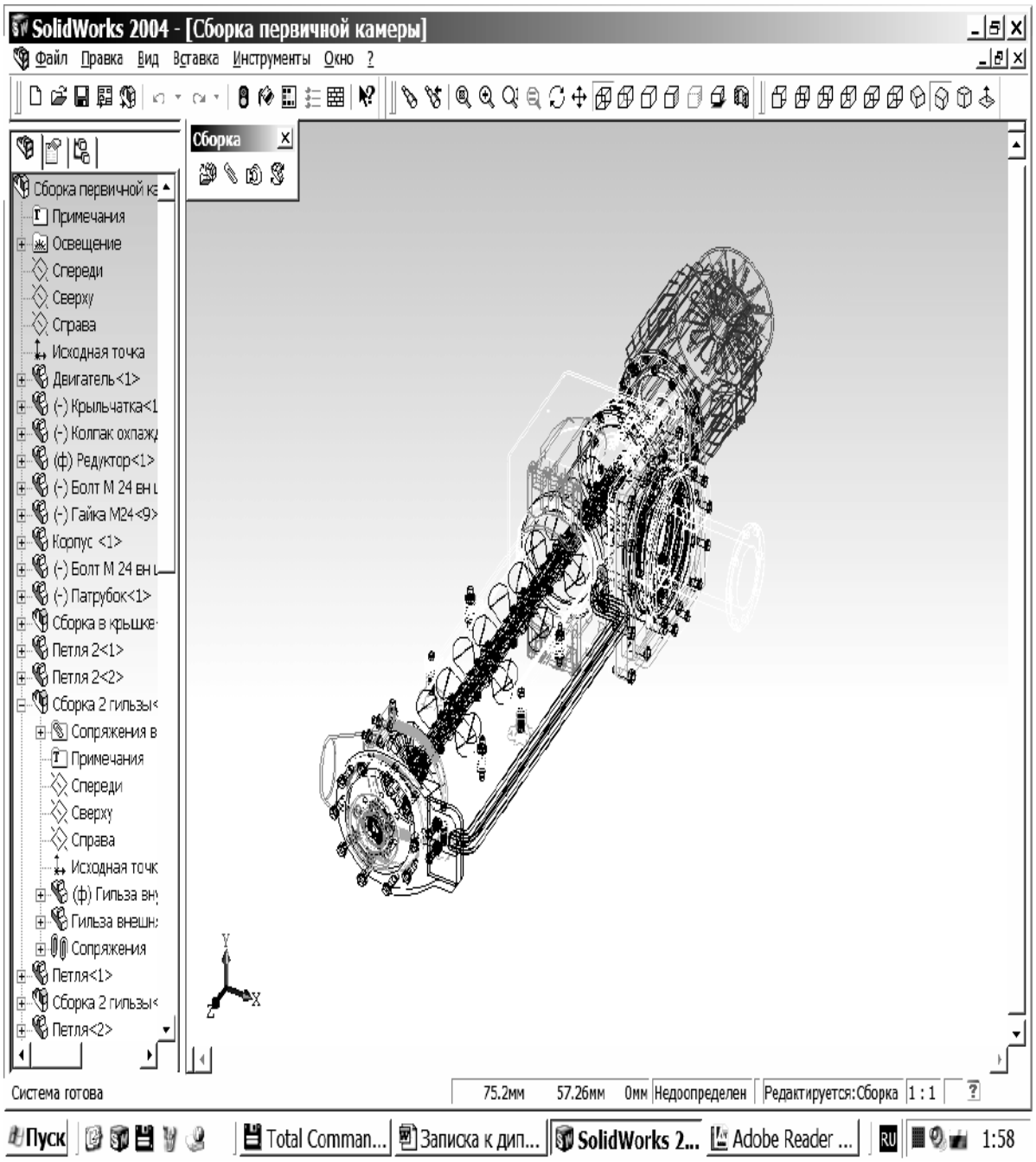


Рис. 3.42. Головний рукав змішувача – камера для перемішування сипучих матеріалів із закріплювачем і отверджувачем

3.5.7. Автоматизоване проектування дозатора

Після проектування змішувача починаємо автоматизоване проектування дозатора. Вихідними даними для проектування є межа міцності суміші

ХТС, час твердіння суміші, а також корисний об’єм змішувача. Скористаємося для розрахування конструктивних параметрів механізму для дозування компонентів холоднотвердіючої суміші програмою «Дозатор».

У програму заносимо дані необхідні, розраховані раніше: густину смоли, межу міцності суміші ХТС, час отвердження суміші, корисний об’єм змішувача. Результат розрахунків програми «Дозатор» поданий на рис. 3.44.

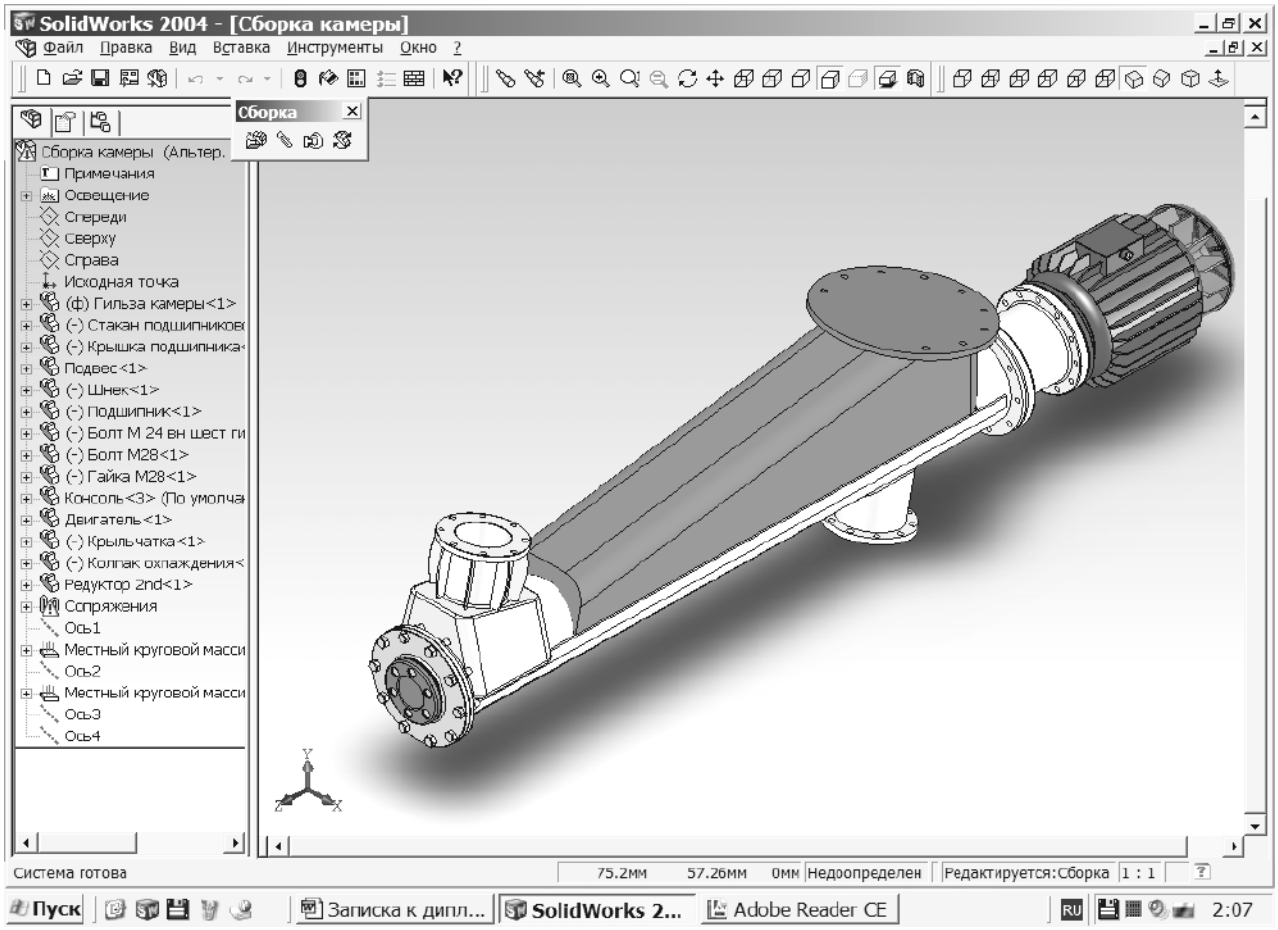


Рис. 3.43. Другий вал, що подає змішувач

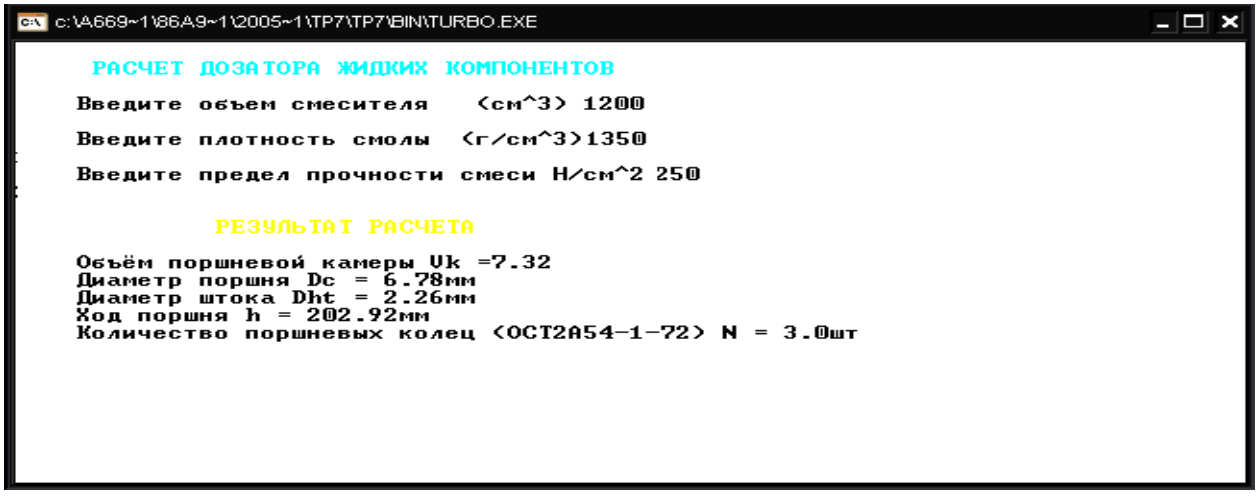


Рис. 3.44. Вихідні дані для тривимірного проектування дозатора

У результаті розрахування одержимо параметри для креслення деталей дозатора. Оскільки розглянутий дозатор – це складний циліндр, то розраховуються: діаметри поршня й штока, хід поршня, розміри поршневих кілець.

3.5.8. Створення тривимірної моделі поршня

Побудова деталей дозатора аналогічна, побудові деталей змішувальних камер. Почнемо проектування зі створення тривимірної моделі поршня (рис. 3.45) у пакеті програми SW.

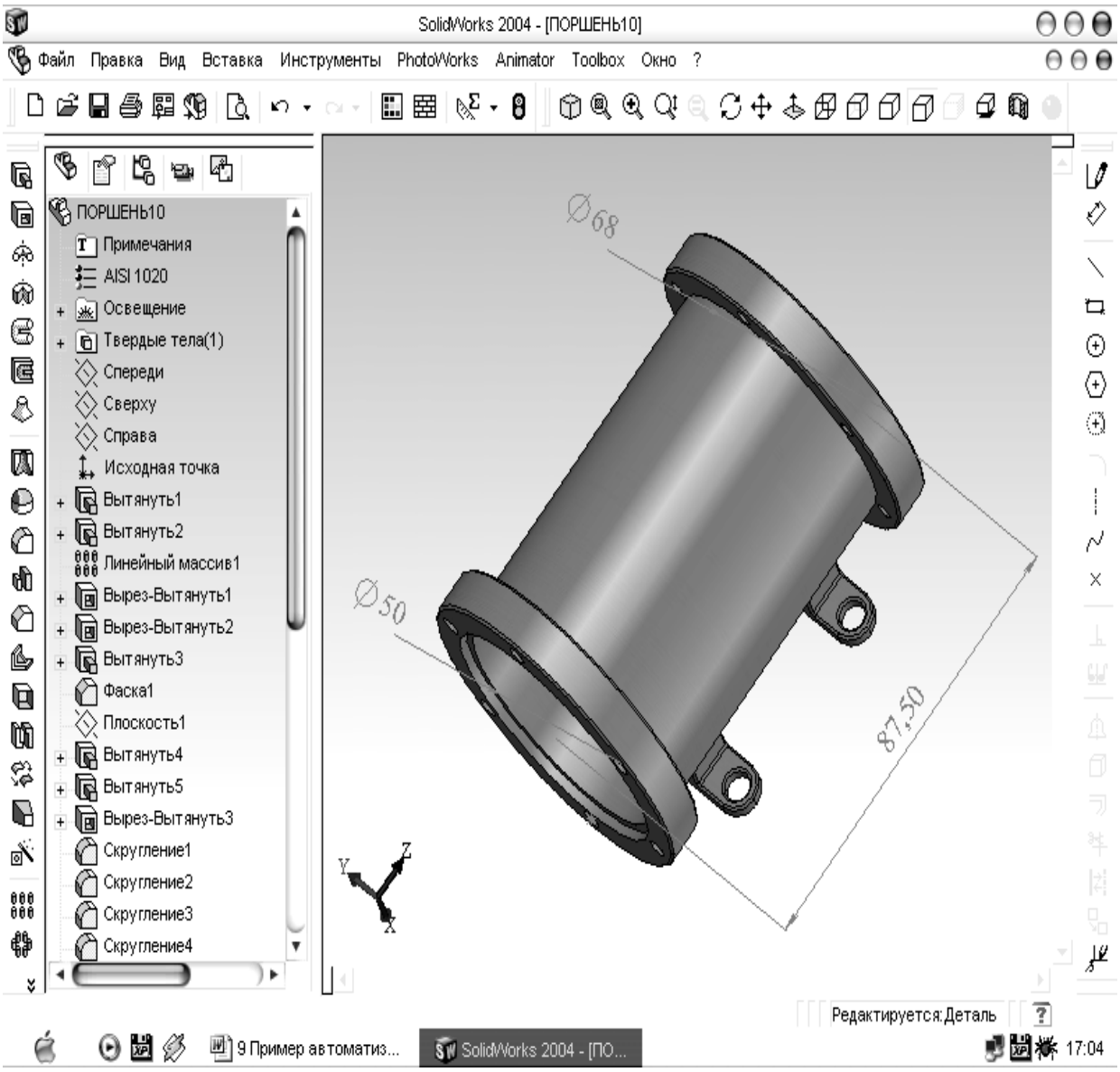


Рис. 3.45. Дозувальний поршень

Створюючи складання із дрібних деталей, одержуємо об'ємне зображення дозатора (рис. 3.46).

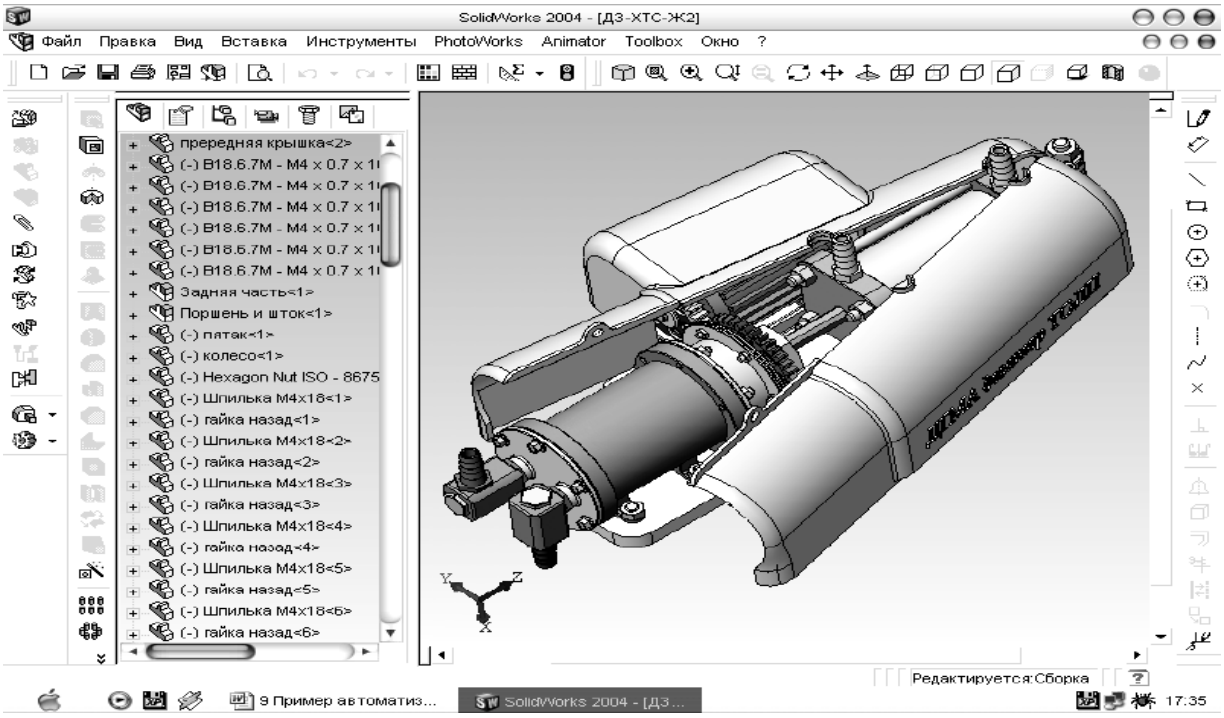


Рис. 3.46. Дозатор для дозування рідких компонентів суміші

Поєднуємо всі великі складання в одне й одержуємо машину в цілому. Результат поданий на рис. 3.47.

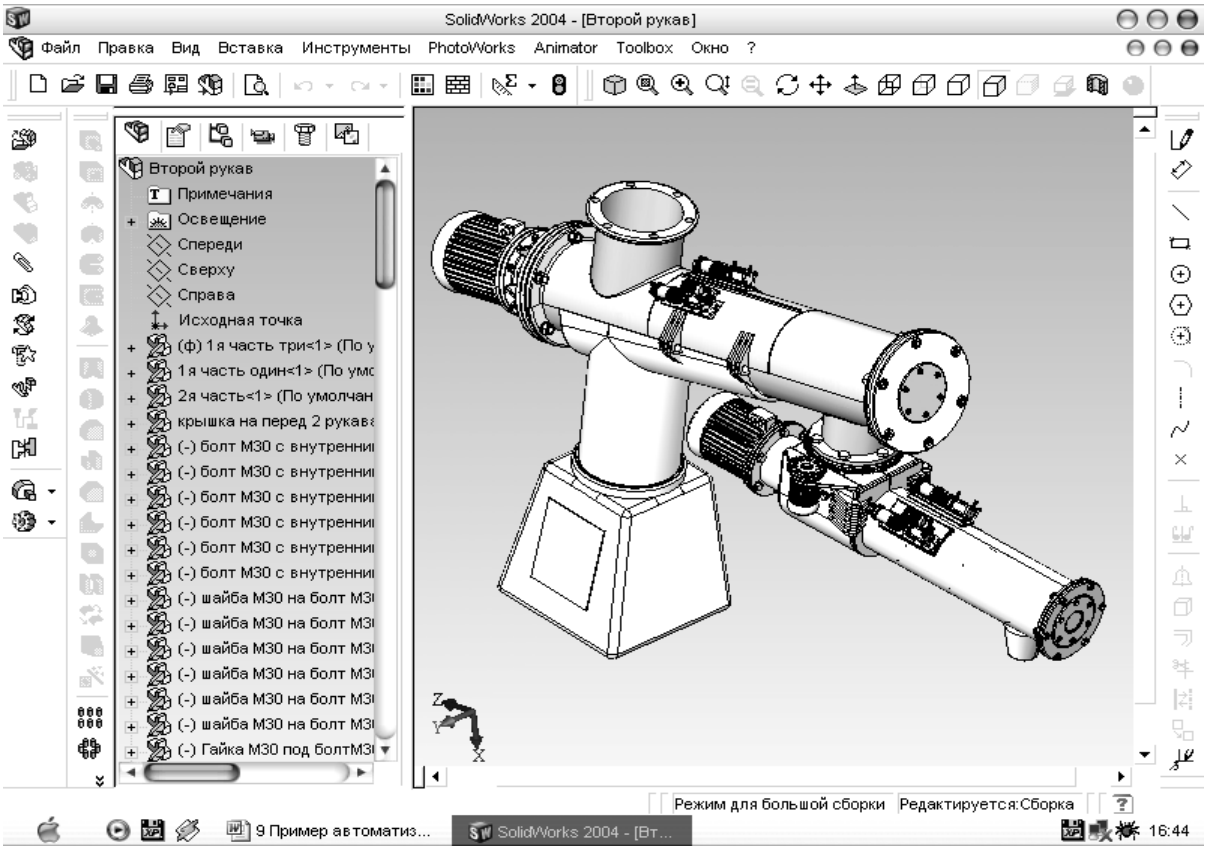


Рис. 3.47. Змішувач із системою дозування рідких компонентів

Зробимо «монтаж» змішувача в сумішоприготувальний комплекс.

Комплекс ХТС складається з:

– бункерної естакади;

– дозаторів сипучих матеріалів, що дозують необхідну кількість пісків (свіжих і регенерованих) із бункерів;

– пневмотранспорту, який передає дози сипучих матеріалів у лопатевий змішувач.

За методикою проектування лопатевого змішувача виконуємо тривимірні моделі деталей, вузлів і машин комплексу.

Комплекс технологічного устаткування ХТС поданий на рис. 3.48.

3.5.9. Створення конструкторської документації змішувача ХТС

Основна трудомісткість виконання креслень полягає в створенні тривимірних моделей, які були виконані на попередньому етапі проектування. Тепер досить перетягнути деталь, вузол або всю машину цілком на аркуш креслення. Далі програма SW сама допоможе розставити розміри й позиції на кресленнях. В SW зручно працювати з місцевими видами, розрізами, виривами та ін.

Кілька прикладів креслень подано в додатках А – И.

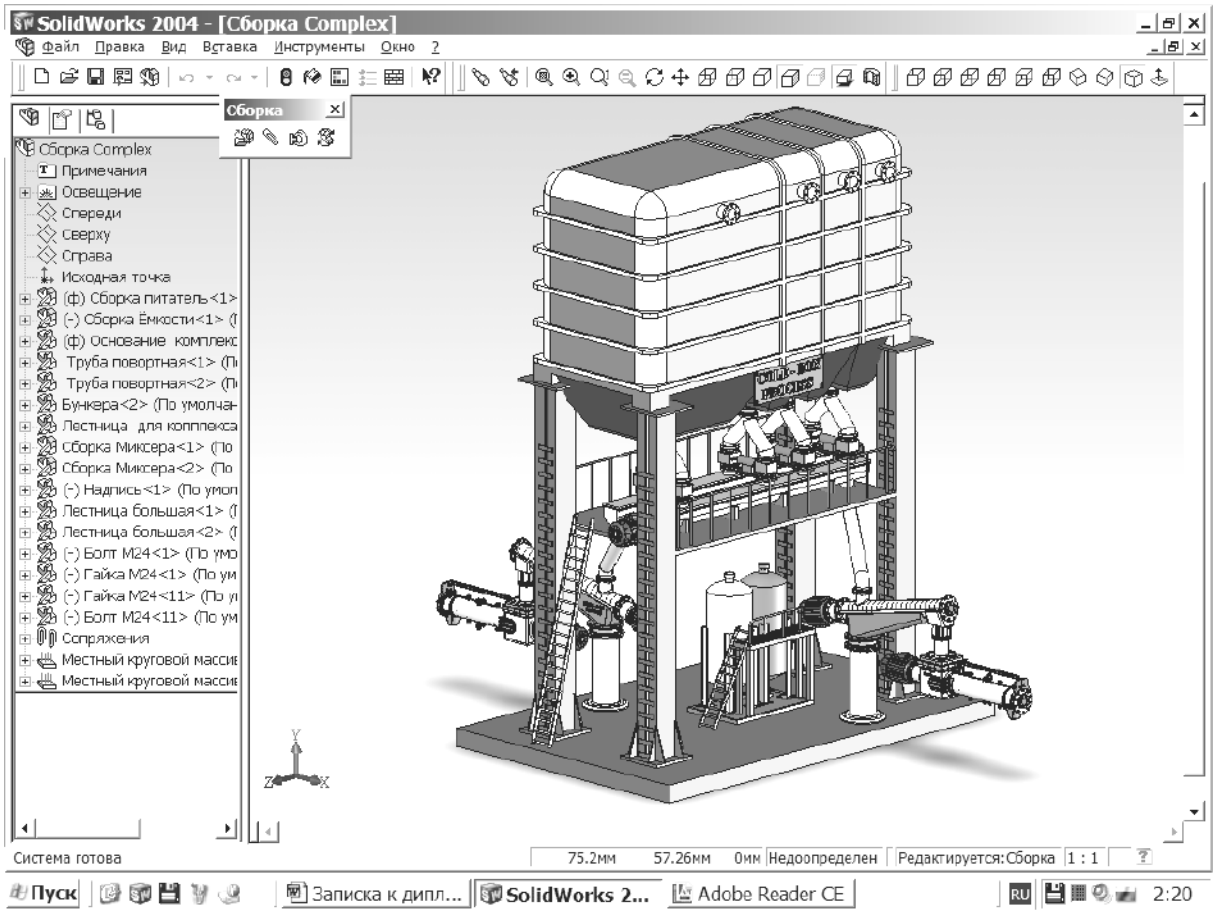


Рис. 3.48. Тривимірна модель комплексу ХТС

Контрольні запитання

1. Які існують конструкції лопатевих змішувачів для приготування холодно-твердіючих сумішей?
2. За якими критеріями оцінюють ливарні стержні?
3. Шляхи вдосконалення процесів сумішоприготування ХТС.
4. Які загальні технологічні проблеми існують для різних типів сумішей ХТС?
5. Конструкція змішувача з попередньою камерою перемішування сипучих матеріалів.
6. Поясніть конструкцію поршневого насоса зі змінюваним об'ємом поршневої камери.
7. Порядок визначення конструктивних параметрів змішувача ХТС.
8. З яких підсистем складається система автоматизованого розрахування основних параметрів лопатевих змішувачів?
9. Порядок виконання автоматизованого проектування дозатора ХТС.

РОЗДІЛ 4.
ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ З ПРОЕКТУВАННЯ ЛИВАРНИХ СИСТЕМ

4.1. Ливарний цех як об'єкт дослідження

На сучасному етапі розвитку ливарного виробництва основна увага має приділятися підвищенню якості виливків при зниженні витрат праці, матеріалів і енергії на їх виготовлення. При цьому поява складних комплексів устаткування, у тому числі автоматичних і роботизованих, що реалізовують досконаліші технології, є головною тенденцією прогресу у виробництві виливків.

Литі заготовки роблять різними методами, серед яких домінуючим залишається процес їх виробництва в сирих піщаних формах. Це визначається передусім порівняно низькими витратами на виробництво таких відливань. Основні передумови для управління якістю і підвищення ефективності виробництва виливків створює автоматизація цього процесу на базі широкого використання автоматичних формувальних ліній. Ливарний цех виготовлення виливків у піщані форми може бути подана як єдина технологічна система, схему якої наведено на рис. 4.1.

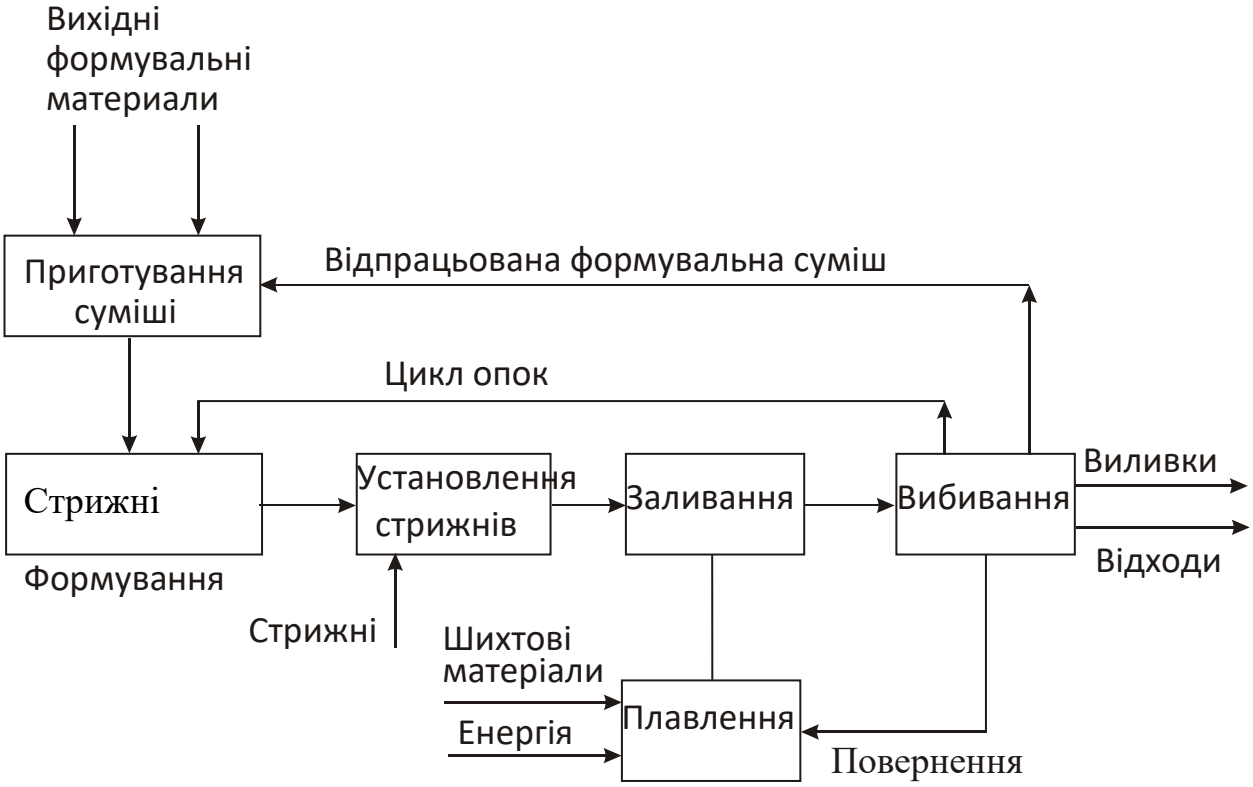


Рис. 4.1. Ливарний цех як технологічна система

Аналіз технологічної системи показує наступне:

- ливарний цех – система пов'язаних технологічних циклів;

- опоки проходять замкнутий технологічний цикл, на який накладаються два відкритих (незамкнутих): цикл формувальної суміші і плавильно-заливальний цикл;
- місцями зв'язку цих трьох циклів є формування, заливка, охолодження і вибивання;
- у відкриті цикли надходять початкові і допоміжні матеріали для приготування рідкого металу і виготовлення ливарних форм;
- основний комплекс технологічних операцій: формування, установка стрижнів, заливання і вибивання – виконуються в масовому і багатосерійному виробництві на автоматичних формувальних лініях.

Ефективність функціонування ливарного цеху визначається ступенем синхронізації і надійністю роботи основних його підрозділів. Велику частку простоїв автоматичних формувальних ліній (30...60 % від загальної кількості) становлять простої через неритмічну роботу суміжних виробничих ділянок.

Аналіз літературних джерел показує, що четверта частина усіх простоїв у ливарному цеху припадає на частку системи сумішеприготування [28]. За існуючими оцінками [29], 40...70 % усіх дефектів виливків визначається рівнем і стабільністю властивостей формувальних сумішей, до яких при автоматичному формуванні становлять підвищені вимоги.

Функціональним завданням сумішеприготувальної системи (СПС) є приготування і транспортування формувальних сумішей, що відповідають заданим технічним умовам, у необхідній кількості. Для розв’язання такого завдання створюються системи сумішеприготування, що складаються в середньому з 50...120 різнорідних агрегатів технологічного і транспортного характеру [30].

Якість формувальної суміші формується в змішувачах, а її кількість визначається продуктивністю паралельно працюючих змішувачів і надійністю системи транспортних пристроїв, що забезпечують передавання суміші від змішувачів до формувального устаткування. Елементи СПС жорстко пов'язані між собою, тому зупинка одного стрічкового конвеєра для транспортування суміші призводить до зупинки не лише СПС, але й автоматичної формувальної лінії. За час простою погіршуються технологічні властивості формувальної суміші, що призводить до появи дефектів у виливків. Велику частку в простоях автоматичних формувальних ліній становлять простої через плавильне відділення.

Аналіз організації роботи цехів масового і великосерійного виробництва провідних заводів сільгоспмашинобудування й автомобільної промисловості свідчить, що простої автоматизованого формувального устаткування через відсутність металу становлять 10...25 %, досягаючи іноді 50 % номінального фонду часу [31, 32].

У плавильному відділенні здійснюється підготовка шихтових матеріалів, виплавлення сплавів, доставка їх на дільнмицю заливки і заливання металу у форми. Робота плавильного відділення спрямована на повне забез-

печення рідким металом дільниць заливки автоматичних формувальних ліній. Залежно від виду сплаву, що виплавляється, застосовують різні типи плавильних агрегатів або їх комбінації. Розміри печей, їх конструкція, площі які вони займають, методи їх обслуговування й експлуатації істотно розрізняються між собою і сильно впливають на вибір планувань плавильних відділень і організацію робочих місць.

Істотну роль у роботі плавильного відділення відіграє система подання рідкого металу до автоматичних формувальних ліній, яка більшою мірою залежить від розташування плавильних агрегатів і дільниць заливки автоматичних ліній, наявності нагромаджувачів, а також від траєкторії шляху доставки металу до дільниць заливки. Раціональна організація роботи плавильних систем ливарних цехів, сучасні технології і оптимальний вибір устаткування для отримання сплавів є визначальними вимогами для отримання виливків із необхідними міцнісними й експлуатаційними характеристиками.

Дослідження роботи стержневих відділень ливарних цехів показують, що за правильної організації їх роботи простоїв автоматичних формувальних ліній через відсутність стрижнів не виникає.

У формувальному відділенні відбувається перетинання усіх основних потоків матеріалів, необхідних для виготовлення виливків, і безпосередньо її. Основним устаткуванням сучасних формувальних відділень ливарного цеху є потокові автоматизовані або автоматичні формувальні лінії, які необхідно розглядати як системи технологічних машин, розташовані за технологічним потоком і пов'язані транспортними пристроями, призначеними для виготовлення виливків необхідної якості із заданою продуктивністю. Кожен елемент лінії здійснює точно визначену функцію, але і він пов'язаний із іншими елементами. Складність і різноманіття можливих варіантів лінії, наявність великої кількості елементів і транспортних засобів ускладнюють процеси дослідження таких ліній. Головним чинником, що визначає продуктивність лінії, є її надійність.

Особливістю автоматичних формувальних ліній є наявність однієї операції найбільшої тривалості й інших операцій, що мають значні резерви продуктивності. Для формувальної лінії операція найбільшої тривалості, як правило, виконується на формувальному автоматі, від продуктивності якого залежить здебільшого і продуктивність лінії. Механізми лінії, розташовані в технологічному ланцюжку до формувального автомата (наприклад, розпаровувач, механізм подання опок та ін.), а також після нього (кантувач, збирач, зштовхувач заформованих опок), працюють швидше і впродовж кожного циклу формувального автомата частину часу простоюють.

На ефективність роботи автоматичної лінії істотно впливає надійна робота вибивних пристроїв, оскільки зупинка їх роботи призводить до зупинки роботи автоматичної формувальної лінії.

Трудомісткість процесів, що здійснюються в кожному з цих відділень, розподіляється в таких співвідношеннях: на сумішеприготувальне, стержневе

й формувальне – припадає приблизно 50...60 % усієї трудомісткості виготовлення виливків; на плавильне – 10 %; на вибивне – 30...40 % [31,32].

Таким чином, основними особливостями організації виробництва в ливарному цеху є: складність організації виробничого процесу; часто велика номенклатура виливків; однонаправленість і безперервність виробничого процесу виготовлення виливків; істотні відмінності в технології виконання різних ливарних операцій; незмінність кількості й послідовність виконання стадій для усіх виливків незалежно від їх форми і маси; значні коливання металомісткості форм і трудомісткості формувальних і стержневих робіт, обумовлені структурними рушеннями в номенклатурі виливків; неможливість створення компенсуючих заділів (рідкого металу, форм); визначальний вплив стадії виготовлення форм, на основі якої планують роботу усього ливарного цеху; різноманітність і велика кількість споживаних матеріалів, а також великий їх вантажообіг; «закритий» характер ряду ливарних процесів і різноманіття причин одного і того ж виду браку та ін.

Складність організації виробничого процесу в ливарному цеху визначається великою кількістю взаємопов'язаних і розділених у виробництві і в часі технологічних стадій виготовлення фасонних виливків. Одні зі стадій виконуються тільки послідовно, інші – паралельно, що зумовлює необхідність взаємнзв'язку роботи виробничих відділень ливарного цеху. При цьому необхідно забезпечити узгодження виконання окремих операцій в часі при різноманітті використовуваних матеріалів і устаткування. Це, у свою чергу, потребує «жорсткої» синхронізації роботи основних відділень ливарного цеху при забезпеченні рівномірного їх завантаження.

Організація узгодженої і надійної роботи підрозділів ливарного цеху є одним із завдань у галузі ливарного виробництва, для якої відсутні ефективні рішення, що негативно позначається на продуктивній роботі цеху і якості виливків, що випускаються.

Таким чином, ливарний цех як об'єкт дослідження має такі особливості.

1. Ливарний цех є складною технічною системою, ефективне функціонування якої визначається ступенем синхронізації роботи її виробничих і технологічних підсистем, а також їх надійністю.

2. У міру розвитку автоматизації і роботизації ливарного цеху роль його підсистем у виробничому процесі безперервно зростає, а їх структура ускладнюється. Кожна з підсистем сучасного ливарного цеху – це складні технічні комплекси, що складаються з великої кількості агрегатів технологічного і транспортного характеру. В той же час ливарний цех має велику кількість змінних структурного і параметричного характеру, впливаючи на які, можна в широких межах управляти ефективністю його роботи.

3. Створення складних автоматизованих комплексів у ливарному виробництві, що реалізовують сучасні технології, становило впродовж багатьох років головну тенденцію прогресу у виробництві виливків.

4. Характерними особливостями ливарного цеху є велика складність, різнорідність і багатовимірність, а також високий ступінь взаємозв'язаної і

параметричної взаємодії функціональних підсистем, вузлів і агрегатів технологічного устаткування.

5. Взаємозв'язок між кількістю і якістю виливків, суміші, металу є основою для інженерного керування цими параметрами і вона має чітко виражений імовірнісний характер, що раніше не враховувалося у рамках існуючих методик проектування ливарних цехів і їх підрозділів. До випадкових необхідно віднести, в першу чергу, чинники, пов'язані з відмовами устаткування, коливаннями властивостей початкових матеріалів і похибками їх дозування.

6. З огляду на те, що сучасний ливарний цех має великий ступінь механізації і автоматизації, однією з важливих є проблема підвищення надійності його роботи. Підвищення надійності підсистем ливарного цеху дозволить знизити простої устаткування і брак виливків.

4.2. Сучасні методи дослідження і проектування складних технічних систем

4.2.1. Системний підхід у дослідженні й проектуванні ливарних цехів і їх підрозділів

Сьогодні проблема комплексного вдосконалення ливарного виробництва вирішується на основі широкого впровадження високопродуктивного автоматизованого устаткування. Зі змістовної точки зору, в ливарному виробництві є всього два кардинальні завдання: по-перше, управління виробничою діяльністю ливарного підприємства з метою максимального використання його виробничого потенціалу і, по-друге, управління якістю виливків з метою підвищення його конкурентоспроможності.

У зв'язку з цим науково-технічні завдання в галузі ливарного виробництва безперервно ускладнюються, що обмежує можливості емпіричних методів їх розв’язання і робить кількісний підхід головним науковим інструментом. Важливим моментом цього підходу є машинний пошук оптимального варіанта з використанням математичних моделей статистичного, економіко-математичного і фізико-математичного характеру.

Обмеження в застосуванні наукового кількісного підходу при розв’язанні практичних завдань пов'язані, в першу чергу, з невисокою адекватністю і малою розмірністю використовуваних математичних моделей, а також зі значними труднощами математичного характеру, що виникають при пошуку оптимального розв’язку складних завдань. Так, наприклад, максимальна кількість змінних технологічного характеру, що використовують у статистичних моделях і отримують на основі обробки даних планованого експерименту й у моделях математичної фізики, дорівнює 10...15, а кількість параметрів, що характеризують геометричну форму і властивості виливків середньої складності, становить 100...200. На якість відливань впливає до 2000 змінних чинників [33].

Крім того, кількість деталей, що входять до автоматичної ливарної лінії, досягає близько 10^5, а розмірність практично розв'язуваних економіко-математичних завдань має порядок 10^2. Значне підвищення ефективності використання наукового кількісного підходу для розв'язання практичних завдань може бути отримане на основі концептуального і інструментального апаратів нової галузі фундаментальних наук, пов'язаних із розвитком теорії складних систем, кібернетики і дослідженням операцій.

Стрімкий і унікальний, такий, що не має прецедентів в історії науки і техніки, прогрес у сфері розвитку електронних обчислювальних машин привів до того, що в 60-ті роки минулого століття з'явилася реальна можливість їх використання для розв'язання інженерних завдань конструкторського і технологічного характеру. Уперше шляхи кібернетики і ливарного виробництва перетнулися в 1961 р., коли відомі американські фірми Chrysler і Caterpiller Tractor використали ЕОМ для керування електричним режимом плавлення сірого чавуну в індукційних печах і оптимізації його хімічного складу.

З того часу використання ЕОМ і кібернетичних методів безперервно розширювалося як за видами розв'язуваних завдань, так і за кількістю числу організацій, що їх використовують, ливарних цехів і підприємств. Цьому сприяло стрибкоподібне підвищення технічних характеристик при зміні поколінь ЕОМ, підвищення їх надійності і зниження вартості. Кібернетичні методи відкрили нові можливості щодо підвищення якості і конкурентноспроможності литва, і вже в 1970 р. був зроблений висновок про те, що застосування автоматизованих систем керування є необхідною умовою подальшого прогресу ливарного виробництва.

Центральною концепцією усієї системології є поняття системи як єдиного цілого, що складається з частин (підсистем і елементів), а основним завданням – вивчення кількісних закономірностей функціонування системи, що вивчається. Сьогодні єдиного загальноприйнятого визначення складної системи немає. Існують різні трактування такого визначення, запропоновані С. Біром, Р. Джонсоном, Ф. Кастом, Д. Розенцвейгом, І. П. Алдохіним, М. Месаровичем. Наприклад, А. І. Уйомов [34] наводить 35 різних визначень системи. На цей час вважають найбільш вдалою концепцію складної системи Н. П. Бусленко [35], згідно якої система вважається складною у разі, коли в ній є велика кількість взаємопов'язаних і взаємодіючих між собою елементів і підсистем, що забезпечують виконання деякої досить складної функції. Як елементи складної системи рекомендується розглядати об'єкти, що виконують певні функції і не підлягають подальшому діленню на частини при прийнятому розгляді системи.

Математичний апарат теорії систем розроблений в останні 50...60 років. Системний підхід відіграє вирішальну роль у кібернетиці, теорії дослідження операцій, у системотехніці, у сфері проектування і побудови автоматизованих систем керування, в хімічній кінетиці, молекулярній біології, екології, економіці, в управлінні виробництвом і інших науках. Поява системно-

го аналізу і ЕОМ відкривають нові можливості для підвищення ефективності розв’язання завдань великої розмірності зі складними структурними взаємозв'язками.

Як математичний апарат у системному аналізі використовуються методи теорії графів, теорії великих кількостей, імітаційного моделювання, а також прикладні математичні методи лінійної і дискретної математики.

Найбільш характерними особливостями системного підходу є такі [35]:

- як критерій ефективності при розв’язання завдань аналізу і синтезу систем необхідно використати критерій ефективності системи більш високого рангу що до тієї, яка розглядається (принцип підсистеми);
- вивчення властивостей системи як єдиного цілого здійснюється на основі дослідження кількісних взаємодій між її елементами (принцип декомпозиції);
- система, що вивчається, розглядається як елемент, що взаємодіє із зовнішнім середовищем, характеристики якого є прогнозованими функціями часу і впливають на функціонування і показники ефективності цієїї системи (принцип занурення в зовнішнє середовище);
- при вивченні системи необхідно розглядати її повний життєвий цикл, що включає стадії проектування, виготовлення, експлуатацій, відновлення її працездатності і ліквідації (принцип повного життєвого циклу);
- кількісне вивчення закономірностей функціонування складних систем можливе тільки на основі широкого використання прикладних математичних методів, орієнтованих на сучасну обчислювальну техніку (принцип математичного моделювання).

За роки використання кібернетичних методів чітко намітилися такі напрями їх використання для розв’язання завдань у галузі ливарного виробництва.

1. Розв’язання завдань обліково-статистичного характеру, пов'язаних із фіксацією, зберіганням і обробкою великих обсягів поточної виробничої керуючої інформації. Завдання цього типу досить ефективно розв’язуються у рамках автоматизованих систем керуваня виробництвом.

2. Керування і оптимізація окремих технологічних процесів і технологічних комплексів, таких, як плавильні печі і дільниці, агрегати і комплекси для приготування сумішей, автоматичні лінії формування, машини і робототехнічні комплекси для литва під тиском та ін. Комп'ютерні системи для розв’язання цих завдань дістали назву автоматизованих систем керування технологічними процессами , вони широко використовуються в ливарних цехах масового і багатосерійного виробництва розвинених країн.

3. Автоматизоване проектування технологічних процесів ливарного виробництва і конструювання виливків. Для розв’язання завдань цього типу створено декілька різновидів систем автоматизованого проектування (САПР) і близько 30 потужних пакетів застосовних програм комерційного характеру, що реалізовують технологічні розрахунки, які виконуються при проектуванні

технології литва: розрахування системи ливника, додатків, шихти, газового режиму ливарної форми, процесів кристалізації, твердіння і усадки металу виливків, прогнозування появи ливарних дефектів та ін.

Застосування кібернетичних методів і засобів дозволило усю різноманітність моделюючих методик звести до однієї із загальних математичних схем: обчислення за формулами; розв’язання рівнянь алгебри і диференціальних різного порядку; розв’язання лінійних і нелінійних систем рівнянь; оптимізаційні завдання різного виду.

Усі чотири математичні схеми відомі і використовувалися задовго до появи кібернетики, проте тільки з її появою вони стали робочим інструментом інженера і технолога. Це пов'язано зі створенням пакетів застосовних програм, використання яких дозволило різко розширити математичні можливості використовуваних методик і сферу їх практичного застосування.

Перші роботи у галузі кібернетики і системного аналізу ливарних процесів радянських учених було опубліковано в 70-х роках минулого століття і були пов'язані як із розробкою наукових основ цього напряму, так і з розв’язанням на цій основі прикладних завдань ливарного виробництва. У роботі Г. Ф. Баландіна, В. М. Голода викладено концепцію і математичний апарат для розв’язання фундаментального науково-технічного завдання ливарного виробництва – керування формуванням структури виливків і отримання їх із заданими службовими і технологічними властивостями. Для цього процес формування властивостей відливання розглядається як єдине ціле, тобто як система, розв’язок якої наводиться у вигляді математичних моделей процесів, що відбуваються.

В. М. Шестопалом, В. Я. Клебанером, Р. П. Рише та ін. був проведений аналіз способів здійснення виробничого процесу, аналіз інформаційних і транспортних потоків ливарного цеху, досліджено принципи побудови механізованих і автоматичних систем. За допомогою математичних методів розв’язано окремі типові організаційно-економічні і планові завдання в ливарному виробництві. У роботах О. А. Бєлікова, В. І. Вербицького, Є. Л. Двойреса [36] системний підхід використано для розробки методики проектування автоматичних ливарних ліній і їх агрегатів.

Дослідження систем ливарного цеху за основними етапами технологічного процесу наведено в роботах А. А. Бречко, Л. Г. Атливаніка, Ю. Г. Полякова та ін. [37]. Системний підхід для проектування об'єктів ливарного виробництва використаний у роботах А. Л. Становського, Л. А. Іванової [38].

Сьогодні виникла необхідність у розробці моделей ливарних технологічних систем для розв’язання завдання їх раціональної побудови й аналізу функціонування. Це пов'язано, в першу чергу, з дедалі зростаючими вимогами до якості виливків, що призводить до ускладнення окремих елементів технологічного процесу і структури цеху.

Аналіз систем включає такі етапи: постановку завдання; вибір альтернативних шляхів розв’язання задачі; дослідження ресурсів, що витрачаються

на рішення задачі; складання моделі; вибір критеріїв оцінки; порівняння альтернатив і ухвалення рішення.

Постановка завдання включає формулювання сутності проблеми, межі дослідження, початкові дані і виявлення цілей. Вибір альтернативних шляхів розв'язання завдань полягає в перерахуванні тих коштів, які з попередніх міркувань можуть бути використані для розв'язання поставленого завдання. Дослідження ресурсів – етап економічних досліджень, на якому визначаються матеріальні ресурси, а також їх вартісні вирази, необхідні для розв'язання завдання.

Складання моделі – етап дослідження, на якому розробляється деякий аналог реальної системи шляхом урахування найбільш суттєвих чинників математичними залежностями (аналітичні моделі), за допомогою ЕОМ (машинні моделі) або за допомогою спеціальної «гри» (ігрові моделі). Вибір критеріїв оцінки полягає у зазначенні такої величини (системи величин), за числовим значенням якої можна зробити висновки про успішність розв'язання задачі.

Порівняння альтернатив і ухвалення рішення – останній етап аналізу, на якому порівнюються засоби розв'язання поставленої задачі за вибраним критерієм. Окрім кількісної оцінки різних альтернатив, можуть бути наведені і логічні судження, що вказують перевагу тієї або іншої альтернативи порівняно з іншими.

Апарат системного аналізу може служити ефективним засобом розв'язання одного з найважливіших наукових і практичних завдань ливарного виробництва – максимального використання виробничого потенціалу ливарного цеху. Для її розв'язання необхідно розробити метод системної оптимізації. Основні положення зводяться до такого. Ливарний цех розглядається як системотворний елемент, кількісна і якісна сторони якого визначаються взаємодією його функціональних і структурних підрозділів. Це дозволить на основі вивчення особливостей функціонування, отримання характеристик окремих елементів і аналізу взаємодії між елементами отримувати характеристики системи в цілому.

4.2.2. Структурний метод дослідження систем

Характерними особливостями ливарного цеху і його підсистем є їх велика складність, різнорідність і багатовимірність, а також високий ступінь взаємозв'язаної і параметричної взаємодії функціональних підсистем, вузлів і агрегатів технологічного устаткування. Це створює значні труднощі при побудові адекватних математичних моделей, що описують процес їх функціонування.

Одним із ефективних методів дослідження складних систем є структурний аналіз. Головним для структурного методу дослідження складних систем є вибір оптимального варіанту структури системи і визначення її властивостей. Ефективність функціонування систем і їх експлуатаційна надійність значною мірою визначається їх структурою. При дослідженні

структур технічних систем широко використовують теорію графів [39]. Граф є топологічною моделлю якого-небудь процесу. Термін «структурна схема» потрібно розуміти як умовне графічне зображення елементів системи і зв'язку між ними. Графічні моделі є наочними, що полегшує розуміння і аналіз складних систем. За допомогою графічної моделі легко спростити хід міркувань, переконати опонента уявити всі явища в цілому. Тому графічні моделі інтенсивно розробляються і поступово стають неодмінними складовими інженерного опису виробничого процесу. Не буде перебільшенням сказати, що графічна мова – найбільш зрозуміла і найпоширеніша з інженерних мов.

Модель системи у вигляді графа дозволяє використати відомі закономірності і встановити нові, що випливають із якісного аналізу системи. Якщо взяти за основу алгоритм технологічного процесу, тобто послідовність виконання операцій, і взяти до уваги кількісну характеристику зміни сукупних властивостей об'єкта, що переробляється, то можна побудувати схему реалізації процесу, що описується математично.

Завдання опису схеми процесу полягає в тому, щоб перекласти впорядковану сукупність операцій математичною мовою, яку потім можна було б використати для складання і перетворення рівнянь.

Структурний аналіз широко використовується у ряді галузей знань: у зв'язку, в теорії автоматичного регулювання, в теорії надійності, в економіці, при соціологічних дослідженнях і багатьох інших. Структурний аналіз успішно використовується в ливарному виробництві для аналізу компонувань і роботи автоматичних ливарних ліній [40], при їх проектуванні [36], при моделюванні гнучких виробничих комплексів.

У роботах А. А. Бречка, Л. А. Атливаніка, Ю. Г. Полякова [37] структурний аналіз використовується для моделювання ливарних систем. Автори запропонували розділити системи ливарного цеху на дві частини: організовану вище, але менш стійку (технологію) і організовану нижче, але стійкішу скелетну частину (устаткування) – і розглядали їх окремо один від одного. Технологічна частина системи описувалася операційно-технологічним графом, вершинами якого були технологічні, а дугами – транспортні операції. Кількісна оцінка здійснювалася матрицею потреби, рядки якої відповідали споживаним матеріалам, а стовпці – операціям. Якісний аналіз матриці дозволяв визначити обсяг необхідних матеріалів, а також установлювати універсальне і спеціалізоване устаткування за кожним матеріалом і операцією. Побудова моделі другої частини системи здійснювалася за допомогою відомості устаткування, яка випливала з матриці потреби. За відомістю розроблявся агрегатно-технологічний граф, вершини якого відповідали технологічному, а дуги – транспортному устаткуванню. Аналіз графа здійснювався за допомогою матриці відповідності, в якій на перетині рядків і стовпців стоїть коефіцієнт, що є відношенням потреби щодо матеріалу до потужності встановленого устаткування. Значення коефіцієнта, більшого або такого, що дорівнює одиниці, вказує на наявність критичного елемента. За допомогою операційно-технологічного й агрегатно-технологічного графів було побудо-

вано моделі основних підрозділів ливарного цеху і досліджено їх пропускну здатність і можливості технологічного устаткування.

Проте такий підхід спрощує вивчення ливарних систем і, зокрема, не дозволяє встановити кількісні залежності між кількістю та якістю виливків, сумішей, сплавів і структурою й експлуатаційною надійністю устаткування підсистем ливарного цеху.

Становить великий науковий і практичний інтерес розв’язання задачі визначення залежностей кількості та якості формувальних сумішей від структури сумішеприготувальної системи, кількості та якості металу, що виплавляється, від розташування плавильного відділення, кількості, місткості плавильних агрегатів і, кінець кінцем, залежності кількості та якості виливків від структури ливарного цеху. Отже, в основі автоматизованих систем керування технологічними процесами або виробництвом є локальні математичні моделі, що описують залежності властивостей формувальної суміші від кількості і якості початкових формувальних матеріалів і відпрацьованої суміші, якості виплавленого сплаву від кількості та якості шихтових матеріалів, а також технологічних параметрів їх приготування. Недоліком цих моделей є відсутність урахування в них чинника надійності устаткування і системних характеристик підсистем ливарного цеху, що призводить до низької економічної ефективності створюваних систем. Тому викликає інтерес розробка адекватних математичних моделей властивостей виливків, формувальної суміші, сплавів з урахуванням параметрів експлуатаційної надійності устаткування і системних характеристик підсистем.

Основним і загальним в усіх роботах, пов'язаних із структурними дослідженнями, є прагнення очистити об'єкт дослідження від усього вторинного, розглянути лише його найхарактерніші ознаки. Приділяючи основну увагу виявленню взаємних зв'язків між елементами системи і тим самим висуваючи на перше місце структуру системи, а не склад її окремих компонент, отримуємо можливість однаково досліджувати різні за своєю природою системи. Ця обставина дозволяє перенести методи структурного аналізу на дослідження систем ливарного виробництва для вивчення і підвищення ефективності їх роботи.

4.2.3. Аналітичні методи дослідження складних систем

Одним із важливих завдань теорії складних систем є пошук математичних схем, що досить адекватно відбивають специфіку роботи елементів складних систем. У той же час ці математичні схеми мають досліджуватися аналітичними або машинними методами.

Сьогодні якнайповніше і всебічне дослідження математичних моделей може бути проведене аналітичними методами.

Саме дослідження об'єктів і явищ математичними методами включає:

- створення математичного опису (моделі) об'єкта, що вивчається;
- ототожнення цієї моделі з однією з відомих математичних схем;

- використання існуючих математичних методів для дослідження загальних властивостей моделі;
- дослідження моделі при деяких конкретних значеннях, що визначають її параметри.

Різнорідність призначення складних систем, наявність великої кількості діючих чинників, функціонування в умовах випадкових взаємодій викликає необхідність використання різноманітного математичного апарату для створення моделей, що описують їх поведінку. Моделі мають адекватно відбивати закономірності поведінки реальних систем для того, щоб служити інструментом оптимального керування системою.

Для розробки загальної математичної моделі ливарного цеху і його підсистем необхідно розробити моделі окремих складових (елементів) системи. Зважаючи на різнорідність підсистем ливарного цеху, їх математичний опис повинен здійснюватися за допомогою математичного об'єкта високої міри спільності.

Для розв’язання практичних завдань, пов'язаних із керуванням роботою ливарного цеху і його підсистем, необхідно оцінити переваги і недоліки різних підходів до створення аналітичних моделей складних систем. Аналітичні моделі систем класифікуються або за змістовною ознакою, або за використовуваним для їх створення математичномим апаратом.

За змістовною ознакою виділяють такі класи аналітичних моделей:

- системи автоматичного керування, слідкувальні системи;
- скінчені автомати, релейно-контактні схеми;
- імовірнісні автомати;
- системи масового обслуговування;
- системи передачі й обробки інформації;
- резервовані системи;
- системи керування запасами;
- виробничі системи (безперервні і дискретні);
- транспортні системи.

Необхідно констатувати, що ці класи визначені дуже нечітко, наприклад, не існує формальних понять «Система автоматичного керування» або «система масового обслуговування». У кращому разі можна вказати ряд ознак, що визначають систему кожного класу, оскільки для дослідження різних систем часто використовують одні і ті ж самі математичні методи.

Тому В. В. Калашніков [41] пропонує замість класифікації складних систем за змістовною ознакою застосовувати класифікацію використовуваних для опису математичних методів. Серед використовуваних математичних моделей особливе місце займають такі:

- диференціальні і різницеві рівняння;
- загальні динамічні системи;
- марківські процеси;
- регенеруючі процеси;

- кусково-лінійні (лінійчасті) процеси.

Ці моделі можна назвати типовими математичними схемами, оскільки вони широко використовуються при дослідженні складних систем.

Диференціальні рівняння – сьогодні найбільш використовувана математична схема. Диференціальні рівняння використовуються для опису систем, що функціонують у часі в умовах, коли впливом різного ряду випадковостей можна нехтувати. Більше того, за допомогою диференціальних рівнянь можна описати і ряд стохастичних систем. Наприклад, перехідна вірогідність марківського ланцюга з безперервним часом описується диференціальними рівняннями Колмогорова.

За допомогою диференціальних рівнянь можна описати системи автоматичного керування, фізичні, гідравлічні, механічні. Аналіз використовуваних математичних моделей і методів у ливарному виробництві наведений у роботі И. О. Лєушина [42], у них найчастіше використовуваною математичною схемою є диференціальні і різницеві рівняння.

До динамічних систем відносять такі математичні об'єкти: скінченні автомати, імовірнісні автомати і системи масового обслуговування. Кожен з перерахованих класів моделей має специфічні властивості. Скінченні автомати використовуються для подання будь-яких детермінованих систем, що функціонують у дискретному часі. Імовірнісні автомати – засіб подання стохастичних систем із дискретним часом, а системи масового обслуговування – стохастичних систем з безперервним часом. Апарат теорії скінченних автоматів використовується як інструмент аналізу і синтезу цифрових обчислювальних машин і різноманітних автоматичних пристроїв. Кількісні методи та якісна теорія скінченних автоматів дають можливість вибору шляхів і підходів до дослідження динамічних систем найзагальнішого вигляду.

Імовірнісний автомат є абстрактним перетворювачем інформації, все або частина характеристик якого мають імовірнісний характер. Існує загальна концепція імовірнісного автомата і безліч її трактувань залежно від конкретних завдань, що стоять перед дослідником [43]. У деяких із них випадковий фактор має місце тільки у формуванні стану автомата, в інших – у формуванні вихідних сигналів, у третіх – в обох механізмах одночасно.

Поняття імовірнісного автомата застосовують для опису систем у техніці, біології, економіці. Практична доцільність теорії імовірнісних автоматів підтверджена розв’язком практичних завдань при конструюванні ЕОМ, у системі автоматизації виробничих процесів, при організації систем керування, у біологічному моделюванні.

Існує ще три класи випадкових процесів: марківські, регенеруючі і кусково-лінійні. Ці класи є такими, що перетинаються, а лінійні – підкласом марківських. Випадковий марківський процес має таку властивість: для кожного моменту часу вірогідність будь-якого стану системи в майбутньому залежить тільки від її стану сьогодені і не залежить від того, коли і як система набула цього стану. Регенеруючі процеси – це процеси, в яких як точки регенерації вибираються послідовні моменти повернення системи в деякий фік-

сований стан. Проте цей стан повинен мати таку властивість, що час повернення в нього визначений і кінцевий. Іншими словами, у момент регенерації процес забуває минуле і починається наново, причому відлічуваний від моменту tn процес має такий же розподіл, що і з моменту $t_0 = 0$.

Кусково-лінійчастий агрегат [35] є окремим випадком стохастичної системи з дискретним втручанням випадку.

На відміну від імовірнісних автоматів(рух яких складається тільки зі стрибків при надходженні вхідних сигналів) і систем, що описуються диференціальними рівняннями (стрибки взагалі відсутні), в цій системі рух може містити будь-які фрагменти – переміщення і стрибки, і тому вона потребує для свого опису повного набору характеристик :

- рівнянь межі простору станів;
- рівнянь руху точки *zt* у просторі станів;
- співвідношень для розрахування розподілу вірогідності нового стану в результаті стрибка при виході на межу;
- співвідношень для розрахування розподілу вірогідності нового стрибка при надходженні вхідного сигналу;
- співвідношень для розрахування координат вихідних сигналів.

Таким чином, кусково-лінійчастий агрегат можна інтерпретувати як деякий «симбіоз» з імовірнісного автомата, що характеризує випадковий процес переходу з однієї підмножини станів в іншу, і сукупності систем, визначених диференціальними рівняннями.

Розглянуті вище схеми широко застосовуються для формального опису елементів при моделюванні і дослідженні складних систем. Елементи складних систем можуть описуватися різноманітними математичними схемами, проте єдиний математичний опис отримують тільки ті системи, елементи яких у результаті формалізації описуються однаково.

Як об'єкти для опису елементів підсистем ливарного цеху найдоцільніше використати імовірнісні автомати, системи масового обслуговування (клас загальних динамічних систем) і кусково-лінійчасті агрегати, оскільки усі вони служать для опису стохастичних систем.

4.2.4. Імітаційне моделювання складних систем

Практика використання аналітичного підходу для дослідження реальних систем виявила обмеженість його можливостей. Аналіз процесів функціонування систем із великою кількістю змінних за допомогою аналітичних методів дослідження пов'язаний зазвичай зі значними труднощами, що призводять до необхідності істотного спрощення моделей і отримання недостовірних результатів. Тому сьогодні багато уваги приділено завданням дослідження великих систем на основі імітаційних моделей, що програмно реалізовуються на сучасних ЕОМ.

Згідно Р. Шенону, імітаційне моделювання є «процесом конструювання моделі реальної системи і постановки експериментів на ній з метою або зро-

зуміти поведінку системи, або оцінити (у рамках обмежень, що накладаються деяким критерієм або сукупністю критеріїв) різні стратегії, що забезпечують функціонування цієї системи» [44].

Імітаційне моделювання є експериментальною і прикладною методологією, що має на меті:

- описати поведінку системи;
- побудувати теорії і гіпотези, які можуть пояснити поведінку, що спострігається;
- використати ці теорії для передбачення майбутньої поведінки системи, тобто тих дій, які можуть бути викликані змінами в системі або змінами способів її функціонування.

Таким чином, метод імітаційного моделювання полягає в тому, що за допомогою ЕОМ відтворюється (імітується) поведінка досліджуваної системи, а дослідник, керуючи процесом імітації і оглядаючи отримані результати, робить висновки про властивості та якість системи. Результати випробувань моделі, що є аналогом реальної системи, дозволяють отримувати кількісні характеристики поведінки системи за заданих умов. Результати, що отримуються з імітаційної моделі і відбивають найбільш суттєві її риси, можуть виявитися не лише корисними для практики, але і стати певною основою для подальшої розробки теорії. Поява машинної імітації і перетворення її в ефективний засіб аналізу систем була, з одного боку, обумовлена потребами практики, а з іншого – забезпечена розвитком методу статистичних випробувань (метод Монте-Карло), моделювання випадкових чинників, якими насичені реальні системи, що відкрило можливість, і розвитком електронно-обчислювальної техніки, що є базою для проведення таких експериментів.

У багатьох завданнях замість аналітичного дослідження системи, що може виявитися неможливим через відсутність необхідної теорії, доцільно вивчати поведінку системи в цілому, відтворюючи поведінку її окремих частин і взаємодію між ними. Для цього застосовується імітаційне моделювання. Модель системи являє собою в цьому випадку деяку комплексну програму для ЕОМ, що описує поведінку компонентів системи і взаємодію між ними. Виконання такої програми при різних початкових даних дозволяє імітувати динамічні процеси, що відбуваються в реальній системі. Таким чином, імітаційне моделювання не потребує аналітичного рішення проблеми.

В деякому відношенні машинна імітація нагадує фізичний експеримент. Проте вона має і ряд переваг:

- в імітаційній моделі допускаються будь-які зміни;
- кожен фактор (незалежно від його реальної природи) може варіюватися за розсудом дослідника;
- помилки, допущені в моделі або початкових даних, не мають тих катастрофічних наслідків, які можуть виникнути під час фізичного досліду.

Системи, що досліджуються методом імітації, зазвичай належать до розряду складних систем, в яких неможливо заздалегідь передбачити наслідки

тих або інших рішень, що приймаються людьми в процесі керування системою. У таких системах внутрішні чинники і дії зовнішнього середовища мають, як правило, мінливий, випадковий характер.

Імітаційне моделювання є трудомістким і тривалим процесом. Робота розпочинається з вивчення структури системи і формування проблеми. Паралельно призначається мета майбутніх експериментів і вказуються змінні, початкові значення яких є початковими даними, що отримуються ззовні від дослідника, і змінні, що мають наприкінці моделювання значення результатів, потрібних дослідникові. Потім відомості, зібрані про систему, перекладаються мовою математики.

Математичний апарат, використовуваний при побудові моделей, може бути найрізноманітнішим. Для опису дій об'єктів застосовуються арифметичні і булеві вирази, лінійні і диференціальні рівняння, лінійне і динамічне програмування і так далі. Імітаційне дослідження зазвичай має статистичний характер. Тому в математичну основу імітації входять методи теорії ймовірності і математичної статистики. Випадкові фактори, що відображаються в моделі, реалізуються за допомогою вибірки значень випадкових величин з використовуваних відповідних функцій розподілу. Обробка і оцінка даних експерименту здійснюється методами математичної статистики.

Виключно важливого значення в побудові моделі набуває процес опису системи, який має враховувати можливості обчислювальної машини і структуру моделі. Одночасно з розробкою моделі йде збір початкових даних і перетворення їх в потрібну для моделі форму.

Коли модель побудована і початкові дані підготовлені, здійснюють випробування моделі на ЕОМ відповідно до заздалегідь складеного плану. Тут остаточно з'ясовується, чи здатна ця модель досліджувати, тобто чи містить вона в собі істотні риси дослідної системи.

Експеримент закінчується лише тоді, коли мета дослідження, сформульована на початку роботи, досягнута. Імітація завершується ретельним аналізом, перевіркою отриманих результатів і видачею рекомендацій для практичного впровадження. Таким чином, імітаційне моделювання є багатоетапним дослідженням, що потребує від експериментатора спеціальних знань у галузі, до якої належить проблема, що вивчається, різноманітних математичних методів і досвіду застосування ЕОМ.

Для реалізації на ЕОМ складної моделі потрібний апарат моделювання. Сьогодні бажаного ефекту можна досягти, використовуючи спеціалізовані мови моделювання GPSS, CSMP, SMPL, GASP, SIMULA, ACUM, ДИНАМО, АЛСИМ. Проте їх використання дозволяє здолати лише частину, що виникають труднощі. Мови моделювання (як і взагалі мови програмування) є і залишатимуться дуже ефективним інструментом фахівців, які розробляють програмне забезпечення ЕОМ. Для користувача потрібні простіші засоби підготовки завдань і спілкування з ЕОМ. Такими засобами можуть бути різні інструментальні середовища і більшість існуючих універсальних мов, таких

як Сі, Паскаль, Асемблер та ін., хоча потрібно визнати, що для таких завдань вони недостатньо розвинені.

У нашій країні і за кордоном виконано велику кількість робіт із застосування методів імітаційного моделювання до розв’язання конкретних планових завдань, конструюванню спеціальних мов для машинної імітації та ін. [35,45]. Імітаційне моделювання є потужним інструментом аналізу і проектування складних систем. За його допомогою вирішуються питання народногосподарського планування, транспорту, керування складськими запасами і завдання обслуговування. Імітаційне моделювання використовується у військовій промисловості при оцінюванні різних видів озброєння, в сільському господарстві і в економіці. Найбільша кількість завдань пов'язана з вдосконаленням оперативного планування і аналізом виробництва.

Останнім часом імітаційне моделювання стало використовуватися для дослідження ливарних систем. Імітаційне моделювання використовується для розв’язання технологічних завдань [42, 46]. Розроблено імітаційну модель на ЕОМ автоматизованої конвеєрної ливарної лінії. Розроблено імітаційну модель функціонування ливарних цехів заводу кольорової металургії і чавуноливарного цеху. За допомогою імітаційного моделювання розробляються рекомендації з поліпшення властивостей виливків [46] і аналізується ефективність струшувальних формувальних машин, моделюється робота гнучких автоматичних ливарних ліній [36].

Таким чином, імітаційне моделювання значно розширює можливості дослідження складних систем і може бути використане для моделювання роботи виробничих підрозділів ливарного цеху, що дозволить знизити ступінь ризику при реалізації проектних рішень, реконструкції виробництва, освоєнні нових виробничих замовлень, вирішувати питання порівняльного аналізу їх структурно-компонувальних рішень, досліджувати вплив характеристик надійності основного технологічного устаткування на основні показники функціонування, робити перевірку працездатності створюваних виробничих систем.

4.3. Методи підвищення ефективності роботи ливарного цеху

Існуючий сьогодні спад промислового виробництва, у тому числі і ливарного, не означає зниження інтересу до аналізу його ефективної роботи. Тому питання синхронної і надійної роботи усіх відділень ливарного цеху, оптимальних економічних підходів при оцінці роботи устаткування, раціонального використання матеріалів і енергоресурсів залишаються актуальними.

Для вирішення проблеми підвищення ефективності складної системи необхідно визначити критерій, що характеризує якість її функціонування. Завдання вибору критерію полягає у визначенні показників, що кількісно оцінюються і досить повно характеризують витрати громадської праці.

Критерій ефективності повинен відбивати взаємозв'язок численних факторів, що впливають на якість роботи системи. Оскільки функціонування

складної системи проходить, як правило, в умовах значного впливу зовнішніх випадкових факторів, то оцінку її ефективності доцільно проводити на основі використання імовірнісних характеристик. Ефективність системи характеризується мірою її пристосованості до розв'язання завдань, що стоять перед нею, тому конкретний вид показника ефективності залежить передусім від призначення системи. Існують такі вимоги при виборі показника ефективності:показник ефективності повинен характеризувати систему як єдине ціле;

- показник ефективності повинен характеризувати систему як єдине ціле;
- показник ефективності і його залежність від встановлених фак-торов мають забезпечити можливість отримання якісної оцінки з необхідною достовірністю;
- показник ефективності повинен мати обмежений інтервал зміни.

Для складних систем трудність вибору конкретного показника зростає через численність елементів і зв'язків у системі. Для ливарного цеху в цілому як складної технічної і технологічної системи основними критеріями ефективності є якість і кількість виливків.

4.3.1. Вибір раціональної структури підсистем ливарного цеху

Ефективність функціонування складної системи здебільшого закладається при проектуванні або реконструкції, проте може бути підвищена і на стадії експлуатації. Вже на етапі проектування або реконструкції необхідно вирішувати питання щодо синхронізації роботи підсистем ливарного цеху і забезпечення автоматичних ливарних ліній рідким металом, формувальною сумішшю, стрижнями та ін.

Для цього необхідно вивчити якість структурної схеми системи, одним з основних показників якої є надійність. Якщо система не має необхідної надійності, то усі інші показники функціонування втрачають своє практичне значення, оскільки вони не можуть бути повністю використані в роботі. Основним моментом дослідження будь-якого виду систем є аналіз якості її функціонування, встановлення ступеня впливу зміни вихідних параметрів окремих об'єктів системи на загальний показник якості функціонування в цілому.

Так, у роботі [38] розроблено комп'ютерну систему, що дозволяє в діалоговому режимі відшуковувати найбільш прийнятні варіанти розміщення устаткування для спеціальних способів литва.

Структури ливарних цехів і їх підсистем можуть бути різними. Отже, структури сумішеприготувальних систем у цехах масового і багатосерійного виробництва бувають двох типів.

Структура *першого* типу – це автономні сумішеприготувальні системи для кожної автоматичної ливарної лінії (АЛЛ). Таке рішення забезпечує повне використання своєї оборотної суміші, як найбільш відповідної сировини для виробництва високоякісної формувальної суміші. На автоматичних ли-

варних лініях ставлять бункери-накопичувачі для готової суміші не більше ніж на 30 хв. витрати, а увесь запас оборотної суміші в підготовленому вигляді зосереджують у бункерах перед змішувачами.

Місткість цих бункерів зазвичай дорівнює об'єму усієї суміші, що знаходиться в системі. Потребу для такої системи розраховують виходячи з продуктивності лінії:

$$Q_{см} = Q_{ц} \cdot k_{г} \cdot V_{прив} \cdot \gamma_{уп} (1 + k_{п}), \qquad (4.1)$$

де $Q_{ц}$ – циклова продуктивність ливарної лінії, ф/год;

$k_{г}$ – коефіцієнт технічної готовності лінії;

$V_{прив}$ – приведений об'єм форми (об'єм форми за габаритними розмірами опок мінус об'єм виливків), м^3;

$\gamma_{уп}$ – питома вага ущільненої суміші, т/м^3;

$k_{п}$ – коефіцієнт втрат суміші ($k_{п}$ = 0,05...0,15 – залежно від способу формування).

СПС другого типу за структурою обслуговує усі потокові й автоматичні лінії цеху. В цьому випадку систему розраховують на середньорічну потребу у формувальній суміші для виконання програми цеху [47]. Загальна витрата формувальних сумішей у масовому і багатосерійному виробництві визначається розрахунком, виходячи з розмірів і кількості форм, що виготовляються, для усієї номенклатури виливків, за вирахуванням об'єму, зайнятого виливками з системою ливника і стрижнями. Розрахункову витрату сумішей визначають з урахуванням можливого браку форм і виливків, приймаючи величину браку в межах 4...6 % і можливих втрат формувальних матеріалів при транспортуванні і формуванні у розмірі 10...15 %. Проте розрахування за середньорічним споживанням суміші часто призводить до нестачі суміші.

І. Д. Чудновським [48] було розроблено методику розрахування продуктивності таких сумішеприготувальних систем, в якій, на думку автора, усунений цей недолік:

$$Q = LB(H_1 + H_2)n\frac{\delta_{уп}}{\delta_{раз}} \cdot 1{,}2 \cdot 1{,}1, \qquad (4.2)$$

де Q – продуктивність сумішеприготувальної системи, м^3/год;

L, B, H_1, H_2 – відповідно довжина і ширина опоки у світлі, висота нижньої і верхньої опоки, м;

n – кількість опок;

$\delta_{уп}$, $\delta_{раз}$ – густина суміші в ущільненому стані і в стані засипки, т/м^3;

1,2 – коефіцієнт запасу, що враховує зрізування суміші з контрладу півформ і просипу;

1,1 – коефіцієнт запасу, що враховує якість суміші.

Існуючі методи проектування СПС передбачають повне забезпечення формувальних ділянок сумішшю із запасом 15...35 %. Проте ж на практиці

бувають простої автоматичних ливарних ліній через відсутність формувальних сумішей, які для цехів масового і багатосерійного виробництва становлять більше 25 %. Причиною цього є недостатня експлуатаційна надійність СПС, яка до теперішнього часу практично не вивчена і не враховується на етапі проектування.

Аналогічний аналіз можна зробити і за іншими підрозділами ливарного цеху.

Одним із принципових методів підвищення надійності складних технічних систем є структурна оптимізація. Розробка такої методики становить особливий інтерес, оскільки до теперішнього часу цей підхід для підвищення надійності ливарних систем практично не використовувався. Його використання є особливо доцільним на стадіях проектування і реконструкції ливарних цехів, коли відсутня можливість розв'язання цього завдання на основі значного підвищення надійності окремих машин і агрегатів. Прагнення досягти високих показників надійності окремих одиниць устаткування неминуче пов'язане зі зростанням витрат на розробку і виготовлення, які збільшуються тим швидше, чим ближче показники надійності до одиниці. Ці витрати можуть виявитися такими високими, що використання такого устаткування стає нерентабельним.

При розв’язанні завдання структурної оптимізації можливі два підходи: по-перше, можна знаходити мінімальний рівень резервування, що забезпечує заздалегідь, заданий рівень надійності і, по-друге, визначити оптимальний рівень резервування, що відповідає мінімуму деякого числового критерію, який показує ефективність функціонування системи. Такий критерій має відбивати баланс витрат, пов'язаний, з одного боку, з необхідністю використання додаткового устаткування і виробничих площ і, з іншого – зі збільшенням випуску продукції від використання створеної системи за рахунок скорочення величини простоїв, підвищення її надійності і продуктивності.

При використанні першого підходу необхідно заздалегідь задати нижній допустимий рівень надійності системи, яка вивчається, що за відсутності досвіду використання імовірнісних уявлень для оцінки ефективності використання ливарного устаткування спричиняє значні труднощі.

Перший підхід потребує виконання умови

$$P_{\text{н}} \le P_{\text{с}}(\tau), \tag{4.3}$$

де $P_{\text{н}}$ – заданий нормативний рівень надійності;

$P_{\text{с}}(\tau)$ – рівень надійності створюваної системи.

При цьому підході неминучий суб'єктивізм при виборі нормативного рівня створюваної системи.

Конструктивнішим є використання другого підходу, пов'язаного з визначенням оптимального рівня резервування. Основна трудність реалізації цього підходу – розробка критерію оптимізації, досить просто і адекватно,

тому що відбиває основні статті витрат при вивченні різних варіантів системи.

Оптимальною вважається структура системи, яка забезпечує мінімум деякого числового критерію, що відбиває ефективність її функціонування. Критерій оптимізації може бути розроблений на основі аналізу взаємозв'язку його функціональних підсистем.

4.3.2. Аналіз існуючих методів проектування відділень ливарних цехів

При проектуванні і реконструкції забезпечуються і розраховуються виробничі потужності ливарного цеху, що забезпечує випуск якісної продукції, необхідну продуктивність устаткування, оптимальну собівартість виливків.

У машинобудуванні для визначення виробничої потужності ливарних цехів використовують міжгалузеву і різні галузеві інструкції.Сьогодні виробничу потужність ливарного цеху прийнято вважати розрахунковий максимально можливий річний випуск виливків за встановленою планом номенклатурою з урахуванням повного використання продуктивності провідних груп устаткування.

При розрахуванні виробничої потужності цехів багатосерійного і масового виробництва зі стійкою і обмеженою номенклатурою литва використовують метод точного розрахунку. Розрахування виробничої потужності роблять за провідними групами устаткування, як правило, тільки за формувальним або одночасно за формувальним, плавильним і сумішеприготувальним. Спочатку визначається продуктивність формувального устаткування, а потім аналогічно – потужність інших ділянок з уведенням деякого запасу, що забезпечує безперебійну роботу формувальної ділянки.

Проте більша частка простоїі автоматичних формувальних ліній, 30–60 % від загальної їх кількості, відбуваються через відсутність металу і формувальної суміші. Одна з головних причин цього – недосконаліть використовуваних при проектуванні методик.

Усі використовувані методики оцінки виробничих потужностей, що грунтуються на різних методах, вживаних при проектуванні чи то з використанням норм технологічного проектування, чи то на основі приведених тонн, що враховують основні конструктивно-технологічні параметри виливків, що виготовляються, чи то на основі методик, що дозволяють пов'язати планові завдання з випуску з пропускною здатністб ділянок, виходячи з конкретної номенклатури планованого періоду, не враховують той факт, що сучасний ливарний цех є складною динамічною системою, функціонування якої визна-

чається стохастичним характером взаємодії різного устаткування і його структурою.

Тому при розрахуванні виробничих потужностей ливарного цеху необхідно враховувати такий фактор, як надійність роботи систем ливарного цеху.

Так, наприклад, існує декілька методів розрахування кількості і місткості плавильних агрегатів ливарних цехів. Для розрахування кількості плавильних агрегатів усе литво проектованого цеху підрозділяється за класами шихти залежно від виду сплаву з зазначенням величини виходу придатного литва для кожного класу, вигару металу і втрат у відсотках від металевої завалки. Обсяг річної металевої завалки, необхідний для розрахунку потужності плавильних агрегатів, визначається на підставі відомості шихт і балансу металу. Розрахування плавильних агрегатів ведеться за рідким металом [47].

Кількість печей на річну програму розраховується за формулою:

$$n = \frac{Q \cdot k_{\text{н}}}{T_{\text{д}} q}, \tag{4.4}$$

де n – кількість печей, шт.;

Q – необхідна кількість рідкого металу, т;

$k_{\text{н}}$ – коефіцієнт нерівномірності споживання рідкого металу;

$T_{\text{д}}$ – дійсний річний фонд часу роботи печі, год;

q – продуктивність печі, тонни/ч.

Відповідно до "Всесоюзних норм технологічного проектування підприємств машинобудування і металообробки" при використанні в цехах автоматичних формувальних ліній у масовому і багатосерійному виробництві кількість і потужність плавильних агрегатів розраховується, виходячи з годинної потреби в рідкому металі $П$ (т/год), залежно від середньої металомісткості $М_{срі}$ форм, закріплених за i-ю АФЛ з цикловою продуктивністю $Ц_i$ (форм/ч) з урахуванням коефіцієнта нерівномірності споживання рідкого металу ($k_{\text{н}}$ = 1,1–1,2)

$$П = \sum_{i=1}^{n} Ц_i \cdot M_{\text{ср}i} \cdot k_{\text{н}}. \tag{4.5}$$

Дослідженнями авторів [49] встановлено, що розрахунки за приведеним виразом мають істотні недоліки. У формулі (4.5) занижений показник

$M_{\text{ср}i}$, оскільки металомісткість форм (окрім спеціалізованого виробництва) істотно відхиляється від середнього рівня, причому $k_{\text{н}}$ не може компенсувати значні коливання металомісткості форм. Крім того, практика показала, що автоматичні формувальні лінії не можуть працювати з постійною цикловою продуктивністю. Тому в роботі [49] було запропоновано робити розрахування за можливою годинною потребою в металі $П_{\text{м}}$(т/год) за формулою:

$$П_{\text{м}} = \sum_{i=1}^{n} Ц_i \cdot k_{\text{и}i} \cdot M_{\text{ср}i} \cdot k_{\text{м}}, \qquad (4.6)$$

де $k_{\text{м}}$ – коефіцієнт, що враховує нерівномірність металомісткості форм;

$k_{\text{и}i}$ – коефіцієнт використання i-лінії.

При цьому коефіцієнт, що враховує нерівномірність металомісткості форм у спеціалізованому виробництві, приймають рівним одиниці, а коефіцієнт використання лінії – залежно від кількості АФЛ – 0,93...1,0; при багатономенклатурному виробництві, залежно від розміру партій металомістких виливків і кількості АФЛ, $k_{\text{м}}$ збільшують до 1,3, а $k_{\text{и}}$ коливається в межах 0,8...1,0.

Таким чином, запропонована методика розрахування плавильного устаткування завищує потужність плавильних відділень цехів щодо середньої розрахункової на величину, залежну від номенклатури виливків, що виробляються. Пропонована методика розрахування потреби в плавильному устаткуванні дозволяє точніше визначати максимально можливу потребу в рідкому металі, тим самим скорочувати простої автоматичних формувальних ліній і уникати розвитку зайвих потужностей плавильного відділення.

Залежно від виду сплаву застосовуються різні типи плавильних агрегатів або їх комбінації. Крім того, розміри печей, їх конструкція, площі, які вони займають, методи обслуговування й експлуатації печей істотно розрізняються між собою і сильно впливають на вибір планувань плавильних відділень і організацію робочих місць.

Для чавуноливарних цехів масового виробництва потужність вагранки визначається, в першу чергу, годинною потребою в рідкому металі цієї марки на конвеєрах або АФЛ цеху.

Розрахування кількості печей періодичної дії дещо складніше. Так, наприклад, кількість електродугових печей H(шт.) визначається залежно від вибраної місткості печі й оптимального часу плавлення [49]:

$$H = П_{\text{м}} \cdot T_{\text{п}} / V, \qquad (4.7)$$

де $T_{\text{п}}$ – оптимальний час плавлення, год;

V – місткість печі, т.

При цьому місткість печі рекомендується розраховувати по формулі:

$$V = П_м \cdot к_с \cdot к_р, \quad (4.8)$$

де $к_с$ – коефіцієнт, що враховує максимальний час розбирання металу зі стендового ковша (при $П_м$ < 35 т/год $к_с$ = 0,5...0,7; при $П_м$ > 35 т/год $к_с$ = 0,7...1,0);

$к_р$ – коефіцієнт резерву на непередбачені втрати ($к_р$ = 0,5...0,7).

Для обчислення кількості печей за формулою (4.7) значення V рекомендується приймати не вище за розрахункове.

Зробимо розрахування кількості електродугових печей залежно від годинної потреби в металі і коефіцієнтів $к_с$ і $к_р$. Дані з тривалості плавлення, залежно від місткості печі (при кислому процесі) приведені в таблиці 4.1. Дані розрахунку кількості електродугових печей, залежно від годинної потреби в металі, наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.1 – Тривалість плавлення залежно від місткості печі

Місткість печі, т	0,5	1,5	3,0	6,0	12,0	25,0
Тривалість плавлення, год	1,4	1,5	1,8	2,1	2,8	3,4

Таблиця 4.2 – Розрахування кількості електродугових печей залежно від годинної потреби в металі

Годинна потреба в металі, т/год	$к_с$	$к_р$	$V_{роз}$, т	Прийнята місткість печі V, т	Розрахункова кількість печей	Прийнята кількість печей
1	2	3	4	5	6	7
10	0,5	0,5	$10 \cdot 0,5 \cdot 0,5 = 2,5$	1,5	$\frac{10 \cdot 1,5}{1,5} = 10$	10
	0,7	0,7	$10 \cdot 0,7 \cdot 0,7 = 4,9$	3	$\frac{10 \cdot 1,8}{3} = 6$	6
20	0,5	0,5	$20 \cdot 0,5 \cdot 0,5 = 5$	3	$\frac{20 \cdot 1,8}{3} = 12$	12
	0,7	0,7	$20 \cdot 0,7 \cdot 0,7 = 9,8$	6	$\frac{20 \cdot 2,1}{6} = 7$	7

Продовження табл.. 4.2

1	2	3	4	5	6	7

30	0,5 0,7	0,5 0,7	$30 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}5 = 7{,}5$ $30 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}7 = 14{,}7$	6 12	$\frac{30 \cdot 2{,}8}{6} = 10{,}5$ $\frac{30 \cdot 2{,}8}{12} = 7$	11 7
40	0,7 1,0	0,5 0,7	$40 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}5 = 14$ $40 \cdot 1{,}0 \cdot 0{,}7 = 28$	12 25	$\frac{40 \cdot 2{,}8}{12} = 9{,}2$ $\frac{40 \cdot 3{,}4}{25} = 5{,}4$	9 5

Розрахунки показують, що вибір типу і місткості печі неоднозначний, і значення розрахункових параметрів можуть коливатися навіть у межах рекомендованих коефіцієнтів κ_c і κ_p за фіксованою годинною потребою в металі. Таким чином, виникає необхідність аналізу двох варіантів типу печей із різною їх місткістю.

Звідси випливає, що за запропонованими методиками не можна однозначно встановити, якого типу і якої місткості печі необхідно встановлювати в плавильному відділенні ливарного цеху. Аналогічні розрахунки можна провести і за іншими відділеннями ливарного цеху.

На основі викладеного можна зробити такі висновки.

1. У практиці проектування відділень ливарних цехів поширений емпіричний підхід, при якому ухвалення технічних і організаційних рішень цілком грунтується на нормативних даних і професійному досвіді проектувальників і виробників.

2. Формування структури й основних параметрів виробничого процесу ливарного цеху відбувається на стадії його проектування, при цьому принципова перебудова може бути здійснена тільки на стадії реконструкції цеху. Тому ефективність роботи ливарного цеху значною мірою визначається якістю й обгрунтованістю проектних рішень.

3. Реконструкцію таких цехів неможливо виконати тільки на основі емпіричних підходів, що і робить методи математичного й імітаційного моделювання, яуі реалізовуються на сучасних ЕОМ, головним інструментом розв'язання інженерних завдань, пов'язаних із проектуванням і керуванням ливарних систем.

4. Найкращий результат при розв'язання практичних завдань ливарного виробництва може бути отриманий шляхом використання системного підходу.

5. Для кількісного вивчення закономірностей функціонування ливарно-

го цеху і його підсистем доцільно використати такі методи дослідження складних систем:

- математичний апарат імовірнісних автоматів, системи масового обслуговування, кусково-лінійчасті агрегати;
- імітаційне моделювання.

6. Технічний прогрес у виробництві виливків привів до ускладнення структури цехів і збільшення видів устаткування і зв'язків між ними. Проте це призводить до зниження надійності ливарних систем. Тому завдання забезпечення заданого рівня надійності устаткування є однією з актуальних проблем науки і практики в галузі ливарного виробництва.

Контрольні запитання.

1. Зробіть аналіз технологічної системи ливарного цеху як об'єкта дослідження.
2. Назвіть сучасні методи дослідження і проектування складних технічних систем.
3. Назвіть основні характерні особливості системного підходу при проектуванні ливарних систем.
4. У чому особливості структурного методу дослідження ливарних систем?
5. Перерахуйте класи аналітичних моделей.
6. Для опису яких систем використовують диференціальні рівняння?
7. Які математичні об'єкти належать до динамічних систем?
8. Дайте характеристику імовірнісного автомата.
9. Специфіка використання імітаційного моделювання складних систем.
10. Методи підвищення ефективності роботи ливарного цеху.

РОЗДІЛ 5.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ ЗАГАЛЬНОЇ МОДЕЛІ ЛИВАРНОГО ЦЕХУ

5.1. Структурні моделі ливарного цеху

Моделі ливарних технологічних систем, побудовані з урахуванням їх якісних параметрів, дозволяють використати кількісні методи для раціонального проектування і реконструкції ливарних цехів, а також побудови автоматизованої системи керування виробництвом. Розробка таких моделей потребує детального вивчення технологічного процесу і його глибокого аналізу за всіма елементами.

Структурний аналіз припускає розчленовування використовуваного технологічного процесу на операції. Операцією в автоматизованому виробництві вважаємо закінчену частину технологічного процесу, яка реалізується функціональним пристроєм або механізмом, що забезпечує необхідну взаємодію органів або середовища з об'єктом обробки.

При розробці структурних моделей використовуємо термінологію теорії графів [39].

Граф G у загальному випадку становлять сукупність ліній і точок, утворених перетинанням цих ліній. Якщо лінії мають певний напрямок, вказаний стрілкою, їх називають дугами, а сам граф – орієнтованим. Вершини графа X відповідають залежним і незалежним змінним, а дуги U – коефіцієнтам передачі або передатним функціям. Основна інформація, поміщена в графу, полягає в графічному вираженні зв'язків між вершинами.

Використання теорії графів дозволяє застосовувати формальні методи аналізу систем, незалежні від їх складності і фізичної суті. Графи не мають спеціальних символів для позначення різного роду дій, що виконуються пристроями й агрегатами, самі ж дії граф відображає. Дії виражаються способами з'єднання вершин графа дугами. Якщо в графі встановлений зв'язок (відображення Г) між безліччю незалежних змінних

$$X_0 \equiv \left\{x_0^{(1)}, x_0^{(2)}, x_0^{(3)}, \ldots\right\} \subseteq X$$

і безліччю змінних

$$X_i \equiv \left\{x_1, x_2, x_3, \ldots x_1\right\} \in X ,$$

тоді граф $G = (X, U, \Gamma)$ може бути описаний системою рівнянь такого виду

$$
\left.
\begin{array}{l}
x_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \ldots + a_{1i}x_i + \ldots a_{1l}x_l + a_{1(1)}x_0^{(1)}; \\
x_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \ldots + a_{2i}x_i + \ldots a_{2l}x_l + a_{2(2)}x_0^{(2)}; \\
\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\
x_j = a_{j1}x_1 + a_{j2}x_2 + \ldots + a_{ji}x_i + \ldots a_{jl}x_l + a_{j(i)}x_0^{(j)}; \\
x_l = a_{l1}x_1 + a_{l2}x_2 + \ldots + a_{li}x_i + \ldots a_{ll}x_l + a_{l(l)}x_0^{(l)},
\end{array}
\right\} \quad (5.1)
$$

де a_{ji} – коефіцієнт передачі (передатна функція), виражений у графі дугою U_{ji} між змінними x_i і x_j як залежними, так і незалежними.

Коефіцієнт передачі

$$a_{ji\,\mathrm{def}} = \frac{x_j}{x_i}, \quad (5.2)$$

звідки випливає, що для будь-якого x, що належить множині X,

$$x_j = a_{ji} \cdot x_i \quad (5.3)$$

при $j - i = 1$ і $j - i = 0$.

Систему рівнянь (5.1) при розв'язанні її на ЕОМ записують у матричній формі. Матриця коефіцієнтів при невідомих x_1, x_2, x_3, x_i є квадратною. При порівняно невеликій кількості залежних змінних будь-яке значення x_i можна знайти згідно з правилом Крамера. У разі, коли кількість невідомих x_i велика, використовують метод послідовного виключення невідомих або метод ітерацій.

Наведені методи розв'язанні при аналізі складних систем часто виявляються громіздкими і недостатньо наочними.

Граф і система рівнянь (5.1), що відповідає йому, можуть виражати модель виконання комплексу операцій механізмами над матеріальними елементами (об'єктом переробки), якщо множина $X_0 \in X$ витоків і множина $U_i \in U$ дуг графа будуть поставлені у відповідність множині $D_0^{(i)}$ формалізованих матеріальних елементів і операцій A технологічного процесу виготовлення виробу на автоматизованому устаткуванні.

Використовуючи символіку, прийняту в теорії графів, можна графічно записати математичну модель технологічного процесу.

Графічне зображення математичної моделі і сама модель мають відображати схему реалізації технологічного процесу на автоматизованому уста-

ткуванні з урахуванням використовуваних матеріалів, складності процесу і конструкції агрегатів.

Для зображення моделі процесу необхідно:

- розділити технологічний процес на закінчені операції, кожна з яких може бути реалізована функціональним пристроєм, механізмом;
- графічно вказати матеріали, що переробляються, і операції, які закінчуються відповідною реалізацією.

Граф, побудований згідно з описом процесу, містить усі структурні і "надмірні" елементи моделі і відповідає функціональному графу Мезона, який визначається системою незалежних лінійних рівнянь (5.1).

Моделі, що грунтуються на теорії скінченних орієнтованих графів, мають ієрархічну властивість. Це дає можливість послідовно розчленувати моделі на ряд композиційних із різним ступенем подробиць. У міру підвищення рівня моделей у них використовується найбільш узагальнена інформація.

Моделювання ливарного цеху потребує детального вивчення технологічних процесів, його структури і глибокого аналізу за всіма елементами. Це можливо при розгляді його як цехи ієрархічної системи багаторівневого характеру, що відповідає таким ознакам:

- послідовному вертикальному розташуванню підсистем, що складають цю систему;
- пріоритету дії або праву втручання підсистем верхнього рівня;
- залежності дії підсистем верхнього рівня від фактичного виконання нижніми рівнями своїх функцій.

Зважаючи на велику кількість елементів, що становлять ливарний цех, його структуру подаємо в ієрархічному вигляді. Це ливарні системи таких рівнів [79]:

- І рівень – ливарний цех як єдине ціле;
- ІІ рівень – підсистема ливарного цеху : сумішеприготувальна, плавильна, стержнева, формувальна, фінішних операцій;
- ІІІ рівень – комплекс технологічного устаткування, що має загальне призначення;
- IV рівень – плавильна піч, формувальний автомат, тобто одиниця ливарного устаткування;
- V рівень – окрема деталь, вузол, агрегат.

Загальну структурну схему ливарного цеху наведено на рис. 5.1 (розріз графа прадерева за 1-м рівнем). Основними її елементами є сумішеприготувальна, плавильна, стрижнева і формувальна підсистеми, а також підсистема фінішних операцій.

Таким чином, система ливарні є множиною E, що складається з п'яти перетинних підмножин, що відповідають сумішеприготувальній A, плавильній B, стержневій C, формувальній D підсистемам і підсистемі фінішних операцій F, тобто

$$E = A \cup B \cup C \cup D \cup F . \qquad (5.4)$$

Взаємодія між структурними елементами здійснюється відповідно до напрямку ребер (стрілок), наведених на структурній схемі (рис. 5.1). Системні характеристики підсистем визначаються як результат взаємодії між окремими структурними складовими.

Рис. 5.1. Загальна структурна схема ливарного цеху (переріз графа прадерева за 1-м рівнем)

Система ливарні є комплексом технологічного і транспортного устаткування. Структура системи і алгоритм її роботи визначається заданим технологічним процесом, а його раціональний варіант – мінімумом витрат за всіма переробками при зіставленні можливиххх способів формоутворення.

У діючій ливарній системі може змінюватися ряд таких параметрів, як план, номенклатура виливків, сплав, склад формувальної суміші та ін., що призводить до необхідності регулювання і керування системою. Функції регулювання, як правило, виконує людина. Здійснюється воно за трьома параметрами: зміною кількості й якості та інтенсифікації роботи існуючих елементів системи.

Уявляючи структурну схему системи у вигляді графа, ще нічого не можна сказати шодо якісних показників самої системи. Тому необхідно мати в розпорядженні методику, що дозволяє виділити і визначити деякі структурні параметри, і дати їм кількісну оцінку. Завдання аналізу якості структурної схеми – виявити «проблемні» місця в схемі. Вибираємо параметри, що визначають якість структурної схеми при поданні її графом: зв'язаність графа, ранг елемента, множина зчленування. Параметр зв'язаності графа виявляє наявність обривів, вершин, що "висять", і інші структурні характеристики функціональної схеми.

Параметр – ранг елементу – дозволяє розподілити елементи схеми за значущістю. Чим вищий ранг елемента, тим сильніше він пов'язаний з іншими елементами схеми, і тим важчим будуть наслідки при поломці цього елемента. Множина зчленування є параметром, що вказує, при видаленні яких елементів зі схеми вона зруйнується і перестане існувати як єдине ціле.

Функціонування ливарних систем безперервне в часі і зводиться до переміщення сировини і напівфабрикатів, що проходять послідовну обробку на технологічному устаткуванні до отримання готового виливка. Отже, ливарну систему необхідно розглядати як транспортну систему.

Структури ливарних підсистем і система ливарного цеху в цілому описуються графами типу прадерева, в яких відношення між вершинами виражені дугами. Подання ливарних систем у вигляді графів дозволяє встановити деякі загальні умови їх раціональної побудови і функціонування [37].

Умова потреби в сировині. При заданому випуску литва потреба в кожному інгредієнті за одиницю часу визначається за формулою

$$V_s = \frac{q_s n}{\tau}, \tag{5.5}$$

де V_s – потреба в інгредієнті, т/год;

n – заданий випуск литва, т;

τ – час, год;

q_s – витрата інгредієнта на 1 т виливків.

Умова раціональної потужності агрегатів. Потужність устаткування для кожного матеріалу окремо і при спільній обробці декількох інгредієнтів визначається рівняннями:

$$\left.\begin{aligned} & m_1(x_i) = \frac{1}{\eta_i} V_1; \\ & m_2(x_i) = \frac{1}{\eta_i} V_2; \\ & \cdots\cdots\cdots \\ & m_m(x_i) = \frac{1}{\eta_i} V_m; \\ & \overline{\sum_{j=p}^{r} m_j(x_i) = \frac{1}{\eta_i} \sum_{j=p}^{r} V_j} \quad \text{для } 1 \le p \le r \le m, \end{aligned}\right\} \tag{5.6}$$

де $m_j(x_i)$ – потужність i-го устаткування, необхідна для обробки j-го інгредієнта; η_i – коефіцієнт використання устаткування.

Умова безперервності функціонування системи. При безперервному виробничому процесі, що встановився, витрата матеріалів або напівфабрикатів прямо пропорційна потужності устаткування

$$R = \eta \cdot m \cdot (x). \tag{5.7}$$

За наявності в системі елементів періодичної дії потрібне установлення резервних елементів.

Умова зв'язаності системи. Для кожної вершини х, відмінної від початкової і кінцевої, кількість протікаючого матеріалу дорівнює кількості витікаючого

$$\sum_{u \in U_x^-} \varphi(u) - \sum_{u \in U_x^+} \varphi(u) = 0, \tag{5.8}$$

де $\varphi(u)$ – функція (потік);

U_x^- – множина дуг, що входять у x;

U_x^+ – множина дуг, що виходять із x.

Сума величин потоків, що виходять із вершин нульового ярусу, дорівнює сумі величин потоків, що входять у вершини останнього ярусу

$$\sum_{u \in U_0^+} \varphi(u) - \sum_{u \in U_r^-} \varphi(u) = \Phi , \qquad (5.9)$$

де Ф – величина потоку.

Умова відповідності. У будь-який момент часу потреба в матеріалах має бути меншою потужності агрегату

$$V(x) < m(x), \qquad (5.10)$$

а для транспортної системи потік φ(*u*) по дузі *u* не перевищує пропускної здатності цієї дуги, тобто

$$\varphi(u) < c(u), \qquad (5.11)$$

де c(u) – пропускна здатність дуги.

Порушення цієї умови призводить до утворення в системі «вузького» місця при $p(x) > m(x)$ або φ(u) > *c*(u), а також критичних елементів, коли $p(x) = m(x)$ або $\varphi(u) = c(u)$, де $p(x)$ – потужність агрегату *p*, розташованого за технологічним процесом попереду агрегату *m*.

Умова мінімального перерізу. Згідно з теоремою Форда-Фулкерсона пропускна здатність будь-якого перерізу підсистеми має бути не меншою пропускної системи її стоку. Для транспортної системи

$$\sum_{u \in U_s^-} c(u) \geq \sum_{u \in U_r^-} c(u) , \qquad (5.12)$$

де U_s^- – множина дуг, що входять у A_s;

U_r^- – множина дуг, що виходять із A_r,

а для технологічного устаткування

$$\sum_{x \in A_s} m(x) \geq \sum_{x \in A_r} m(x) , \qquad (5.13)$$

де A_s – множина вершин графа, що належать ярусу *s*;

A_r – множина вершин графа, що належать останньому ярусу *r*.

Ці умови були узяті за основу при дослідженні структур ливарного цеху і його підрозділів.

Таким чином, у рамках прийнятої моделі функціонування ливарного цеху як єдиної технологічної системи його структура є п'ятиступеневою системою взаємопов'язаних між собою підсистем, для яких мають бути створені структурні і математичні моделі імітаційно-аналітичного характеру різних рівнів від ливарного цеху до вузла або деталі ливарного устаткування.

5.2. Імовірнісно-автоматні моделі елементів ливарного цеху

Вибір математичного об'єкта для моделювання здійснюють на основі таких вимог:

- математичний об'єкт має адекватно відбивати реальні процеси, що проходять у системі;
- для різноманітних елементів математичний об'єкт повинен мати однакове подання;
- опис повинен робитися максимально простим способом.

Тому для дослідження необхідно здійснити вибір уніфікованої абстрактної схеми, що дозволяє однаково описати усі елементи системи (дискретні, безперервні, детерміновані, стохастичні). Це має істотне значення, оскільки вона міститиме в собі усі математичні моделі як окремі випадки.

Оскільки як об'єкти для опису елементів підсистем ливарного цеху можуть служити імовірнісні автомати, системи масового обслуговування і кусково-лінійчасті агрегати, досліджуємо їх щодо можливості створення на їх основі уніфікованих абстрактних схем.

Створенню уніфікованих схем, придатних для опису різнорідних процесів і об'єктів, було присвячено численні роботи авторів [35, 41, 43]. Н. П. Бусленко ввів поняття агрегату і запропонував будувати універсальну модель складної системи у вигляді деякої сукупності агрегатів, пов'язаних між собою.

Формальна математична схема така:

t – множина даних моментів часу;

x – множина вхідних;

y – множина вихідних;

g – множина керуючих сигналів;

z – множина станів;

$t \subset T$; x, y, g, z – множина будь-якої природи, причому стани вхідні, вихідні і керуючихь сигналів розглядаються як функції часу

$$z = z(t), \quad x = x(t), \quad g = g(t), \quad y = y(t).$$

Агрегат розуміють як об'єкт, що визначається множиною t, x, y, g, z і операторами переходів H і виходів Ω, такими, що $H:(z, x) \rightarrow z$; $\Omega: (z, x) \rightarrow y$. Структура операторів переходів і виходів власне і виділяє агрегати серед інших систем.

Стан агрегату $z(t)$ для довільного моменту часу $t > t_0$ визначається за попередніми станами оператором переходів $H[z(t_0), t]$. Це означає, що одному значенню $z(t_0)$ ставиться у відповідність не одно, а множина значень $z(t)$ з деяким законом розподілу, залежним від виду оператора H. Конкретне значення стану $z(t)$ визначається як реалізація заданого процесу відповідно до вказаного закону розподілу.

Якщо стани $z = (z_1, z_2, ..., z_l)$ виявляються дійсними векторами, то $z_i(i = 1..., l)$ називають фазовими координатами, а функції $z(t)$ – фазовими траєкторіями. Агрегат має вхідні контакти, здатні сприймати дії зовнішнього середовища, на які в моменти $t_j(j = l, 2,...)$ надходять вхідні сигнали $x(t) \subset X$. Вхідний сигнал x є вектором, розмірність якого дорівнює кількості вхідних контактів, і на кожен контакт надходить «своя» координата вхідного сигналу (аналогічно – для вихідних і керуючих сигналів).

Як кінцевий інтервал часу $(0, t)$ агрегат приймає кінцеву кількість вхідних керуючих сигналів, і видає кінцеву кількість вихідних сигналів. Сукупність вхідних (вихідних, керуючих) сигналів, розташованих за їх введенням, називають вхідним (вихідним, керуючим) повідомленням.

Метою моделювання є отримання характеристик, що визначаються станами модельованої системи, для чого необхідно фіксувати в процесі моделювання досить повну інформацію про стани системи у відповідні моменти часу. Щодо агрегату це означає, що необхідно отримати значення станів $z(t)$ для деяких моментів часу в інтервалі дослідження $(0, t)$.

Момент введення вхідних і видачі вихідних керуючих сигналів, називаються особливими моментами часу, а стани агрегату, що відповідають їм, – його особливими станами. Моделювання процесу функціонування агрегату розглядається як послідовний ланцюг переходів з одного особливого стану в інший, умовно додавши до них і стан $z(0)$.

Проте використання агрегатів загального вигляду як формальної математичної схеми пов'язане з великими труднощами їх реалізації, тому використовують більше приватні схеми.

И. Н. Коваленко розробив теорію кускоо-лінійних агрегатів і показав, що складна система може бути синтезована з агрегатів цього типу. Клас кусково-лінійних агрегатів виділяється з класу агрегатів загального вигляду за допомогою конкретизації структури множини z, x і y – просторів станів, вхідних і вихідних сигналів, а також операторів переходів H і виходів Ω. Але математична модель складної системи, синтезована з кусково-лінійних агрегатів, визначається досить громіздко, тому Н. В. Яровицкий [50] запропонував в як "матеріал" для побудови моделі використати агрегати простої

структури – імовірнісні автомати, які також можуть бути застосовані для моделювання елементів складних систем. Побудова системи у вигляді імовірнісних автоматів має ряд переваг. Це порівняльна однорідність об'єктів, що об'єднуються в систему, і виняткова простота програмного алгоритму.

Агрегативний підхід до моделювання складних систем припускає розчленовування складної системи на кінцеву кількість частин (підсистем), зі збереженням зв'язків, що забезпечують взаємодію цих частин. Процес розчленовування триває до ти, доки не вийдуть елементи, які в умовах цього завдання вважаються простими і зручними для математичного опису. В результаті такого процессу (структуризації) складна система подається у вигляді багаторівневої конструкції зі взаємопов'язаних елементів, що об'єднуються в підсистеми різних рівнів.

При моделюванні складної системи за допомогою імовірнісних автоматів вихідний сигнал одного автомата служить вхідним для іншого. Функція виходу відбиває перетворення, здійснювані над об'єктом, що вивчається, а функція переходу описує динаміку його внутрішнього стану. Залежно від типу задачі, що вирішується, моделювати складну систему при використанні імовірнісних автоматів можна з різним ступенем подробиці – від рівня функціональних підсистем до вузлів і окремих деталей.

Таким чином, з усіх використовуваних сьогодні аналітичних моделей для моделювання роботи ливарного цеху і його підсистем найбільше підходить апарат імовірнісних автоматів. Його використання дозволяє мати мінімальний математичний опис системи, що досить повно відбиває усе різноманіття процесів, які проходять у виробничій системі ливарного цеху. Імовірнісні автомати (ВА) – це математичні об'єкти, що мають внутрішній стан, який формується з урахуванням імовірнісних чинників, здатні сприймати і видавати сигнали.

Для опису ливарних систем найбільше підходить ініціативний імовірнісний автомат Мура з детермінованими виходами, що задається шістьма об'єктами:

$$\langle X, Z, Y, a_0, A(x), \psi \rangle, \tag{5.14}$$

де *X, Z, Y* – вхідний, внутрішній і вихідний алфавіт;

a_0 – вектор, що описує початковий стан;

A(x) – сім’я стохастичних матриць, що визначають правило переходу автомата з одного стану в інший;

ψ – функція виходу, що визначає правило формування вихідного сигналу.

Функціонування автомата зводиться до того, що на його вхід у дискретні моменти часу надходять сигнали, що становлять вхідний алфавіт, при цьому автомат залежно від вхідного сигналу, що надійшов, і свого внутрішнього стану автомата виробляє алфавіт за правилами, визначеними функцією виходу. Функція переходу є правилом переходу автомата з одного стану в інший у процесі його функціонування.

Для опису процесу функціонування ливарних систем, що складаються з великої кількості різнорідних за функціональним призначенням машин і агрегатів, використовуємо єдину уніфіковану модель ВА, яка щодо об'єктів ливарного виробництва має такий вигляд.

ВА задається набором таких характеристик: вхідним X і вихідним Y алфавітами, функцією внутрішнього стану $Z(\tau)$, функцією переходу φ, що описує зміну внутрішнього стану автомата у момент часу τ, функцією виходу $\psi(\tau)$, що визначає вихідний сигнал залежно від вхідного і стани автомата в даний момент. Функціонування ВА зводиться до перетворення

$$Y(\tau) = \psi\,[X(\tau), Z(\tau)], \tag{5.15}$$

а зміна внутрішнього стану з часом описується формулою

$$Z(\tau) = \varphi\,[U(\tau), B(\tau), \tau], \tag{5.16}$$

де φ – функція переходу;

$B(\tau)$ – вектор параметрів, що довільно змінюється в часі через процеси старіння і знос, що відбуваються;

$U(\tau)$ – вектор керуючих параметрів, що визначається інтенсивністю проведення планово-запобіжних ремонтів.

Для технічних пристроїв, об'єднаних у систему ливарного технологічного устаткування, як функції внутрішнього стану приймаємо вірогідність безвідмовної роботи $P(\tau)$ в даний момент часу.

На основі цього показника і показника часу відновлення можуть бути визначені усі основні характеристики надійності системи. Внутрішній алфавіт складається з символів «1» і «0», які означають, що автомат відповідно знаходиться в нормальному або непрацездатному стані.

Потім функція (5.16) набуває вигляду

$$Z(\tau) = P(\tau) = \varphi\,[U(\tau), B(\tau), \tau], \tag{5.17}$$

де $P(\tau)$ – імовірність безвідмовної роботи.

При моделюванні технічної системи мережею автоматів відбувається їх об'єднання автоматів, що полягає в ототожненні вхідних алфавітів – одних із вихідними алфавітами інших. Структура отриманої мережі ВА описується за допомогою орграфа міжавтоматних зв'язків або за допомогою матричного опису залежно від розмірності системи, що вивчається, і способу її отримання.

Як елементи системи ливарного цеху (I рівень ієрархії) є його функціональні підрозділи. Такі імовірнісно-автоматні моделі описуються так.

Для кожної підсистеми ливарного цеху, згідно із структурною схемою, наведеною на рис. 5.1, визначаємо види вхідного і вихідного алфавітів, функцію внутрішнього стану і функцію виходу.

1. Імовірнісний автомат, що моделює роботу сумішеприготувальної підсистеми, подаюмо в такому вигляді.

Вхідний алфавіт – *n*-вимірний вектор із компонентами

$$X_{\text{СПС}} = \{x_1, x_2, ..., x_m, x_{m+1}, ..., x_n\}, \tag{5.18}$$

де x_1, $x_{2...}$, x_m – незалежні змінні, що являють собою кількість уводимих початкових формувальних матеріалів;

x_{m+1}., x_n – параметри, що характеризують якість початкових матеріалів;

m – кількість компонентів суміші.

Вихідний алфавіт подає вектор

$$Y_{\text{СПС}} = \{q_{\text{СПС}}, \sigma, \Gamma, W\}, \tag{5.19}$$

де $q_{\text{СПС}}$ – кількість суміші на виході із сумішеприготувальної системи;

σ, Г, W – числові значення якості формувальної суміші відповідно міцності на стиск у сирому стані, газопроникності і вологості формувальної суміші.

Згідно з прийнятою гіпотезою, вважаємо, що функцією внутрішнього стану φ є імовірність безвідмовної роботи сумішеприготувальної системи $P_{\text{СПС}}(\tau)$, яка визначається відмовами устаткування, що входять до її складу.

Функцію виходу ψ для імовірнісного автомата, що моделює роботу сумішеприготквальної системи, описуємо так:

$$q_{\text{СПС}} = \begin{cases} \sum_{i=1}^{m} x_i, \text{ з імовірністю } P_{\text{СПС}}(\tau), \\ 0, \quad \text{з імовірністю } 1 - P_{\text{СПС}}(\tau), \end{cases} \tag{5.20}$$

$$\sigma = f(x, \tau); \tag{5.21}$$

$$\Gamma = f(x, \tau); \tag{5.22}$$

$$W = f(x, \tau); \tag{5.23}$$

Показники фізико-механічних властивостей суміші (5.21)–(5.23) залежать від кількості та якості початкових компонентів, що подаються в систему, часу перемішування, часу доставки суміші до автоматичних ліній формування і можуть бути знайдені на основі обробки цих промислових експериментів.

2. Імовірнісний автомат, що моделює роботу плавильної підсистеми ливарного цеху, може бути поданий у такому вигляді

$$X_{\text{ме}} = \left\{x_1, x_2, ..., x_n, \kappa_{i(1)}, \kappa_{i(2)}, ..., \kappa_{i(n)}\right\}, \tag{5.24}$$

де x_1, x_2..., x_n – незалежні змінні, що являють собою кількість початкових шихтовых матеріалів (масова частка кожного з компонентів шихти), що вводяться;

n – кількість компонентів шихти;

$\kappa_{i(1)}$, $\kappa_{i(2).}$, $\kappa_{i(n)}$ – множина концентрацій і-го елемента в кожному з компонентів шихти;

i – кількість контрольованих елементів у компоненті.

Вихідний алфавіт подає вектор

$$Y_{\text{ме}} = \left\{q_{\text{ме}}, M_{\kappa_i}^{(c)}, T\right\}, \tag{5.25}$$

де $q_{\text{ме}}$ – кількість металу на виході з плавильної підсистеми;

$M_{\kappa_i}^{(c)}$ – числові значення якості приготованого сплаву, тобто контрольованих елементів у металі;

T – температура металу на виході з плавильної підсистеми.

Функція внутрішнього стану φ визначається імовірністю безвідмовної роботи плавильної підсистеми $P_{\text{ме}}(\tau)$.

Функцію виходу ψ для імовірнісного автомата, що моделює роботу плавильної підсистеми, подаємо в такому вигляді:

$$q_{\text{ме}} = \begin{cases} \sum_{i=1}^{n} x_i, \text{ з імовірністю } P_{\text{ме}}(\tau), \\ 0, \quad \text{з імовірністю } 1 - P_{\text{ме}}(\tau). \end{cases} \tag{5.26}$$

Таблиця 5.1 – Характеристики імовірнісно-автоматних моделей елементів ливарного цеху

Імовірність автомат	Вхідний алфавіт	Вихідний алфавіт	Функція внутрішнього стану	Функція виходу
1. Сумішоприготувальна підсистема	$X_{\text{спс}}=\{x_1,x_2,\ldots,x_m,x_{m+1},\ldots,x_n\}$	$Y_{\text{спс}}=\{q_{\text{спс}},\sigma,\Gamma,W\}$	$P_{\text{спс}}(\tau)$	$q_{\text{спс}}=\begin{cases}\sum_{i=1}^{m}x_i, \text{с вероятностью } P_{\text{спс}}(\tau)\\ 0, \quad \text{с вероятностью } 1-P_{\text{спс}}(\tau)\end{cases}$ $\sigma=f(x,\tau);\quad \Gamma=f(x,\tau);\quad W=f(x,\tau)$
2.Плавильна підсистема	$X_{\text{ме}}=\{x_1,x_2,..,x_n,\kappa_{i(1)},\kappa_{i(2)},\ldots\kappa_{i(n)}\}$	$Y_{\text{ме}}=\{q_{\text{ме}},\ M_{\kappa_i}^{(c)},T\}$	$P_{\text{мет}}(\tau)$	$q_{\text{ме}}=\begin{cases}\sum_{j=1}^{n}x_j, \text{с вероятностью } P_{\text{мет}}(\tau)\\ 0, \quad \text{с вероятностью } 1-P_{\text{мет}}(\tau)\end{cases}$ $T=f(\tau);\quad M_{\kappa_i}^{(c)}$
3.Стрижнева підсистема	$X_{\text{ст}}=\{x_1,x_2,\ldots,x_m,x_{m+1},\ldots,x_n\}$	$Y_{\text{ст}}=\{q_{\text{ст}}\}$	$P_{\text{ст}}(\tau)$	$q_{\text{ст}}=\begin{cases}\sum_{i=1}^{m}x_i, \text{с вероятностью } P_{\text{ст}}(\tau)\\ 0, \quad \text{с вероятностью } 1-P_{\text{ст}}(\tau)\end{cases}$
4. Формувальна підсистема	$X_{\text{фс}}=\{q_{\text{спс}},\sigma,\Gamma,W,q_{\text{ме}},$ $M_{\kappa_i}^{(c)},T,q_{\text{ст}}\}$	$Y_{\text{фс}}=\{q_{\text{отл}},n_{\text{ф}},q_{\text{отр.см}}\}$	$P_{\text{фс}}(\tau)$	$q_{\text{отл}}=\begin{cases}q_{\text{ме}}, \text{с вероятностью } P_{\text{фс}}(\tau)\\ 0, \quad \text{с вероятностью } 1-P_{\text{фс}}(\tau)\end{cases}$
5. Підсистема фінішних операцій	$X_{\text{фо}}=\{q_{\text{отл}}\}$	$Y_{\text{фо}}=\{M_{\text{отл}},\ R_i\}$	$P_{\text{фо}}(\tau)$	$M_{\text{отл}}=\begin{cases}q_{\text{отл}}-q_{\text{лс}}, \text{с вероятностью } P_{\text{фо}}(\tau)\\ 0, \quad \text{с вероятностью } 1-P_{\text{фо}}(\tau)\end{cases}$ $R_i.$

Якість отримуваного сплаву визначається розрахунком шихти і дотриманням технологічного процесу плавки, а температура сплаву на ділянці заливки залежить від його температури на виході з печі, а також від часу доставки металу до заливальної ділянки автоматичної лінії формування і може бути визначена на основі обробки промислового експерименту.

3. Імовірнісний автомат, що моделює роботу стрижневої підсистеми ливарного цеху, подаємо так.

Вхідний алфавіт – *n*-вимірний вектор із компонентами

$$X_{\text{ст}} = \{x_1, x_2, ..., x_m, x_{m+1}, ..., x_n\}, \tag{5.27}$$

де x_1, x_2..., x_m – незалежні змінні, що подають кількість початкових стрижневих матеріалів, що вводяться;

x_{m+1}..., x_n – параметри, що характеризують якість початкових стрижневих матеріалів;

m – кількість компонентів стержневої суміші.

Вихідний алфавіт подає вектор

$$Y_{\text{ст}} = \{ q_{\text{ст}} \}, \tag{5.28}$$

де $q_{\text{ст}}$ – маса стрижнів на виході з підсистеми.

Функцією внутрішнього стану φ є імовірністю безвідмовної роботи стержневої підсистеми $P_{\text{ст}}(\varphi)$.

Функцію виходу ψ для імовірнісного автомата, що моделює роботу стрижневої підсистеми, подаємо у вигляді

$$q_{\text{ст}} = \begin{cases} \sum_{i=1}^{n} x_i, & \text{з імовірністю } P_{\text{ст}}(\tau), \\ 0, & \text{з імовірністю } 1 - P_{\text{ст}}(\tau). \end{cases} \tag{5.29}$$

Контрольовані параметри якості стрижнів регламентуються технологічним процесом при виготовленні.

Стрижнева підсистема гнучко пов'язана з роботою формувального відділення, тому в ньому можна створити заділ стрижнів, щоб не спричиняти простоїв автоматичних ліній формування через їх відсутність.

Моделювання стрижневої підсистеми здійснюється за аналогією до сумішеприготувальної, тому питання, пов'язані з функціонуванням стрижневої підсистеми, розглядаються в загальному вигляді.

4. Імовірнісний автомат, що моделює роботу формувальної підсистеми ливарного цеху, описували так.

Вхідним алфавітом був вектор

$$X_{\text{фс}} = \left\{ q_{\text{СПС}}, \sigma, \Gamma, W, q_{\text{ме}}, M_{\kappa_i}^{(c)}, T, q_{\text{ст}} \right\}, \tag{5.30}$$

а вихідним

$$Y_{\text{фс}} = \left\{ q_{\text{отл}}, n_{\text{ф}}, q_{\text{отр.см}} \right\}, \tag{5.31}$$

де $q_{\text{отл}}$ – металомісткість виливків із системою ливника на виході з формувальної підсистеми;

$n_{\text{ф}}$, $q_{\text{отр.см}}$ – кількість форм і відпрацьованої суміші на виході з формувальної підсистеми.

Функція виходу ψ має такий вигляд:

$$q_{\text{отл}} = \begin{cases} q_{\text{ме}}, \text{ з імовірністю } & P_{\text{фс}}(\tau), \\ 0, \quad \text{з імовірністю } & 1 - P_{\text{фс}}(\tau). \end{cases} \tag{5.32}$$

5. Імовірнісний автомат, що моделює роботу підсистеми фінішних операцій, виглядає так.

Вхідний алфавіт

$$X_{\text{фо}} = \{ q_{\text{отл}} \}, \tag{5.33}$$

а вихідний алфавіт

$$Y_{\text{фо}} = \{ m_{\text{отл}}, R_i \}, \tag{5.34}$$

де $m_{\text{отл}}$ – металомісткість виливків на виході з підсистеми фінішних операцій;

R_i – числові значення і-го контрольованого параметра виливків;

i – кількість контрольованих параметрів виливки.

Функція внутрішнього стану φ визначається імовірністю безвідмовної роботи підсистеми фінішних операцій $P_{\text{фо}}(\tau)$.

Функцію виходу ψ для імовірнісного автомата, що моделює роботу підсистеми фінішних операцій, можна подати у вигляді:

$$m_{\text{отл}} = \begin{cases} q_{\text{отл}} - q_{\text{лс}}, \text{ з імовірністю } & P_{\text{фо}}(\tau) \\ 0, \quad \text{з імовірністю } & 1 - P_{\text{фо}}(\tau) \end{cases}, \tag{5.35}$$

де $q_{\text{лс}}$ – металомісткість систем ливників.

Параметри $q_{\text{спс}}$, $q_{\text{ме}}$, $q_{\text{ст}}$, $q_{\text{отл}}$, $m_{\text{отл}}$ визначаються на основі вивчення імовірнісно-автоматних моделей елементів підсистем нижчих рівнів ієрархії. Зважаючи на дискретний характер роботи підсистеми фінішних операцій, малої її автоматизації, наявність великої кількості різноманітного устаткування, що вживається для певної номенклатури виливків, відсутність жорст-

ких зв'язків між устаткуванням і можливістю створення заділів, її моделювання необхідно робити тільки для конкретних виробничих умов. Тому питання моделювання підсистем фінішних операцій детально не розглядаються.

Імовірність безвідмовної роботи цієї підсистеми можна приблизно оцінити імовірністю безвідмовної роботи вибивних пристроїв.

Характеристики імовірнісно-автоматних моделей елементів ливарного цеху наведено в табл. 5.1.

Таким чином, процес функціонування ливарного цеху може бути поданий у вигляді взаємодіючих імовірнісних автоматів, а динаміка зміни основних характеристик може бути відтворена на ЕОМ на основі використання комбінації аналітичних і імітаційних моделей, що створює основи для переходу від емпіричних методів розв’язання науково-технічних завдань у галузі ливарного виробництва до машинного пошуку оптимальних розв’язків з використанням сучасних математичних методів. Наведені залежності мають загальний характер і справедливі для будь-яких умов функціонування ливарного цеху, проте для конкретних умов вони потребують деталізації.

5.3. Загальна математична модель і алгоритм функціонування ливарного цеху

При розробці загальної математичної моделі (ОММ) ливарного цеху використали результати, наведені в підрозділі 5.2, враховуючи, що імовірнісні автомати видають миттєві значення роботи елементів систем, кінцевим же результатом моделювання є визначення середніх характеристик ливарного цеху на заданому відрізку часу $[0, \tau_u]$.

Структура ОММ ливарного цеху описується таким чином

$$Y = H\,[X1, X2, X3, B, U, \tau], \tag{5.36}$$

де Y – вектор, що характеризує кількість і якість виливків;

X1, X2, X3 – вектори, що характеризують кількість і якість формувальної суміші, сплаву і стрижнів;

H – загальний оператор системи;

B – вектор параметрів системи;

U – вектор керуючих параметрів;

τ – час.

Вектор основних показників ефективності ливарного цеху виглядає так:

$$Y = \{\, M_{\text{отл}}, R_i \,\}, \tag{5.37}$$

де $M_{отл}$ – середній випуск виливків за відрізок часу $[0, \tau_u]$;

R_i – числові значення і-го контрольованого параметра виливків;

i – кількість контрольованих параметрів виливків.

Загальна металомісткість виливків на виході з ливарного цеху, n, що має, – автоматичні або потокові лінії продуктивністю, записується у вигляді

$$M\left[M_{отл}(\tau)\right] = \frac{1}{\tau_u}\sum_{i=1}^{n} Q_i^{(АЛЛ)} \int_0^{\tau_u} S(\tau) P_{фс}(\tau) d\tau, \qquad (5.38)$$

де M – символ математичного сподівання;

$S(\tau)$ – середня імовірність безвідмовної роботи підсистем ливарного цеху з інтервалом часу $[0, \tau_u]$;

n – кількість автоматичних або потокових ліній;

$P_{фс}(\tau)$ – імовірність безвідмовної роботи формувальної підсистеми;

τ_u – тривалість інтервалу спостереження.

Величину $S(\tau)$ визначали так

$$S(\tau) = P_{мет}(\tau) \cdot P_{ст}(\tau) \cdot P_{спс}(\tau) \cdot P_{фо}(\tau), \qquad (5.39)$$

де $P_{мет}(\tau)$, $P_{ст}(\tau)$, $P_{спс}(\tau)$, $P_{фо}(\tau)$ – середня імовірність безвідмовної роботи плавильної, стрижневої, сумішеприготувальної підсистем і підсистеми фінішних операцій.

Підставляючи значення $S(\tau)$ у формулу (5.38), отримуємо остаточний вираження для визначення загальної металомісткості виливків ливарного цеху

$$M\left[M_{отл}(\tau)\right] = \frac{1}{\tau_u}\sum_{i=1}^{n} Q_i^{(АЛЛ)}(\tau) \cdot \int_0^{\tau_u} P_{мет}(\tau) P_{ст}(\tau) P_{спс}(\tau) P_{фо}(\tau) P_{фс}(\tau) d\tau. \qquad (5.40)$$

Контрольовані параметри якості виливків визначаються їх призначенням.

Таким чином, створення загальної математичної моделі ливарного цеху можливе тільки на основі використання локальних аналітичних, числових або комбінованих математичних моделей, що описують залежність основних показників ефективності від параметрів, що характеризують кількість і якість початкових компонентів, технологічного процесу і стану основних вузлів і агрегатів.

Метою розробки загального алгоритму (ОА) є встановлення кількісних характеристик між вхідними і вихідними параметрами системи, що вивчається. Для розв'язання поставленого завдання використали як типові елементи імовірнісні автомати, складені для підсистем ливарного цеху відповідно до його структурної схеми (див. рис. 5.1).

Загальний алгоритм моделювання процесу функціонування ливарного цеху містить таку послідовність дій.

1. Вхідні дії є комплексом векторів

$$\begin{cases} X1 = \{Q_{\text{СПС}}, \sigma, W, \Gamma\}; \\ X2 = \left\{Q_{\text{ме}}, M_{\kappa_i}^{(c)}, T\right\}; \\ X3 = \{Q_{\text{ст}}\}; \end{cases} \tag{5.41}$$

де $Q_{\text{СПС}}$, $Q_{\text{ме}}$ – середні продуктивності смесеприготовительной і плавильною підсистем за відрізок часу $[0, \tau_{\text{u}}]$;

$Q_{\text{ст}}$ – маса стрижнів, необхідна для виконання програми цеху на відрізку $[0, \tau_u]$;

$M_{\kappa_i}^{(c)}$ – числові значення і-елемента в сплаві;

T – температура сплаву на виході з плавильної підсистеми.

Вхідні вектори $X1$, $X2$, $X3$ є вихідними векторами основних показників ефективності функціонування підсистем сумішеприготувальної, плавильної і стрижневою.

2. Визначаємо числові значення вихідних параметрів ливарного цеху

$$Y = \{M_{\text{отл}}, R_i\}, \tag{5.42}$$

3. Середній випуск виливків $M_{\text{отл}}(\tau)$ при функціонуванні n автоматичних або потокових ліній продуктивністю $Q_i^{(АЛЛ)}$ в інтервалі $[0, \tau_u]$ обчислюємо за формулою (5.40).

4. Визначаємо контрольовані параметри якості виливків.

Розроблено загальний алгоритм, застосовний для моделювання будь-якого ливарного цеху.

Для кількісного опису роботи ливарного цеху необхідно:

- створити імовірнісно-автоматні моделі елементів основних підсистем ливарного цеху для розв’язання практичних завдань, пов'язаних з їх проектуванням, реконструкцією і керування;
- вивчити причини і частоту виникнення відмов основного устаткування ливарного цеху;
- розробити математичні моделі технологічних властивостей металу й суміші і вивчити зміни їх параметрів із часом;

- вивчити вплив параметрів кожної з підсистем на кількість і якість виливків, що виготовляються;
- визначити можливості синхронізації роботи підсистем ливарного цеху з метою підвищення його продуктивності;
- розробити програмний комплекс для імітаційного моделювання роботи основних підрозділів ливарного цеху і цеху в цілому.

5.4. Імітаційна модель функціонування ливарного цеху

При моделюванні складних виробничих систем, до яких належать і ливарні цехи, використовують імітаційне моделювання. Це єдиний, існуючий на сьогодні метод, який дозволяє знаходити характеристики системи в цілому. Тільки на основі імітаційного моделювання можуть бути розв’язані завдання, пов'язані з визначенням функції переходу в імовірнісно-автоматні моделі, і вивчена динаміка зміни характеристик системи.

Імітаційна модель системи реалізується на ЕОМ за допомогою програми, яка дозволяє імітувати динамічні процеси, що відбуваються в реальній системі.

Дотепер основні обмеження на складність моделей, що реалізовуються, визначалися характеристиками використовуваних ЕОМ. Нові можливості в розв’язанні завдань з'явилися через радикальну зміну базової обчислювальної техніки на ПЕВМ класу Pentium і вищих моделей типу VAX і WC. До сьогодні сформувалася досить чітка методологія імітаційного моделювання, що містить такні основні етапи побудови імітаційної моделі того або іншого об'єкта :

- формулювання комплексу завдань дослідження об'єкта;
- побудову концептуальної моделі об'єкта (складання змістовного опису об'єкта, попередню його формалізацію);
- формування комплексу вимог до моделюючої програми;
- побудову математичної моделі об'єкта (формування структури системи, складання математичних описів елементів системи і зовнішніх дій);
- розробку моделюючої програму (моделюючого алгоритма);
- перевірку роботи (верифікацію) імітаційної моделі;
- оцінку її придатності.

Передусім формулюють комплекс завдань дослідження і його змістовний опис. На етапі складання концептуальної моделі об'єктау моделювання здійснюють вибір способу формалізації, що визначає специфіку реалізації і використання імітаційної моделі на подальших технологічних етапах.

На етапі формалізації роблять опис компонент об'єкта моделювання; подання взаємодії компонент системи за інформацією; відділення параметрів моделі від алгоритмів, що реалізовують функції компонент системи; подання взаємодії компонент за керуванням.

При переході від формального до математичного опису імітаційної моделі необхідно автоматизувати оцінку похибки імітації, обумовлену наявністю в імітаційній моделі неідеальних генераторів псевдовипадкових чисел, здійснити організацію внутрішньої синхронізації між компонентами моделі, використати загальні ресурси компонент моделі і організувати обмін інформацією між компонентами моделі.

Перевірку адекватності імітаційної моделі об'єкта моделювання здійснювали за допомогою розробки засобів проведення незалежних прогонів імітаційної моделі і порівняння відгуків, перевірки гіпотез про близькість середніх значень відгуку в імітаційній моделі і реальній системі, спостереження за відхиленням відгуку імітаційної моделі від відгуків, що отримуються при дослідженні реальної системи.

Найбільший ступінь автоматизації робіт досягається на найбільш трудомісткому етапі програмування імітаційних моделей через кодування програм компонент моделі і забезпечення паралельного і автономного налаодження, а також комплексне налагодження моделі і документування процесу програмування імітаційної моделі.

Етап планування експериментів містив два види функціональних дій. Перший – це зменшення кількості імітаційних експериментів, визначення інтервалів зміни параметрів моделі і планування пошуку джерел помилок. Другий – це функції, які забезпечуються класичними методами планування експериментів: складання планів експериментів, пошук регресійних залежностей та ін. Ці функції, а також засоби автоматизації етапу експлуатації імітаційних моделей (засоби автоматизації подання результатів моделювання, організації серії модельних експериментів, збору статистичних даних і обробки результатів імітації, видачі повідомлень про перебіг імітації, введення-виведення інформації у вигляді, зручному для аналізу результатів) було оформлено у вигляді бібліотек стандартних процедур.

Для моделювання ливарної системи на ЕОМ був створений спеціальний моделюючий алгоритм. Залежно від способу просування модельного часу використали два підходи побудови моделюючого алгоритму – за особливими станами і за Δt (спосіб фіксованого кроку). Якщо моменти появи подій, не відомих заздалегідь, рівномірно розподілені на усьому інтервалі моделювання, або подій багато і вони з'являються групами, застосовували другий підхід, в інших випадках використали перший підхід як економічніший.

При використанні як формальної математичної схеми імовірнісного автомата для імітаційного моделювання задається єдиноначальний стан. При цьому в системі виділяють параметри незмінні і змінювані в процесі моделювання, доступні користувачеві для завдання експерименту з моделлю. Дані, що описують початковий стан, вводяться на етапі формування замовлення на моделювання.

Програмний модуль для опису функціонування складної ливарної системи є програмою на мові Delphi, в якій описуються структури станів імовірнісних автоматів, структури видаваних сигналів, що приймаються, їх реакція

на особливий стан і настроюються початкові стани імовірнісних автоматів на характеристики конкретної модельованої системи.

Для завдання початкового стану кожного імовірнісного автомата множина його фазових координат ділиться на підмножину тих, що настроюються, і підмножину робочих координат станів. У підмножині координат стану, що настроюються, виділяються параметри: незмінні і змінювані в процесі моделювання, доступні користувачеві для завдання експериментів із моделлю. Дані, що описують початковий стан, вводяться на етапі формування замовлення на моделювання. Окрім модулів імовірнісних автоматів, що імітують функціонування елементів модельованої системи, в системному комплексі використовуються модулі, що реалізовують алгоритми розв’язання завдань дослідження.

Дані для створення моделі і проведення з нею експерименту подано у вигляді замовлень. Опис модельованої системи відокремлений від опису експерименту з моделлю. Це зумовило можливість легко варіювати експерименти з моделями, а також змінювати самі моделі.

Структурно-програмний комплекс, наведений на рис. 5.2, складається з двох частин: системної, незалежної від предметної області, і прикладної, що являє собою конкретну предметну область.

Стандартний вигляд математичних моделей елементів системи і програм імітації процесу функціонування системи дозволяють отримувати єдину форму результатів моделювання.

Основною частиною програмного комплексу є програма підтримки імітації (імітатор), призначена для відтворення траєкторії зміни стану модельованої системи в модельному часі, що є обов'язковою частиною усіх програмних моделей. Імітатор виконує такі функції: організовує і видає календар подій, здійснює передачу сигналів від одного імовірнісного автомата до іншого, забезпечує квазіпаралельне виконання запланованих подій, формує результати моделювання.

Структурно-функціональний підхід до формалізації досліджуваного об'єкта знижує обмеження за складнощами, які неминуче виникають при спробі подати процес функціонування системи в цілому як послідовність взаємозв'язаних системних подій для запису його на мові моделювання або у вигляді моделюючого алгоритму на мові програмування.

Деякі програми можуть бути написані не лише на мові Delphi, але і на інших мовах, а потім скомпоновані в одну програму за допомогою спеціальних директив компілятора мови Delphi.

Щодо ливарних систем методику імітаційного моделювання використана для вивчення таких процесів, що проходять у системі :

- моделювання роботи функціональних підсистем ливарного цеху;
- впливів роботи підсистем на кількість і якість виливків, що випускаються;
- зміни параметрів, що призводять до виникнення відмов у роботі окремих вузлів і агрегатів;

- зміни загальної надійності підсистем упродовж періоду їх функціонування;
- залежностей розкиду параметрів, отримуваних формувальних сумішей, сплавів і виливків від коливань у технології їх приготування.

Процес функціонування підсистем ливарного цеху описаний за допомогою імовірнісно-детермінованих моделей, при цьому основні закономірності, на які накладається вплив великої кількості випадкових змінних, мають детермінований характер. Тому для вивчення динаміки підсистем ливарного цеху використали комбіновані імовірнісно-детерміновані моделі, в яких дія випадкових чинників реалізується за допомогою імітаційних методів.

Наприклад, до основних детермінованих закономірностей, що описують процес функціонування ливарних підсистем, належать:

- залежність кількості формувальної суміші і металу, що видаються на автоматичні ливарні лінії, від продуктивності і робочих характеристик основного і допоміжного устаткування;
- залежність продуктивності автоматичних ливарних ліній від часу їх роботи;
- формування технологічних властивостей формувальної суміші і сплавів залежно від кількості початкових матеріалів і робочих параметрів устаткування, а також характеристик процесу їх приготування і схеми транспортування.

До випадкових чинників, які можуть бути вивчені на основі використання методу імітаційного моделювання, належать такі:

- чинники, що визначають надійність окремих елементів і ливарних підсистем;
- коливання об'ємів і властивостей початкових матеріалів і сировини;
- випадкові процеси зміни параметрів вузлів і агрегатів, що спричиняють виникнення раптових відмов;
- зміна нормативного часу приготування суміші за випадкових відмов сумішеприготувальних агрегатів у межах однієї сумішеприготувальної системи;
- зміна загальної кількості формувальної суміші і металу в підсистемах залежно від режиму їх роботи.

Облік випадкових чинників здійснюється методом числової імітації, отриманих функцій розподілу, що накладаються на детерміновані залежності. Для цього визначаються емпіричні функції розподілу, що описують розсіяння характеристик початкових формувальних і шихтових матеріалів, сировини, а також величин просипу для транспортного обладнання системи сумішеприготування. Облік випадкових чинників, пов'язаних із надійністю вузлів і агрегатів, виконують на основі розробки моделей їх відмов і обліку отриманих даних у загальній моделі функціонування підсистем.

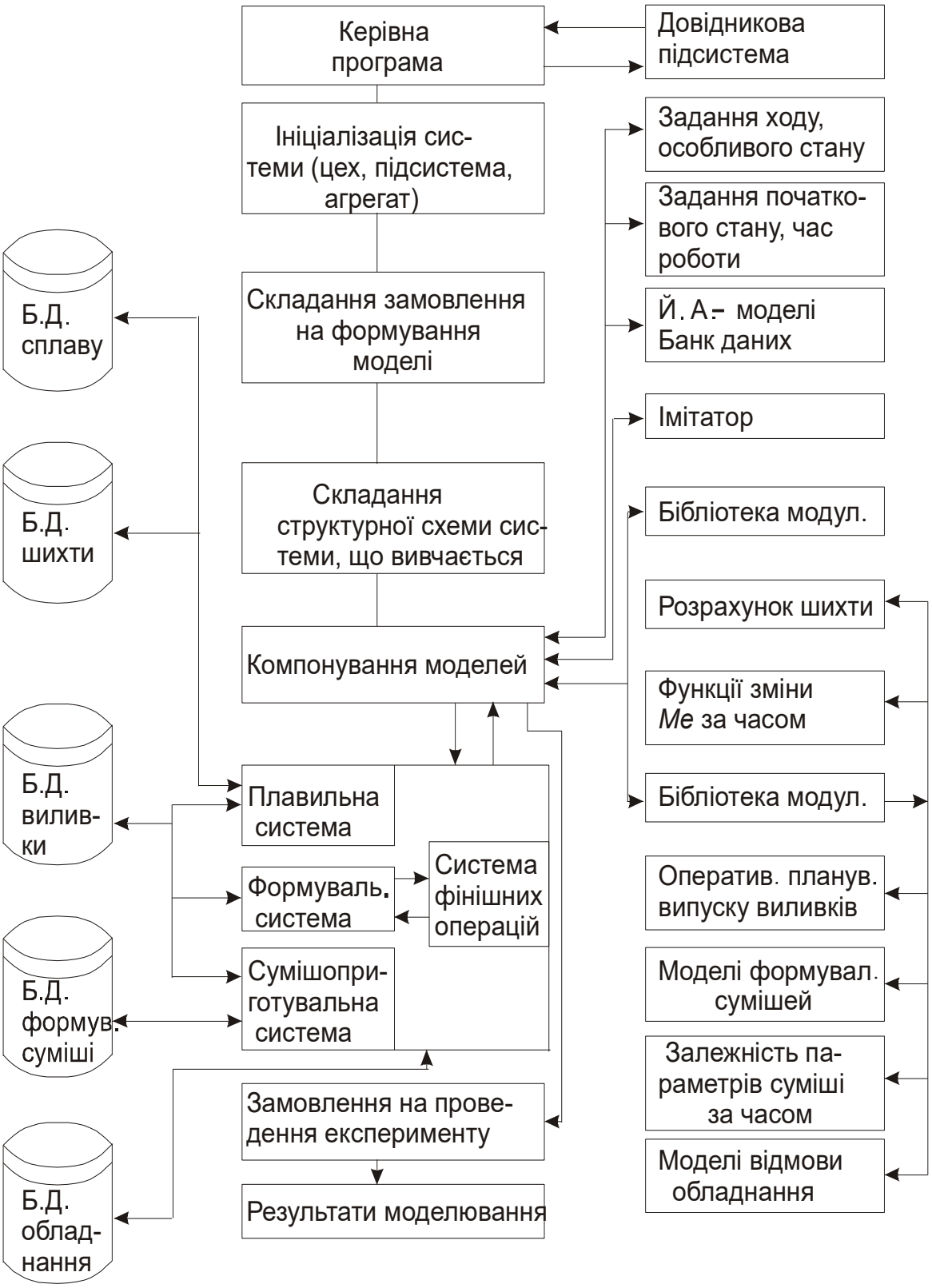


Рис. 5.2. Структурно-програмний комплекс із моделювання роботи ливарного цеху

На підставі викладеного можна зробити висновки.

1. Структуру ливарного цеху доцільно подати в ієрархічному вигляді як ступеневу. Перший рівень – ливарний цех як єдине ціле – відбиває зв'язок між його основними функціональними підрозділами. На другому рівні розглядаються окремі підсистеми ливарного цеху: сумішеприготувальна, плавильна, формувальна і так далі. На третьому рівні елементи підсистем розглядаються у вигляді комплексу технологічного устаткування, що має загальне призначення, на четвертому – у вигляді окремих машин і агрегатів, на п'ятому – елементи структури постають вузлами і окремими деталями.

2. Структури ливарних підсистем і система ливарного цеху в цілому описуються графом типу прадерева, в яких відношення між вершинами виражено дугами.

3. Ливарні системи – це транспортні системи, оскільки їх функціонування безперервне в часі і зводиться до переміщення сировини і напівфабрикатів, що проходять послідовну обробку на технологічному устаткуванні до отримання готового виливка.

4. Елементи і підсистеми ливарного цеху відзначаються великою різнорідністю за своєю будовою і виконуваними функціями, тому їх необхідно описувати за допомогою єдиного математичного апарату, який вибрано як імовірнісні автомати.

5. Функціонування кожної системи подаються у вигляді комплексу взаємодіючих імовірнісних автоматів, характеристики яких ідентифіковано і враховують особливості конкретних ливарних цехів і їх підрозділів.

6. Для дослідження ливарного цеху розроблено загальну математичну модель його функціонування, основними компонентами якої є загальні математичні моделі функціональних підрозділів – цехи, створені на основі комплексного використання структурних, аналітичних і експериментальних методів дослідження. Системні характеристики ливарного цеху визначаються як результат взаємодії між його основними підсистемами.

7. Загальні математичні моделі систем ливарного цеху є основним інструментом для розв’язання практичних завдань, пов'язаних з їх проектуванням, експлуатацією і керування. Структурно вони є сукупністю залежностей, що описують зміну кількості та якості формувальної суміші, металу, виливків залежно від параметрів систем і стану зовнішнього середовища.

8. Процес функціонування підсистем адекватно описується за допомогою імовірнісно-детермінованих моделей, при цьому основні залежності, на які накладається вплив великої кількості випадкових змінних, мають детермінований характер.

9. Для обліку впливу випадкових чинників при дослідженні ливарних систем використаний метод імітаційного моделювання. Це дозволяє визначати функцію переходу в імовірнісно-автоматні моделі, а також вивчати динаміку зміни надійності окремих агрегатів і систем у цілому. Для дослідження надійності ливарних систем необхідно вивчити процеси, що призводять до виникнення основних відмов устаткування.

10. Для дослідження роботи ливарного цеху і його підрозділів у системі Windows був створений програмно-структурний комплекс, основними початковими даними якого є інформація, отримана при дослідженні функціональних підрозділів цеху.

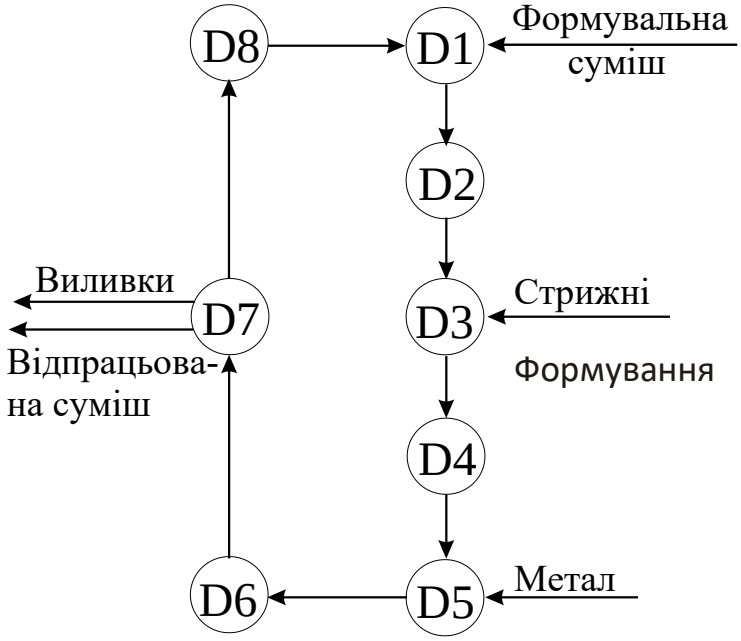
Контрольні запитання

1. Що являє собою структурна модель ливарного цеху?
2. Умови раціональної побудови і функціонування ливарних систем.
3. Опис об'єктів ливарного виробництва за допомогою імовірнісних автоматів.
4. Основні характеристики імовірнісно-автоматних моделей елементів ливарного цеху.
5. Наведить загальну математичну модель ливарного цеху.
6. Алгоритм функціонування ливарного цеху.
7. Імітаційна модель функціонування ливарного цеху.

РОЗДІЛ 6
ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ФОРМУВАЛЬНИХ СИСТЕМ ЛИВАРНИХ ЦЕХІВ

6.1. Структурні схеми формувальних систем ливарного цеху

Для опису загальної структурної схеми формувальної системи (рис. 6.1) виділено такі підсистеми (DI ≡ Di, I = $\overline{1,8}$).



Підсистеми:
D1 – виготовлення півформ;
D2 – транспортування півформ;
D3 – проставлення стрижнів;
D4 – складання форм;
D5 – заливання форм металом;
D6 – охолодження виливків;
D7 – відділення виливків від суміші;
D8 – повернення порожніх опок.

Рис. 6.1. Загальна структурна схема формувальної системи

D1. Виготовлення півформ. До складу підсистеми входять формувальні автомати, а також такі пристрої як механізми зрізування напуску суміші, механізми ковзаючого оснащення, наколювання вентиляційних каналів та ін. У деяких випадках формувальні автомати можуть бути замінені піскометами.

D2. Транспортування півформ до ділянки проставленя стрижнів. Черінь-система зазвичай складається з кантувачів, механізмів підйому, штовхачів, перестановлювачів, установлювачів півформ і так далі.

D3. Простановлення стрижнів. Установка стрижнів у півформи здійснюється або вручну, або за допомогою установлювачів стрижнів у півформи.

D4. Складання форм. Підсистема містить збирачі форм і вантажоукладачі.

D5. Заливання форм металом.

D6. Охолодження виливків.

D7. Відділення виливків від суміші. У підсистему входять обладнання витискування грудки горілої суміші з виливком, вибивальні вібраційні та інерційні решітки, галтувальний барабан для руйнування безопочных форм із виливками.

D8. Повернення порожніх опок. Підсистема містить транспортні засоби, розпарувачі, обладнання очищення опок і майданчиків візків, механізми повернення плит покидьків, штовхачі, перестановлювачі та ін.

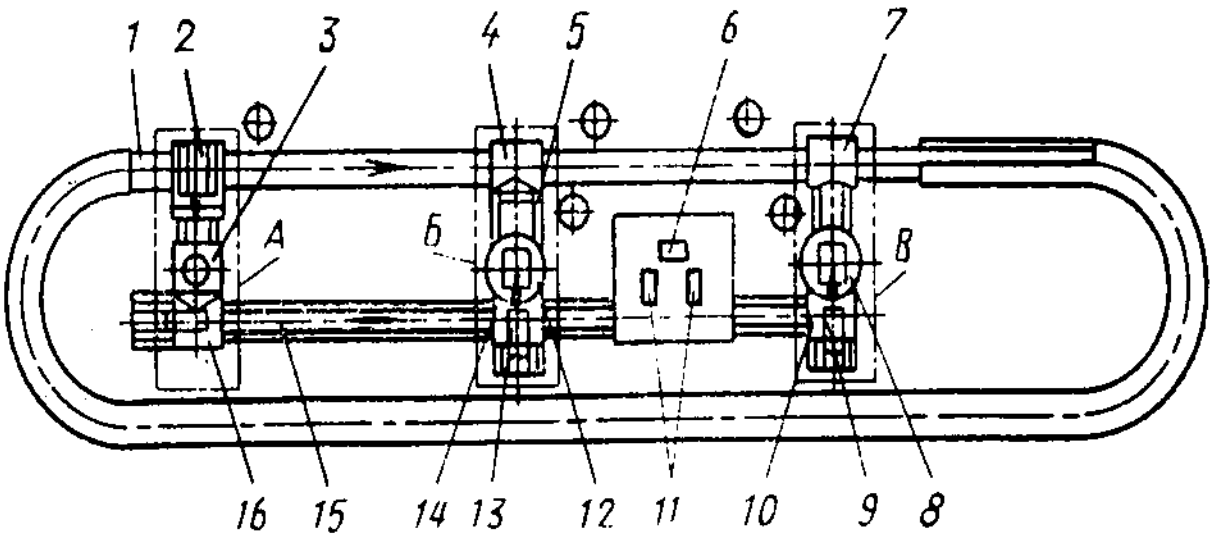
Потоково-механізовані і автоматичні лінії формування, заливання, вибивання є основними технологічними комплексами сучасних формувальних систем ливарного цеху. На автоматичних лініях формування виконуються операції: виготовлення півформ, простановленя стрижнів, складання форм, заливання форм металом, твердіння і часткового охолодження виливків, відділення виливків від суміші. Вони є складними системами технологічного і допоміжного устаткування, організованими таким чином, що в результаті їх роботи виконується конкретне завдання – отримання придатних виливків.

Лінії формування мають певну структуру, причому кожен з її елементів здійснює точно визначену функцію, і знаходиться у взаємному зв'язку з іншими елементами лінії. Лінії формування мають різну складність і велику кількість варіантів компонувань, наявність великої кількості елементів і транспортних засобів, тому для їх дослідження також раціонально використати теорію графів.

Структурна схема АЛЛ визначається вибраним технологічним процесом (безопочне, опочне формування), типом формувальних автоматів і ливарного конвеєра, розташуванням формувальних автоматів щодо конвеєра, довжиною і видом гілок охолодження та ін. При дослідженні конкретної АЛЛ (Ш рівень) її елементи уявляємо на рівні агрегатів (машин і механізмів), які виконують закінчені технологічні операції, наприклад, формувальний автомат, кантувач та ін.

Як базові об'єкти було вибрано автоматичні ливарні лінії формування мод. 696 ХТЗ і типу ІЛ 225, встановлено в сталеливарному цеху ХТЗ. АЛЛ

мод. 696 призначена для виготовлення чавунних і сталевих виливків великої номенклатури в умовах масового і багатосерійного виробництва в опоках розміром 900×600×250 мм. Схему АЛЛ подано на рис. 6.2.



⊕ - робочі місця

Рис. 6.2. Схема АЛЛ моделі 696

Робота АЛЛ моделі 696 розпочинається з переміщення охолодженої залитої форми з майданчика конвеєра *1* механізмом зіштовхування форм *2* на проміжну позицію блока вибивання *А*, а попередня форма передається на позицію виштовхування грудки *3*, де формувальна суміш з виливків видавлюється на інерційні решітки, на яких виливки відділяються від формувальної суміші. Після виштовхування грудки звільнені від формувальної суміші і виливків порожні опоки при переміщенні на крок потрапляють на стіл механізму підйому нерозпарованих опок *16*, з якого вони перештовхуються на роликову трасу конвеєра *15* порожніх опок. Потім спарені опоки переміщаються на позицію розпарувача *14* опок блока виготовлення нижніх півформ, де вони розділяються, верхня опока переміщається на позицію механізму *10* знімання верхніх опок блока в виготовлення верхніх півформ.

Нижня опока опускається столом розпарувача на приймальні планки механізму *13* подачі нижніх опок, а верхня опока столом механізму знімання опок – на приймальні планки механізму *9* подачі верхніх опок. Нижні опоки механізмом *13* переміщаються на крок у піскострільно-пресовий формувальний автомат (ФА) *12*, де виготовляються нижні півформи. У кантувачу *5* півформа обертається на 180° і надходить на захоплювач установлювача *4* нижніх півформ на майданчик конвеєра *1*. Верхні опоки механізмом *9* переміщаються на крок у ФА *8*, де виготовляються верхні півформи, далі – на проміж-

ну позицію і на захоплювач збирача форм *7*. На ділянці конвеєра *1* між установником *4* і збирачем форм *7* вручну в нижній півформі проставляються стрижні і зібрана форма встановлювачем *4* і збирачем форм *7* на майданчик конвеєра. При подальшому переміщенні конвеєра *1* зібрані форми потрапляють на ділянку заливання, де вручну заливаються металом, а потім охолоджуються при переміщенні на позицію блока вибивання, після чого цикл роботи повторюється.

Керування роботою механізмів АЛЛ і ФА здійснюється кроковими пневмокомандоапаратами відповідно *6* і *11* конструкції ХТЗ і електропневматичною системою керування на базі елементів, розроблених НІІтракторосельхозмашем. Автоматична лінія ливарні типу ІЛ 225 призначена для виготовлення виливків з чавуну і сталі в сирих одноразових піщано-глинистих формах в умовах багатосерійного і масового виробництва. Схему лінії подано на рис. 6.3.

Лінію розділено на п'ять технологічних ділянок, кожна з яких керується автономно від власної станції керування.

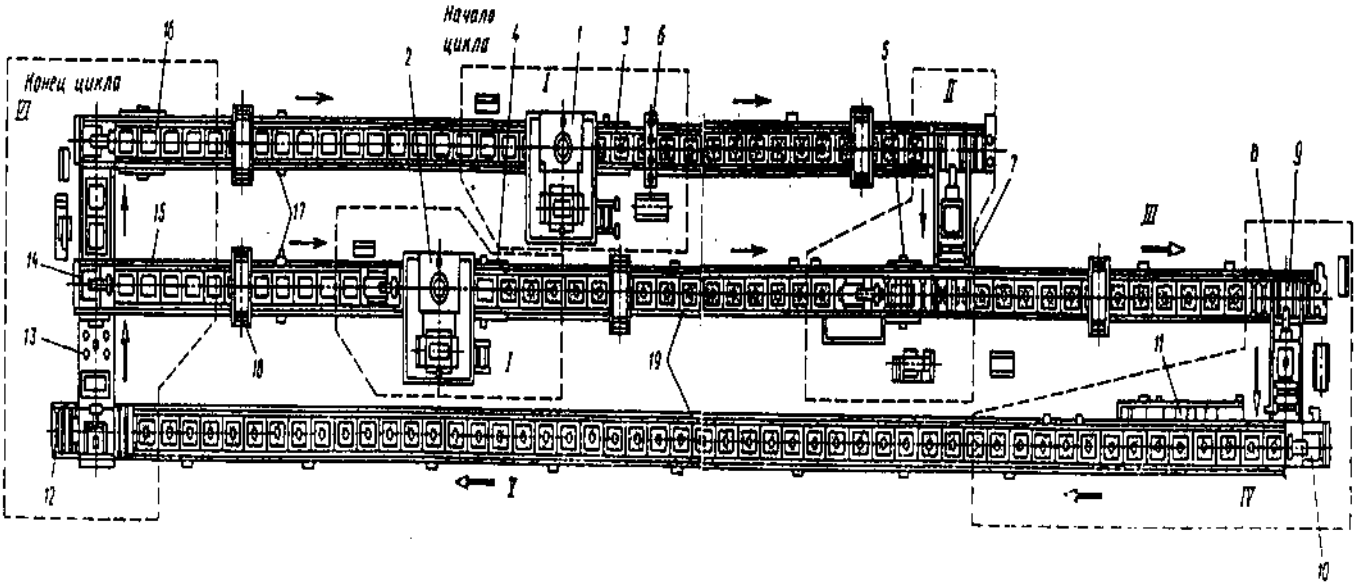


Рис. 6.3. Схема комплексної автоматичної лінії ІЛ 225:

1 – формувальний автомат нижніх півформ; 2 – формувальний автомат верхніх півформ; 3 – кантувач нижніх півформ; 4 і 5 – кантувачі верхніх півформ; 6 – механізм зрізування надлишків суміші;7 – збирач форм; 8 – відсікач; 9 – уніфікований штовхач; 10 – механізм підйому підопочних плит; 11 – механізм притискування форм при заливанні; 12 – механізм опускання підопочних щитків; 13 – установка витискування форм з опок; 14 – розпарувач; 15 – механізм підйому опок; 16 – кантувач нижніх опок;17 – механізм очищення опок; 18 – перехідний місток; 19 – секція роликового конвеєра. Ділянки

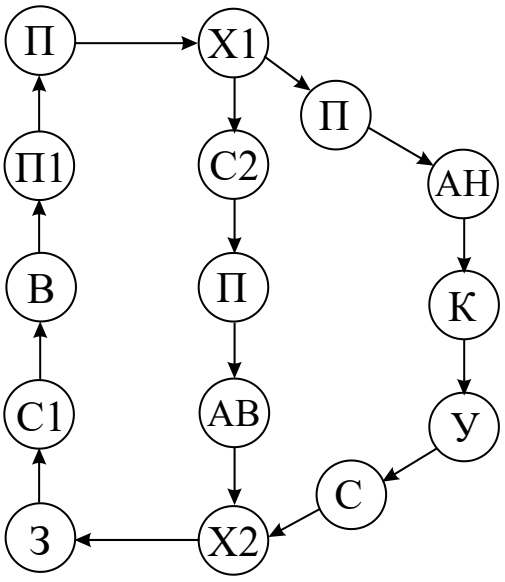
лінії : I - формування; II, III - складання форм; IV - заливання; V - охолодження; VI – вибивання.

Форми виготовляють методом верхнього пресування під високим питомим тиском при нижньому розташуванні модельного комплекту на пневмо-важільних формувальних автоматах, які є базовим формотворним агрегатом для ліній цього типу. Рівномірність ущільнення суміші у формі забезпечується використанням диференціальної багатоплунжерної головки і додатковою вібрацією.

Технологічний цикл виготовлення опок включає такі операції: роздільне формування нижніх і верхніх півформ, кантування нижніх півформ на 180°, зрізування надлишків суміші з контрпорядку нижніх півформ, простановлення у в нижні півформи стрижнів, двократне кантування верхніх півформ, складання форм, укладання форм на підопочні плити, притискування зібраних півформ перед заливанням, заливання, охолодження форм, зняття форм із підопочних плит, витискування грудки з опок, вибивання виливок, розпарування комплекту порожньої опоки, очищення опоки від залишків суміш і подання вони на ділянку формування.

Для дослідження роботи АЛЛ мод. 696 ХТЗ і ІЛ 225 використовуємо замкнуті орієнтовані графи, в яких вкажемо напрямок опок, півформ і форм.

Структурні схеми ліній подано на рис. 6.4 і 6.5.



Х1 – розпарувач;
Х2 – збирач форм;
П – механізми перестановки і подання опок;
П1 – підйом нерозпарованих опок;
У – установлювач нижніх опок;
С1 – зіштовхувач форм;

С2 – знімач верхніх опок;
АВ, АН – однопозиційні ФА для верхніх і нижніх півформ;
У – установка для вибивання форм;
З, С – ділянки заливання і простановлення стрижнів;
К – кантувач.

Рис. 6.4. Структурна схема АЛЛ мод. 696 ХТЗ.

Оскільки АЛЛ є автоматичними пристроями, з’єднаними транспортними засобами, граф, складений певним чином, може ілюструвати компонування і роботу лінії. Граф відображає дії механізмів і пристроїв, яким відповідають способи з'єднання його вершин дугами.

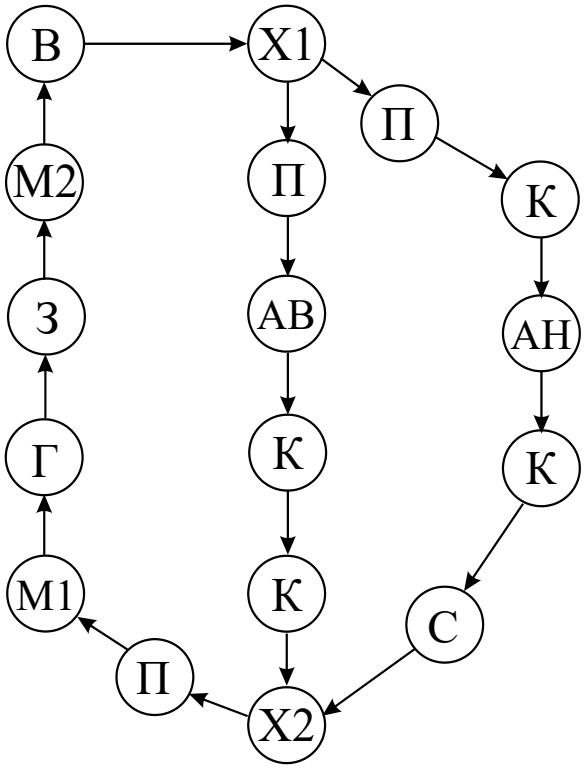


Рис. 6.5. Структурна схема АЛЛ ІЛ 225.

Х1 – розпарувач;
Х2 – збирач форм;
П – механізми перестановки і подання опок;
Г – механізм накладення вантажів;
М1, М2 – механізми підйому і опускання підопочних щитків;
АВ, АН – однопозиційні ФА для верхніх і нижніх півформ;
У – установка для вибивання форм;
З, С – ділянки заливання і простановлення стрижнів;
К – кантувач.

Орієнтований граф і взаємозв'язок його компонентів характеризуються матрицями з'єднань (інцидентності), суміжності, відстаней та ін. Для характеристики графів АЛЛ достатньо користуватися матрицями суміжності і відстаней [40].

Визначник матриці суміжності може якоюсь мірою характеризувати компонування лінії, а вид матриці – взаємозв'язки між елементами АЛЛ. Чим менше абсолютне значення визначника, тим простіше і компактніше лінія.

Матрицю відстаней графа використано при оцінці міжопераційних транспортних зв'язків і знаходженні найкоротшої відстані (ланцюга) між вузлами автоматичної лінії. Члени матриці відстаней указують, скільки гілок відділяють цю вершину від інших. Кожну гілку можна охарактеризувати її довжиною («вагою»). Тому мінімізація визначника матриці дає можливість зменшити площу, яку займає лінія.

Для аналізу динаміки роботи лінії складається граф відповідно до усіх технологічних операцій отримання виливків, починаючи від подання порожніх опок до формувального блока і закінчуючи розділенням опок, суміші і виливків [56]. Цей граф, що називається графом потоків, враховує підсумовування і ділення потоків порожніх опок, формувальної суміші, півформ, стрижнів, зібраних форм, рідкого металу і готових виливок.

Таким чином, методи теоретичного аналізу АЛЛ за їх структурними схемами дозволяють вибрати найкраще компонування автоматичних обладнань лінії і забезпечити оптимальні умови її роботи.

Аналіз компонувань АЛЛ, встановлених у СЛЦ ХТЗ, показує, що вони являють собою замкнуті орієнтовані графи, в яких стрілками вказаний напрямок потоків опок, півформ і форм. Складними вузлами вважаємо елементи лінії, які механічно або ділять потік (наприклад, розпарувач), або підсумовують потік (збирач форм). Елементарним вважаємо вузли графа, через які потік проходить не розділяючись (однопозиційний формувальний автомат). У матриці суміжності враховували «вагу» гілки, що поєднує тільки складні вузли. При цьому як вагу брали кількість простих вузлів на гілці (структурні елементи лінії) плюс саме з'єднання (транспортний засіб – конвеєр).

Матриці суміжності мають вигляд:

$$M_c^{'} = \begin{array}{c|cc} & X_1 & X_2 \\ X_1 & 0 & 10 \\ X_2 & 6 & 0 \end{array}; \qquad M_c^{''} = \begin{array}{c|cc} & X_1 & X_2 \\ X_1 & 0 & 11 \\ X_2 & 7 & 0 \end{array},$$

де $M_c^{'}$ – матриця суміжності АЛЛ мод. 696;

$M_c^{''}$ – матриця суміжності АЛЛ ІЛ 225.

Визначники матриць :

$$\Delta' = |-60|; \qquad \Delta'' = |-77|.$$

Коефіцієнти асиметричності графів

$$k'_{\text{ас}} = 0{,}6; \qquad k''_{\text{ас}} = 0{,}64,$$

а коефіцієнти потоковості

$$k'_{\text{пот}} = 0{,}4; \qquad k''_{\text{пот}} = 0{,}36.$$

Аналіз показує, що компонування АЛЛ мод. 696 простіше і коефіцієнт потоковості більший.

Таким чином, використовуючи замкнутий орієнтований скінченний граф АЛЛ, можна не лише характеризувати структуру лінії, але і за абсолютною величиною визначника робити висновки про складність компонувань.

6.2. Імовірнісно-автоматні моделі формувальних систем

Згідно із структурною схемою формувальної системи (рис. 8.1) визначаємо для кожного її елемента вид вхідного і вихідного алфавіту, функцію внутрішнього стану і функцію виходу.

Характеристики імовірнісно-автоматних моделей елементів формувальної системи, наведено в табл. 6.1.

1. Імовірнісний автомат, що моделює процес виготовлення ливарної форми, описується так.

Вхідний алфавіт формувального автомата

$$X_1 = \{\text{О}, q_1, \sigma, W, \Gamma, \delta_0, x_1, x_2, \ldots, x_n\}, \qquad (6.1)$$

де О – опока;

q_1 – кількість суміші, що надходить у формувальний автомат;

δ_0 – насипна густина суміші;

$x_1, x_2..., x_n$ – параметри формувального автомата, наприклад, тиск повітря при піскострільному процесі, тиск пресування або підпресовування та ін.;

n – кількість контрольованих параметрів устаткування.

Вихідний алфавіт

$$Y_1 = \{\text{ПФ}, q_2, \delta_1, H\}, \qquad (6.2)$$

де ПФ – півформа;

q_2 – кількість формувальної суміші в опоці;

δ_1 – густина формувальної суміші;

H – твердість форми.

Аналогічно прийнятим положенням при моделюванні сумішепроготувальної і плавильної систем вважаємо, що імовірність безвідмовної роботи елементів формувальної системи визначається поступовими і раптовими відмовами основних вузлів і агрегатів, а також фоновою вірогідністю безвідмовної роботи допоміжних механізмів, дія яких виявляється незалежно один від одного.

Функція внутрішнього стану φ подається у вигляді

$$P^{(\text{ФА})}(\tau) = P_{\text{п}}^{(\text{ФА})}(\tau) P_{\text{вн}}^{(\text{ФА})}(\tau) P_{\text{ф}}^{(\text{ФА})}(\tau) P_{\text{спс}}(\tau), \qquad (6.3)$$

де Р(ФА) (τ) – імовірність безвідмовної роботи формувального автомата.

Функцію виходу ψ для імовірнісного автомата, що моделює роботу формувального автомата, можна подати у вигляді:

$$q_2 = \begin{cases} q_1 - \Delta q, \text{з імовірністю } P^{(\text{ФА})}(\tau); \\ \\ 0, \quad \text{з імовірністю } 1 - P^{(\text{ФА})}(\tau); \end{cases} \qquad (6.4)$$

$$\delta_1 = f(\delta_0, x_1, x_2, \ldots, x_n) \pm \Delta_1; \qquad (6.5)$$

$$H = f(W, \Gamma, x_1, x_2, \ldots, x_n) \pm \Delta_2, \qquad (6.6)$$

де Δq –кількість суміші розсипаної і зрізаної.

Рівняння (6.5)–(6.6) відбивають залежності фізико-механічних властивостей ливарної форми і можуть бути знайдені на основі цих промислових експериментів. Випадкова помилка Δ_i, яка характеризує точність виміру параметра, що вивчається, для кожної реалізації визначається на основі використання імітаційного моделювання.

Таблиця 6.1 – Характеристики імовірнісно-автоматних моделей елементів формувальної системи

Імовірнісний автомат	Вхідний алфавіт	Вихідний алфавіт	Функція внутрішнього стану	Функція виходу
1. Формувальний автомат	$X_1=\{0, q_1, \sigma, W, \Gamma, \delta_0, x_1, x_2,\ldots, x_n\}$	$Y_1=\{\text{ПФ}, q_2, \delta_1, H\}$	$P^{(\text{ФА})}(\tau)=P_{\text{п}}^{(\text{ФА})}(\tau)\times$ $\times P_{\text{вн}}^{(\text{ФА})}(\tau)P_{\text{ф}}^{(\text{ФА})}(\tau)P_{\text{спс}}(\tau)$	$q_2=\begin{cases}q_1-\Delta q, \text{з імовірністю } P^{(\text{ФА})}(\tau)\\ 0, \quad \text{з імовірністю } 1-P^{(\text{ФА})}(\tau)\end{cases}$ $\delta_1=f(\delta_0, x_1, x_2, \ldots, x_n)\pm\Delta_1$ $H=f(W, \Gamma, x_1, x_2, \ldots, x_n)\pm\Delta_2$
2. Транспортування півформ	$X_2=\{\text{ПФ}, q_2, \delta_1, H\}$	$Y_2=\{\text{ПФ}, q_3, \delta_1, H1\}$	$P^{(\text{тр})}(\tau)=\prod_{i=1}^{n}P_i(\tau)$	$q_3=\begin{cases}q_2, \text{з імовірністю } P^{(\text{тр})}(\tau)\\ 0, \text{ з імовірністю } 1-P^{(\text{тр})}(\tau)\end{cases}$ $H_1=H-a\tau$
3. Простановлення стрижнів	$X_3=\{\text{ПФ}_{\text{н}}, q_3, \delta_1, H\}$	$Y_3=\{\text{ПФ}_{\text{н}}, q_4, \delta_1, H\}$	$P_{\text{ст}}(\tau)$	$q_4=\begin{cases}q_3+C, \text{з імовірністю } P_{\text{ст}}(\tau)\\ q_3, \quad \text{з імовірністю } 1-P_{\text{ст}}(\tau)\end{cases}$
4. Складання форм	$X_4=\{\text{ПФ}_{\text{н}}, \text{ПФ}_{\text{в}}, q_2, q_4, \delta_1, H1\}$	$Y_4=\{\text{ЛФ}, q_5, \delta_1, H1\}$	$P^{(\text{сб})}(\tau)=P_{\text{п}}^{(\text{сб})}(\tau)\times$ $\times P_{\text{вн}}^{(\text{сб})}(\tau)P_{\text{ф}}^{(\text{сб})}(\tau)$	$q_5=\begin{cases}q_2+q_4, \text{з імовірністю } P^{(\text{сб})}(\tau)\\ 0, \quad \text{з імовірністю } 1-P^{(\text{сб})}(\tau)\end{cases}$

5. Заливавння форм металом	X_5={ЛФ, q_5, δ_1, $H1$}	Y_5={ЛФ, q_6, T}	$P_{\text{мет}}(\tau)$	$q_6 = \begin{cases} q_5 + Me, \text{ з імовірністю } P_{\text{мет}}(\tau) \\ q_5, \quad \text{з імовірністю } 1 - P_{\text{мет}}(\tau) \end{cases}$
6. Охолодження виливків	X_6={ЛФ, q_6, T}	Y_6={ЛФ, q_7, $T1$}	$P^{(\text{лк})}(\tau) = \prod_{i=1}^{3} P_i^{(\text{лк})}(\tau)$	$q_7 = \begin{cases} q_6, \text{ з імовірністю } P^{(\text{лк})}(\tau) \\ 0, \text{ з імовірністю } 1 - P^{(\text{лк})}(\tau) \end{cases}$
7. Відділення виливка від суміші	X_7={ЛФ, q_7, $T1$}	Y_7={$O_{\text{н}}$, O_6, q_8, $M_{\text{отл}}$}	$P^{\text{в}}(\tau) = P_{\text{п}}^{(\text{в})}(\tau) P_{\text{вн}}^{(\text{в})}(\tau) \times$ $\times P_{\text{ф}}^{(\text{в})}(\tau) P_{\text{фо}}^{(\text{в})}(\tau)$	$q_8 = \begin{cases} q_7 - M_{\text{отл}}, \text{ з імовірністю } P^{(\text{в})}(\tau) \\ 0, \quad \text{з імовірністю } 1 - P^{(\text{в})}(\tau) \end{cases}$
8. Повернення порожніх опок	X_8={$O_{\text{н}} + O_{\text{в}}$}	Y_8={$O_{\text{н}}$, $O_{\text{в}}$}	$P^{(\text{во})}(\tau) = \prod_{i=1}^{n} P_i^{(\text{во})}(\tau)$	$q_9 = \begin{cases} O_{\text{н}}, O_{\text{в}}, \text{ з імовірністю } ю P^{(\text{во})}(\tau) \\ 0, \quad \text{з імовірністю } 1 - P^{(\text{во})}(\tau) \end{cases}$

Імовірнісно-автоматні моделі для інших агрегатів розробляються аналогічно і подані в табл. 6.1.

Умовні позначення:

q_3 – кількість суміші в півформі на виході з підсистеми транспортування півформ;

q_4 – кількість суміші і стрижнів у півформі низу;

q_5 – кількість суміші і стрижнів у ливарній формі на виході зі збирача форм;

q_6 – кількість суміші, стрижнів і сплаву, що заливається, в ливарній формі;

q_7 – кількість суміші, стрижнів, металу в ливарній формі у кінці ділянки охолодження ливарного конвеєра;

q_8 – кількість відпрацьованої формувальної суміші;

$P^{(\text{тр})}(\tau)$ – імовірність безвідмовної роботи підсистеми транспортування півформ;

$P_1^{(\text{тр})}(\tau),...,P_n^{(\text{тр})}(\tau)$ – імовірність безвідмовної роботи агрегатів, розташованих у системі від формувальних автоматів до ділянки заливання;

$P^{(\text{сб})}(\tau)$ – імовірність безвідмовної роботи збирача форм;

$P^{(\text{лк})}(\tau)$ – імовірність безвідмовної роботи ливарного конвеєра;

$P^{(\text{в})}(\tau)$ – імовірність безвідмовної роботи вибивальної установки;

$P^{(\text{во})}(\tau)$ – імовірність безвідмовної роботи підсистеми повернення порожніх опок;

$P_i^{(\text{во})}(\tau)$ – імовірність безвідмовної роботи агрегатів, розташованих на ділянці повернення порожніх опок;

H_1 – твердість форми на виході з підсистеми транспортування півформ;

a – константа, що враховує зміну параметра H з часом □;

b – константа, що враховує зміну температури виливка з часом □;

T – температура металу, що заливається;

T_1 – температура виливків у кінці ділянки охолодження ливарного конвеєра;

Me – металомісткість форми;

q_8 – кількість відпрацьованої формувальної суміші;

$М_{отл}$ – металомісткість отриманих виливків із системою ливника;

$О_н$ – опока низу;

$О_в$ – опока верху;

$ПФ_н$ – півформа низу;

$ПФ_в$ – півформа верху;

ЛФ – форма ливарні;

С – кількість стрижнів у ливарній формі.

При імовірнісно-автоматному моделюванні елементів формувальних систем приймаємо, що параметри суміші в ливарній формі в кантувачі, збирачі форм, установлювачі нижніх опок, за відсутності простоїв лінії, не змінюються.

Функція внутрішнього стану φ автомата, що моделює процес транспортування півформ, визначає імовірність безвідмовної роботи агрегатів, розташованих у технологічній послідовності на ливарному конвеєрі від формувальних автоматів до заливальної ділянки. Таким устаткуванням є кантувачі, штовхачі, перестановлювачі та інше устаткування.

Ливарний конвеєр є загальним транспортним обладнанням, зо з'єднує усі технологічні агрегати, тому внутрішній стан ливарного конвеєра достатньо враховувати один раз.

Вважаємо, що функція внутрішнього стану процесу проставлення стрижнів визначається вірогідністю безвідмовної роботи стержневої системи $P_{ст}(\tau)$.

Експериментальні дані показують, що простої через стержневого відділення мінімальні. Головна причина – несвоєчасна доставка стрижнів.

При моделюванні роботи ливарного цеху вважаємо, що на ділянку формування доставляються стрижні, що задовольняють вимогам до їх якості. Параметри якості стрижнів враховуються при автономному моделюванні роботи стержневої підсистеми.

Вважаємо, що функція внутрішнього стану процесу заливання форм металом визначається безвідмовною роботою плавильної системи $P_{мет}(\tau)$.

При розрахуванні функції внутрішнього стану φ ливарного конвеєра необхідно у формулі враховувати імовірність безвідмовної роботи агрегатів, розташованих на ділянці охолодження (якщо вони є), наприклад, імовірність безвідмовної роботи зіштовхувача форм та ін.

При визначенні функції внутрішнього стану процесу вибивання форм необхідно враховувати вірогідність безвідмовної роботи системи фінішної обробки виливків $P_{фо}(\tau)$.

Функцію внутрішнього стану автомата, що моделює процес повернення порожніх опок, визначає імовірність безвідмовної роботи агрегатів, розташованих у технологічній послідовності на ливарному конвеєрі від ділянки вибивання до формувальних автоматів. Таким устаткуванням можуть бути механізми перестановки і подання порожніх опок, розпарувачі, знімач верхніх опок і інше устаткування.

6.2.1. Імовірнісно-автоматні моделі агрегатів автоматичної ливарної лінії

Якщо як основне технологічне устаткування в цеху використовуються автоматичні ливарні лінії, то імовірнісно-автоматні моделі створюються для конкретної АЛЛ.

Наприклад, для АЛЛ моделі 696 ХТЗ (рис. 6.4), згідно з її структурною схемою, визначаємо для кожного елемента вигляд вхідного і вихідного алфавіту, функцію внутрішнього стану і функцію виходу.

Імовірнісний автомат, що моделює процес виготовлення ливарної форми низу (піскострільне заповнення з подальшим нижнім допресуванням), описується так.

Вхідний алфавіт формувального автомата низу:

$$X_{1н} = \{O_н, q_1, \sigma, W, Г, \delta_0, P_в, P_{пр}\}, \quad (6.7)$$

де $P_в$, $P_{пр}$ – відповідно тиск повітря і підпресовування.

Вихідний алфавіт:

$$Y_{1н} = \{ПФ_н, q_2, \delta_1, H\}. \quad (6.8)$$

Функція внутрішнього стану φ визначається за формулою (6.3), а функція виходу ψ – за (6.4), параметри якості визначаються так:

$$\delta_1 = f(\delta_0, P_в, P_{пр}) \pm \Delta_1; \quad (6.9)$$

$$H = f(W, Г, P_в, P_{пр}) \pm \Delta_2. \quad (6.10)$$

Усі інші параметри імовірнісно-автоматних моделей визначаються аналогічно розділу 6.2, враховують специфіку конкретної АЛЛ і наведені в табл.. 6.2.

Імовірнісний автомат, що моделює процес виготовлення ливарної форми верху, описується аналогічно процесу виготовлення форми низу. Проте при розрахунку функції внутрішнього стану цього агрегату імовірність безвідмовної роботи сумішеприготувальної системи вже не враховується (див. табл. 6.2).

Умовні позначення в таблиці 6.2:

Таблиця 6.2 – Характеристики імовірнісно-автоматних моделей елементів АЛЛ

Імовірнісний автомат	Вхідний алфавіт	Вихідний алфавіт	Функція внутрішнього стану	Функція виходу
1. Формувальний автомат низу	$X_{1н}=\{O_н, q_1, W, \Gamma, \delta_0, P_в, P_{пр}\}$	$Y_{1н}=\{ПФ_н, q_2, \delta_1, H\}$	$P^{(ФА)}(\tau)=P_п^{(ФА)}(\tau)\times$ $\times P_{вн}^{(ФА)}(\tau)P_ф^{(ФА)}(\tau)P_{спс}(\tau)$	$q_2=\begin{cases}q_1-\Delta q, \text{з вірогідністю } P^{(ФА)}(\tau)\\ 0, \quad \text{з вірогідністю } 1-P^{(ФА)}(\tau)\end{cases}$ $\delta_1=f(\delta_0, P_в, P_{пр})\pm\Delta_1$ $H=f(W, \Gamma, P_в, P_{пр})\pm\Delta_2$
2. Формувальний автомат верху	$X_{1в}=\{O_в, q, W, \Gamma, \delta_0, P_в, P_{пр}\}$	$Y_{1в}=\{ПФ_в, q_2, \delta_1, H\}$	$P^{(ФА)}(\tau)=P_п^{(ФА)}(\tau)\times$ $\times P_{вн}^{(ФА)}(\tau)P_ф^{(ФА)}(\tau)$	$q_2=\begin{cases}q_1-\Delta q, \text{з вірогідністю } P^{(ФА)}(\tau)\\ 0, \quad \text{з вірогідністю } 1-P^{(ФА)}(\tau)\end{cases}$ $\delta_1=f(\delta_0, P_в, P_{пр})\pm\Delta_1$ $H=f(W, \Gamma, P_в, P_{пр})\pm\Delta_2$
3. Кантувач	$X_2=\{ПФ_н, q_2, \delta_1, H\}$	$Y_2=\{ПФ_н, q_3, \delta_1, H\}$	$P^{(к)}(\tau)=\prod_{i=1}^{3}P_i^{(к)}(\tau)$	$q_3=\begin{cases}q_2, \text{з вірогідністю } P^{(к)}(\tau)\\ 0, \text{з вірогідністю } 1-P^{(к)}(\tau)\end{cases}$
4. Установлювач нижніх опок	$X_3=\{ПФ_н, q_3, \delta_1, H\}$	$Y_3=\{ПФ_н, q_4, \delta_1, H\}$	$P^{(у)}(\tau)=P_п^{(у)}(\tau)\times$ $\times P_{вн}^{(у)}(\tau)P_ф^{(у)}(\tau)$	$q_4=\begin{cases}q_3, \text{з вірогідністю } P^{(у)}(\tau)\\ 0, \text{з вірогідністю } 1-P^{(у)}(\tau)\end{cases}$

5. Проставлення стрижнів	$X_4=\{\text{ПФ}_\text{н}, q_4, \delta_1, H\}$	$Y_4=\{\text{ПФ}_\text{н}, q_5, \delta_1, H\}$	$P_{\text{ст}}(\tau)$	$q_5=\begin{cases} q_4+C, \text{ з вірогідністю } P_{\text{ст}}(\tau) \\ q_4, \text{ з вірогідністю } 1-P_{\text{ст}}(\tau) \end{cases}$
6. Збирач форм	$X_5=\{\text{ПФ}_\text{н}, \text{ПФ}_\text{в}, q_2, q_5, \delta_1, H\}$	$Y_5=\{\text{ЛФ}, q_6, \delta_1, H\}$	$P^{(\text{сб})}(\tau)=P_{\text{п}}^{(\text{сб})}(\tau)\times$ $\times P_{\text{вн}}^{(\text{сб})}(\tau)P_{\text{ф}}^{(\text{сб})}(\tau)$	$q_6=\begin{cases} q_2+q_5, \text{з вірогідністю} P^{(\text{сб})}(\tau) \\ 0, \quad \text{з вірогідністю } 1-P^{(\text{сб})}(\tau) \end{cases}$
7. Заливання форм	$X_6=\{\text{ЛФ}, q_6, \delta_1, H\}$	$Y_6=\{\text{ЛФ}, q_7, T\}$	$P_{\text{мет}}(\tau)$	$q_7=\begin{cases} q_6+Me, \text{ з вірогідністю } P_{\text{мет}}(\tau) \\ q_6, \quad \text{з вірогідністю } 1-P_{\text{мет}}(\tau) \end{cases}$
8. Ливарний конвеєр	$X_7=\{\text{ЛФ}, q_7, T\}$	$Y_7=\{\text{ЛФ}, q_8, T_1\}$	$P^{(\text{лк})}(\tau)=\prod_{i=1}^{3}P_i^{(\text{лк})}(\tau)$	$q_8=\begin{cases} q_7, \text{ з вірогідністю } P^{(\text{лк})}(\tau) \\ 0, \text{ з вірогідністю} 1-P^{(\text{лк})}(\tau) \end{cases}$ $T_1=T-b\tau$
9. Зіштовхувач форм	$X_8=\{\text{ЛФ}, q_8, T_1\}$	$Y_8=\{\text{ЛФ}, q_9, T_1\}$	$P^{(\text{ст})}(\tau)=P_{\text{п}}^{(\text{ст})}(\tau)\times$ $\times P_{\text{вн}}^{(\text{ст})}(\tau)P_{\text{ф}}^{(\text{ст})}(\tau)$	$q_9=\begin{cases} q_8, \text{ з вірогідністю } P^{(\text{ст})}(\tau) \\ 0, \text{ з вірогідністю } 1-P^{(\text{ст})}(\tau) \end{cases}$
10. Установка для вибивання форм	$X_9=\{\text{ЛФ}, q_9, T_1\}$	$Y_9=\{\text{О}_\text{н}+\text{О}_\text{в}, q_{10}, M_{\text{отл}}\}$	$P^{\text{в}}(\tau)=P_{\text{п}}^{(\text{в})}(\tau)P^{(\text{в})}(\tau)\times$ $\times P_{\text{ф}}^{(\text{в})}(\tau)P_{\text{фо}}(\tau)$	$q_{10}=\begin{cases} q_9-M_{\text{отл}}, \text{ з вірогідністю } P^{(\text{в})}(\tau) \\ 0, \quad \text{з вірогідністю } 1-P^{(\text{в})}(\tau) \end{cases}$

q_3 – кількість суміші в півформі низу при виході з кантувача;

q_4 – кількість суміші в півформі низу на виході з установлювача нижніх опок;

q_5 – кількість суміші і стрижнів у півформі низу;

q_6 – кількість суміші і стрижнів у ливарній формі на виході зі збирача форм;

q_7 – кількість суміші, стрижнів і сплаву, що заливається, в ливарній формі;

q_8 – кількість суміші, стрижнів, металу в ливарній формі у кінці ділянки охолодження ливарного конвеєра;

q_9 – кількість суміші, стрижнів, металу в ливарній формі на виході з зіштовхувача форм;

$P^{(к)}(\tau)$ – імовірність безвідмовної роботи кантувача;

$P^{(у)}(\tau)$ – імовірність безвідмовної роботи установника нижніх опок;

$P^{(ст)}(\tau)$ – імовірність безвідмовної роботи зіштовхувача форм.

При імовірнісно-автоматному моделюванні елементів АЛЛ вважаємо, що параметри суміші в ливарній формі в кантувачі, збирачі форм, установлювачі нижніх опок, за відсутності простоїв лінії, не змінюються.

Оскільки стрижні в ливарну форму встановлюються вручну, вважаємо, що функція внутрішнього стану цього процесу визначається імовірністю безвідмовної роботи стрижневої системи.

Заливання на АЛЛ моделі 696 виконується вручну, тому вважаємо, що функція внутрішнього стану цього процесу визначається безвідмовною роботою плавильної системи.

Автоматичні ливарні лінії, з точки зору теорії надійності, є лініями з жорстким транспортним зв'язком, тобто при відмові якого-небудь агрегату лінія зупиняється. Ливарний конвеєр є загальним транспортним пристроєм, що сполучає усі технологічні агрегати АЛЛ. Тому внутрішній стан ливарного конвеєра достатньо враховувати один раз.

Характеристики імовірнісного автомата, що моделює процес вибивання форм, пропонується визначати так.

Вхідний і вихідний алфавіти:

$$X_9 = \{ЛФ, q_9, T_1\}, \tag{6.11}$$

$$Y_9 = \{O_н + O_в, q_{10}, M_{отл}\}, \tag{6.12}$$

де q_{10} – кількість відпрацьованої формувальної суміші;

$M_{отл}$ – металомісткість отриманих виливків з системою ливника.

Функція внутрішнього стану φ подається у вигляді

$$P^{(в)}(\tau) = P_{п}^{(в)}(\tau) P_{вн}^{(в)}(\tau) P_{ф}^{(в)}(\tau) P_{фо}(\tau), \qquad (6.13)$$

де $P^{(в)}(\tau)$ – імовірність безвідмовної роботи вибивальної установки.

Функція виходу ψ має такий вигляд:

$$q_{10} = \begin{cases} q_9 - M_{отл}, \text{з імовірністю } P^{(в)}(\tau); \\ 0, \quad \text{з імовірністю } 1 - P^{(в)}(\tau); \end{cases} \qquad (6.14)$$

Формувальне відділення є центральною системою ливарного цеху, оскільки його ефективна робота визначає кількість і якість отримуваних виливків, тому загальна математична модель формувальної системи описується аналогічно загальній математичній моделі ливарного цеху.

Структуру загальної математичної моделі ливарного цеху формувальної системи описують за формулою (5.36), а вектор основних показників – за формулою (5.37).

Для кількісного опису конкретних АЛЛ або формувальних систем необхідно:

- створити імітаційно-імовірнісну модель АЛЛ для розв’язання практичних завдань, пов'язаних з їх створенням і керуванням;
- вивчити імовірність безвідмовної роботи основних агрегатів АЛЛ;
- вивчити вплив на продуктивність лінії довжини заливальних ділянок АЛЛ;
- вивчити вплив параметрів кожної з систем, що обслуговують АЛЛ, на кількість і якість отримуваних виливків;
- описати зміну властивостей ливарної форми залежно від часу;
- вивчити питання синхронізації роботи систем із метою зниження простоїв АЛЛ.

6.3. Моделювання роботи автоматичних ливарних ліній

Як об'єкти моделювання вибираємо автоматичні ливарні лінії моделі 636 ХТЗ і ІЛ 225, встановлені в СЛЦ ХТЗ. Опис роботи ліній і їх компонування наведені в розділі 6.1 і на рис. 6.2 і 6.3.

Узагальненою характеристикою АЛЛ є її продуктивність, що вимірюється випуском форм за одиницю часу (ф/год). Тому як основні показники

ефективності АЛЛ, що оцінюються за допомогою імітаційних моделей, можна прийняти такі характеристики:

- продуктивність автоматичної ливарної лінії, що функціонує в умовах дії випадкових чинників;
- кількість простоїв ліній і їх тривалість.

Автоматична лінія ливарні є складною системою технологічного і допоміжного устаткування. Складність і різноманіття можливих варіантів системи, наявність великої кількості елементів і транспортних засобів ускладнюють процес дослідження АЛЛ.

Для дослідження роботи АЛЛ використовують замкнутий орієнтований граф, в якому вказаний напрямок опок, півформ і форм. Для дослідження роботи АЛЛ подаємо її елементи на рівні агрегатів (машин і механізмів АЛЛ), які виконують закінчені технологічні операції. Структурні схеми лінії наведено на рис. 6.4 та рис. 6.5.

Особливістю АЛЛ є наявність однієї операції найбільшої тривалості та інших операцій, що мають значні резерви продуктивності. Для ливарної лінії операція найбільшої тривалості, як правило, виконується на формувальному автоматі, від продуктивності якого залежить здебільшого продуктивність лінії. Механізми лінії, розташовані в технологічному ланцюжку до формувального автомата (наприклад, распарувач, механізм подання порожніх опок та ін.), а також після нього (кантувач, збирач, зіштовхувач заформованих опок), працюють швидше і впродовж кожного циклу формувального автомата частину часу простоюють.

Продуктивність автоматичної лінії залежить від параметрів двох видів. По-перше, від параметрів, значення яких у процесі роботи лінії майже стабільні і залежать тільки від її конструкції. До таких параметрів належить час робочого циклу лінії, тобто і її циклова продуктивність. По-друге, залежить від параметрів, значення яких у процесі роботи лінії можуть залежно від різних випадкових причин змінюватися. До таких параметрів належить, наприклад, тривалість безперебійної роботи окремих механізмів лінії і тривалість простоїв через усунення причин, що спричинили відмови цих механізмів. Вказані параметри належать до теорії надійності до категорії випадкових величин. Тому значення цих параметрів, необхідні для розрахування технічної продуктивності лінії, визначають імовірнісними методами на основі великої кількості практичних спостережень за роботою лінії в умовах її експлуатації.

При моделюванні АЛЛ статистичну інформацію про простої можна використати з даних літератури, звітів науково-дослідних робіт цих підприємств.

У табл. 6.3 і 6.4 наведено статистичні дані середнього напрацювання на відмову і середнього часу відновлення агрегатів АЛЛ моделі 696 ХТЗ і ІЛ 225 для умов СЛЦ ХТЗ.

Таблиця 6.3 – Відмови механічної частини АЛЛ моделі 696 ХТЗ

Найменування агрегату	Причина відмови	Середнє напрацювання на відмову, год	Середній час відновлення, год
1	2	3	4
Конвеєр	Поломка манжет ущільнення на приводі	16500	2,5
Механізм витискування грудки	Поломка манжет ущільнення	3683	2,8
Установлювач півформ низу на конвеєр	1. Стопорення ролика; 2. Спрацьовування напрямних; 3. Поломка манжети ущільнення (витік повітря)	115,5 2710 782,7	0,9 4,0 0,65
Кантувач форм низу	Поломка манжети ущільнення (витік повітря)	3069,4	0,5
Збирач форм, розпарувач опок	1. Поломка манжети ущільнення; 2. Спрацьовування роликів	828,6 480,0	0,5 1,1
Формувальний автомат	1. Поломка манжет ущільнення на мультиплікаторові (витік мастила); 2. Поломка механізму наддування через попадання скрапу; 3. Поломка шиберного пристрою через попадання скрапу; 4. Поломка кільця (гума) ущі-	2762,5 20,5 110,0 98,5	6,5 1,5 6,5 6,2

	льнювача		

Продовження табл. 6.3

1	2	3	4
Формувальний автомат	5. Поломка манжети ущільнення на вузлі підтиску (витік мастила) 6. Спрацьовування каретки	3068,0 600	7,0 3,0
Механізм знімання верхніх опок	1. Стопорення ролика; 2. Спрацьовування напрямних; 3. Поломка манжети ущільнення (витік повітря)	75,2 2630 920,8	1,1 3,8 0,8
Роликовий конвеєр	1. Вихід з ладу привідного механізму; 2. Спрацьовування роликів	3455,0 144,0	3,0 0,5
Механізм знімання нерозпарованих опок		9,5	0,15

Для опису роботи елементів АЛЛ використали імовірнісно-автоматні моделі. Як функція внутрішнього стану була прийнята імовірність безвідмовної роботи АЛЛ у даний момент часу. Внутрішній алфавіт складається з символів «1» і «0», які означають, що агрегат знаходиться відповідно в нормальному або непрацездатному стані. Визначення стану елемента в момент часу, що вивчається, виконується на основі імітаційного моделювання згідно з правилом:

$$Z(\tau) = \begin{cases} 1, & \text{з імовірністю } P(\tau) \\ 0, & \text{з імовірністю } 1 - P(\tau) \end{cases}.$$

У початковий момент часу ($\tau_0 = 0$) кожен із n-агрегатів автоматичної ливарної лінії характеризується одним зі своїх станів Zi(τ), де i – номер елемента АЛЛ.

Огляд внутрішнього стану елемента (працює або простоює) робиться за допомогою датчика випадкових чисел методом попадання випадкової величини *X* в інтервал відмови.

При моделюванні технічної системи мережею автоматів відбувається об'єднання автоматів, що полягає в ототожненні вхідних алфавітів одних із вихідними алфавітами інших.

При створенні імітаційної моделі автоматичної ливарної лінії вводимо такий ряд обмежень:

- Вважати, що елементи автоматичної ливарної лінії, з точки зору надійності, сполучені послідовно;
- Елементи лінії сполучені жорстким зв'язком, тобто відмова одного елемента лінії призводить до зупинки усієї лінії;
- Огляд елементів лінії відбувається в дискретні моменти часу, рівні часу циклу лінії, якщо усі елементи лінії функціонують нормально, або через час, необхідне для відновлення елемента, що відмовив;
- Із ладу в дискретний момент часу виходить лише один елемент;
- Кількість елементів імітаційної моделі дорівнює кількості агрегатів АЛЛ.

Таблиця 6.4 – Відмови механічної частини АЛЛ типу ІЛ 225

Найменування агрегату	Причина відмови	Середнє напрацювання на відмову, год	Середній час відновлення, год
Формувальний автомат	1. Поломка важеля підсилення;	5000	3,5
	2. Поломка підшипників кочення;	5250	6,5
	3. Поломка головного циліндра (витік повітря)	1564	2,8
Вузол вибивання	1. Спрацьовування зубів	1460	3,0
	2. Поломка підшипників	1300	2,6
Механізм витискування форм	Поломка манжет діаметром 400 мм (витік повітря)	1375	2,0
Рейковий механізм вузла заливки	1. Поломка зубів рейкового механізму;	5000	7,5
	2. Поломка манжет	2750	4,0

Розпарувач	1. Спрацьовування лап (зварювання); 2. Поломка манжет	2550 2300	1,15 2,0

Продовження табл. 6.4

1	2	3	4
Кантувач	Поломка манжет	2300	2,5
Конвеєр рольгангової системи	Поломка вінця черв'яка і підшипників	2450	1,3
Ланцюгова передача	Порвавши ланцюги	10,5	0,4

Аналіз статистичних даних і результатів комп'ютерних програм з моделювання роботи ліній моделі 696 ХТЗ і ІЛ 225 дозволяє зробити такі висновки.

1. Лінії, встановлені в СЛЦ ХТЗ, застосовуються для виготовлення одних і тих самих виливків, габаритні розміри лінії приблизно однакові: розмір опок 900×600×250.

2. Циклова продуктивність: модель 696 ХТЗ – 200 ф/год, ІЛ 225 – 180 ф/год.

3. Був зроблений статистичний аналіз причин поломки основних вузлів і агрегатів АЛЛ, який дозволив визначити найбільш ненадійні.

4. Аналіз показує, що компонування АЛЛ моделі 696 ХТЗ простіше ($|\Delta'|$ =60) і коефіцієнт потоковості більший $\left(k'_{\text{пот}} = 0{,}4\right)$, проте її коефіцієнт готовності значно нижчий і дорівнює 0,686, а для ІЛ 225 – 0,812.

5. Впровадження заходів щодо зниження простоїв через попадання скрапу у вузли і механізми АЛЛ моделі 696 ХТЗ підвищує коефіцієнт її готовності з 0,686 до 0,793.

6. Моделювання роботи автоматичних ливарних ліній СЛЦ ХТЗ (група марганцевистого литва) показало, що установлення автоматизованих заливальних пристроїв дозволяє підвищити продуктивність лінії на 15…17 % при металомісткості форм 35…50 кг і на 10…12 % – до 35 кг.

Розроблену імітаційну модель АЛЛ використали для формування запиту для плавильної системи на метал і для СПС на формувальну суміш. Тоді в імітаційних моделях враховували простої АЛЛ тільки з технічних причин.

Її можна використати при впровадженні й налагодженні нових технологічних процесів і устаткування, прогнозуванні потреби в запасних частинах.

За допомогою моделі можна виявити «вузькі» місця в технологічному ланцюжку АЛЛ, оцінити вплив випадкових чинників на процес поломки устаткування та ін.

Контрольні запитання

1. Структурна схема формувальної системи ливарного цеху.
2. Структурна схема автоматичної ливарної лінії.
3. Характеристика імовірнісно-автоматних моделей формувальної системи.
4. Характеристика імовірнісно-автоматних моделей агрегатів автоматичної ливарної лінії.
5. Моделювання роботи автоматичної ливарної лінії.

ЗАКЛЮЧЕННЯ

Важко переоцінити значення автоматизації проектування для розвитку науки, техніки і народного господарства. Саме з автоматизацією проектування пов'язані принципові можливості створення технічних об'єктів, що усе більш ускладнюються. Автоматизація проектування розглядається як необхідна умова при плануванні, розробці і створенні складних технічних систем, до яких можна віднести як окремі види ливарного устаткування і технології, так і ливарні цехи і їх підсистеми.

Автоматизація проектування – основний спосіб підвищення продуктивності праці інженерно-технічних працівників, зайнятих проектуванням. Практична реалізація цілей і ідей автоматизації проектування відбувається у рамках САПР.

Автори в навчальному посібнику намагалися довести, що вивчення сучасного автоматизованого проектування має включати придбання студентами навичок вибору і використання моделей, алгоритмів, методів, мов, програм і технічних засобів САПР. Характер викладу матеріалу в навчальному посібнику грунтується на попередній підготовці читача в галузі математики, застосування ЕОМ, знанні спеціальності.

Від фахівця в галузі САПР потрібне уміння сформулювати завдання, виділити початкові дані і результати виконання проектних процедур, прийняти рішення з використання тієї або іншої моделі з наявних бібліотек математичних моделей елементів і вузлів, того або іншого методу з бібліотек числових методів аналізу і синтезу, встановити прийнятність отриманих рішень, вести діалог з ЕОМ на прийнятих мовах програмування та ін.

У навчальному посібнику висвітлено особливості автоматизованого проектування стосовно ливарного виробництва, що може бути корисним і фахівцям в інших галузях проектування.

Розглянуто теоретичні основи автоматизо-ванного проектування. Здійснено аналіз конструкцій деяких машин ливарного виробництва і їх удосконалення на прикладі струшувально-пресових, імпульсних формувальних машин, лопатевих змішувачів для холоднотвердіючих сумішей. Подано математичні й алгоритмічні моделі розрахунків вузлів і деталей ливарних машин, що дозволяють перейти до комп'ютерного об'ємного їх проектування. Як приклад наведено деякі комп'ютерні креслення.

Використання в САПР прикладних математичних методів, обчислювальної техніки і апарату системного аналізу дозволяє ефективніше розв'язувати наукові і практичні завдання ливарного виробництва, пов'язані з оптиміза-

цією технологічних рішень в умовах проектування і реконструкції ливарних цехів. Тут головним етапом є створення математичної моделі системи, що вивчається, і використання її як інструменту для розв'язання оптимізаційних завдань на ЕОМ.

Ливарні цехи розглянуті як системи з ієрархічною структурою, що мають п'ять ступенів, кожнен з яких описується за допомогою математичних моделей високої міри спільності – імовірносно-автоматних моделей. У рамках цих моделей процес функціонування системи в часі визначається динамікою зміни її основних характеристик і може бути відтворений на ЕОМ шляхом комбінування локальних аналітичних і імітаційних моделей. Так запропоновано загальні математичні моделі підсистем ливарного цеху, описаного залежності основних показників ефективності системи від параметрів технології і стану агрегатів і їх вузлів.

На базі математичних моделей підсистем цеху створений комплекс програм, використовуваний на стадіях проектування і реконструкції для визначення ефективності і синхронізації роботи підрозділів, відпрацюваненя нових технологічних рішень, виявлення "вузьких" місць у ланцюжку технологічного устаткування, оцінки впливу випадкових чинників та ін. Програмування здійснене на основі об'єктно-орієнтованого підходу.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Гунько І. І. Автоматизоване проектування ливарних машин на прикладі імпульсних формувальних агрегатів : метод. посіб. / уклад.: І. І. Гунько, С. В. Порохня. – Краматорськ : ДДМА, 2005. – 104 с.

2. Проников А. С. Надежность машин / А.С. Проников. – М. : Машиностроение, 1978. – 592 с.

3. Прохоров А. М. Советский энциклопедический словарь / под ред. А.М.Прохорова. – М. : Сов. энциклопедия, 1982. – 1600 с.

4. Батищев Д. И. Методы оптимального проектирования : учебное пособие для вузов / Д.И. Батищев. – М. : Радио и связь, 1984. – 284 с., ил.

5. Останин А. Н. Применение математических методов и ЭВМ. Вычислительные методы проектирования оптимальной конструкции : учебное пособие для вузов / А. Н. Останин, В. А. Гугля, Н. Н. Гурский [и др.]. – Мн.: Высш. школа, 1989. – 279 с.

6. Крымов В. Г. Изготовление литейных стержней / В. Г. Крымов, Ф. Е. Фишкин. – М. : Высшая школа, 1991. – 209 с.

7. Куракевич Б. В. Современные связующие композиции для холоднотвердеющих форм и стержней / Б. В. Куракевич, Т. С. Милеева // Литейное производство. – 2005. – № 4 . – С.13–15.

8. Зайгеров И. Б. Оборудование литейных цехов / И. Б. Зайгеров. – Мн: Высшая школа, 1980. – 368 с.

9. Горский А. И. Расчет машин и механизмов автоматических линий литейного производства / А. И. Горский. – М. : Машиностроение, 1978. – 551 с.

10. Орлов Г. М. Автоматизация и механизация процесса изготовления литейных форм / Г. М. Орлов. – М. : Машиностроение, 1988. – 264 с.

11. Гунько І. І. Автоматизоване проектування формувальних машин і ліній / І. І. Гунько, С. В. Порохня. – Вістник ДДМА.– 2006. –160 с.

12. Пат. 7485 Україна, МПК [7] B01F 7/04. Змішувач безперервної дії для приготування холоднотвердіючих сумішей / Гунько І. І., Дудченко А. В.; заявитель и патентообладатель ДГМА. – № 20041210832; заявл. 27.12.2004; опубл. 15.06.2005, Бюл. №6 ил.

13. Пат. 17709 Україна, МПК [7] B01F 15/04. Дозатор для приготування холоднотвердіючих сумішей / Гунько І. І., Порохня С. В., Жирков А. С; заявитель и патентообладатель ДГМА. – № 200603273; заявл. 27.03.2006; опубл. 16.10.2006, Бюл. №10, ил.

14. Пат. 27197 Україна, МПК [7] B22C 5/00. Змішувач для приготування холоднотвердіючих сумішей з аераційною камерою попередього змішування / Гунько І. І., Яковлев А. В., Дмитренко А. С. – № 200705105; заявл. 10.05.2007; Бюл. №

15. Гунько И. И. Методика автоматизированного расчета на ЭВМ параметров импульсной головки низкого давления / И. И. Гунько, В. О. Ковригин // Металл и литье Украины. – 2003. – №11–12. – С.10–11.

16. Гунько И. И. Автоматизированный расчет параметров импульсных головок высокого и низкого давления / И. И. Гунько, В. О. Ковригин // Литейное производство. – 2003. – № 10. – С. 32–34.

17. Гунько И. И. Методика автоматизированного проектирования на ЭВМ импульсной машины низкого давления / И. И. Гунько, В. О. Ковригин // Сб. Пути повышения качества и экономичности литейных процессов. – Одесса : ОГУ. – 2003. – С. 61–64.

18. Гунько І. І. До розрахунку працездатності імпульсних формувальних машин і ліній: методичний посібник / сост.: І. І. Гунько. – Краматорськ : ДДМА. – 2003. – 80 с.

19. Гунько И. И. Автоматизированное проектирование формовочных машин / И. И. Гунько, А. С. Дмитренко // Сб. Машинобудування та металлообробка. – Кировоград : КДТУ. – 2003. – С. 25.

20. Гунько И. И. Оптимизация состава смеси ХТС с помощью компьютерных технологий / И. И. Гунько, С. В. Порохня, А. С. Жирков // Вестник ДГМА.– Краматорск : ДГМА, 2005. – №1. – С. 88–92.

21. Гунько И. И. Методика автоматизированного проектирования лопастных смесителей / И. И. Гунько, С. В. Порохня, А. С. Жирков // Вестник ДГМА. – Краматорск : ДГМА, 2005. – №3. – С. 88–92.

22. Гунько И. И. Дозатор жидких компонентов для смесителя ХТС / И. И. Гунько, С. В. Порохня, А. С. Жирков // Металл и литье Украины. – 2006. – №4. – С.18–20.

23. Гущин К. О. Управление движением аэросмесей в пневмотранспортном трубопроводе струйным воздействием воздушного потока / К. О. Гущин // Студ. Вістник. – Краматорск, ДДМА. – 2004. – С.19–21.

24. Топтунова Л. М. Движение порошковых материалов в пневмотранспортном трубопроводе при вращательном режиме перемещения аэросмеси / Л. М. Топтунова, В. М. Гущин, М. В. Брус // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії и машинобудуванні. – Зб. наук. праць. – 2004. – С.168–172.

25. Гущин В. М. Рух аєросуміші у спіральному повітряному потоці пневмотранспортного трубопроводу / В. М. Гущин, Л. М. Топтунова // Вісник ВПІ. – 2001. – №3, – С. 112–113.

26. Гунько И.И. Повышение качества сыпучих материалов посредством воздействия воздушных потоков / И. И. Гунько, С. В. Порохня, А. В. Яковлев.– Вестник ДГМА. – Краматорск : ДГМА. – 2007. – № 10. – С. 58–62.

27. Гунько И. И. Основы научных исследований и технического творчества для студентов специальности 7.090.205: методические указания к практическим и самостоятельным работам / сост. И. И. Гунько. – Краматорск : ДГМА, 1999. – 40с.

28. Средства и системы автоматизации литейного производства (Шихтовка, плавка, смесеприготовление, разливка) / К. С. Богдан, В. Н. Горбенко, В. М. Денисенко, Ю. П. Каширин. – М. : Машиностроение, 1981. – 272 с.

29. Чудновский И. Д. Проблемы автоматизации процессов смесеприготовления / И. Д. Чудновский // Литейное производство. – 1986. – № 7. – С. 20–23.

30. Матвеенко И. В. Оборудование литейных цехов / И. В. Матвеенко, В. Л. Тарский. – М. : Машиностроение, 1985. – 398 с.

31. Пономаренко О. И. Оптимизация технологических решений для цехов литейного производства / О. И. Пономаренко : Монография. – Х. : НТУ «ХПИ». – 2007. – 317 с.

32. Пономаренко О. И. Управление литейными сиситемами и процессами / О. И. Пономаренко, Т. В. Лысенко, А. Л. Становский, О. И. Шинский : Монография. – Х. : Підручник НТУ “ХПИ”. – 2012. – 368 с.

33. Македонский Н. В. Организация и планирование литейного производства / Н. В. Македонский, В. А. Гринберг. – Минск: Вышейш. шк., 1978. – 240 с.

34. Уемов А. И. Системный подход и общая теория систем / А. И. Уемов. – М. : Мысль, 1978. – 283 с.

35. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем / Н. П. Бусленко. – М. : Наука, 1978. – 399 с.

36. Беликов О. А. Моделирование работы гибких автоматических литейных линий / О. А. Беликов, А. В. Волегов // Литейное производство. – 1991. – № 10. – С. 21–22.

37. Бречко А. А. Литейные системы и их моделирование / А. А. Бречко, Л. Г. Атливаник, Ю. Г. Поляков, А. И. Щаников, Н. Г. Бречко. – Л. : Машиностроение, 1975. – 248 с.

38. Становский А. Л. Схемотехническое проектирование объектов литейного производства / А. Л. Становский, Л. А. Иванова. – М. : ВНИИТЭМР, 1989. – 52 с.

39. Оре О. Теория графов / О. Оре. – М. : Наука, 1980. – 366 с.

40. Немировский Р. Г. Автоматические линии литейного производства / Р. Г. Немировский. – Киев–Донецк : Вища шк., 1981. – 206 с.

41. Калашников В. В. Сложные системы и методы их анализа / В. В. Калашников. – М. : Знание, 1980. – 64 с.

42. Леушин И. О. Математические модели и методы в литейном производстве / И. О. Леушин. – Н. Новгород : НГТУ, 1995. – 149 с.

43. Бусленко В. Н. Автоматизация имитационного моделирования сложных систем / В. Н. Бусленко. – М. : Наука, 1977. – 240 с.

44. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р. Шеннон. – М. : Мир, 1978. – 418 с.

45. Калашников В. В. Организация моделирования сложных систем / В. В. Калашников. – М. : Знание, 1982. – 64 с.

46. Неустроев А. А. Автоматизированное проектирование технологических процессов литья / А. А. Неустроев, В. С. Моисеев. – М. : МГТУ, 1994. – 256 с.

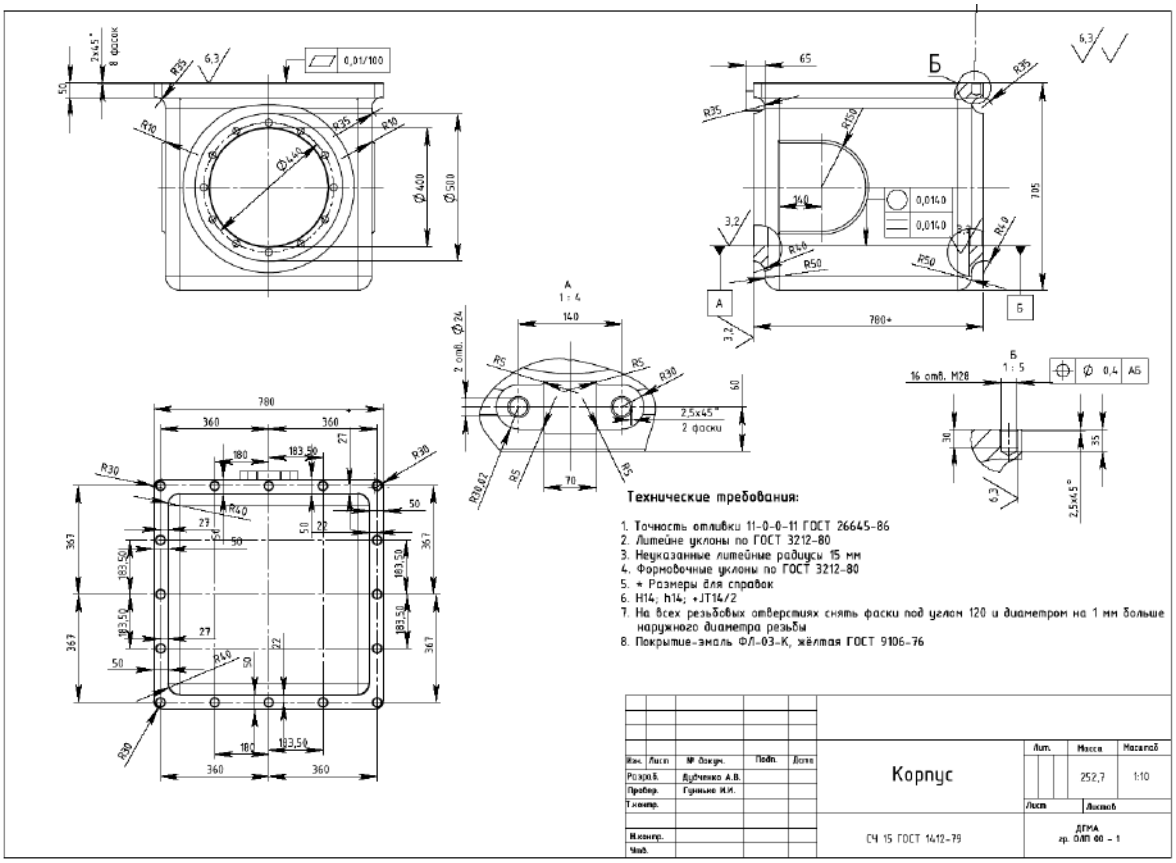
47. Проектирование литейных цехов и заводов / под ред. В. И. Шестопала. – М. : Машиностроение, 1974. – Т.2. – 294 с.

48. Чудновский И. Д. Смесеприготовительные системы для автоматизированных формовочных линий / И. Д. Чудновский // Литейное производство. – 1994. – № 12. – С. 15–18.

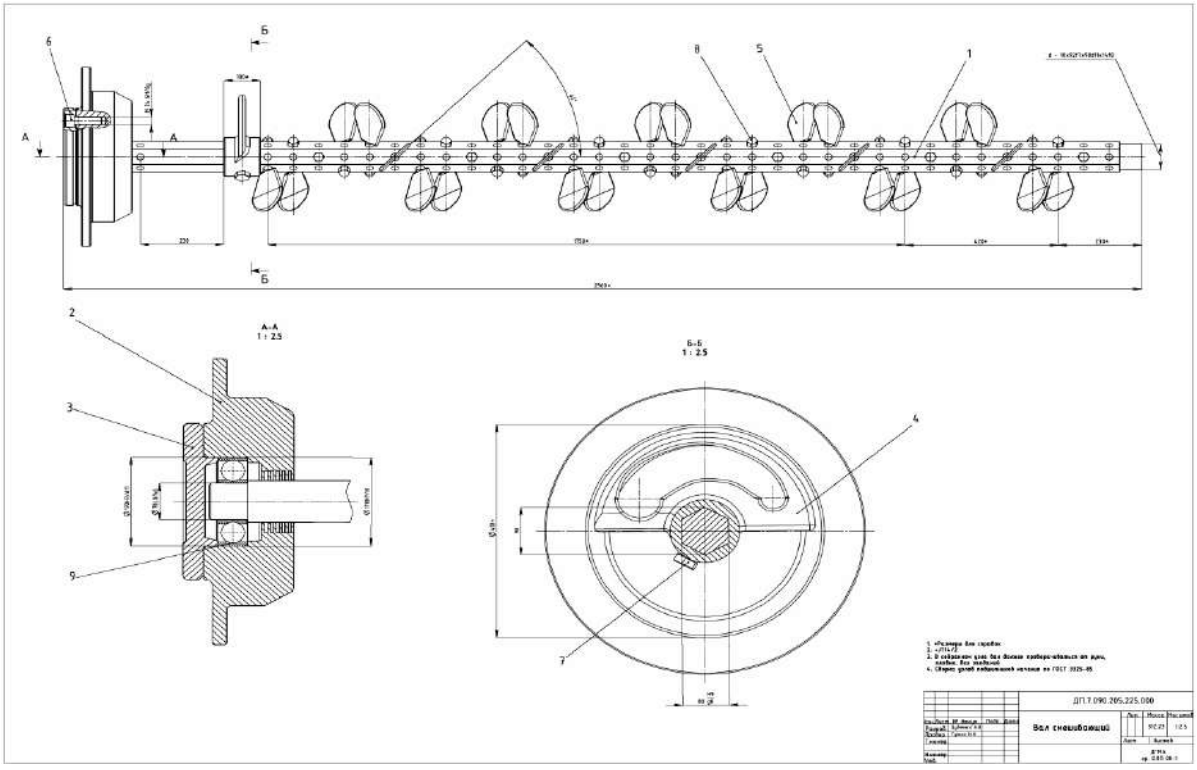
49. Манихин И. Б. Расчет потребности в плавильном оборудовании для сталелитейных цехов / И. Б. Манихин, Я. И. Гольбин //Литейное производство. – 1989. – № 3. – С. 27–28.

50. Яровицкий Н. В. Вероятностное автоматное моделирование дискретных систем / Н. В. Яровицкий // Кибернетика. – 1966. – № 5. – С. 35–43.

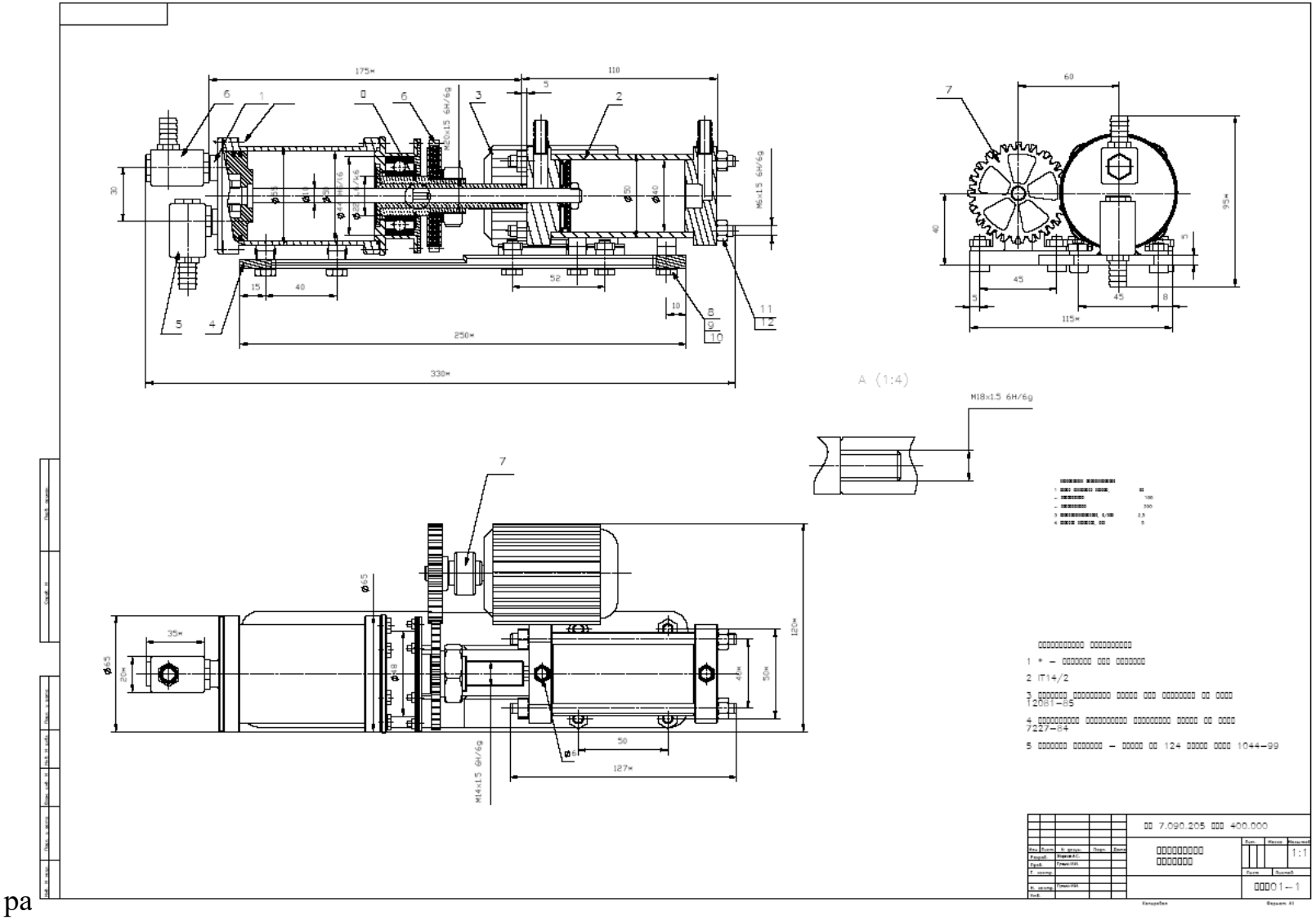
ДОДАТОК А – Робоче креслення корпусу змішувача



ДОДАТОК Б – Робоче креслення вала в сборке

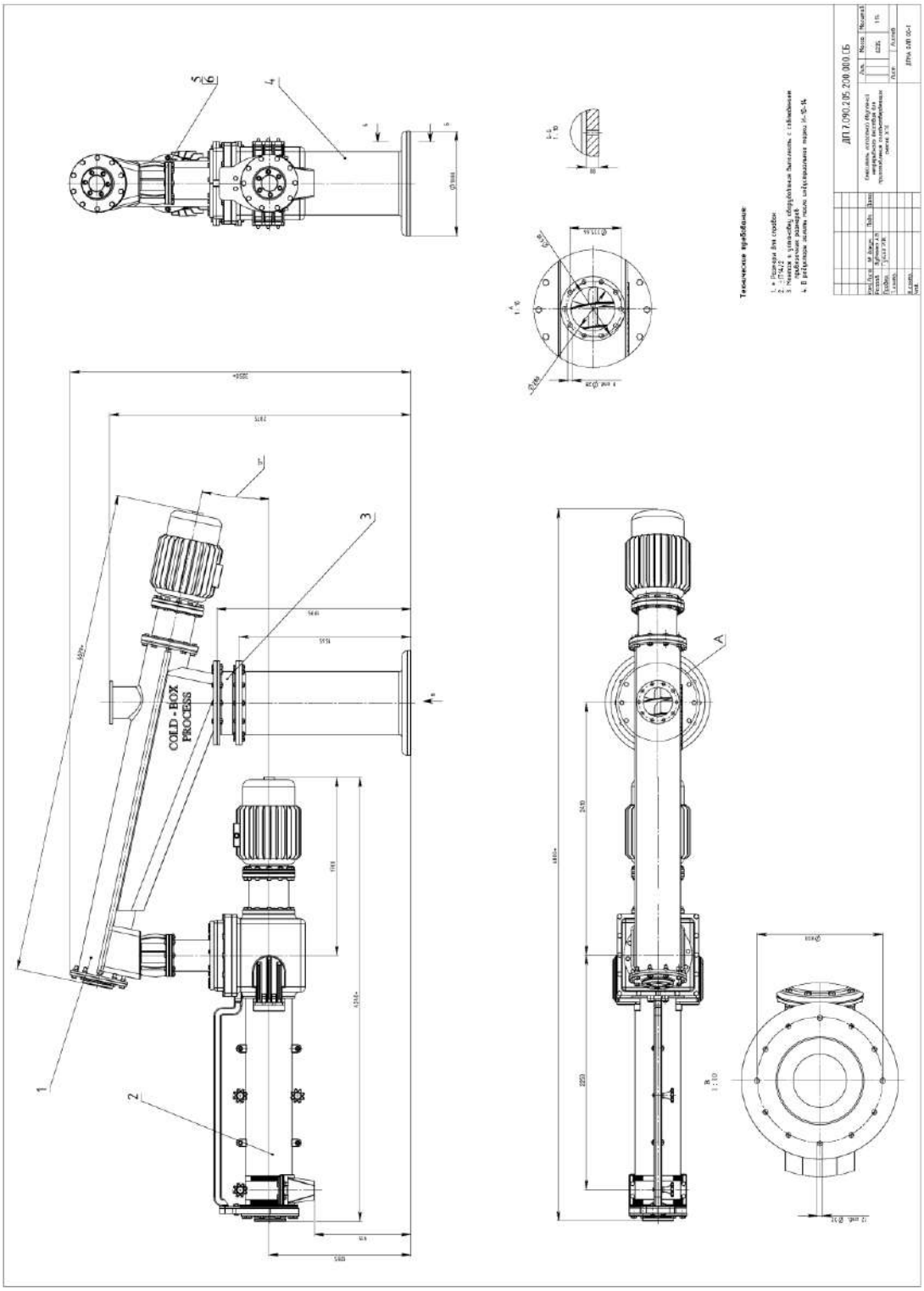


ДОДАТОК В – Креслення: загальний вигляд дозато-

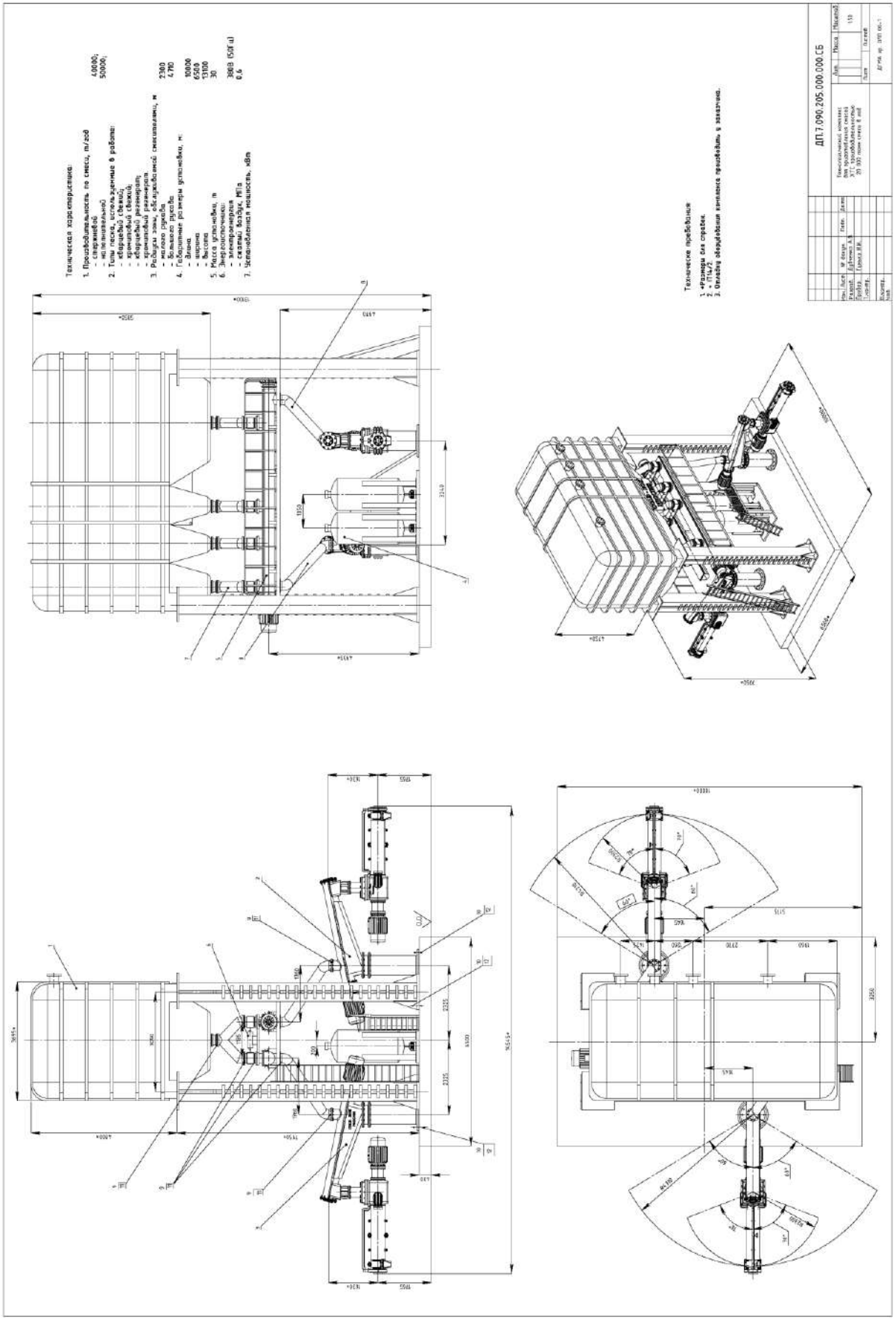


ра

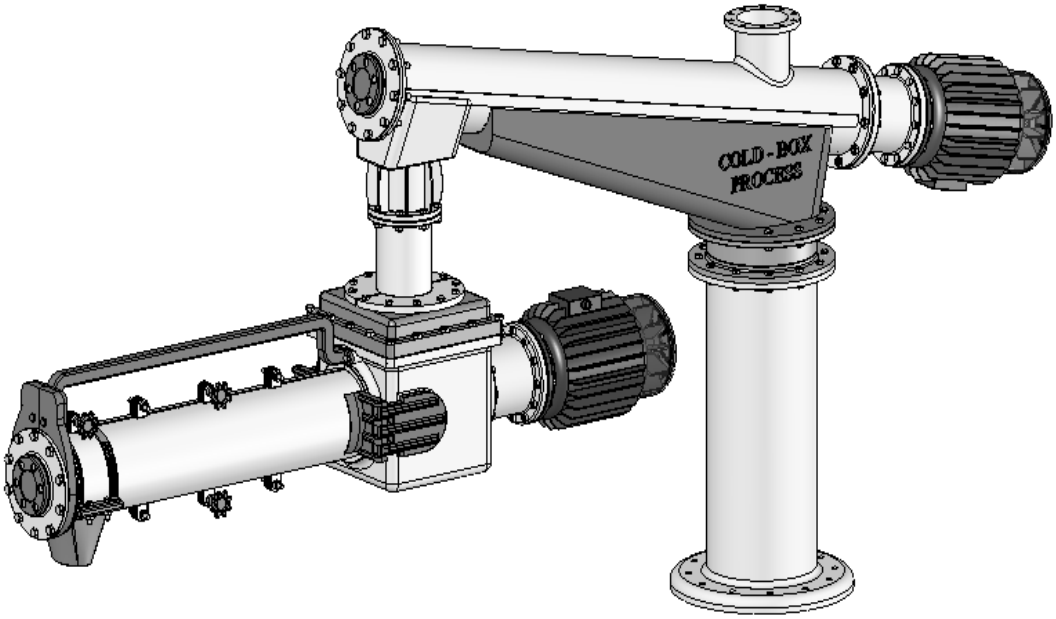
ДОДАТОК Г – Креслення змішувача в сборке



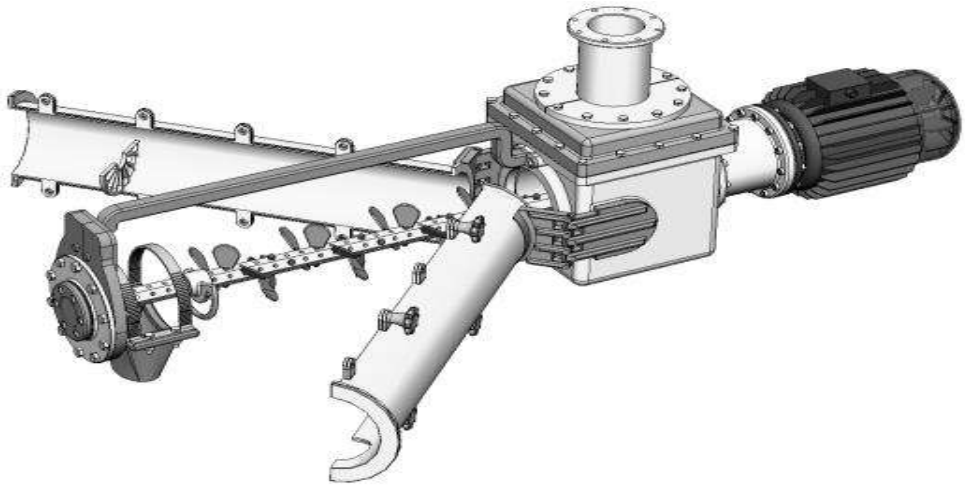
ДОДАТОК Д – Загальний вигляд комплексу ХТС



ДОДАТОК Е – Дворукавний змішувач ХТС (а) з вертикальним розніманням камери другого рукава (б)

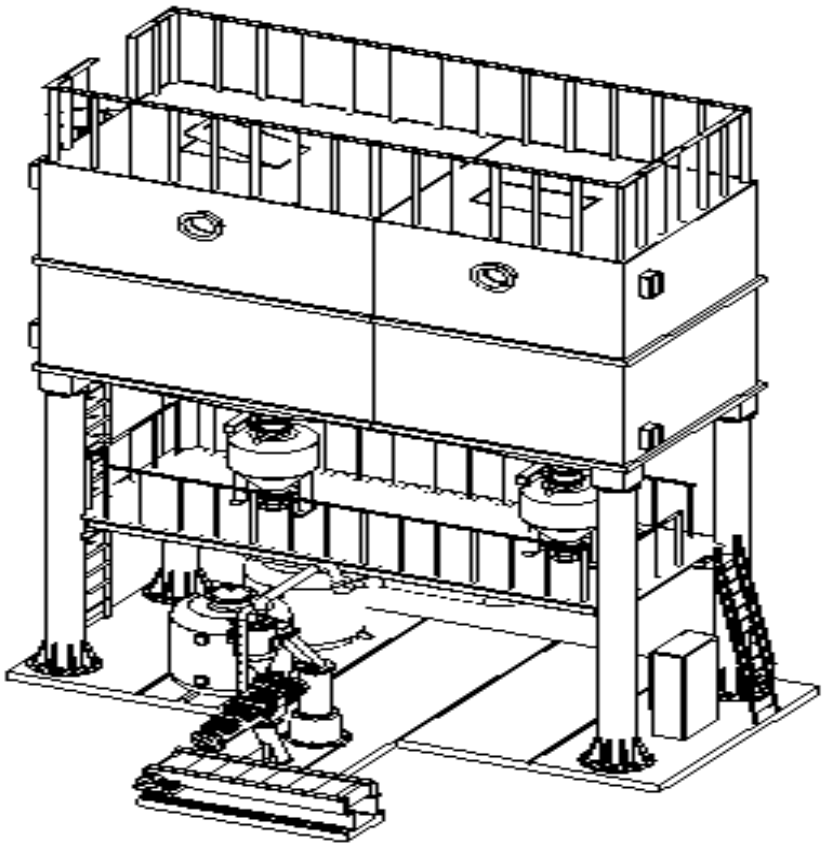


а



б

ДОДАТОК Ж – Комплекс ХТС із аераційним змішувачем



ДОДАТОК И – Лопатевий змішувач ХТС з аэроційною камерою попереднього перемішування

ЗМІСТ

Передмова . .3
Розділ 1. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ЛИВАРНИХ МАШИН. .6
1.1. Методи дослідження. .8
1.1.1. Оцінка машини за критеріями надійності. .8
1.1.2. Моделювання. .9
1.2.Існуючі методики автоматизованого проектування. .11
1.2.1. Технологія проектування. .11
1.2.2. Оптимальне проектування. .11
1.2.3. Програмний комплекс проектування. .12
1.2.4. Діалоговий метод проектування. .13
1.2.5. Об'ємне проектування. 13
Контрольні запитання. 15
Розділ 2. МЕТОДИКА АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ЛИВАРНОГО УСТАТКУВАННЯ. .16
2.1. Методика автоматизованого проектування струшувальних і пресових машин. .16
2.1.1. Критичний аналіз конструкцій струшувально-пресових формувальних машин .18
2.2. Удосконалення струшувальних машин. .21
2.2.1. Вплив технологічних факторів на конструктивні параметри струшувально-пресових формувальних машин. .22
2.2.2. Побудова математичних моделей вузлів і деталей струшувальних і пресових машин. .24
2.3. Побудова алгоритмічних моделей вузлів і деталей струшувальних і пресових циліндрів. .27
2.3.1. Побудова алгоритмічних моделей формувальної машини в цілому .27
2.3.2. Побудова алгоритмічних моделей пресового й струшувального циліндрів. .33
2.3.3. Побудова алгоритмічних моделей струшувального циліндра. .41
2.3.4. Побудова алгоритмічних моделей станини й траверси. .46
2.3.5. Побудова алгоритмічних моделей колони. .47
2.4. Методика автоматизованого проектування імпульсної машини Критичний аналіз конструкцій імпульсних формувальних машин .47
2.4.1. Вибір способу повітряно-імпульсного виготовлення пів форми .50

2.4.2. Імпульсні машини високого тиску. .51
2.4.3. Імпульсні машини низького тиску. .56
2.4.4. Побудова математичних моделей вузлів і деталей імпульсної машини. .58
2.5. Побудова повного алгоритму розрахунків імпульсної машини. .64
2.5.1. Побудова алгоритмів розрахунків імпульсних головок високого й низького тиску. .66
2.6. Удосконалення імпульсної машини. Розрахування траверси з вісьма ребрами жорсткості. .77
2.6.1. Розрахування траверси із чотирма ребрами жорсткості. .79
2.6.2. Розрахування траверси із чотирма ребрами жорсткості, посиленими горизонтальними стінками. .84
2.6.3. Вибір оптимальної конструкції траверси. .89
2.6.4. Побудова 3D-моделі імпульсної машини й створення конструкторської документації .90
Контрольні запитання . 93
Розділ 3. МЕТОДИКА АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ЛОПАТЕВОГО ЗМІШУВАЧА . .95
3.1. Критичний аналіз конструкцій лопатевих змішувачів для приготування холоднотвердіючих сумішей. .95
3.2. Вплив технологічних факторів холоднотвердіючих стрижневих сумішей а конструктивні параметри лопатевих змішувачів 100
3.2.1. Склад і властивості холоднотвердіючих сумішей. .100
3.2.2. Критерії оцінки стрижнів. .101
3.2.3. Удосконалювання процесів сумішоприготування холоднотвердіючих сумішей. .102
3.2.4. Загальні технологічні проблеми для різних типів холоднотвердіючих сумішей. .105
3.3. Удосконалення лопатевого змішувача. .106
3.3.1. Змішувач із сектором для виключення можливості утворення застою суміші в камері. .108
3.3.2. Змішувачі з попередньою камерою перемішування сипучих матеріалів. .109
3.3.3. Підвищення якості перемішування сипучих матеріалів за допомогою впливу повітряних потоків. .109
3.3.4. Змішувач із аераційним перемішуванням. .119
3.4. Створення дозатора нового типу .120
3.4.1. Дослідження залежності процентного вмісту смоли

на межу міцності стрижня або форми. .121
3.4.2. Дослідження впливу часу твердіння стрижня на межу його міцності. .122
3.4.3. Дослідження залежності конструктивних параметрів змішувача холоднотвердіючих сумішей один від одного. .124
3.4.4. Нова конструкція дозатора. .126
3.5. Комплекс зі змішувачами холоднотвердіючих сумішей. .129
3.5.1. Побудова алгоритмічних моделей вузлів і деталей лопатевого змішувача. Розрахування змішувальної камери. .129
3.5.2. Розрахування потужності приводу змішувача. .140
3.5.3. Побудова блок-схеми розрахування конструктивних параметрів дозатора. .144
3.5.4. Побудова 3-D-моделі лопатевого змішувача. .146
3.5.5. Створення тривимірної моделі деталей змішувальної камери 146
3.5.6. Виконання супутніх деталей змішувальної камери. .147
3.5.7. Автоматизоване проектування дозатора. .149
3.5.8. Створення тривимірної моделі поршня. .150
3.5.9. Створення конструкторської документації змішувача холоднотвердіючої суміші. .152
Контрольні запитання . .153
Розділ 4. ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ПО ПРОЕКТУВАННЮ ЛИВАРНИХ СИСТЕМ . .154
4.1. Ливарний цех як об'єкт дослідження. 154
4.2. Сучасні методи дослідження і проектування складних технічних систем. 158
4.2.1. Системний підхід у дослідженні й проектуванні ливарних цехів і їх підрозділів.....158
4.2.2. Структурний метод дослідження систем.....162
4.2.3. Аналітичні методи дослідження складних систем.....164
4.2.4. Імітаційне моделювання складних систем.....167
4.3. Методи підвищення ефективності роботи ливарного цеху.....170
4.3.1. Вибір раціональної структури підсистем ливарного цеху.....171
4.3.2. Аналіз існуючих методів проектування відділень ливарних цехів..173
Контрольні запитання. 177
Розділ 5. **ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ ЗАГАЛЬНОЇ МОДЕЛІ ЛИВАРНОГО ЦЕХУ** 178
5.1. Структурні моделі ливарного цеху. 178
5.2. Імовірнісно-автоматні моделі елементів ливарного цеху. 185

5.3. Загальна математична модель і алгоритм функціонування ливарного цеху 193
5.4. Імітаційна модель функціонування ливарного цеху 196
Контрольні запитання 202
Розділ 6. ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ФОРМУВАЛЬНИХ СИСТЕМ ЛИВАРНИХ ЦЕХІВ. 203
6.1. Структурні схеми формувальних систем ливарного цеху 203
6.2. Імовірнісно-автоматні моделі формувальних систем 209
6.2.1. Імовірнісно-автоматні моделі агрегатів автоматичної ливарної лінії 214
6.3. Моделювання роботи автоматичних ливарних ліній 219
Контрольні запитання 223
ЗАКЛЮЧЕННЯ. 224
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ
ДОДАТКИ

Навчальне видання

ПОНОМАРЕНКО Ольга Іванівна

ГУНЬКО Інна Іванівна

ПОРОХНЯ Сергій Васильович

ЄВТУШЕНКО Наталія Сергіївна

АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ФОРМУВАЛЬНИХ ТА СТРИЖНЕВИХ МАШИН

Навчальний посібник

для студентів спеціальностей

«Обладнання та технології ливарного виробництва»

Відповідальний за випуск О.В.Акімов

Роботу до видання рекомендував М.А. Погрібний

Редактор О.В.Козюк

План 2013 р., поз. 122

Підп. до друку _____. Формат 60x84 1/16. Папір офсетний.

Друк – ризографія. Гарнітура Times New Roman. Ум.друк.арк.

Наклад 300 прим. Зам. № _____. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХПІ». 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 3657 від 24.12.2009 р.

Друкарня НТУ «ХПІ». 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.