

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Управління енергетичними та економічними процесами

Інтелектуальні системи енергопостачання

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
магістра

на тему: Дослідження газодинамічних процесів у двофазному середовищі факелу розпиленої рідини та вибір раціональних параметрів обприскувача залізничного полотна

за освітньою програмою Енергетичні та електромеханічні системи на транспорті

зі спеціальності: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Виконав: студент групи: ЕЕ2221

Кеши

/ Анна КОЗАЧИНСЬКА /

Керівник:

Михайло

/ доцент Олександр ЖЕВЖИК /

Нормоконтролер:

Саша

/ доцент Ірина ПОТАПЧУК /

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент

Кеши

Ministry of Education and Science of Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technologies

Energy and economic processes management

Intellectual power supply systems

Explanatory Note
to Master's Thesis

on the topic: Research of gas-dynamic processes in the two-phase environment of a spray of sprayed liquid and the selection of rational parameters of a railway sprayer

according to educational curriculum Energy and electromechanical systems in transport

in the Speciality: 141 Power engineering, electrical engineering and electromechanics

Done by the student of the group: / Anna Kozachynska /

Scientific Supervisor: / Ass. Prof. Oleksandr Zhevzhyk /

Normative controller : / Ass. Prof. Iryna Potapchuk /

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Управління енергетичними та економічними процесами
Кафедра: Інтелектуальні системи енергопостачання
Рівень вищої освіти: Другий (магістерський)
Освітня програма: Енергетичні та електромеханічні системи на транспорті
Спеціальність: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІСЕ

 Дмитро БОСІЙ
Дата 15.01.2024

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу

магістр з електроенергетики,
електротехніки та електромеханіки

студенту Козачинській Анні Володимирівні

1. Тема роботи: “Дослідження газодинамічних процесів у двофазному середовищі факелу розпиленої рідини та вибір раціональних параметрів обприскувача залізничного полотна”

Керівник роботи: Жевжик Олександр Владиславович, к.т.н., доцент

затверджені наказом від

"18" січня 2023 р.

№ 56 ст

2. Строк подання студентом роботи: 08.01.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: Геометрія залізничного полотна, конструкція залізничної платформи, фізичні властивості розпилювальної рідини, параметри і теплофізичні властивості атмосферного повітря, наявний тиск на розпилювання.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

4.1 Вступ

4.2 Опис платформного обприскувача залізничного полотна

4.3 Математична модель руху краплин

4.4 Результати розрахунків

4.5 Висновки та рекомендації

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

1. Схема обприскувача залізничного полотна. 2. Рівняння математичної моделі.
3. Крайові умови. 4. Результати розрахунків. 5. Висновки.

6. Консультанти розділів роботи:

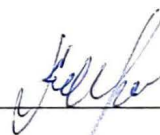
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав:	Завдання прийняв:

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	2 жовтня 2023 р	
2	Опис платформного обприскувача залізничного полотна	23 жовтня 2023 р	
3	Математична модель руху краплин	6 листопада 2023	
4	Результати розрахунків	1 січня 2024	
5	Висновки та рекомендації	8 січня 2024	
6	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	8 січня 2024	
7	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії	16 січня 2024	

Студент

Анна КОЗАЧИНСЬКА



Керівник роботи

Олександр ЖЕВЖИК



РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 84 с., 11 рис., 8 табл., 10 джерел.

Об'єкт дослідження – процеси, що відбуваються у двофазному середовищі факелу розпиленої рідини.

Мета роботи – побудувати математичну модель газодинамічних процесів у двофазному середовищі (повітря-краплини) факелу розпиленої рідини, та вибрати раціональні параметри обприскувача залізничного полотна.

Методи дослідження – аналітичні та чисельні методи.

Одержані результати – побудована математична модель газодинамічних процесів у двофазному середовищі факелу розпиленої рідини. Складена програма для ПЕОМ, що дозволила провести розрахунки за математичною моделлю, виконати аналіз отриманих результатів та вибрати раціональні параметри обприскувача залізничного полотна.

Для зниження впливу бокового вітру діаметр крапель форсунок розпилювання гербіциду має бути з дисперсністю 200...300 мкм, кутом факелу 90° , початковою швидкістю краплин 12...15,5 м/с. Визначена відстань між форсунками обприскувача $\approx 0,34...0,5$ м. Швидкість бічного вітру при обприскуванні повинна бути не більше 1 м/с.

Ключові слова: ОБПРИСКУВАЧ ЗАЛІЗНИЧНОГО ПОЛОТНА, ФОРСУНКА, ФАКЕЛ РОЗПИЛЕНОЇ РІДИНИ, КРАПЛИНА, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Опис платформного обприскувача залізничного полотна.....	9
1.1 Пристрій та принцип дії обприскувача.....	9
1.2 Технічна характеристика системи обприскування.....	12
1.3 Типи гербіцидів.....	13
1.4 Приготування робочої суміші та екологічна безпека.....	16
1.5 Технологія обприскування.....	19
2 Математична модель руху краплин.....	23
2.1 Фізичне уявлення процесу.....	23
2.2 Допущення під час переходу до математичної моделі.....	24
2.3 Рівняння руху краплин.....	24
2.4 Початкові умови.....	27
2.5 Апроксимація теплофізичних властивостей.....	29
2.5.1 Вода	29
2.5.2 Водяна пара.....	31
2.5.3 Сухе повітря	33
2.5.4 Вологе повітря.....	34
2.6 Метод розрахунку.....	36
3 Результати розрахунків.....	37
3.1 Розрахунок траєкторії краплин.....	37
3.2 Вибір форми і розмірів камери закручування форсунок.....	42
Висновки та рекомендації.....	53
Перелік посилань.....	54
Додаток А.....	55

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Дослідження газодинамічних процесів у двофазному середовищі факелу розпиленої рідини та вибір раціональних параметрів	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Козачинська А.В.		15.01.		М	6	84
Консульт.								
Керівник		Жевжик О.В.		15.01.24				
Н. контр.		Потапчук І.Ю.		16.01.24				
						МОНУ, УДУНТ, ІСЕ,		

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Управління енергетичними та економічними процесами

Інтелектуальні системи енергопостачання

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
магістра

на тему: Дослідження газодинамічних процесів у двофазному середовищі факелу розпиленої рідини та вибір раціональних параметрів обприскувача залізничного полотна

за освітньою програмою Енергетичні та електромеханічні системи на транспорті

зі спеціальності: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Виконав: студент групи: EE2221

_____ / Анна КОЗАЧИНСЬКА /

Керівник: _____ / доцент Олександр ЖЕВЖИК /

Нормоконтролер: _____ / доцент Ірина ПОТАПЧУК /

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____

Дніпро – 2024 Рік

Ministry of Education and Science of Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technologies

Energy and economic processes management

Intellectual power supply systems

Explanatory Note
to Master's Thesis

on the topic: Research of gas-dynamic processes in the two-phase environment of a spray of sprayed liquid and the selection of rational parameters of a railway sprayer

according to educational curriculum Energy and electromechanical systems in transport

in the Speciality: 141 Power engineering, electrical engineering and electromechanics

Done by the student of the group: / Anna Kozachynska /

Scientific Supervisor: / Ass. Prof. Oleksandr Zhevzyk /

Normative controller : / Ass. Prof. Iryna Potapchuk /

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Управління енергетичними процесами

Кафедра: Інтелектуальні системи енергопостачання

Рівень вищої освіти: Другий (магістерський)

Освітня програма: Енергетичні та електромеханічні системи на транспорті

Спеціальність: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІСЕ
Дмитро БОСІЙ

Дата

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу

магістр з електроенергетики,
електротехніки та електромеханіки

студенту Козачинській Анні Володимирівні

1. Тема роботи: “Дослідження газодинамічних процесів у двофазному середовищі факелу розпиленої рідини та вибір раціональних параметрів обприскувача залізничного полотна”

Керівник роботи: Жевжик Олександр Владиславович, к.т.н., доцент

затверджені наказом від

"18" січня 2023 р.

№ 56 ст

2. Строк подання студентом роботи: 08.01.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: Геометрія залізничного полотна, конструкція залізничної платформи, фізичні властивості розпилювальної рідини, параметри і теплофізичні властивості атмосферного повітря, наявний тиск на розпилювання.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

4.1 Вступ

4.2 Опис платформного обприскувача залізничного полотна

4.3 Математична модель руху краплин

4.4 Результати розрахунків

4.5 Висновки та рекомендації

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

1. Схема обприскувача залізничного полотна. 2. Рівняння математичної моделі. 3. Крайові умови. 4. Результати розрахунків. 5. Висновки.

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав:	Завдання прийняв:

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	2 жовтня 2023 р	
2	Опис платформного обприскувача залізничного полотна	23 жовтня 2023 р	
3	Математична модель руху краплин	6 листопада 2023	
4	Результати розрахунків	1 січня 2024	
5	Висновки та рекомендації	8 січня 2024	
6	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	8 січня 2024	
7	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії	16 січня 2024	

Студент

Козачинська Анна

Керівник роботи

доцент Олександр Жевжик

РЕФЕРАТ

Магістерська робота: 84 с., 11 рис., 7 табл., 10 джерел.

Об'єкт дослідження – процеси, що відбуваються у двофазному середовищі факелу розпиленої рідини.

Мета роботи – побудувати математичну модель газодинамічних процесів у двофазному середовищі (повітря-краплини) факелу розпиленої рідини, та вибрати раціональні параметри обприскувача залізничного полотна.

Методи дослідження – аналітичні та чисельні методи.

Одержані результати – побудована математична модель газодинамічних процесів у двофазному середовищі факелу розпиленої рідини. Складена програма для ПЕОМ, що дозволила провести розрахунки за математичною моделлю, виконати аналіз отриманих результатів та вибрати раціональні параметри обприскувача залізничного полотна.

Для зниження впливу бокового вітру діаметр крапель форсунок розпилювання гербіциду має бути з дисперсністю 200...300 мкм, кутом факелу 90° , початковою швидкістю краплин 12...15,5 м/с. Визначена відстань між форсунками обприскувача $\approx 0,34...0,5$ м. Швидкість бічного вітру при обприскуванні повинна бути не більше 1 м/с.

Ключові слова: ОБПРИСКУВАЧ ЗАЛІЗНИЧНОГО ПОЛОТНА, ФОРСУНКА, ФАКЕЛ РОЗПИЛЕНОЇ РІДИНИ, КРАПЛИНА, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Опис платформного обприскувача залізничного полотна.....	9
1.1 Пристрій та принцип дії обприскувача.....	9
1.2 Технічна характеристика системи обприскування.....	12
1.3 Типи гербіцидів.....	13
1.4 Приготування робочої суміші та екологічна безпека.....	16
1.5 Технологія обприскування.....	19
2 Математична модель руху краплин.....	23
2.1 Фізичне уявлення процесу.....	23
2.2 Допущення під час переходу до математичної моделі.....	24
2.3 Рівняння руху краплин.....	24
2.4 Початкові умови.....	27
2.5 Апроксимація теплофізичних властивостей.....	29
2.5.1 Вода	29
2.5.2 Водяна пара.....	31
2.5.3 Сухе повітря	33
2.5.4 Вологе повітря.....	34
2.6 Метод розрахунку.....	36
3 Результати розрахунків.....	37
3.1 Розрахунок траєкторії краплин.....	37
3.2 Вибір форми і розмірів камери закручування форсунок.....	42
Висновки та рекомендації.....	53
Перелік посилань.....	54
Додаток А.....	55

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Дослідження газодинамічних процесів у двофазному середовищі факелу розпиленої рідини та вибір раціональних параметрів обприскувача залізничного полотна	Літ.	Арк.	Аркушів
Розроб.		Козачинська А.В.				М	6	84
Консульт.						МОНУ, УДУНТ, ІСЕ, гр. EE2221		
Керівник		Жевжик О.В.						
Н. контр.		Потапчук І.Ю.						
Зав. каф.		Босий Д.О.						

ВСТУП

Рослини, проростаючи корінням у насип залізничного полотна, згодом її руйнують. Це спричиняє щорічні фінансові втрати "Укрзалізниці" на відновлення та обслуговування дороги. Знищення рослинності обприскуванням гербіцидами дозволяє значно скоротити ці витрати.

Від якісного приготування робочої рідини та її розпилення залежить результат хімічної обробки, і, як наслідок, витрата дорогих гербіцидів, а також екологічна обстановка в смузі відведення. Тому важливим завданням є вибір характеристик розпилювання гербіциду: дисперсності, початкової швидкості крапель, кута розкриття факела, відстані між форсунками та максимальної швидкості вітру, при якій відбувається обробка [1-3].

З різних шляхів вирішення проблеми, найбільш прийнятний - це математичне моделювання краплинного факела розпиленого гербіциду платформного обприскувача.

Мета роботи: побудувати математичну модель газодинамічних процесів у двофазному середовищі (повітря-краплини) факелу розпиленої рідини, та вибрати раціональні параметри обприскувача залізничного полотна.

Відповідно до поставленої цілі в роботі вирішені наступні завдання:

складання замкненої системи рівнянь математичної моделі та розв'язання її за допомогою чисельного методу;

складання програми для ПЕОМ для розв'язку рівнянь математичної моделі, проведення розрахунків з аналізом отриманих результатів;

вибір раціональних параметрів обприскувача залізничного полотна.

Об'єкт дослідження – процеси, що відбуваються у двофазному середовищі факелу розпиленої рідини.

Методи дослідження – чисельні та аналітичні методи.

Практичне значення отриманих результатів: результати роботи можливо використовувати при проектуванні нових та дослідженні існуючих обприскувачів залізничного полотна.

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Апробація результатів магістерської роботи. Основні положення роботи і результати досліджень доповідалися здобувачем і обговорювалися на XII Міжнародна науково-практична конференція «EUROPEAN SCIENTIFIC CONGRESS» (25-27.12.2023) SPC "Sci-conf.com.ua", Мадрид, Іспанія. 2023.

Публікації.

Козачинська А.В., Потапчук І.Ю., Жевжик О.В. Платформовий обприскувач гербіцидами залізничної колії / А.В. Козачинська, І.Ю. Потапчук, О.В. Жевжик // Proceedings of XII International Scientific and Practical Conference “European scientific congress” (December 25-27, 2023). Barca Academy Publishing. Madrid, Spain. 2023. Pp.164-167.

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. ОПИС ПЛАТФОРМНОГО ОБПРИСКУВАЧА ЗАЛІЗНИЧНОГО ПОЛОТНА

1.1. Пристрій та принцип дії обприскувача

До складу обприскувача (рис. 1.1) входять: ємність 1 для води об'ємом 18 м³, дозатор 2 гербіциду об'ємом 0,1 м³, електрична станція АБ-4 з генератором 3, відцентровий насосний агрегат 4, кран запірний 5, регулятор 6, змішувач 7, пульт управління 8 в кабіні, два запірних вентиля 9, штанга 10 з розпилювачами 1, манометр контролю тиску води 12.

Заправлення водою здійснюється від водопровідної мережі залізничної станції опущеним шлангом в бак через заливний люк.

Гербіцид об'ємом 100 л заливається в дозатор через заправний штуцер із тари постачальника. Після заправки штуцер герметизується заглушкою.

Підготовка обприскувача до роботи. Штанги встановити у робоче положення. Відкрити запірний кран на магістралі всмоктування води та вентиль дозатора. Включити насосний агрегат, подати воду на розпилювання при відкритих запірних вентилях на штанзі. Контролювати за манометрами тиск води у магістралі подачі на розпилювачі, встановити тиск за допомогою регулятора.

Обприскування. Локомотив переміщає платформу ділянкою обробки зі швидкістю встановленої технологією. Застосовується 4-вісна платформа з металевими бортами, модель 13-401 (рис. 1.2).

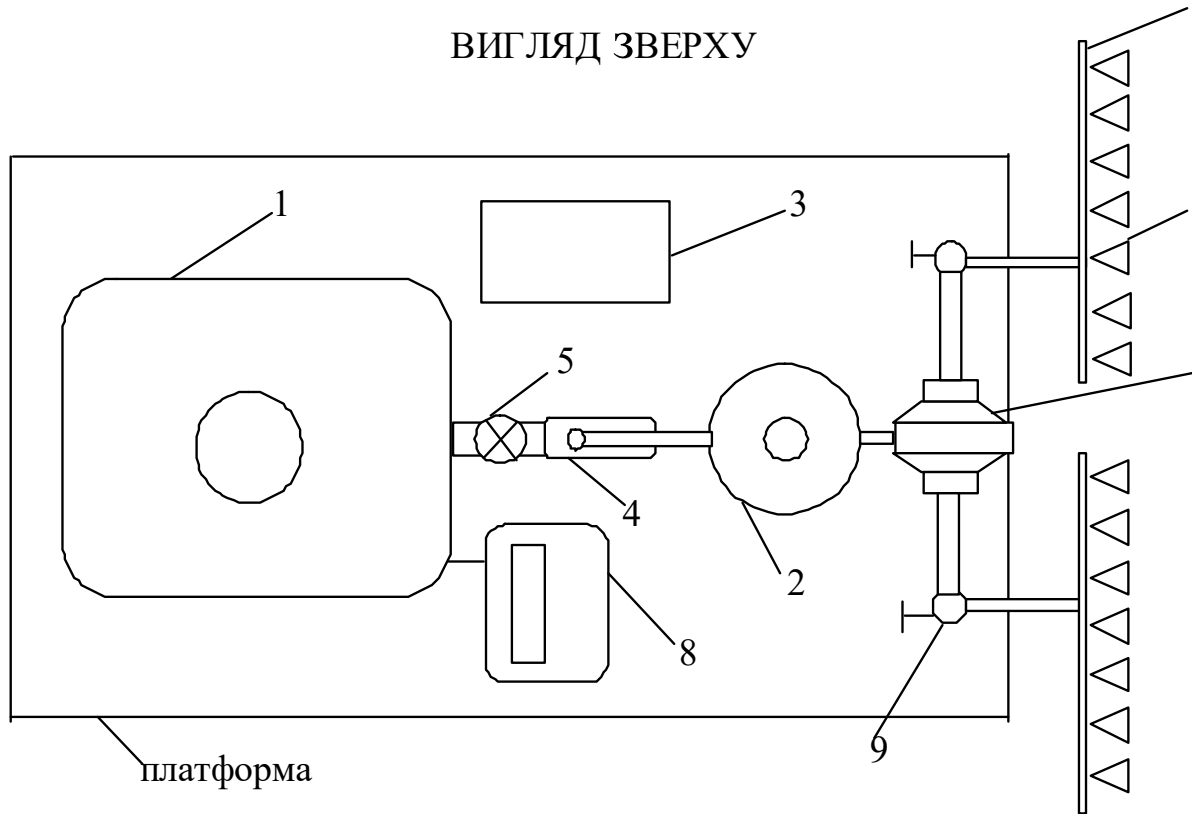
Включаються електрогідроклапани дозатора.

Гербіцид витісняється з дозатора у змішувач, з якого середовище після перемішування надходить у штанги з розпилювачами.

При закінченні обприскування вимикаються електрогідроклапани дозатора і після промивання водою штанг з розпилювачами закривається запірний кран на магістралі всмоктування. Вимикається електрична станція. Штанги переводять у транспортне положення.

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИГЛЯД ЗВЕРХУ



ВИГЛЯД ЗБОКУ

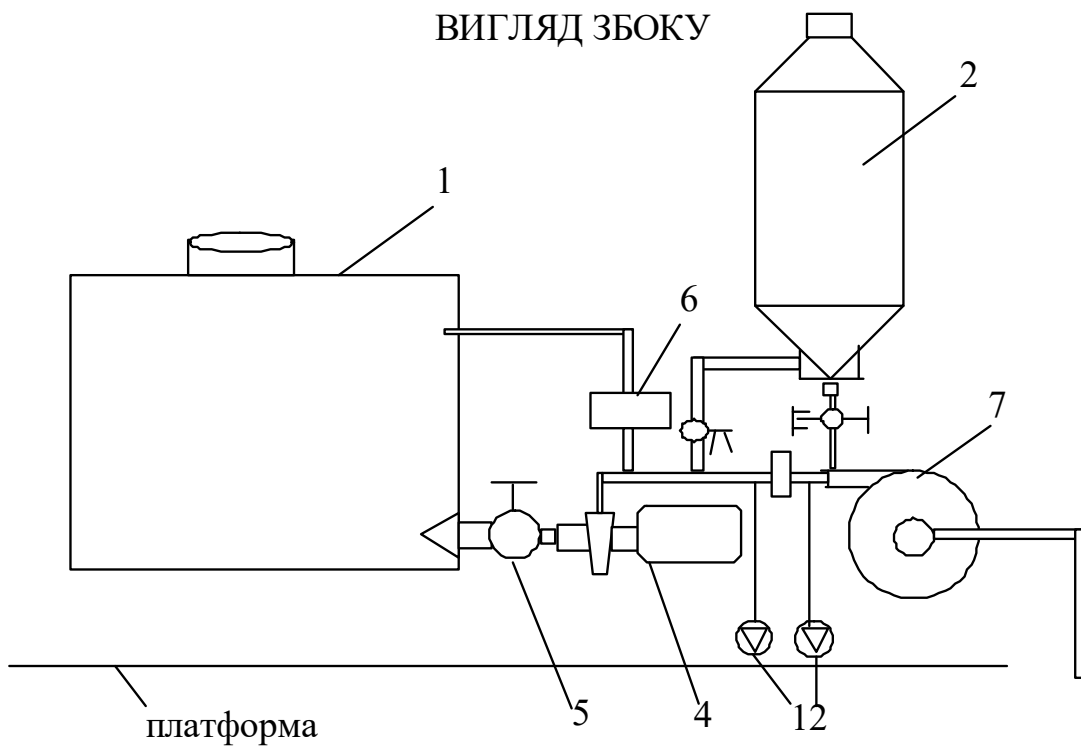


Рисунок 1.1 – Схема обприскувача

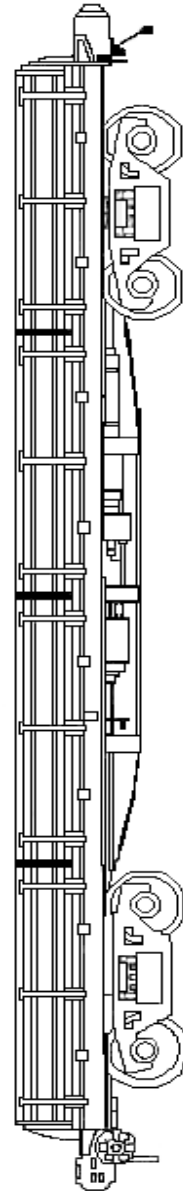
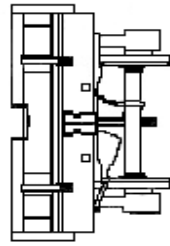


Рисунок 1.2 – Залізнична платформа, модель 13-401

1.2 Технічна характеристика обприскувача

Платформний обприскувач гербіцидами – автономний агрегат, що переміщується локомотивом, з роздільним зберіганням води та гербіциду, потоковим змішуванням перед розпилюванням, призначений для обприскування гербіцидами залізничного полотна

Технічна характеристика.

Тягове обладнання	локомотив
Платформа	4-х - вісна
Тип обприскувача	навісний
Насосний агрегат	електроприводний відцентровий
тиск, МПа	0,4
витрата рідини, л/хв	75
Розпилювачі Ф03.1.6	відцентрові ТУ-У-23074337-98
кількість, шт	46
тиск, МПа	0,3
витрата рідини, л/хв	1,6
Енергоспоживання	
тип джерела енергії	електростанція АБ-4 (3-х фаз. 220 В; 50 Гц.)
Потужність, кВт	4
Запас на обприскувачі	
води, м ³	18
гербіциду, л	100
Умови обприскування	
тип гербіциду	Арсенал (Раундап)
доза використання, л/га	2
підготовка робочої рідини	перемішування в потоковому змішувачі

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

швидкість руху	30
обприскувача, км/год	
ширина оброблюваного	
полотна, м	5
витрата робочої рідини, л	75
довжина оброблюваного	
полотна, км	100
температура повітря, °C	14...25
вологість повітря, %	опадів відсутні
швидкість бічного вітру, м/с	до 3
відхилення витрати	
рідини від номінальної, %	не більше 10
Управління	дистанційне з платформи
Чисельність персоналу	1
Екологічні вимоги	безпечний для персоналу під час обприскування та обслуговування

Обприскувач встановлюється на чотиривісній платформі та переміщається по колії локомотивом.

У транспортному положенні обприскувач має габарити платформи.

Швидкість переміщення залізницею не обмежується і залежить від типу локомотива.

У робочому положенні габарити обприскувача шириною штанги 5,4 м, висота над полотном 0,6...0,8 м. Швидкість переміщення до 30 км/год.

1.3 Типи гербіцидів

У цьому обприскувачі можливе застосування гербіцидів двох типів: Арсенал та Раундап [4-7].

Гербіцид АРСЕНАЛ імазапир є широкодіапазонним та післядіючим засобом, який був розроблений у Сільськогосподарському дослідницькому центрі

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

американської компанії Ціанамід, у місті Принсетон, Нью-Джерсі. Арсенал має відмінну активність проти однорічних та багаторічних трав та широколистих бур'янів, а також проти багатьох видів листяних дерев.

Опис продукту.

Хімічна назва: 2/4,5-дихидро-4-метил-4-/1-метил-етил/-5-оксо-1H-імідазол-2-іл-3-піридинекарбоксилова кислота.

Хімічна група: імідазолінон.

Назва зареєстрованих марок: AC 252, 925, CL 252, 925, CL 243, 997.

Інші назви: ARSENAL, CHOPPER, ASSAULT, CONTAIN

Молекулярна формула: C₁₃H₁₅N₃O₃

Фізичні та хімічні властивості:

Молекулярна вага261,3

Фізичний стан.....порошок від білої до жовто-коричневої забарвлення з легким кислуватим запахом

Температура плавлення.....169-173 °C

Розчинність у воді.....9740 мг/кг при 15 °C; 11272 мг/кг при 25 °C; 13470 мг/кг при 35 °C

Тиск випаровування..... $1 \cdot 10^{-7}$ мм.рт.ст. при 60 °C

Стабільність..... діюча речовина, її водні та гранульовані форми виявилися стабільними за різних температур досвідченого періоду, тобто від 12 до 24 місяців при 25 °C, 12 місяців при 37 °C, 3 місяці при 45 °C. Крім цього, розчин з концентрацією 250 г кислотного еквівалента на 1 л, розташований у баку, був стабільним протягом 6-ти тижнів дослідного періоду при кімнатній температурі протягом 1-го тижня при 50 °C.

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Форми розфасовки

Форма розфасовки	Концентрація чинного речовини	Зауваження
розчин	50, 100, 220, 250 г.к.е./л	містить поверхнево-активну добавку; використовується для контролю бур'янів на ділянках промисловості
рідина	1 та 10 % к.е.	містить фарбу, використовується на порізаних стволах
емульсиро- ванний кон- центрат	240 г к.е/л	змішується з водою, дизельним паливом і використовується для впорскування в дерева
гранули	0,5; 1,0; 2,0, 2,5; 5,0 % к.е.	для контролю бур'янів на індустріальних ділянках

Спосіб дії. Гербіцид Арсенал вбиває рослини скорочуючи рівень тригалузових ланцюжків аліфатичних амінокислот, валіну, леуцину та ізолеуцину за допомогою затримання синтезу ацетогідроксильної кислоти, ензиму, який є звичайним для біосинтезу цих амінокислот. Таке затримання викликає розрив синтезу протеїну, який у свою чергу веде до перешкод у синтезі ДНК та зростанні клітин.

На активність Арсеналу не впливають дощі, що випали пізніше за 1 годину після застосування через швидку абсорбцію гербіциду.

Гербіцид РАУНДАП застосовується на залізницях для боротьби з бур'янистою та деревно-чагарниковою рослинністю юна залізничних коліях та смузі відчуження в період з травня по жовтень. Раундап екологічно безпечний та дозволений в Україні для застосування на залізницях без обмежень із 1980 року. Препарат було розроблено американською компанією Монсанто.

Норма витрати Раундапу оброблюваної смуги в 5 м становить на 1 км

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

0,3...0,5 л препарату для трав'янистих рослин і 0,5...0,8 л на 1 км шляху для чагарникової рослинності.

Бур'яни обробляють у період їхнього активного зростання.

Для одноразової високоякісної обробки ділянки дороги необхідно витратити препарат із розрахунку 5 л на 1 га. Рекомендується застосовувати гербіцид у суху погоду, не менше ніж за 6 годин до передбачуваного дощу.

Опис продукту. Фізичні та хімічні властивості.

РАУНДАП (нітосорг, гліфосат), молекулярна формула $C_3H_8NO_5P$, біла кристалічна речовина, температура плавлення 230 °С, добре розчиняється у воді.

Форма випуску та зберігання.

Випускається у формі 36 %-ого водного розчину. Викликає сильну корозію металів, тому зберігається в поліетиленовій та металевій тарі з антикорозійним покриттям.

Спосіб дії. Препарат системної дії швидко переміщається з надземної частини в кореневу частину рослин і викликає їх знищення. Швидко втрачає токсичність у ґрунті. Повністю розкладається за 2...4 тижні. Нетоксичний для комах.

1.4 Приготування робочої суміші та екологічна безпека

Обприскувач з циркуляційним перемішуванням гербіцидів та води в баку, перемішуванням у баку мішалкою, заправкою бака робочою сумішшю, приготовленою в машинах-мішалках, як показує досвід, небезпечний для обслуговуючого персоналу та навколишнього середовища:

- оператор усуває несправності та обслуговує агрегат змочений отрутохімікатом, що небезпечно для здоров'я;
- залишки суміші в баку після обприскування та вода після промивання зливається на землю, отруюючи навколишнє середовище.

Тому платформний агрегат розробляється з перемішуванням гербіциду та

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

води в потоковому змішувачі. Цим скорочується площа змоченої гербіцидом поверхні в обприскувачі. Гербіцид зберігається в дозаторі та змішується з водою перед входом у штанги з розпилювачами. Управління обприскуванням передбачає включення та вимкнення подачі гербіциду з дозатора в змішувач.

Свіжоприготовлена робоча суміш активніша, ніж підвищується ефективність обприскування.

Персонал обслуговує обприскувач промитий водою із бака. Залишки суміші після припинення обприскування залишаються тільки в змішувачі та штангах з розпилювачами та змиваються водою.

Підвищується надійність обприскувача, оскільки перед розпилювачами не встановлюються відсічні клапани та фільтри, схильні до засмічення та поломок [8-10].

Техніка безпеки при зберіганні та транспортуванні гербіцидів.

Під час проведення робіт з гербіцидами слід керуватися «Інструкцією з техніки безпеки при зберіганні та транспортуванні пестицидів у с/г.

Техніка безпеки під час обприскування.

1. Приготування робочих розчинів гербіцидів проводиться на спеціально відведених тимчасових майданчиках, ґрунт яких утрамбовується.

2. Перед початком обприскування працюючий повинен перевірити справність усієї апаратури та відрегулювати роботу наконечників-розпилювачів на норму витрати робочої рідини.

3. При обприскуванні слід стежити, щоб факел розпилу не прямував потоком повітря на працюючих.

Вимоги безпеки під час роботи з гербіцидами.

1. Безпека праці та охорона навколишнього середовища під час роботи з гербіцидами має бути забезпечена максимальною механізацією, використанням сучасних препаративних форм та способів внесення препаратів, найсуворішим дотриманням правил техніки безпеки та санітарно-гігієнічних норм. Відповідальність з охорони праці та техніки безпеки під час роботи з гербіцидами покладається на керівників дистанцій.

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Усі роботи здійснюються під керівництвом інженерно-технічних працівників, які мають спеціальну освіту або пройшли курсову підготовку.

3. Керівник робіт зобов'язаний ознайомити осіб, які залучаються до роботи з гербіцидами, з характеристикою використовуваних препаратів, особливостями його впливу на організм людини, запобіжними засобами, виробничою та особистою гігієною, ознайомити з заходами надання долікарської допомоги у випадках отруєння та видати наряд-допуск. До роботи з гербіцидами не допускаються особи віком до 18 років, вагітні жінки.

4. Під час робіт забороняється вживати їжу, пити, курити, знімати засоби індивідуального захисту; це допускається під час відпочинку на спеціальному майданчику, після ретельного миття рук, порожнин рота та носа.

Перевезення арсеналу.

1. Категорично забороняється перевозити разом із гербіцидами харчові продукти, пасажирів.

2. Автомашини та підводи після перевезення арсеналу у разі його розливу треба ретельно вимити, підстилковий матеріал зібрати та спалити; робітники при проведенні вантажно-розвантажувальних робіт повинні надягати комбінезони або халати, рукавиці, респіратори або марлеві пов'язки, що прикривають ніс та рот.

Зберігання арсеналу.

1. Тривале зберігання арсеналу повинно здійснюватися тільки за позитивних температур повітря у спеціально пристосованих для цього складах, що відповідають санітарно-гігієнічним вимогам та правилам техніки безпеки.

2. Тривале зберігання у складах дистанцій дозволяється лише після того, як приміщення буде оглянуто органами санітарної служби та на нього складено паспорт.

3. Приміщення для постійного зберігання арсеналу має бути просторим, світлим, з природною та штучною вентиляцією, мати щільні стіни, гладку цементну підлогу (дерев'яна підлога забороняється). Він має закриватися на замок.

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Під час миття підлоги у воду додають 200 г вуглекислої соди на відро води. Для нейтралізації гербіцидів склад повинен бути забезпечений достатньою кількістю дегазуючих засобів - хлорне вапно, кальцинована сода та ін.

5. На складі має бути встановлений суворий порядок: гербіциди відпускаються лише за письмовим дозволом начальника дистанції або його заступника.

Засоби індивідуального захисту.

1. За кожним працюючим на весь період робіт відповідно до «Норм безкоштовного видачі спецодягу, спецвзуття та запобіжних пристроїв» закріплюють комплект індивідуальних захисних засобів: спецодяг, спецвзуття, фартух прогумований, рукавички або рукавиці з кислотним захисним просоченням та захисні окуляри.

2. Для захисту від потрапляння гербіциду через дихальні шляхи під час обприскування слід використовувати респіратори «Астра-2», «Пелюстка» або марлеві пов'язки.

3. Гумове взуття, рукавички та фартухи обробляють кашкою хлорного вапна або 3...5 % розчином (300...500 г на 10 л води).

1.5 Технологія обприскування

Технологія застосування гербіцидів ґрунтується на двох технологічних операціях – приготування робочої рідини та нанесення її на оброблювані об'єкти.

Робоча рідина необхідна для рівномірного розподілу гербіциду по об'єктах, що обробляються. Вона готується розчиненням рекомендованої до застосування норми препарату певній кількості води. Вода має бути чистою і не містити мулистих суспензій.

Необхідний запас води:

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$E = \frac{\Pi \times Q}{A};$$

де Π – об'єм гербіциду в дозаторі, л;

Q – норма витрати робочої суміші, л/га;

A – норма витрати гербіциду, л/га.

Тоді отримаємо:

$$E = \frac{100 \times 300}{2} = 15 \text{ м}^3 \text{ – для Арсеналу}$$

$$E = \frac{100 \times 300}{5} = 6 \text{ м}^3 \text{ – для Раундапа}$$

Одної заправки достатньо для суцільної обробки площі:

$$\frac{E}{Q} = \frac{15000}{300} = 50 \text{ га} \text{ – для Арсеналу}$$

$$\frac{E}{Q} = \frac{6000}{300} = 20 \text{ га} \text{ – для Раундапа}$$

При ширині обробленої смуги 5 м це відповідає: 100 км колії – для Арсеналу, 40 км колії – для Раундапа. При швидкості локомотива 30 км/год час обробки приблизно: 3,5 год - для Арсеналу; 1,5 год – для Раундапа.

Витрата суміші:

$$Q_{\text{шт}} = \frac{V \times B \times Q}{10 \times 60},$$

де $Q_{\text{шт}}$ - витрата суміші через штангу, л/хв;

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

V - робоча швидкість обприскувача, км/год;

B – ширина захоплення обприскувача, м.

Тоді отримаємо л/хв – для Арсеналу та Раундапа.

Мінімальна витрата гербіциду на обприскування досягається застосуванням відцентрових розпилювачів Ф03.1.6 ТУ У 23074337-98 з витратою 1,6 л/хв при тиску 0,3 МПа та відхиленні на комплекс 3 %.

Тоді потрібна кількість розпилювачів на штанзі $75/1,6=46$ шт, а відстань між розпилювачами 112,5 мм, довжина штанги 5062,5 мм.

Проведення обприскування.

1. Обприскування може проводитися у будь-який час доби за позитивних температур повітря в межах 14...25 °С відсутності атмосферних опадів. Найкращим часом для обприскування є ранковий годинник відразу після висихання роси на листі і вечірній годинник до моменту утворення роси.

2. Проведення обприскування при бічному вітрі зі швидкістю понад 3 м/с не допускається, як може спричинити пошкодження придорожніх лісонасаджень.

3. Обприскування повинно проводитися з постійною швидкістю установки, що обприскує, і постійним тиском у її напірній магістралі.

4. Швидкість проведення обприскування має перевищувати 30 км/год.

5. При вимушених зупинках подача робочої рідини до наконечників-розпилювачів повинна припинятися.

6. При обприскуванні верхні та нижні листові поверхні оброблюваних рослин повинні бути покриті краплями робочої рідини. Оптимальною кількістю крапель на листових поверхнях вважається 30 шт/см².

7. Під час обприскування необхідно постійно контролювати та домагатися бездоганної роботи насосного агрегату, манометра та пристрою, що перемішує. Сопла розпилювачів, що засмітилися, прочищають волосяною щіткою або замінюють.

Підготовка робочої рідини до роботи. Робочу рідину готують у резервуарі обприскувача, попередньо на 2/3 заповнюють водою. Потім, відміряну кількість гербіциду заливають у резервуар, і при включеному пристрої, що перемішує,

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

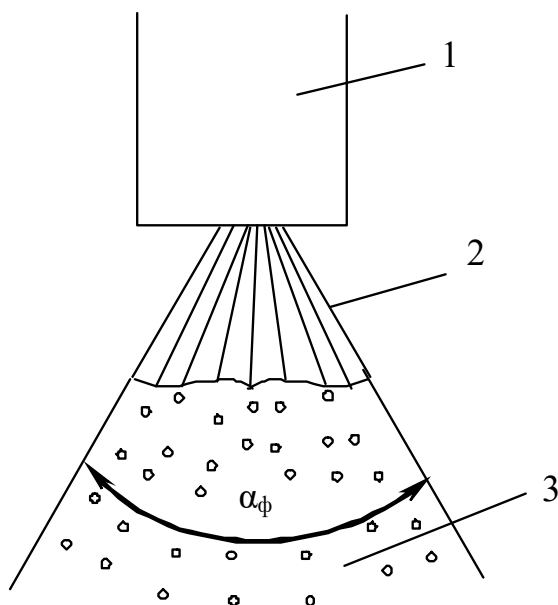
доливають воду точно до робочого об'єму. Робоча рідина перемішується щонайменше 10 - 15 хвилин. Оскільки гербіцид викорінює рослину, проникаючи через листову поверхню, їм не можна обприскувати шляхи за 6 годин і 1 годину після дощу.

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РУХУ КРАПЛИН

2.1 Фізичне уявлення процесу

Обприскування залізничного полотна здійснюється за допомогою платформного обприскувача, що рухається. Розпилювання здійснюється відцентровими форсунками, встановленими на висоті H від поверхні землі. Краплини утворюються після подрібнення плівки на виході із сопла форсунок (рис. 2.1) і, потім, рухаються вниз під дією сили тяжіння та аеродинамічного опору. На траєкторію руху краплин діє бічний вітер.



1 – форсунка, 2 – плівка води, що обертається, 3 – краплинний потік

Рисунок 2.1 – Схема розпилювання відцентровою форсункою

2.2 Припущення під час переходу до математичної моделі

При побудові математичної моделі було зроблено такі припущення:

1. Під час руху платформа не впливає на розподіл швидкості повітря;
2. Краплина вилітає з точкового джерела, розміщеного на осі факелу;
3. Краплинний потік монодисперсний із середнім діаметром краплин d_{32} ;
4. Краплина води замінюється кулею. Зміна форми краплини та, як наслідок, коефіцієнта аеродинамічного опору враховується за допомогою коефіцієнта форми:

$$\Psi = \frac{S_d \cdot C_d}{S_{ш} \cdot C_{ш}},$$

де C_d , C_k – коефіцієнти аеродинамічного опору деформованої краплини і кулі;

S_d , S_k – площа поверхні відповідно;

5. Краплина рухається серед атмосферного повітря з постійними теплофізичними властивостями;
6. Швидкість бокового вітру постійна по висоті та напрямку;
7. Діаметр краплі на траєкторії не змінюється;
8. Зважаючи на малу концентрацію гербіциду, фізичні властивості суміші води та гербіциду приймаються постійними та відповідають воді.

2.3 Рівняння руху краплин

Введемо декартову систему координат хуз з початком у центрі сопла форсунки на момент вильоту краплини. Вісь Ox направимо за напрямом руху платформи (рис. 2.2.). Напрямок бічного вітру збігається із напрямком осі Oy .

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

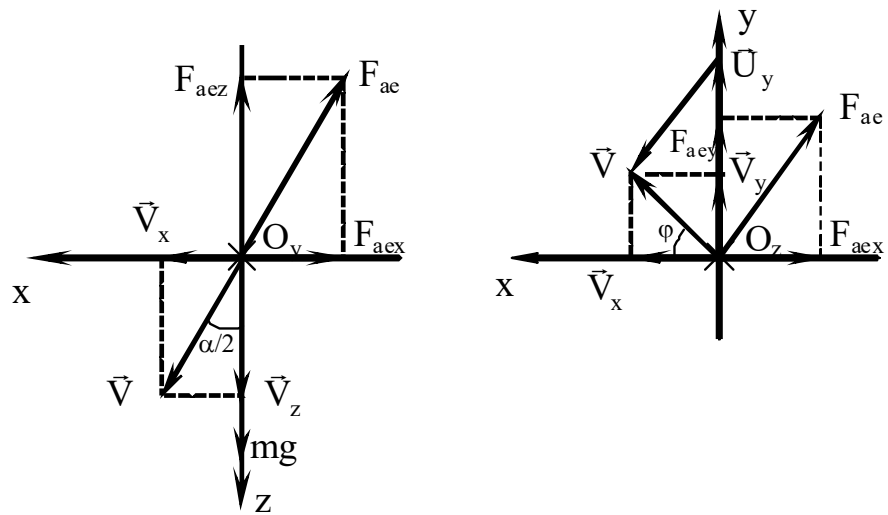


Рисунок 2.2 – Схема взаємодії краплин з повітрям

Рівняння руху центру мас краплі в повітрі в полі сили тяжіння мають вигляд

$$m \frac{d\vec{V}}{d\tau} = -F_{ac} + m\vec{g}, \quad (2.1)$$

$$\frac{d\vec{x}}{d\tau} = \vec{V}; \quad (2.2)$$

де $\vec{V} = \vec{V}(V_x, V_y, V_z)$ – вектор швидкості краплини;

$m = \frac{1}{6} \pi d^3 \rho$ – маса краплини;

$\vec{x} = (x, y, z)$ – радіус-вектор центру мас краплини;

d – діаметр краплини;

τ – час;

$\rho = 998,5 \text{ кг/м}^3$ – густина води;

$g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння.

$\vec{F}_{ac} = C_K \Psi \frac{\pi d^2}{4} \frac{\rho_b |\vec{V} - \vec{U}|}{2} (\vec{V} - \vec{U})$ – сила аеродинамічного опору;

$\vec{U} = \{U_x, 0, 0\}$ – вектор швидкості потоку повітря;

$$C_k = \frac{24}{Re} + \frac{4,4}{\sqrt{Re}} + 0,32 \quad - \quad \text{коефіцієнт аеродинамічного опору краплі,}$$

залежність справедлива при числах Рейнольдса у діапазоні $10^3 < Re < 6 \cdot 10^3$;

$$Re = \frac{\rho_B d |\vec{V} - \vec{U}|}{\mu_B} \quad - \quad \text{число Рейнольдса;}$$

$\rho_B = 1,18 \text{ кг/м}^3$ – щільність повітря;

$\mu_B = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$ – динамічна в'язкість.

Коефіцієнт форми краплі визначається в залежності від числа Вебера:

$$\Psi = \exp(0,03 We^{1,5}),$$

$$\text{де } We = \frac{\rho_B d |\vec{V} - \vec{U}|^2}{\sigma} \quad - \quad \text{Число Вебера;}$$

$\sigma = 0,072 \text{ Н/м}$ – поверхневий натяг води.

Модуль різниці векторів швидкості краплини та вітру:

$$|\vec{V} - \vec{U}| = \sqrt{(V_Z - U_Z)^2 + (V_X - U_X)^2 + (V_Y - U_Y)^2}.$$

У проекціях на осі координат рівняння (1) та (2) мають вигляд:

$$\frac{dV_Z}{d\tau} = -\frac{3}{4} c \Psi \frac{\rho}{\rho_B d} |\vec{V} - \vec{U}| V_Z + g$$

$$\frac{dV_X}{d\tau} = -\frac{3}{4} c \Psi \frac{\rho}{\rho_B d} |\vec{V} - \vec{U}| (V_X - U_X)$$

$$\frac{dV_Y}{d\tau} = -\frac{3}{4} c \Psi \frac{\rho}{\rho_B d} |\vec{V} - \vec{U}| V_Y \quad (2.3)$$

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\frac{dZ}{d\tau} = V_Z$$

$$\frac{dX}{d\tau} = V_X$$

$$\frac{dY}{d\tau} = V_Y$$

2.4 Початкові умови

Початковими умовами на вирішення диференціальних рівнянь руху краплини є початкові координати форсунки та початкові швидкості краплин (рис. 2.3), які визначаються із співвідношень:

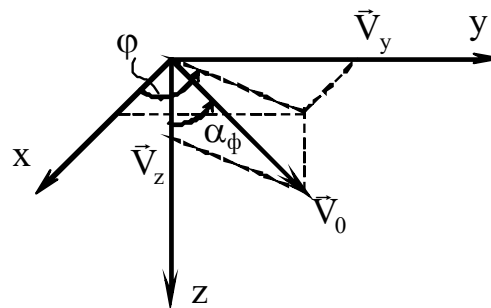


Рисунок 2.3 – Схема до розрахунку початкових умов

$$V_Z = |\vec{V}| \cdot \cos \alpha_{\phi} / 2 ;$$

$$V_X = |\vec{V}| \cdot \sin \alpha_{\phi} / 2 \cdot \cos \varphi + U_{\Pi}; \quad (2.4)$$

$$V_Y = |\vec{V}| \cdot \sin \alpha_{\phi} / 2 \cdot \sin \varphi ;$$

де U_{Π} – швидкість руху платформи.

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

Приймаючи за масштаби: $d_0, V_0, \tau_0, h_\phi, L_0$, отримаємо:

$$\frac{d\bar{V}_x}{d\bar{\tau}} = \frac{1}{24} C\Psi \frac{Re}{St_0} (\bar{U}_x - \bar{V}_x);$$

$$\frac{d\bar{V}_y}{d\bar{\tau}} = \frac{1}{24} C\Psi \frac{Re}{St_0} (\bar{U}_y - \bar{V}_y); \quad (2.5)$$

$$\frac{d\bar{V}_z}{d\bar{\tau}} = \frac{1}{24} C\Psi \frac{Re}{St_0} (\bar{U}_z - \bar{V}_z) + Fr_0;$$

$$\frac{dZ}{d\bar{\tau}} = \bar{V}_z;$$

$$\frac{dX}{d\bar{\tau}} = \bar{V}_x; \quad (2.6)$$

$$\frac{dY}{d\bar{\tau}} = \bar{V}_y,$$

де безрозмірні координати та комплекси:

$$\bar{d} = \frac{d}{d_0}, \bar{V}_x = \frac{V_{x0}}{U_0}, \bar{V}_y = \frac{V_{y0}}{U_0}, \bar{V}_z = \frac{V_{z0}}{U_0}, \bar{U}_x = \frac{U_x}{U_0}, \bar{U}_y = \frac{U_y}{U_0}, \bar{U}_z = \frac{U_z}{U_0},$$

$$\bar{\tau} = \frac{\tau}{\tau_0} = \tau \cdot \frac{U_0}{L_0}, \bar{X} = \frac{X}{L_0}, \bar{Y} = \frac{Y}{L_0}, \bar{Z} = \frac{Z}{L_0}.$$

$$Re = \frac{\rho_B \cdot d_0 \cdot |\bar{V} - \bar{U}|}{\mu_B},$$

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

$$St_0 = \frac{\rho_B \cdot d_0^2 \cdot V_0}{18Z_K \cdot \mu_B},$$

$$Fr_0 = \frac{g \cdot Z_K}{V_0^2}.$$

2.5 Апроксимація теплофізичних властивостей

Точність розрахунків з застосуванням розробленої математичної моделі випарювання краплин емульсії визначається використанням теплофізичних властивостей води, водяної пари, сухого і вологого повітря з мінімальними похибками.

2.5.1 Вода

Густина води в залежності від температури та тиску знаходимо за формулою [1]:

$$\rho = \frac{1}{V} = \frac{1}{\chi \cdot V_{cl}}$$

Приведений питомий об'єм:

$$\begin{aligned} v/v_{cl} = \chi_1 = A_{11} \cdot a_5 \cdot z^{-5/17} + \left[A_{12} + A_{13}\vartheta + A_{14}\vartheta^2 + A_{15}(a_6 - \vartheta)^{10} + A_{16}(a_7 + \vartheta^{19})^{-1} \right] - \\ - (a_8 - \vartheta^{11})^{-1} (A_{17} + 2A_{18}\beta + 3A_{19}\beta^2) - A_{20}\vartheta^{18}(a_9 + \vartheta^2) \left[-3(a_{10} + \beta)^{-4} + a_{11} \right] + \\ + 3A_{21}(a_{12} - \vartheta)\beta^2 + 4A_{22}\vartheta^{-20}\beta^3 - 3A_{24}\beta^2\vartheta^{19}, \end{aligned}$$

$$\text{де } z = Y + (a_3 Y^2 - 2a_4 \vartheta + 2a_5 \beta)^{1/2}; \quad Y = 1 - a_1 \vartheta^2 - a_2 \vartheta^{-6};$$

$$A_{11} = 7,982692717 \cdot 10^0; \quad A_{15} = 2,421647003 \cdot 10^2; \quad A_{19} = 1,105710498 \cdot 10^{-9};$$

$$A_{12} = -2,616571843 \cdot 10^{-2}; \quad A_{16} = 1,269716088 \cdot 10^{-10}; \quad A_{20} = 1,293441934 \cdot 10^1;$$

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

$$\begin{aligned}
A_{13} &= 1,522411790 \cdot 10^{-3}; & A_{17} &= 2,074838328 \cdot 10^{-7}; & A_{21} &= 1,308119072 \cdot 10^{-5}; \\
A_{14} &= 2,284279054 \cdot 10^{-2}; & A_{18} &= 2,174020350 \cdot 10^{-8}; & A_{22} &= 6,047626338 \cdot 10^{-14}; \\
A_{24} &= 3,458158250 \cdot 10^{-5}; & a_5 &= 4,975858870 \cdot 10^{-2}; & a_6 &= 6,537154300 \cdot 10^{-1}; \\
a_7 &= 1,150000000 \cdot 10^{-6}; & a_9 &= 1,418800000 \cdot 10^{-1}; & a_{11} &= 2,995284926 \cdot 10^{-4}; \\
a_8 &= 1,510800000 \cdot 10^{-5}; & a_{10} &= 7,002753165 \cdot 10^0; & a_{12} &= 2,040000000 \cdot 10^{-1};
\end{aligned}$$

$$\vartheta = \frac{\theta}{T_{cl}} - \text{приведена температура};$$

$$\beta = \frac{P}{P_{cl}} - \text{приведений тиск};$$

$$v_{cl} = 0,00317 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$T_{cl} = 647,3 \text{ К};$$

$$P_{cl} = 22120000 \text{ Н/м}^2.$$

В інтервалі температур $0^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100^\circ\text{C}$ густина води може бути розрахована за апроксимаційною формулою

$$\rho = \frac{1}{v} = \left(\sum_{n=0}^{n=7} c_n \theta^n \right)^{-1}, \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned}
\text{де } c_0 &= 4,570502900 \cdot 10^0; & c_2 &= 9,776494160 \cdot 10^{-4}; & c_4 &= 1,64776619973 \cdot 10^{-8}; \\
c_1 &= -1,021895282 \cdot 10^{-1}; & c_3 &= -5,186551601 \cdot 10^{-6}; & c_5 &= -3,13485025590 \cdot 10^{-11}; \\
c_6 &= 3,30678243380 \cdot 10^{-14}; & c_7 &= -1,49192516000 \cdot 10^{-17}.
\end{aligned}$$

У табл. 2.1 наведена густина води в залежності від температури за формулою (2.7). У порівнянні з [1], максимальне відносне відхилення η не перебільшує 0,13 %.

Поверхневий натяг рахували за формулою [1], яка придатна до використання в інтервалі температур $0^\circ\text{C} \leq \theta \leq 360^\circ\text{C}$:

$$\sigma = \sum_{n=1}^{n=9} c_n (T_{cl} - \theta)^n \cdot 10^{-3}, \quad (2.8)$$

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $c_1 = 8,5000507 \cdot 10^{-2}$; $c_4 = 1,0113716 \cdot 10^{-6}$; $c_7 = -9,278193 \cdot 10^{-14}$;
 $c_2 = 4,1925762 \cdot 10^{-3}$; $c_5 = -7,6233175 \cdot 10^{-9}$; $c_8 = 1,345540 \cdot 10^{-16}$;
 $c_3 = -8,1636901 \cdot 10^{-5}$; $c_6 = 3,4656108 \cdot 10^{-11}$; $c_9 = -8,146286 \cdot 10^{-20}$.

Таблиця 2.1 – Похибка визначення теплофізичних властивостей води

t, °C	T, K	ρ , кг/м ³ , (2.7)	$1/v'$, кг/м ³ , [1]	$\eta \times 10^{-3}$, %
0	273,15	999,800	999,80	0,0
10	283,15	999,700	999,70	0,0
20	293,15	998,303	998,30	0,3
30	303,15	995,917	995,72	19,8
40	313,15	992,260	992,26	0,0
50	323,15	987,947	988,04	9,4
60	333,15	983,187	983,19	0,3
70	343,15	977,995	977,71	29,1
80	353,15	971,628	971,63	0,2
90	363,15	963,948	965,16	125,7
100	373,15	958,222	958,13	9,6

2.5.2 Водяна пара

Тиск насиченої водяної пари знаходили за рівнянням

$$P_n(T/T_{cl}) = P_{cl} \beta_k, \quad (2.9)$$

де приведений тиск насичення β_k в залежності від приведеної температури:

$$\beta_k(\theta) = \exp \sum_{v=0}^{v=11} k_v T_v(u),$$

$$\text{де } u = \frac{K_0(\theta^{-1} - K_1)^{0,4} - K_2}{K_3},$$

$T_v(u)$ - поліном Чебишева степені v , $T_0(u)=1$, $T_1(u)=u$; $T_v(u)=2u T_{v-1}(u)-T_{v-2}(u)$,
 $k_0=-4,0596821 \cdot 10^0$; $k_4=-5,1576420 \cdot 10^{-3}$; $k_8=-4.9154288 \cdot 10^{-5}$;
 $k_1= 5,1322555 \cdot 10^0$; $k_5=-1,4689537 \cdot 10^{-3}$; $k_9= 4.6302565 \cdot 10^{-5}$;
 $k_2=-1,1842407 \cdot 10^0$; $k_6= 5,3622818 \cdot 10^{-4}$; $k_{10}= 1.5301334 \cdot 10^{-5}$;
 $k_3= 1,1779592 \cdot 10^{-1}$; $k_7= 1,2455399 \cdot 10^{-4}$; $k_{11}=-2.0954530 \cdot 10^{-5}$.

Густину водяної пари на лінії насичення знаходили за рівнянням стану для ідеального газу:

$$\rho_n = \frac{P_n M_n}{RT}, \quad (2.10)$$

де $R=8,314$ Дж/(моль·К) – універсальна газова стала,

$M_n=0,018$ кг/моль - молярна маса водяної пари.

В табл. 2.2 наведені значення густини, які розраховані за рівнянням (2.10), у порівнянні з даними таблиць [1]. Максимальне відносне відхилення η в інтервалі температур $0^\circ\text{C} \leq \theta \leq 80^\circ\text{C}$ не перевищує 1 %.

Таблиця 2.2 – Похибка визначення теплофізичних властивостей водяної пари

t, °C	T, K	$\rho_n \times 10^{-3}$, кг/м ³ , (2.10)	$1/v'' \times 10^{-3}$, кг/м ³ , [1]	η , %
0	273,15	4,8453	4,84682	0,031
10	283,15	9,3905	9,39682	0,067
20	293,15	17,2726	17,29117	0,107
30	303,15	30,3186	30,36837	0,164
40	313,15	51,0306	51,15613	0,246
50	323,15	82,7107	83,00133	0,351
60	333,15	129,5551	130,19647	0,494
70	343,15	196,7679	198,10218	0,676
80	353,15	290,5830	293,22074	0,904
90	363,15	418,3198	423,29834	1,183
100	373,15	588,3830	597,44294	1,528

Динамічну в'язкість водяної пари на лінії насичення в залежності від температури $0 \leq t \leq 200$ °С, визначали за формулою:

$$\mu_n = (0,0000003232 \cdot t^3 - 0,0001457613 \cdot t^2 + 0,42067 \cdot t + 80,20314) \cdot 10^{-7} \quad (2.11)$$

де температура t в °С.

2.5.3 Сухе повітря

Густину сухого повітря визначали за рівнянням стану для ідеального газу:

$$\rho_{c.n.} = \frac{P_{c.n.} M_{c.n.}}{RT}, \quad (2.12)$$

де $P_{c.n.}$ - тиск сухого повітря,

$M_{c.n.} = 0,029$ кг/моль - молярна маса сухого повітря.

Значення $\rho_{c.n.}$ за (2.12) при тиску 1 бар та відносна похибка від значень [1] наведені у табл. 2.3. Як можна бачити, максимальне значення $\eta \approx 0,2$ %.

Динамічну в'язкість сухого повітря в залежності від температури $230 \text{ K} \leq T \leq 500 \text{ K}$ при тиску, близькому до 1 бар, визначали за формулою:

$$\mu_{c.n.} = (-0,0003021 \cdot t^2 - 0,5032019 \cdot t + 171,347888) \cdot 10^{-7}, \quad (2.13)$$

де температура t в °С.

Максимальна відносна похибка від значень динамічної в'язкості, які наведені у [1] не перевищує 0,02 % (табл. 2.3).

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Таблиця 2.3 – Похибка визначення теплофізичних властивостей сухого повітря

T, K	$\rho_{с.п.},$ кг/м ³ , (2.12)	$1/\nu,$ кг/м ³ , [1]	$\eta,$ %	$\mu_{с.п.} \times 10^{-7},$ Па·с, (2.13)	$\mu_{с.п.} \times 10^{-7},$ Па·с, [1]	$\eta,$ %
210	1,658624	1,6620	0,203	138,100	138,1	0,0000
220	1,583232	1,5860	0,175	143,584	143,6	0,0111
230	1,514395	1,5165	0,139	149,100	149,1	0,0000
240	1,451296	1,4531	0,124	154,446	154,4	0,0298
250	1,393244	1,3947	0,104	159,600	159,6	0,0000
260	1,339657	1,3408	0,085	164,625	164,6	0,0152
270	1,290041	1,2910	0,074	169,600	169,6	0,0000
280	1,243968	1,2447	0,059	174,586	174,6	0,0080
290	1,201072	1,2016	0,044	179,601	179,6	0,0006
300	1,161036	1,1614	0,031	184,622	184,6	0,0119
310	1,123584	1,1238	0,019	189,601	189,6	0,0005
320	1,088472	1,0887	0,021	194,476	194,5	0,0123
330	1,055488	1,0556	0,011	199,201	199,2	0,0005
340	1,024444	1,0246	0,015	203,764	203,8	0,0177
350	0,995174	0,9950	0,017	208,201	208,2	0,0005

2.5.4 Вологе повітря

Теплофізичні властивості вологого повітря рахували, як суміш сухого повітря та водяної пари.

Відносна вологість повітря:

$$\varphi = \frac{\rho_n}{\rho_n} = \frac{P_n}{P_n}. \quad (2.14)$$

Вологовміст:

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

$$x = \frac{\rho_n}{\rho_{c.n.}} = \frac{M_n}{M_{c.n.}} \frac{P_n \varphi}{P_a - P_n \varphi}. \quad (2.15)$$

Густина водяної пари у вологому повітрі:

$$\rho_n = \rho_n \varphi = \frac{P_n M_n}{RT} \varphi. \quad (2.16)$$

Густина вологого повітря:

$$\rho_{в.п.} = \rho_{c.п.} + \rho_{п.} \quad (2.17)$$

Застосовуючи рівняння стану та вважаючи, що $P_{в.п.} = P_{c.п.} + P_{п.} = P_a$, густину вологого повітря визначали як:

$$\rho_{в.п.} = \frac{1}{RT} [P_a M_{c.n.} - P_n \varphi (M_{c.n.} - M_n)]. \quad (2.18)$$

Динамічну в'язкість вологого повітря визначали за формулою [1]:

$$\mu_{в.п.} = \frac{\mu_{c.n.}}{1 + \frac{x_n}{x_{c.n.}} \Phi_{1.2}} + \frac{\mu_n}{1 + \frac{x_{c.n.}}{x_n} \Phi_{2.1}}, \quad (2.19)$$

$$\text{де } \Phi_{1.2} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\mu_{c.n.}}{\mu_n} \right)^{0.5} \left(\frac{M_n}{M_{c.n.}} \right)^{0.25} \right]^2}{2\sqrt{2} \left(1 + \frac{M_{c.n.}}{M_n} \right)^{0.5}}, \quad \Phi_{2.1} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\mu_n}{\mu_{c.n.}} \right)^{0.5} \left(\frac{M_{c.n.}}{M_n} \right)^{0.25} \right]^2}{2\sqrt{2} \left(1 + \frac{M_n}{M_{c.n.}} \right)^{0.5}},$$

$x_{п.} = \frac{P_{п.}}{P_a} \varphi$ - мольна частина водяної пари у вологому повітрі,

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

$x_{c.п.}=1-x_{п}$ - мольна частина сухого повітря у вологому повітрі.

2.6 Метод розрахунку

Розрахунок диференціальних рівнянь (2.3) з початковими умовами (2.4) виконано чисельно на ПЕОМ методом Рунге-Кутта 4-го порядку точності.

Система рівнянь (2.3)-(2.4) може бути представлена у вигляді:

$$\begin{cases} \frac{dU}{dt} = f(t, U), \\ U(0) = U_0 \end{cases},$$

де U – вектор змінних X, Y, Z, V_X, V_Y, V_Z ;

U_0 – вектор початкових значень, $X_0, Y_0, Z_0, V_{X0}, V_{Y0}, V_{Z0}$.

Тоді нові значення змінних розраховуються за рекурентною формулою

$$U_{i+1} = U_i + \frac{\Delta t}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4),$$

де $K_1 = f(t_i, U_i)$;

$$K_2 = f\left(t + \frac{\Delta t}{2}, U_i + \frac{\Delta t}{2} K_1\right);$$

$$K_3 = f\left(t + \frac{\Delta t}{2}, U + \frac{\Delta t}{2} K_2\right);$$

$$K_4 = f(t + \Delta t, U + \Delta t \cdot K_3);$$

$$t_{i+1} = t_i + \Delta t;$$

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ

3.1 Розрахунок траєкторії краплин

На графіках (рис 3.1) наведено проекції траєкторій краплин пестициду на площину yOz , які вилітають перпендикулярно напрямку руху обприскувача ($\varphi=90^\circ$) в залежності від дисперсності (d), кута розпилювання (α_ϕ), початкової швидкості руху платформи обприскувача $U_n=30$ км/год.

З графіка рис.3.1а видно, що траєкторія краплин діаметром 100 і 200 мкм має дві ділянки: перший – ділянку, майже прямолінійного руху, у якому, початкова кінетична енергія краплини витрачається на подолання сили тертя, і другий, на якому внаслідок тертя, практично, відсутня горизонтальна складова швидкості V_y і сила тяжіння врівноважена силою тертя. Вертикальна складова швидкості V_z є сталою. Очевидно, що краплини, що мають меншу початкову кінетичну енергію, більше схильні до впливу бічного вітру, внаслідок більшої довжини другої ділянки.

Зі збільшенням діаметру краплин збільшується початкова кінетична енергія і, як наслідок, довжина першої ділянки траєкторії. Для краплини $d>300$ мкм, що розпилюються з висоти 0,6 м, друга ділянка відсутня, траєкторії наближаються до прямолінійних і дальність польоту не збільшується. Ці краплини найменше схильні до впливу вітру.

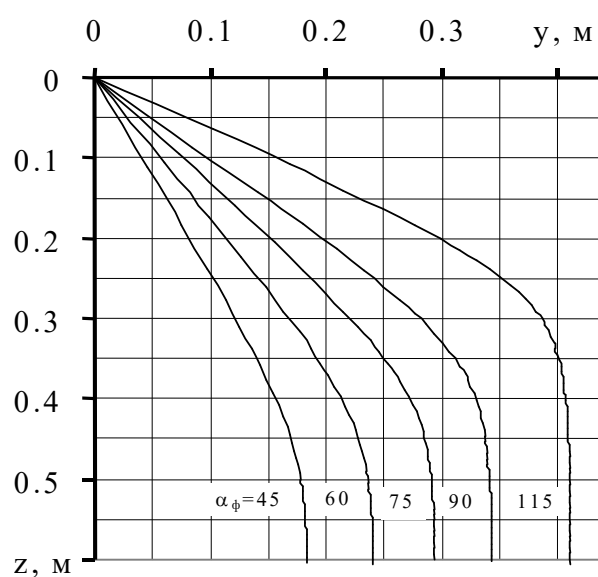
Однак, з огляду на те, що зі зростанням діаметру краплин зменшується площа покриття гербіцидом, то раціональним буде $d=200...300$ мкм.

Відстань між форсунками визначається дальністю польоту краплин і умовами перекриття факелів. Для краплин діаметром $d=200$ мкм крок між форсунками буде 0,34 м.

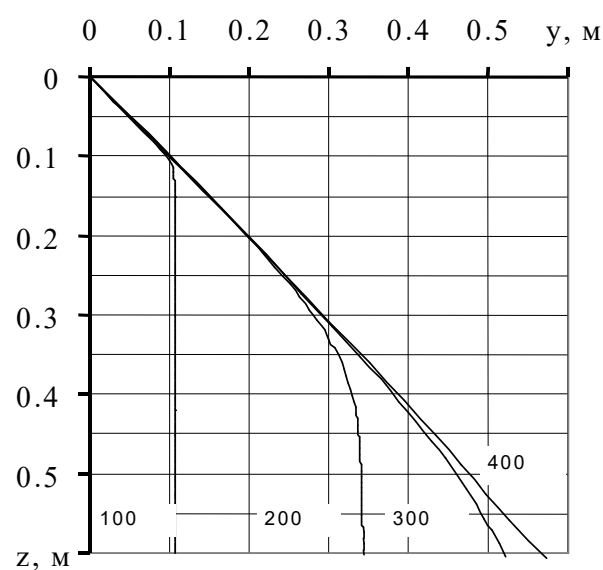
З графіка 3.1.б видно, що зі збільшенням початкової швидкості краплин збільшується дальність польоту та зменшується довжина прямовисної ділянки траєкторії, де більшою мірою проявляється вплив вітру. Збільшення початкової швидкості більше 15,5 м/с не вигідне з точки зору великих витрат енергії на

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

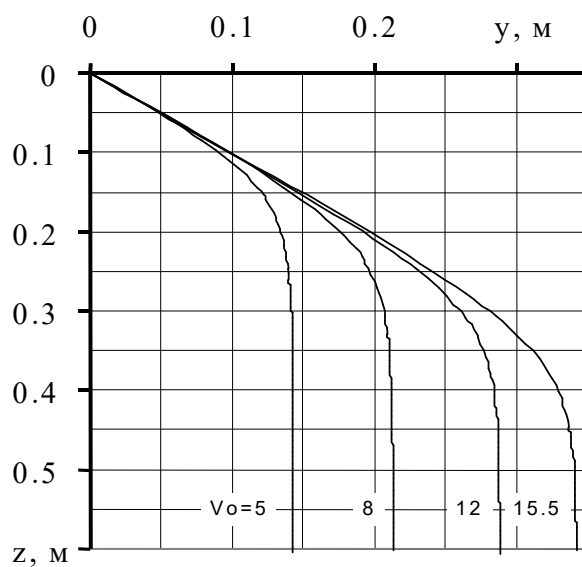
розпилювання та інтенсивного зношення форсунок внаслідок кавітації.



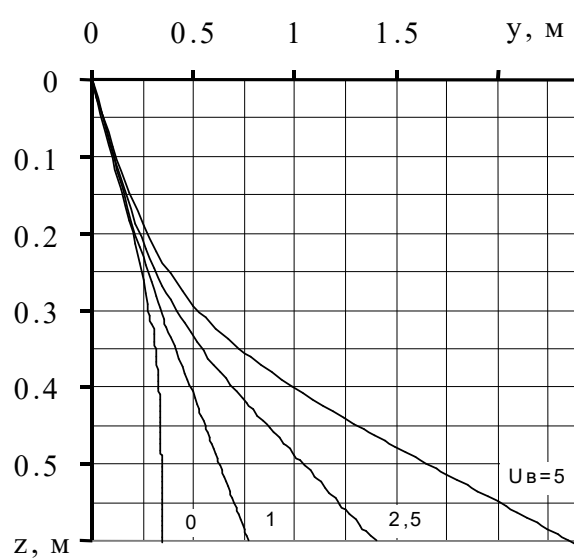
а) $d=200\text{ мкм}$, $V_0=15.5\text{ м/с}$, $U_B=0$



б) $\alpha_\phi=90^\circ$, $V_0=15.5\text{ м/с}$, $U_B=0\text{ м/с}$



в) $d_0=200\text{ мкм}$, $\alpha_\phi=90^\circ$, $U_B=0\text{ м/с}$



г) $d_0=200\text{ мкм}$, $\alpha_\phi=90^\circ$, $V_0=15.5\text{ м/с}$

Рисунок 3.1 – Траєкторії краплин пестициду в залежності від дисперсності та кута розпилювання при швидкості платформи 30 км/год.

Залежності траєкторій краплин від кута розпилювання наведено на рис. 3.1.в. Зменшення кута α_ϕ знижує дальність польоту крапель і, як

наслідок, потребує більшої кількості форсунок на обприскувачі. Зі збільшенням α_{ϕ} дальність польоту збільшується, з одночасним збільшенням прямовисної ділянки траєкторії. Тому кут розпилювання не повинен бути більше 90° .

На рис.3.1.г показано вплив бічного вітру $U_B=0\ldots 5$ м/с на рух краплин гербіциду. Навіть за незначного вітру ($U_B=1$ м/с) дальність польоту краплин $d=200$ мкм зростає вдвічі (до $y=0,8$ м) проти $U_B=0$ м/с.

При подальшому збільшенні швидкості вітру винесення краплин із залізничного полотна збільшується до $y=1,4$ м при $U_B=2,5$ м/с та $y=2,6$ м при $U_B=5$ м/с.

На рис.3.2.а-г показано проекцію траєкторії краплин на площину xOy зі збільшенням швидкості руху платформи обприскувача.

Розрахунки виконані для: $d=200$ мкм, $\alpha_{\phi}=90^{\circ}$, $V_0=15,5$ м/с та швидкість вітру $U_B=0$. З рисунка випливає, що зі збільшенням швидкості платформи факел стає несиметричним щодо площини yOz . Витягування траєкторій крапель по ходу руху платформи (напрямок $0x$) обумовлено додаванням (при $270^{\circ}<\phi<90^{\circ}$) до початкової швидкості краплин V_{x0} , швидкості платформи U_{π} . У той же час, для краплин, що вилітають із форсунки проти руху поїзда ($90^{\circ}<\phi<270^{\circ}$) маємо різницю $|V_{x0}|$ та U_{π} .

На рис. 3.3.а-г показано вплив бокового вітру на траєкторії руху краплин у факелі. З рис.3.3.а видно, що навіть незначний вітер $V_0>1$ м/с істотно деформує та зміщує факел. Бічний вітер призводить до винесення краплин гербіциду із залізничного полотна, попадання їх на прилеглу територію та, як наслідок, збільшення втрат гербіциду, появи необроблених ділянок полотна та забруднення навколишнього середовища. Тому обприскування повинне проводитись при швидкості бокового вітру не більше 1 м/с.

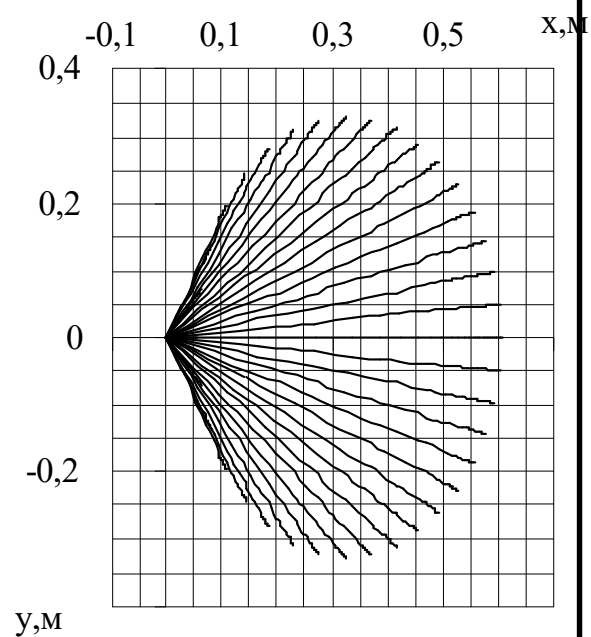
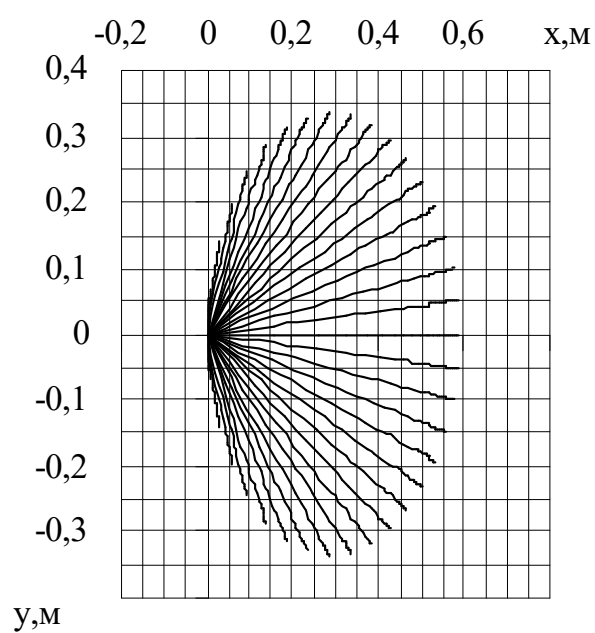
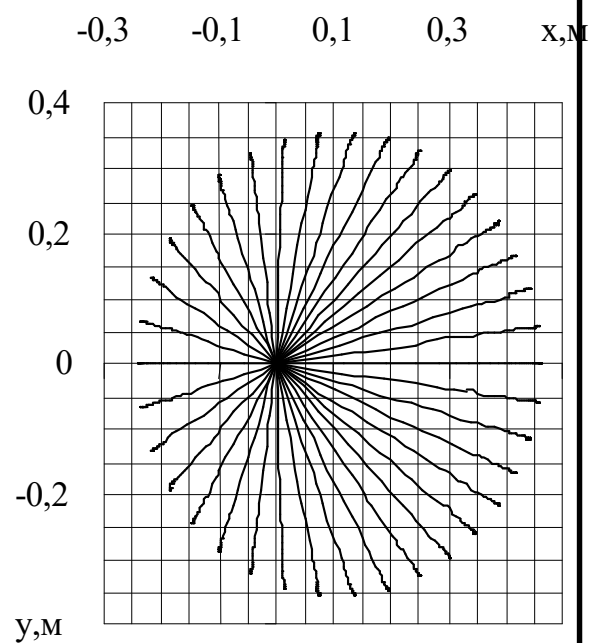
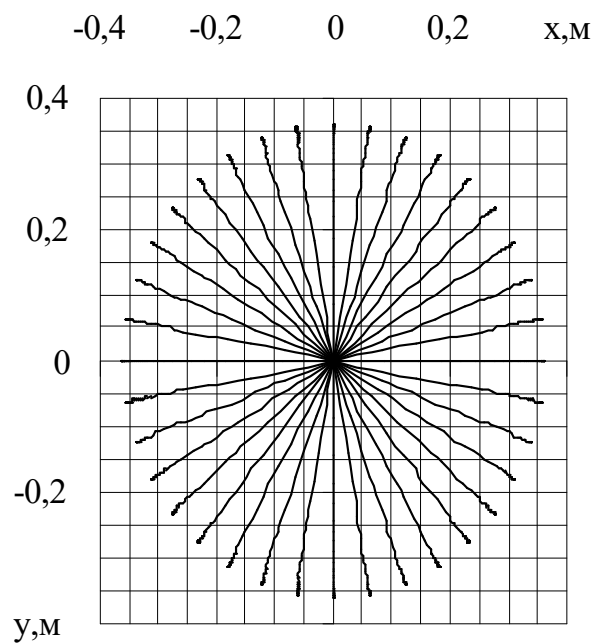


Рисунок 3.2 – Факел форсунки зі збільшенням швидкості платформи

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

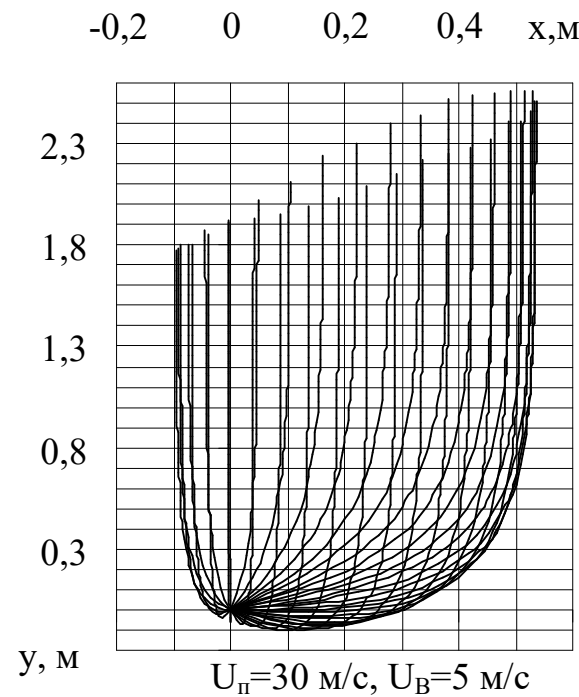
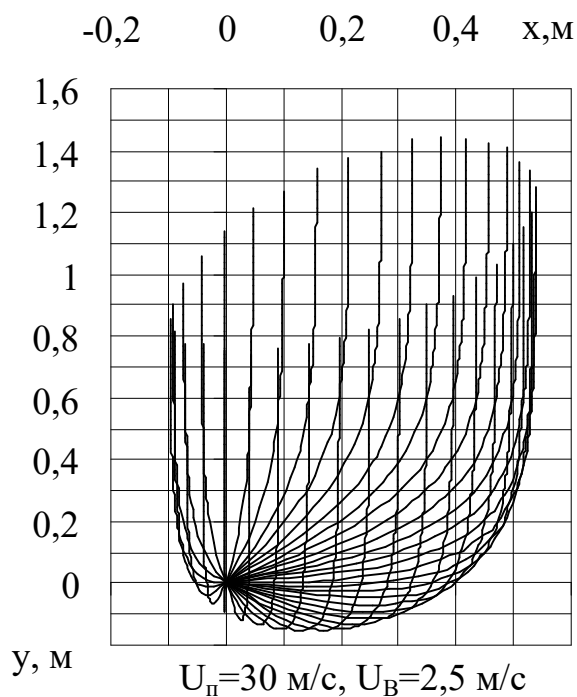
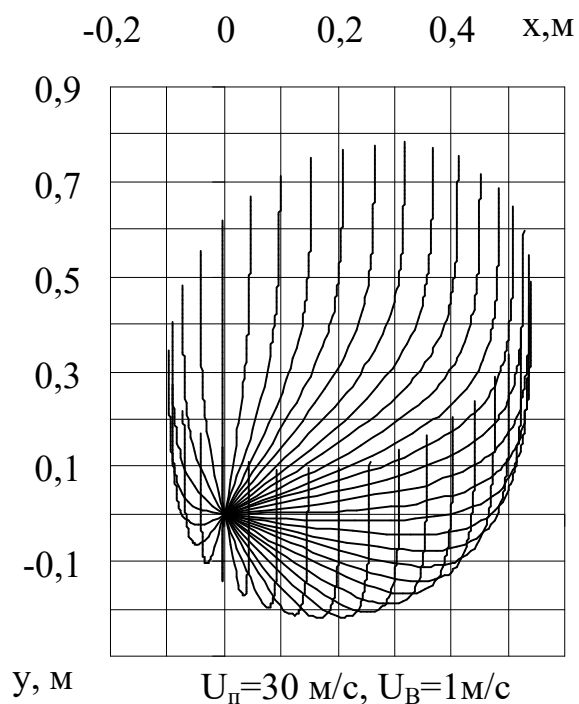
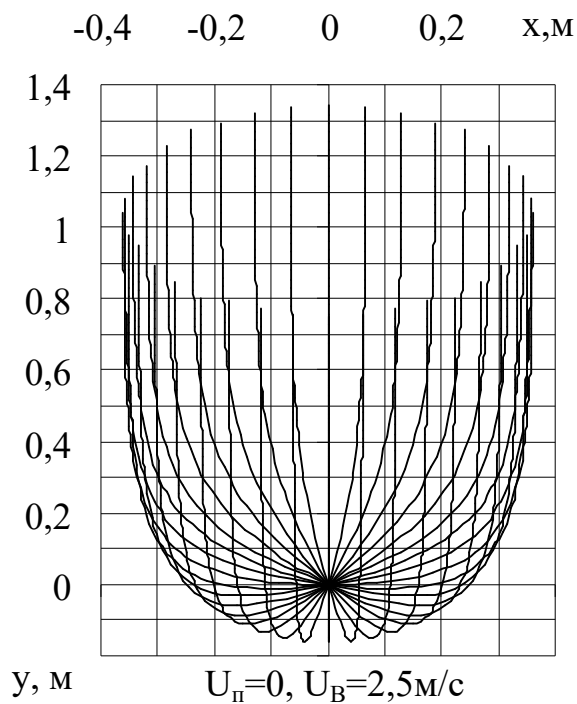


Рисунок 3.3 – Вплив бічного вітру на траєкторії руху краплин у факелі.

3.2 Вибір форми і розмірів камери закручування форсунок

Відомі методи розрахунку відцентрових форсунок за кутом факелу [1] і дисперсністю розпилювання [2].

Основною вимогою до форсунок є рівномірний розподіл робочої рідини по поверхні зрошення. Розрахунки показують, що розподіл робочої рідини по поверхні зрошення з коефіцієнтом варіації меншим ніж 8 %, досягається за умови, що кут розкриття факелу $2\alpha_c$ дорівнює 90° .

Математичне моделювання осаджування краплин дозволило сформулювати вимоги до дисперсності розпилення, яка залежить від швидкості і товщини плівки у сопловому отворі. Форму і розміри камери закручування вибираємо з метою досягнення максимальної швидкості плівки при визначеному тиску. Це можливо за умови мінімальних втрат тиску на тертя в закрученому потоці та вибору оптимального відношення радіуса соплового отвору до радіуса початкового закручування $\left(\frac{r_c}{R_k}\right)_0$.

У запропонованій методиці розміри камери закручування (рис. 3.4) вибираємо, використовуючи наступні вихідні дані:

- об'ємна витрата рідини через форсунку Q , л/хв;
- тиск рідини на вході в камеру закручування P , МПа;
- кут розкриття факелу на радіусі сопла $2\alpha_c$, град;
- максимальний діаметр краплин у факелі d_{max} , мм;
- фізичні властивості робочої рідини (ρ , кг/м³; ν , м²/с).

Розрахунки розмірів камери закручування виконуємо у наступній послідовності:

1. Зважаючи на малі розміри камери, приймаємо максимально досяжне для камери закручування ефективне число Рейнольдса $k = k_* = 1,8$. Чим більше k_* , тим менші втрати тиску на внутрішнє тертя в закрученому потоці. Максимальне $k_* = 2$ відповідає закручуванню ідеальної рідини, тобто позбавленої в'язкості.

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Вибираємо дифузорну камеру закручування, в якій досягається максимальна обертальна швидкість рідини. Згідно з [2] оптимальна камера повинна мати конічну стінку торця з кутом при основі конуса $\delta = 15^\circ$ і плоску стінку сопла.

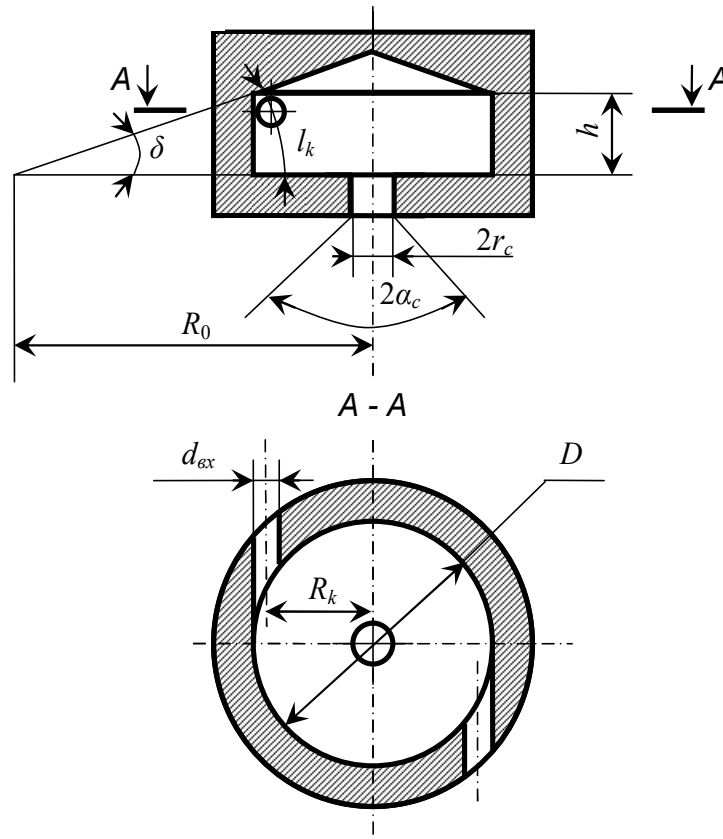


Рисунок 3.4 – Схема камери закручування відцентрового розпилювача

3. Знаходимо оптимальне відношення радіусу соплового отвору до радіусу початкового закручування $\left(\frac{r_c}{R_k}\right)_0$ при $k_* = 1,8$ за графіком, представленим на рис. 3.5, згідно з [1-3].

Оптимальний радіус початкового закручування залежить від форми камери.

При плоских торцевих стінках, коли $R_0 \rightarrow \infty$, $\frac{r_c}{R_0} = 0$, $\left(\frac{r_c}{R_k}\right)_0 \approx 0,26$. Якщо

$\frac{r_c}{R_0} = 0,05$, то можна прийняти $\left(\frac{r_c}{R_k}\right)_0 \approx 0,21$. Але при цьому збільшується діаметр

камери і тертя рідини об стінки, тому доцільно вибрати $\frac{r_c}{R_0}$, яке відповідає

$$\alpha = \frac{R_k}{R_0} = 0.$$

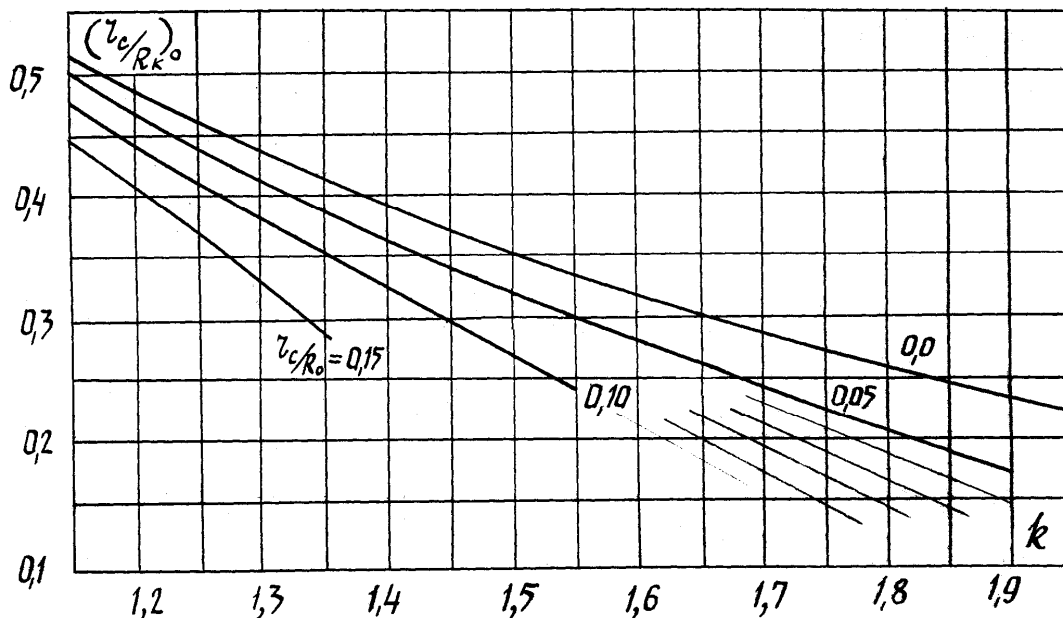


Рисунок 3.5 – Графік визначення оптимального радіусу початкового закручування

4. Для отримання необхідного кута факелу $2\alpha_c$, за графіком рис. 3.6 [2]

знаходимо коефіцієнт заповнення сопла $\varepsilon = \sqrt{1 - \left(\frac{r_c}{r}\right)^2}$, що характеризує площу перерізу плівки в соплі.

5. Визначаємо гідродинамічну характеристику камери закручування

$$A_\Gamma = \frac{\operatorname{tg} \alpha_c}{\varepsilon}, \quad (3.1)$$

при якій забезпечується заданий кут факелу $2\alpha_c$.

Гідродинамічну характеристику камери закручування при відомих k і ε можна віднайти в табл. 3.1.

Таблиця 4.1

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

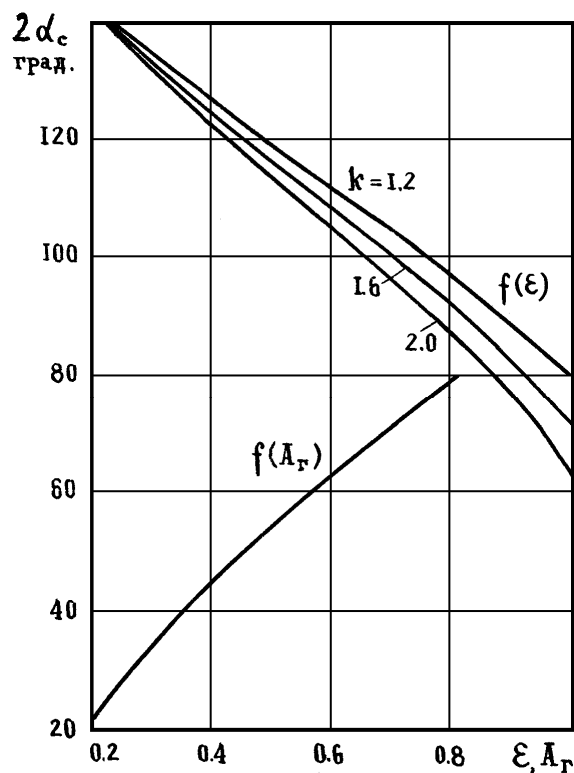


Рисунок 3.6 – Графік визначення кута розкриття факела

Таблиця 3.1 – Гідродинамічна характеристика камери закручування A_{Γ}

$k \backslash \varepsilon$	0,76	0,77	0,78	0,79	0,80	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86
1,6	1,464	1,424	1,385	1,348	1,312	1,276	1,242	1,209	1,176	1,144	1,113
1,8	1,407	1,367	1,329	1,292	1,256	1,221	1,187	1,154	1,122	1,091	1,060
2,0	1,355	1,316	1,278	1,242	1,206	1,171	1,138	1,105	1,073	1,042	1,012

6. При прийнятому куті δ визначаємо відношення радіуса початкового закручування до радіуса основи конуса

$$\alpha = \frac{R_k}{R_0} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\tan \delta} \cdot \frac{l_k}{R_k}}, \quad (3.2)$$

У першому наближенні приймаємо $\frac{l_k}{r_c} \approx 6 - 8$ і $\frac{r_c}{R_k} = \left(\frac{r_c}{R_k} \right)_0$.

7. За наближеним відношенням α та прийнятих k і $\frac{r_c}{R_k}$, з табл. 3.2 [2]

знаходимо значення поправочної функції форми камери закручування f_0 .

Таблиця 3.2 – Поправочна функція форми камери закручування f_0

$\frac{r_c}{R_k} \backslash k$	$\alpha = 0$			$\alpha = 0,10$		
	1,6	1,8	2,0	1,6	1,8	2,0
0,20	0,440	0,334	0,254	0,425	0,327	0,254
0,22	0,487	0,364	0,283	0,453	0,356	0,283
0,24	0,497	0,394	0,312	0,482	0,386	0,312
0,26	0,525	0,424	0,342	0,510	0,416	0,342
0,28	0,553	0,454	0,373	0,538	0,446	0,373
0,30	0,581	0,485	0,404	0,565	0,476	0,404
0,32	0,608	0,515	0,436	0,593	0,507	0,436
0,34	0,635	0,546	0,470	0,620	0,538	0,470

8. В першому наближенні приймаємо коефіцієнт відновлення обертальної швидкості на радіусі початкового закручування $\eta_0 = 0,9 - 0,95$.

9. Характеристику входу камери закручування розраховуємо за формулою:

$$A_0 = \frac{A_\Gamma}{\eta_0} f_0, \quad (3.3)$$

10. При прийнятих ε , k , α , $\frac{r_c}{R_k}$ за табл. 3.3 [2] визначаємо коефіцієнт витрати рідини камерою закручування μ .

11. Радіус соплового отвору розраховуємо за формулою

$$r_c = \sqrt{\frac{Q}{\pi \mu}} \sqrt{\frac{\rho}{2 \Delta P}}, \quad (3.4)$$

Таблиця 3.3 – Коефіцієнт витрати рідини камерою закручування μ при $\alpha = 0$

$\varepsilon \backslash k$	$\frac{r_c}{R_k}=0,2$			$\frac{r_c}{R_k}=0,3$		
	1,6	1,8	2,0	1,6	1,8	2,0
0,76	0,337	0,364	0,387	0,329	0,353	0,375
0,78	0,352	0,381	0,404	0,344	0,369	0,392
0,80	0,368	0,398	0,422	0,359	0,386	0,409
0,82	0,384	0,415	0,441	0,375	0,403	0,428
0,84	0,401	0,433	0,460	0,392	0,421	0,447
0,86	0,419	0,452	0,480	0,410	0,440	0,466
0,88	0,437	0,472	0,500	0,428	0,460	0,487
0,90	0,457	0,493	0,522	0,447	0,480	0,508

12. Радіус початкового закручування знаходимо за формулою

$$R_k = \frac{r_c}{\left(\frac{r_c}{R_k}\right)_0}, \quad (3.5)$$

13. Ефективну площу входних каналів визначаємо за формулою

$$mf_k = \frac{\pi r_c^2}{A_0}, \quad (3.6)$$

З метою забезпечення мінімального відхилення швидкості обертання від осрової симетрії вибираємо кількість входних каналів $m \geq 2$.

Діаметр входного каналу

$$d_{ex} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \frac{f_k}{\chi}}, \quad (3.7)$$

де коефіцієнтом стиснення потоку у вхідному каналі χ враховуємо зменшення площі потоку за вхідним крайком. Значення χ залежить від числа Рейнольдса.

14. Діаметр камери закручування

$$D = 2R_k + d_{ex} + \Delta, \quad (3.8)$$

З метою виключення врізання вхідного каналу в циліндричну стінку камери закручування приймаємо $\Delta = 0,1 \dots 0,2$ мм.

15. Середній діаметр краплин залежить від довжини дуги тороїдальної поверхні камери закручування $l_k = (R_0 - R_k)\delta$, яка входить до характеристики закручування

$$B = \frac{2\pi R_k (R_0 - R_k) \delta}{mf_k}, \quad (3.9)$$

Для отримання факелу, в якому краплини $d_{max} < 350$ мкм, середній діаметр краплин має бути на рівні 120 мкм. Характеристику B визначаємо з відомої формули [2] для середнього об'ємного діаметра краплин відцентрового розпилювача:

$$\frac{d_{30}}{2r_c} = \frac{15}{A^{0,9} B^{0,7} 10^{0,7k}}, \quad (3.10)$$

де геометрична характеристика A , запропонована Г.Н. Абрамовичем

$$A = \frac{\pi r_c R_k}{mf_{ex}} \quad (3.11)$$

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

За формулою (3.9) розраховуємо R_0 і визначаємо висоту камери закручування:

$$h = \left(R_0 - \frac{D}{2} \right) \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (3.12)$$

Розрахована висота h є мінімальною для досягнення необхідного середнього діаметру краплин. При більшій висоті збільшується значення B характеристики закручування (3.9) і зменшується середній діаметр краплин (3.10).

При збільшенні висоти камери закручування зростає площа циліндричної стінки і затрати енергії рідини на тертя та зменшується обертальна швидкість на радіусі початкового закручування. Через коефіцієнт відновлення швидкості η це впливає на гідродинамічну характеристику (3.3) і кут факелу (3.1).

16. Ефективне число Рейнольдса камери закручування розраховуємо за формулою:

$$k = 0,96 \cdot \lg \left(\frac{Q}{2\pi R_0 \delta \nu} \frac{mf_k}{R_k^2} \right), \quad (3.13)$$

За умови, коли $k > k_*$, вибір розмірів закінчено. У випадку коли $k < k_*$ за фактичним k корегуємо $\left(\frac{r_c}{R_k} \right)_0$ і розрахунки повторюємо.

17. Уточнюємо коефіцієнт η відновлення обертальної швидкості на радіусі початкового закручування. Число Рейнольдса для вхідних каналів

$$Re_{ex} = \frac{W_{ex} d_{ex}}{\nu}, \quad (3.14)$$

де середня швидкість рідини у вхідних каналах

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$W_{\text{ex}} = \frac{Q}{mf_{\text{ex}}}, \quad (3.15)$$

Число Рейнольдса біля циліндричної стінки камери закручування

$$Re_l = Re_{\text{ex}} \frac{\pi D}{d_{\text{ex}}}, \quad (3.16)$$

Якщо $Re_l < 5 \cdot 10^5$, розрахунки коефіцієнта тертя на циліндричній стінці виконуємо за формулою Г. Блазіуса:

$$\overline{C_f} = 1,328 Re_l^{-0,5}, \quad (3.17)$$

а коефіцієнт відновлення обертальної швидкості η з рівняння:

$$a_1 \eta^{1,5} + a_2 \eta - 1 = 0, \quad (3.18)$$

Якщо $Re_l > 5 \cdot 10^5$, розрахунки коефіцієнта тертя на циліндричній стінці виконуємо за формулою Л. Прандтля:

$$\overline{C_f} = 0,074 Re_l^{-0,2}, \quad (3.19)$$

а рівняння коефіцієнта відновлення обертальної швидкості η матиме вигляд:

$$a_1 \eta^{1,8} + a_2 \eta - 1 = 0, \quad (3.20)$$

У рівняннях (3.18) і (3.20) $a_1 = \frac{1}{2} \overline{C_f} \psi B$, $a_2 = 1$,

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\text{де коефіцієнт форми камери закручування } \psi = \frac{h}{(R_0 - R_k)\delta} \left(\frac{D}{2R_k} \right)^2.$$

Якщо уточнений коефіцієнт відновлення обертальної швидкості η не перевищує початкового в межах похибки розрахунків, вибір розмірів вважається закінченим. У випадку більшого відхилення η , розрахунки повторюємо з п. 3.

Результати розрахунку розмірів камери закручування відцентрової форсунки наведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Вибір розмірів камери закручування відцентрової форсунки

№	Параметр / характеристика	Формула для розрахунку	Число, значення, величина
1	2	3	4
1	Тиск рідини на вході в камеру закручування, $P_{вх} \cdot 10^6$, Па	—	0,3
2	Об'ємна витрата рідини через розпилювач, Q , л/хв, (м ³ /с)	(4.22)	1 (1,67 · 10 ⁻⁵)
3	Кут розкриття факелу на радіусі сопла, $2\alpha_c$, град	(4.27)	91°
4	Середній об'ємний діаметр краплин у факелі, d_{30} , мкм	(4.10)	88
5	Температура рідини, t , °С	—	20
6	Густина рідини, ρ , кг/м ³	Табл. 2.5	998,2
7	Кінематична в'язкість рідини, ν , · 10 ⁻⁶ , м ² /с	Табл. 2.5	1,004
8	Максимально ефективне число Рейнольдса, k_*	—	1,8
9	Кут при основі конуса, δ , град (рад)	—	15 (0,262)
10	Оптимальне відношення радіуса соплового отвору до радіуса початкового закручування	$\left(\frac{r_c}{R_k} \right)_0$	0,28
11	Коефіцієнт заповнення сопла, ε	Табл. 4.1	0,8
12	Гідродинамічна характеристика, A_Γ	(4.3)	1,258
13	Відношення радіуса початкового закручування до радіуса основи конуса, α	(4.2)	0,1
14	Поправочна функція форми камери закручування, f_0	Табл. 4.2	0,446

Закінчення таблиці 3.4

1	2	3	4
15	Початковий коефіцієнт відновлення обертальної швидкості на радіусі початкового закручування, η_0	—	0,92
16	Характеристика входу, A_0	(4.6)	0,61
17	Коефіцієнт витрати рідини, μ	Табл. 4.3	0,38
18	Радіус соплового отвору, $r_c \cdot 10^{-3}$, м	—	0,8
19	Радіус початкового закручування, $R_k \cdot 10^{-3}$, м	—	2,9
20	Діаметр вхідного каналу, $d_{вх} \cdot 10^{-3}$, м	—	1,6
21	Кількість вхідних каналів, m , шт.	—	2
22	Ефективна площа вхідних каналів, mf_e , 10^{-6} , м ²	(4.21)	3,29
23	Діаметр камери закручування, $D \cdot 10^{-3}$, м при $\Delta = 0,1 \cdot 10^{-3}$, м	—	7,5
24	Геометрична характеристика, A	(4.11)	1,31
25	Середній об'ємний діаметр краплин, d_{30} , мкм	(4.10)	88
26	Характеристика закручування, B	(4.9)	33,7
27	Радіус тороїдальної поверхні, $R_0 \cdot 10^{-3}$, м	(4.9)	15,6
28	Висота камери закручування, $h \cdot 10^{-3}$, м	—	6
29	Ефективне число Рейнольдса, k	(4.13)	2,17
30	Коефіцієнт відновлення обертальної швидкості, η	—	0,95
31	Швидкість у вхідних каналах, $W_{вх}$, м/с	(4.15)	4,65
32	Число Рейнольдса у вхідних каналах, $Re_{вх}$	(4.14)	7018
33	Число Рейнольдса біля циліндричної стінки, Re_l	(4.16)	$1,03 \cdot 10^5$
34	Коефіцієнт тертя на циліндричній стінці, $\overline{C_f}$	(4.17)	0,004
35	Коефіцієнт форми камери закручування, ψ Коефіцієнт, a_1 Коефіцієнт, a_2		1,648 0,111 1,0
36	Відхилення уточненого від початкового коефіцієнта відновлення обертальної швидкості, %	$\frac{\eta - \eta_0}{\eta} \cdot 100$	3

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

В роботі побудована математична модель газодинамічних процесів у двофазному середовищі (повітря-краплини) факелу розпиленої рідини, для розв'язання рівнянь моделі використаний чисельний метод.

Складена програма для ПЕОМ, що дозволяє провести розрахунки за математичною моделлю, виконати аналіз отриманих результатів та вибрати раціональні параметри обприскувача залізничного полотна.

Для зниження впливу бокового вітру діаметр крапель форсунок розпилювання гербіциду має бути $d=200...300$ мкм, кут факела $\alpha_{\phi}=90^{\circ}$, початкова швидкість краплин $V_0=12...15,5$ м/с.

Відстань між форсунками обприскувача при перекритті факелів відповідає дальності польоту краплин і становить $\approx 0,34...0,5$ м.

Вітер більше 1 м/с, внаслідок винесення розпилених краплин із залізничного полотна, призводить до втрат гербіциду, появи необроблених ділянок та забруднення навколишнього середовища. Тому швидкість бічного вітру при обприскуванні повинна бути не більше 1 м/с.

Результати роботи можливо використовувати при проектуванні нових та дослідженні існуючих електродугових реакторів для енергоперетворення вуглецевмісної сировини

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Жевжик О.В. Гідроаеродинамічне удосконалення розпилювальної градирні: дис. канд. техн. наук: 05.14.06 / О.В. Жевжик. – Дніпропетровськ, НЦАОМ України, 2000. –180 с.
2. Коваль В. П. Відцентровий розпилювач пестицидів / В. П. Коваль, О. І. Мележик // Захист рослин. – 1999. – № 1. – С. 21–22.
3. Мележик О. Підвищення ефективності обприскування пестицидами / О. Мележик // Техніка АПК. – 2008. – № 11 – 12. – С. 33–34
4. Жевжик О.В. Рівномірність розподілу рідини в апаратах з плівковими відцентровими розпилювачами. / Вопросы химии и химической технологии. - 2000. - №3. - С. 49-51.
5. Мележик О.І., Кобець А.С., Жевжик О.В. Відцентровий розпилювач пестицидів: рух і випаровування краплин у факелі / Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету. – 2007. -№1, -с. 97-101.
6. Транспортування, зберігання та застосування пестицидів у народному господарстві : ДСП 8.8.1.2.001-98 – К. : 1998. – 70 с. – (Державні санітарні правила і норми).
7. Закон України про пестициди і агрохімікати: № 86/95-ВР від 02.03.95 / Верховна Рада України. – Офіц. вид. – К. : Відомості Верховної Ради. – 1995. – № 14 – С. 91.
8. Agrotop. Dusen und Zubehor fur den Pflanzenschutz. Produktkatalog 105. Obertraubling, 2003. – 112 с.
9. Обладнання для захисту рослин. Обприскувачі. Частина 1. Методи випробовування насадок для розприскування (ISO 5682-1:1996, IDT) : ДСТУ ISO 5682-1:2005. – [Чинний від 2007-10-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2007. – 13 с. – (Національний стандарт України).
10. Розпилювачі відцентрові. Технічні умови : ТУ У 29.3-31177688-002:2006. – [чинний від 2006-05-17]. – Дніпропетровськ : Агромодуль, 2006. – 11 с.

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

Const

{-----}

g=9.80665; {,м/с*c}

R=8.31441; {,КДж/моль*K}

P_a=101325;

Mu_voz=1.85*1E-5;

Ro_voz=1.1893; {}

Cp_voz=1007;

Ro_vod=998.3; {}

{-----}

tau0=0.; {}

Z0=0.; {}

X0=0.;

Y0=0.;

V0=15.5; {}

d0=200*1e-6; {}

TET0=20+273.15; {}

T0=20+273.15; {}

Fi0=60/100;

Zfin=0.6; {}

{-----}

Alfas=45*Pi/180; {}

Fis0=0*Pi/180; {}

Fis_End=0*Pi/180; {}

hFis=10*Pi/180 ; {}

Uz=0; {}

Ux=0;

Uy=0; {м/с}

Upl=30/3.6; {м/с} {}

NEQN=6;

htau=0.01;

htauPrint=htau*1;

Var

Eps_M,

Vz0,Vx0,Vy0,Vz,Vx,Vy,Ro_p0,Z,Fis,Alfa,Beta,

tau,tauPrint:extended;

Ras:text;

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

PnTET,PnT,RonTET,Modul_,Ro_gaz_,Fi_gaz_,Mu_gaz_,Re_,Psi_,
Cd_,Dif_,Sh_,La_gaz_,Nu_,Cp_p_,Ro_g_,Cp_g_,L_g_,n_,Cp_gaz_:extended;

Var

```
{-----}
k1_Z,k1_X,k1_Y,k1_Vz,k1_Vx,k1_Vy:extended;
k2_Z,k2_X,k2_Y,k2_Vz,k2_Vx,k2_Vy:extended;
k3_Z,k3_X,k3_Y,k3_Vz,k3_Vx,k3_Vy:extended;
k4_Z,k4_X,k4_Y,k4_Vz,k4_Vx,k4_Vy:extended;
XY : array[1..NEQN] of extended;
{$I KINEMATIKA.pas}
{$I EQUA.pas}
```

Begin

```
ClrScr;
Assign(Ras,'Ras.pas');
Rewrite(Ras);
Fis:=Fis0;
Repeat
Vz0:=V0*cos(Alfas);
Vx0:=V0*sin(Alfas)*cos(Fis)+Upl;
Vy0:=V0*sin(Alfas)*sin(Fis);
```

tau:=tau0;

```
XY[1]:=Z0;
XY[2]:=X0;
XY[3]:=Y0;
XY[4]:=Vz0;
XY[5]:=Vx0;
XY[6]:=Vy0;
```

```
Writeln(#179,' tau ',#179,' Z ',#179,' X ',#179,' Y ',
#179,' Vz ',#179,' Vx ',#179,' Vy ', #179);
```

```
Writeln(Ras,'tau ', ' Z ', ' X ', ' Y ',
' Vz ', ' Vx ', ' Vy ');
```

```
Window(1,2,80,25);
```

```
Writeln(#179,tau:5:2,#179,XY[1]:6:2,#179,XY[2]:6:3,#179,XY[3]:6:3,
#179,XY[4]:6:1,#179,XY[5]:6:1,#179,XY[6]:6:1,#179);
```

```
Writeln(Ras,tau:5:3,XY[1]:6:3,XY[2]:6:3,XY[3]:6:3,
XY[4]:6:3,XY[5]:7:3,XY[6]:6:3);
```

```
tauPrint:=htauPrint;
```

```
Repeat {Runge-Kutta}
```

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

```

Modul_:=Modul(XY[4],XY[5],XY[6],Uz,Ux,Uy);
Re_:=Re(Modul_,d0, Ro_voz,Mu_voz);
Psi_:=Psi(We(Modul_,d0,Ro_voz,Sigma(TET0)));
Cd_:=Cd(Re_);

```

```

k1_Z:= dz_dtau(tau,XY[1],XY[2],XY[3],XY[4],XY[5],XY[6]);
k1_X:= dX_dtau(tau,XY[1],XY[2],XY[3],XY[4],XY[5],XY[6]);
k1_Y:= dY_dtau(tau,XY[1],XY[2],XY[3],XY[4],XY[5],XY[6]);
k1_Vz:=dVz_dtau(tau,XY[1],XY[2],XY[3],XY[4],XY[5],XY[6]);
k1_Vx:=dVx_dtau(tau,XY[1],XY[2],XY[3],XY[4],XY[5],XY[6]);
k1_Vy:=dVy_dtau(tau,XY[1],XY[2],XY[3],XY[4],XY[5],XY[6]);

```

```

Modul_:=Modul(XY[4]+htau*k1_Vz/2,XY[5]+htau*k1_Vx/2,
              XY[6]+htau*k1_Vy/2,Uz,Ux,Uy);
Re_:=Re(Modul_,d0, Ro_voz,Mu_voz);

```

```

Psi_:=Psi(We(Modul_,d0,Ro_voz,Sigma(TET0)));
Cd_:=Cd(Re_);

```

```

k2_Z:=dZ_dtau (tau+htau/2,XY[1]+htau*k1_Z/2,XY[2]+htau*k1_X/2,
               XY[3]+htau*k1_Y/2,XY[4]+htau*k1_Vz/2,XY[5]+htau*k1_Vx/2,
               XY[6]+htau*k1_Vy/2);
k2_X:=dX_dtau (tau+htau/2,XY[1]+htau*k1_Z/2,XY[2]+htau*k1_X/2,
               XY[3]+htau*k1_Y/2,XY[4]+htau*k1_Vz/2,XY[5]+htau*k1_Vx/2,
               XY[6]+htau*k1_Vy/2);
k2_Y:=dY_dtau (tau+htau/2,XY[1]+htau*k1_Z/2,XY[2]+htau*k1_X/2,
               XY[3]+htau*k1_Y/2,XY[4]+htau*k1_Vz/2,XY[5]+htau*k1_Vx/2,
               XY[6]+htau*k1_Vy/2);
k2_Vz:=dVz_dtau(tau+htau/2,XY[1]+htau*k1_Z/2,XY[2]+htau*k1_X/2,
               XY[3]+htau*k1_Y/2,XY[4]+htau*k1_Vz/2,XY[5]+htau*k1_Vx/2,
               XY[6]+htau*k1_Vy/2);
k2_Vx:=dVx_dtau(tau+htau/2,XY[1]+htau*k1_Z/2,XY[2]+htau*k1_X/2,
               XY[3]+htau*k1_Y/2,XY[4]+htau*k1_Vz/2,XY[5]+htau*k1_Vx/2,
               XY[6]+htau*k1_Vy/2);
k2_Vy:=dVy_dtau(tau+htau/2,XY[1]+htau*k1_Z/2,XY[2]+htau*k1_X/2,
               XY[3]+htau*k1_Y/2,XY[4]+htau*k1_Vz/2,XY[5]+htau*k1_Vx/2,
               XY[6]+htau*k1_Vy/2);

```

```

Modul_:=Modul(XY[4]+htau*k2_Vz/2,XY[5]+htau*k2_Vx/2,
              XY[6]+htau*k2_Vy/2,Uz,Ux,Uy);
Re_:=Re(Modul_,d0, Ro_voz,Mu_voz);
Psi_:=Psi(We(Modul_,d0,Ro_voz,Sigma(TET0)));
Cd_:=Cd(Re_);

```

$k3_Z := dz_d\tau (\tau + h\tau / 2, XY[1] + h\tau * k2_Z / 2, XY[2] + h\tau * k2_X / 2,$
 $XY[3] + h\tau * k2_Y / 2, XY[4] + h\tau * k2_Vz / 2, XY[5] + h\tau * k2_Vx / 2,$
 $XY[6] + h\tau * k2_Vy / 2);$
 $k3_X := dX_d\tau (\tau + h\tau / 2, XY[1] + h\tau * k2_Z / 2, XY[2] + h\tau * k2_X / 2,$
 $XY[3] + h\tau * k2_Y / 2, XY[4] + h\tau * k2_Vz / 2, XY[5] + h\tau * k2_Vx / 2,$
 $XY[6] + h\tau * k2_Vy / 2);$
 $k3_Y := dY_d\tau (\tau + h\tau / 2, XY[1] + h\tau * k2_Z / 2, XY[2] + h\tau * k2_X / 2,$
 $XY[3] + h\tau * k2_Y / 2, XY[4] + h\tau * k2_Vz / 2, XY[5] + h\tau * k2_Vx / 2,$
 $XY[6] + h\tau * k2_Vy / 2);$
 $k3_Vz := dVz_d\tau (\tau + h\tau / 2, XY[1] + h\tau * k2_Z / 2, XY[2] + h\tau * k2_X / 2,$
 $XY[3] + h\tau * k2_Y / 2, XY[4] + h\tau * k2_Vz / 2, XY[5] + h\tau * k2_Vx / 2,$
 $XY[6] + h\tau * k2_Vy / 2);$
 $k3_Vx := dVx_d\tau (\tau + h\tau / 2, XY[1] + h\tau * k2_Z / 2, XY[2] + h\tau * k2_X / 2,$
 $XY[3] + h\tau * k2_Y / 2, XY[4] + h\tau * k2_Vz / 2, XY[5] + h\tau * k2_Vx / 2,$
 $XY[6] + h\tau * k2_Vy / 2);$
 $k3_Vy := dVy_d\tau (\tau + h\tau / 2, XY[1] + h\tau * k2_Z / 2, XY[2] + h\tau * k2_X / 2,$
 $XY[3] + h\tau * k2_Y / 2, XY[4] + h\tau * k2_Vz / 2, XY[5] + h\tau * k2_Vx / 2,$
 $XY[6] + h\tau * k2_Vy / 2);$

$Modul_ := Modul(XY[4] + h\tau * k3_Vz, XY[5] + h\tau * k3_Vx, XY[6] + h\tau * k3_Vy, Uz, U$
 $x, Uy);$

$Re_ := Re(Modul_ , d0, Ro_voz, Mu_voz);$

$Psi_ := Psi(We(Modul_ , d0, Ro_voz, Sigma(TET0)));$

$Cd_ := Cd(Re_);$

$k4_Z := dz_d\tau$
 $(\tau + h\tau, XY[1] + h\tau * k3_Z, XY[2] + h\tau * k3_X, XY[3] + h\tau * k3_Y,$
 $XY[4] + h\tau * k3_Vz, XY[5] + h\tau * k3_Vx, XY[6] + h\tau * k3_Vy);$

$k4_X := dX_d\tau$
 $(\tau + h\tau, XY[1] + h\tau * k3_Z, XY[2] + h\tau * k3_X, XY[3] + h\tau * k3_Y,$
 $XY[4] + h\tau * k3_Vz, XY[5] + h\tau * k3_Vx, XY[6] + h\tau * k3_Vy);$

$k4_Y := dY_d\tau$
 $(\tau + h\tau, XY[1] + h\tau * k3_Z, XY[2] + h\tau * k3_X, XY[3] + h\tau * k3_Y,$
 $XY[4] + h\tau * k3_Vz, XY[5] + h\tau * k3_Vx, XY[6] + h\tau * k3_Vy);$

$k4_Vz := dVz_d\tau (\tau + h\tau, XY[1] + h\tau * k3_Z, XY[2] + h\tau * k3_X, XY[3] + h\tau * k3_Y,$
 $XY[4] + h\tau * k3_Vz, XY[5] + h\tau * k3_Vx, XY[6] + h\tau * k3_Vy);$

$k4_Vx := dVx_d\tau (\tau + h\tau, XY[1] + h\tau * k3_Z, XY[2] + h\tau * k3_X, XY[3] + h\tau * k3_Y,$
 $XY[4] + h\tau * k3_Vz, XY[5] + h\tau * k3_Vx, XY[6] + h\tau * k3_Vy);$

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

```
k4_Vy:=dVy_dtau(tau+htau,XY[1]+htau*k3_Z,XY[2]+htau*k3_X,XY[3]+htau*k3_Y,
```

```
XY[4]+htau*k3_Vz,XY[5]+htau*k3_Vx,XY[6]+htau*k3_Vy);
```

```
XY[1]:=XY[1]+(k1_Z+2*k2_Z+2*K3_Z+k4_Z)*htau/6;
```

```
XY[2]:=XY[2]+(k1_X+2*k2_X+2*K3_X+k4_X)*htau/6;
```

```
XY[3]:=XY[3]+(K1_Y+2*k2_Y+2*K3_Y+k4_Y)*htau/6;
```

```
XY[4]:=XY[4]+(K1_Vz+2*k2_Vz+2*K3_Vz+k4_Vz)*htau/6;
```

```
XY[5]:=XY[5]+(K1_Vx+2*k2_Vx+2*K3_Vx+k4_Vx)*htau/6;
```

```
XY[6]:=XY[6]+(K1_Vy+2*k2_Vy+2*K3_Vy+k4_Vy)*htau/6;
```

```
tau:=tau+htau;
```

```
Writeln(Ras,tau:5:2,XY[1]:6:3,XY[2]:6:3,XY[3]:6:3,
```

```
XY[4]:6:3,XY[5]:7:3,XY[6]:6:3);
```

```
If ABS(tau-tauPrint)<htau/2 then
```

```
Begin
```

```
tauPrint:=tauPrint+htauPrint;
```

```
Writeln(#179,tau:5:2,#179,XY[1]:6:3,#179,XY[2]:6:3,#179,XY[3]:6:3,
```

```
#179,XY[4]:6:3,#179,XY[5]:6:3,#179,XY[6]:6:3,#179);
```

```
End;
```

```
Until XY[1]>Zfin{ or (XY[1]>Zfin+htau/2)}; {Runge-Kutta}
```

```
WRITELN(RAS,' Fi=',Fis*180/Pi:-5:2);
```

```
Fis:=Fis+hFis;
```

```
Until Fis>Fis_end;
```

```
close(Ras);
```

```
Readln;
```

```
End.
```

КИНЕМАТИКА.

```
Procedure Traek_TMO(Z:RealType; Var YI,YPI);
```

```
Var
```

```
XY : array[1..NEQN] of RealType absolute YI;
```

```
YP : array[1..NEQN] of RealType absolute YPI;
```

```
PnTET,PnT,RonTET,Modul_,Ro_gaz_,Fi_gaz_,Mu_gaz_,Re_,Psi_,
```

```
Cd_,Dif_,Sh_,La_gaz_,Nu_,Cp_p_,Ro_g_,Cp_g_,L_g_,n_,Cp_gaz_:extended;
```

```
{1}
```

```
Function dtau_dz:extended;
```

```
Begin
```

```
dtau_dz:=1/XY[4];
```

```
End;
```

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

```

{2}
Function dX_dz:extended;
Begin
  dX_dz:=XY[5]/XY[4];
End;
{3}
Function dY_dz:extended;
Begin
  dY_dz:=XY[6]/XY[4];
End;
{4}
Function dVz_dz:extended;
Begin
  dVz_dz:=-3/4*Cd_*Psi_*Ro_gaz_/Ro_g_/XY[7]*Modul_*
    (XY[4]-Uz)/XY[4];
End;
{5}
Function dVx_dz:extended;
Begin
  dVx_dz:=-3/4*Cd_*Psi_*Ro_gaz_/Ro_g_/XY[7]*Modul_*
    (XY[5]-Ux)/XY[4];
End;
{6}
Function dVy_dz:extended;
Begin
  dVy_dz:=-3/4*Cd_*Psi_*Ro_gaz_/Ro_g_/XY[7]*Modul_*
    (XY[6]-Uy)/XY[4]-g/XY[4];
End;

Begin

  Modul_:=Modul(XY[4],XY[5],XY[6],Uz,Ux,Uy);
  Re_:=Re(Modul_,d0, Ro_voz,Mu_voz);
  Psi_:=Psi(We(Modul_,d0,Ro_voz,Sigma(TET0)));
  Cd_:=Cd(Re_);

  YP[1]:=dtau_dz;
  YP[2]:=dX_dz;
  YP[3]:=dY_dz;
  YP[4]:=dVz_dz;
  YP[5]:=dVx_dz;
  YP[6]:=dVy_dz;

End; {Tras_VNIZ}

```

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

```

{-----TMO -----}
Function Eps_Mashin:Extended;
Var
  Eps:Extended;
Begin
  Eps:=1;
  While 1+Eps<>1 do Eps:=Eps/2;
  Eps_Mashin:=Eps;
End;

Function PWR(a,x:extended):extended;
Begin
  If A=0 Then PWR:=0
  Else PWR:=EXP(X*LN(A))
End;

Function ArcSin(x,eps:Extended):Extended;
Begin
  If ABS(ABS(x)-1)>eps Then
    ArcSin:=ArcTan(x/SQRT(1-SQR(x)))
  Else
    Begin
      If x>0 Then ArcSin:=Pi/2
      Else ArcSin:=-Pi/2
    End;
  End;

Function Tan(x:Extended):Extended; Assembler;
Asm
  FLD  TBYTE PTR [x]  { get argument }
  INT  3Eh             { call shortcut interrupt }
  DW   90F0h           { signal Tan wanted to shortcut handler }
End;

{----- KINEMATIKA -----}
Function Modul(Vz,Vx,Vy,Uz,Ux,Uy:extended):extended;
Begin
  Modul:=sqrt((Vz-Uz)*(Vz-Uz)+(Vx-Ux)*(Vx-Ux)+(Vy-Uy)*(Vy-Uy));
End;

Function We(Modul,d,Ro_vp,Sigma:extended):extended;
Begin
  We:=Modul*Modul*d*Ro_vp/Sigma;
End;

```

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

```
Function Psi(We:extended):extended;
Begin
  Psi:=exp(0.03*We*sqrt(We));
End;
```

```
Function Re(Modul,d,Ro_vp,Mu_vp:extended):extended;
Begin
  Re:=Modul*d*Ro_vp/Mu_vp;
End;
```

```
Function Cd(Re:extended):extended;
Begin
  Cd:=24/Re+4.4/sqrt(Re)+0.32;
End;
```

```
Function Sigma(Tet:extended):extended;
Const
  Tc1=647.3;
Begin
  Sigma:=(8.5000507e-2*(Tc1-Tet)+4.1925762e-3*(Tc1-Tet)*(Tc1-Tet)
    -8.1636901e-5*(Tc1-Tet)*(Tc1-Tet)*(Tc1-Tet)
    +1.0113716e-6*(Tc1-Tet)*(Tc1-Tet)*(Tc1-Tet)*(Tc1-Tet)
    -7.6233175e-9*(Tc1-Tet)*(Tc1-Tet)*(Tc1-Tet)*(Tc1-Tet)*(Tc1-Tet)
    +3.4656108e-11*(Tc1-Tet)*(Tc1-Tet)*(Tc1-Tet)*(Tc1-Tet)*(Tc1-Tet)
      *(Tc1-Tet)
    -9.2781930e-14*(Tc1-Tet)*(Tc1-Tet)*(Tc1-Tet)*(Tc1-Tet)*(Tc1-Tet)
      *(Tc1-Tet)*(Tc1-Tet)
    +1.345540e-16*(Tc1-Tet)*(Tc1-Tet)*(Tc1-Tet)*(Tc1-Tet)*(Tc1-Tet)
      *(Tc1-Tet)*(Tc1-Tet)*(Tc1-Tet)
    -8.146286e-20*(Tc1-Tet)*(Tc1-Tet)*(Tc1-Tet)*(Tc1-Tet)*(Tc1-Tet)
      *(Tc1-Tet)*(Tc1-Tet)*(Tc1-Tet)*(Tc1-Tet))*1e-3;
End;
```

```
{Function Sh(Re,Sc:extended):extended;
Begin
  Sh:=2+0.552*Pwr(Re,0.5)*Pwr(Sc,0.3333);
End;
```

```
Function Sc(Mu_vp,Dif,Ro_vp:extended):extended;
Begin
  Sc:=Mu_vp/Dif/Ro_vp;
End;
```

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```
Function Nu(Re,Pr:extended):extended;
Begin
  Nu:=2+0.552*Pwr(Re,0.5)*Pwr(Pr,0.3333);
End;
```

```
Function Dif(T,P:extended):extended;
Begin
  P:=P/98066.5;
  Dif:=0.0805/P/3600*pwr(T/273,1.8);
End;
```

```
{N+}
USES CRT;
Type
  Real=extended;
Const
  rg=8.314;
  pa=101325;
  mp=0.01814;
  mv=0.02896;
  g=9.81;
  cpv=1007;
  x0=0;
  y0=0;
  tb0=100+273.15;
  fi=2;
  t0=43+273.15;
  v0=18.7;
  w0=0;
  u0=5.18;
  r0=0.34;
  f0=0*pi/180;
  z0=0.2;
  tau0=0;
  d=0.4e-3;
  m0=8.03e-9;
  mk=3.213e-9;
  S=2.512e-6;
  rk=1.89;
  rc=0.54;
  h=1;
  wk=7.18;
  vk=0.83;
  a0=0.64;
```

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

e=0.59;
k=1.7;
hh=1e-3;
hprint=hh*5e1;
Var
re,c,pnt,Ck,sh,nu,l_g,cpg,pntb,Cv,rov,muv,dif,sc,lav,pr,vg,ug,wg,
v_,w_,u_,m_,t_,r_,f_,z_,tau_,v,w,u,m,t,r,f,z,tau,tb,r1,rfm:real;
k1_v,k1_w,k1_u,k1_m,k1_t,k1_r,k1_z,k1_f,
k2_v,k2_w,k2_u,k2_m,k2_t,k2_r,k2_z,k2_f,
k3_v,k3_w,k3_u,k3_m,k3_t,k3_r,k3_z,k3_f,
k4_v,k4_w,k4_u,k4_m,k4_t,k4_r,k4_z,k4_f:real;
tauprint:real;
{$I mat}
Function dv_dt(r,f,z,v,w,u,m,t:real):real;
begin
  dv_dt:=-3/4*c*rov*Pi*d*d/(6*m)*sqrt((v-vg)*(v-vg)
    +(u-ug)*(u-ug)+(w-wg)*(w-wg))*(v-vg)+w*w/r;
end;
Function dw_dt(r,f,z,v,w,u,m,t:real):real;
begin
  dw_dt:=-3/4*c*rov*Pi*d*d/(6*m)*sqrt((v-vg)*(v-vg)
    +(u-ug)*(u-ug)+(w-wg)*(w-wg))*(w-wg)-v*w/r;
end;
Function du_dt(r,f,z,v,w,u,m,t:real):real;
begin
  du_dt:=-3/4*c*rov*Pi*d*d/(6*m)*sqrt((v-vg)*(v-vg)
    +(u-ug)*(u-ug)+(w-wg)*(w-wg))*(u-ug)+g;
end;
Function dm_dt(r,f,z,v,w,u,m,t:real):real;
begin
  dm_dt:=-Pi*d*dif*(Ck-Cv)*sh;
end;
function dt_dt(r,f,z,v,w,u,m,t:real):real;
begin
  dt_dt:=-S/cpg/m/d*(lav*(t-tb)*nu+l_g*dif*(Ck-Cv)*sh)
end;
function dr_dt(r,f,z,v,w,u,m,t:real):real;
begin
  dr_dt:=v
end;
function df_dt(r,f,z,v,w,u,m,t:real):real;
begin
  df_dt:=w/r
end;

```

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

```

function dz_dt(r,f,z,v,w,u,m,t:real):real;
begin
  dz_dt:=u
end;

function tf(r,f,z,v,w,u,m,t:real):real;
begin

  if r>r1 then vg:=-abs(vk)*rk/r
  else vg:=-abs(vk)*rk/rc/e*(r/rc-(1-e)*rc/r);
  if r>rfm then wg:=wk*pwr(rk/r,k-1)
  else
    wg:=wk*pwr(rk/r1,k-1)*rc/r*(1-exp(-k/2*pwr(r/rc,2)))/(1-exp(-k/2));
  if r>r1 then ug:=0
  else ug:=wk/e/a0*(h-z)/h;
  re:=sqrt((v-vg)*(v-vg)+(w-wg)*(w-wg)+(u-ug)*(u-ug))*d*rov/muv;
  c:=24/re+4.4/sqrt(re)+0.32;
  pnt:=101325*pwr(10,-3.142305*(1000/t-1000/373.15)
    +8.2*lg(373.6/t)-0.0024804*(373.15-t));
  Ck:=pnt*mp/rg/t;
  sh:=2+0.552*pwr(re,0.5)*pwr(sc,0.33);
  nu:=2+0.552*pwr(re,0.5)*pwr(pr,0.33);
  l_g:=(6.023647e3-4.603400e1*t+2.654752e-1*t*t
    -8.107155e-4*t*t*t+1.249284e-6*t*t*t*t
    -7.812500e-10*t*t*t*t*t)*1e3;
  Cpg:=1.8936175e5-2.7523623e3*T+1.63549938e1*T*T
    -4.8558809e-2*T*T*T+7.201481e-5*T*T*T*T
    -4.26566e-8*T*T*T*T*T;
end;

```

```

{=====}
=====}

```

BEGIN

CLRSCR;

tb:=tb0;

{teplofizicheskie cv-va vozduha}

pntb:=101325*pwr(10,-3.142305*(1000/tb-1000/373.15)
 +8.2*lg(373.6/tb)-0.0024804*(373.15-tb));

Cv:=mp*pntb/rg/tb*fi/100;

rov:=pa*mv/rg/tb;

muv:=1.88714594e-3-4.59080945e-5*tb+4.75031658e-7*tb*tb
 -2.69723763e-9*tb*tb*tb+9.08767361e-12*tb*tb*tb*tb
 -1.81705729e-14*tb*tb*tb*tb*tb+1.99652778e-17*tb*tb*tb*tb*tb*tb
 -9.30059524e-21*tb*tb*tb*tb*tb*tb*tb;

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

```

dif:=0.0805/(pa/1e5)/3600*pwr(tb/273,1.8);
sc:=muv/rov/dif;
lav:=1.02819680e1-2.73620298e-1*tb+3.11195824e-3*tb*tb
      -1.95804894e-5*tb*tb*tb+7.36051432e-8*tb*tb*tb*tb
      -1.65245226e-10*tb*tb*tb*tb*tb+2.05078125e-13*tb*tb*tb*tb*tb*tb
      -1.08506944e-16*tb*tb*tb*tb*tb*tb*tb*tb;
pr:=muv*cpv/lav;
v:=v0;
w:=w0;
u:=u0;
m:=m0;
t:=t0;
r:=r0;
f:=f0;
z:=z0;
tau:=0;
r1:=rk*(exp(1.13*rc/rk)-1);
rfm:=pwr(a0,0.43)/1.55*rc;
if r>r1 then vg:=-abs(vk)*rk/r
  else vg:=-abs(vk)*rk/rc/e*(r/rc-(1-e)*rc/r);
if r>rfm then wg:=wk*pwr(rk/r,k-1)
  else
    wg:=wk*pwr(rk/r1,k-1)*rc/r*(1-exp(-k/2*pwr(r/rc,2)))/(1-exp(-k/2));
if r>r1 then ug:=0
  else ug:=wk/e/a0*(h-z)/h;
writeln(' r   f   z   v   w   u   vg   wg   ug',
        ' m   t   tau');
window(1,2,80,25);
writeln(r:5:2,f*180/pi:6:2,z:6:2,v:7:2,w:7:2,u:7:2,vg:7:2,wg:7:2,ug:7:2,
        m*1e9:7:3,t-273.2:6:1,tau:7:3);
Tauprint:=hprint;
  repeat {z}
{-----}
  tf(r,f,z,v,w,u,m,t);
  k1_r:=hh*dr_dt(r,f,z,v,w,u,m,t);
  k1_f:=hh*df_dt(r,f,z,v,w,u,m,t);
  k1_z:=hh*dz_dt(r,f,z,v,w,u,m,t);
  k1_v:=hh*dv_dt(r,f,z,v,w,u,m,t);
  k1_w:=hh*dw_dt(r,f,z,v,w,u,m,t);
  k1_u:=hh*du_dt(r,f,z,v,w,u,m,t);
  k1_m:=hh*dm_dt(r,f,z,v,w,u,m,t);
  k1_t:=hh*dt_dt(r,f,z,v,w,u,m,t);

```

tf(r+k1_r/2,f+k1_f/2,z+k1_z/2,v+k1_v/2,w+k1_w/2,u+k1_u/2,
m+k1_m/2,t+k1_t/2);

k2_v:=hh*dv_dt(r+k1_r/2,f+k1_f/2,z+k1_z/2,v+k1_v/2,w+k1_w/2,u+k1_u/2,
m+k1_m/2,t+k1_t/2);

k2_w:=hh*dw_dt(r+k1_r/2,f+k1_f/2,z+k1_z/2,v+k1_v/2,w+k1_w/2,u+k1_u/2,
m+k1_m/2,t+k1_t/2);

k2_u:=hh*du_dt(r+k1_r/2,f+k1_f/2,z+k1_z/2,v+k1_v/2,w+k1_w/2,u+k1_u/2,
m+k1_m/2,t+k1_t/2);

k2_m:=hh*dm_dt(r+k1_r/2,f+k1_f/2,z+k1_z/2,v+k1_v/2,w+k1_w/2,u+k1_u/2,
m+k1_m/2,t+k1_t/2);

k2_t:=hh*dt_dt(r+k1_r/2,f+k1_f/2,z+k1_z/2,v+k1_v/2,w+k1_w/2,u+k1_u/2,
m+k1_m/2,t+k1_t/2);

k2_r:=hh*dr_dt(r+k1_r/2,f+k1_f/2,z+k1_z/2,v+k1_v/2,w+k1_w/2,u+k1_u/2,
m+k1_m/2,t+k1_t/2);

k2_z:=hh*dz_dt(r+k1_r/2,f+k1_f/2,z+k1_z/2,v+k1_v/2,w+k1_w/2,u+k1_u/2,
m+k1_m/2,t+k1_t/2);

k2_f:=hh*df_dt(r+k1_r/2,f+k1_f/2,z+k1_z/2,v+k1_v/2,w+k1_w/2,u+k1_u/2,
m+k1_m/2,t+k1_t/2);

tf(r+k2_r/2,f+k2_f/2,z+k2_z/2,v+k2_v/2,w+k2_w/2,u+k2_u/2,m+k2_m/2,
t+k2_t/2);

k3_v:=hh*dv_dt(r+k2_r/2,f+k2_f/2,z+k2_z/2,v+k2_v/2,w+k2_w/2,u+k2_u/2,
m+k2_m/2,t+k2_t/2);

k3_w:=hh*dw_dt(r+k2_r/2,f+k2_f/2,z+k2_z/2,v+k2_v/2,w+k2_w/2,u+k2_u/2,
m+k2_m/2,t+k2_t/2);

k3_u:=hh*du_dt(r+k2_r/2,f+k2_f/2,z+k2_z/2,v+k2_v/2,w+k2_w/2,u+k2_u/2,
m+k2_m/2,t+k2_t/2);

k3_m:=hh*dm_dt(r+k2_r/2,f+k2_f/2,z+k2_z/2,v+k2_v/2,w+k2_w/2,u+k2_u/2,
m+k2_m/2,t+k2_t/2);

k3_t:=hh*dt_dt(r+k2_r/2,f+k2_f/2,z+k2_z/2,v+k2_v/2,w+k2_w/2,u+k2_u/2,
m+k2_m/2,t+k2_t/2);

k3_r:=hh*dr_dt(r+k2_r/2,f+k2_f/2,z+k2_z/2,v+k2_v/2,w+k2_w/2,u+k2_u/2,
m+k2_m/2,t+k2_t/2);

k3_z:=hh*dz_dt(r+k2_r/2,f+k2_f/2,z+k2_z/2,v+k2_v/2,w+k2_w/2,u+k2_u/2,
m+k2_m/2,t+k2_t/2);

k3_f:=hh*df_dt(r+k2_r/2,f+k2_f/2,z+k2_z/2,v+k2_v/2,w+k2_w/2,u+k2_u/2,
m+k2_m/2,t+k2_t/2);

tf(r+k3_r,f+k3_f,z+k3_z,v+k3_v,w+k3_w,u+k3_u,m+k3_m,t+k3_t);

k4_v:=hh*dv_dt(r+k3_r,f+k3_f,z+k3_z,v+k3_v,w+k3_w,u+k3_u,m+k3_m,t+k3_t);

k4_w:=hh*dw_dt(r+k3_r,f+k3_f,z+k3_z,v+k3_v,w+k3_w,u+k3_u,m+k3_m,t+k3_t);

k4_u:=hh*du_dt(r+k3_r,f+k3_f,z+k3_z,v+k3_v,w+k3_w,u+k3_u,m+k3_m,t+k3_t);

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

```
k4_m:=hh*dm_dt(r+k3_r,f+k3_f,z+k3_z,v+k3_v,w+k3_w,u+k3_u,m+k3_m,t+k3_t);
```

```
k4_t:=hh*dt_dt(r+k3_r,f+k3_f,z+k3_z,v+k3_v,w+k3_w,u+k3_u,m+k3_m,t+k3_t);
k4_r:=hh*dr_dt(r+k3_r,f+k3_f,z+k3_z,v+k3_v,w+k3_w,u+k3_u,m+k3_m,t+k3_t);
k4_z:=hh*dz_dt(r+k3_r,f+k3_f,z+k3_z,v+k3_v,w+k3_w,u+k3_u,m+k3_m,t+k3_t);
k4_f:=hh*df_dt(r+k3_r,f+k3_f,z+k3_z,v+k3_v,w+k3_w,u+k3_u,m+k3_m,t+k3_t);
```

```
v_:=v;
w_:=w;
u_:=u;
m_:=m;
t_:=t;
r_:=r;
f_:=f;
z_:=z;
tau_:=tau;
```

```
v:=v+(k1_v+2*k2_v+2*k3_v+k4_v)/6;
w:=w+(k1_w+2*k2_w+2*k3_w+k4_w)/6;
u:=u+(k1_u+2*k2_u+2*k3_u+k4_u)/6;
m:=m+(k1_m+2*k2_m+2*k3_m+k4_m)/6;
t:=t+(k1_t+2*k2_t+2*k3_t+k4_t)/6;
r:=r+(k1_r+2*k2_r+2*k3_r+k4_r)/6;
f:=f+(k1_z+2*k2_z+2*k3_z+k4_z)/6;
z:=z+(k1_z+2*k2_z+2*k3_z+k4_z)/6;
```

```
tau:=tau+hh;
```

```
{-----}
```

```
if m<=3.213e-9 then
```

```
begin
```

```
v:=(v_+v)/2;
u:=(u_+u)/2;
w:=(w_+w)/2;
m:=(m_+m)/2;
t:=(t_+t)/2;
r:=(r_+r)/2;
f:=(f_+f)/2;
z:=(z_+z)/2;
tau:=(tau+tau_)/2;
```

```
end;
```

```
{ If Wherey=23 then
```

```
Begin
```

```
If Readkey<>#13 then halt;
```

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

```

    Clrscr;
    End;}
If ABS(tau-tauprint)<(hh/2) Then
    Begin
        writeln(r:5:2,f*180/pi:6:2,z:6:2,v:7:2,w:7:2,u:7:2,vg:7:2,
            wg:7:2,ug:7:2,m*1e9:7:3,t-273.2:6:1,tau:7:3);
        tauprint:=tauprint+hprint;
    End;
until m<=mk;
writeln(r:5:2,f*180/pi:6:2,z:6:2,v:7:2,w:7:2,u:7:2,vg:7:2,
    wg:7:2,ug:7:2,m*1e9:7:3,t-273.2:6:1,tau:7:3);

Writeln('---END---');
Readln;
END.

```

```

{N+}
USES CRT;
Type
    Real=extended;
Const
    rg=8.314;
    pa=101325;
    mp=0.01814;
    mv=0.02896;
    g=9.81;
    cpv=1007;
    x0=0;
    y0=0;
    tb0=100+273.15;
    fi=2;
    t0=43+273.15;
    v0=18.7;
    w0=0;
    u0=5.18;
    r0=0.34;
    f0=0*pi/180;
    z0=0.2;
    tau0=0;
    d=0.4e-3;
    m0=8.03e-9;
    mk=3.213e-9;
    S=2.512e-6;
    rk=1.89;

```

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

rc=0.54;
h=1;
wk=7.18;   vk=0.83;
a0=0.64;
e=0.59;
k=1.7;
hh=1e-3;
hprint=hh*5e1;
Var
re,c,pnt,Ck,sh,nu,l_g,cpg,pntb,Cv,rov,muv,dif,sc,lav,pr,vg,ug,wg,
v_,w_,u_,m_,t_,r_,f_,z_,tau_,v,w,u,m,t,r,f,z,tau,tb,r1,rfm:real;
k1_v,k1_w,k1_u,k1_m,k1_t,k1_r,k1_z,k1_f,
k2_v,k2_w,k2_u,k2_m,k2_t,k2_r,k2_z,k2_f,
k3_v,k3_w,k3_u,k3_m,k3_t,k3_r,k3_z,k3_f,
k4_v,k4_w,k4_u,k4_m,k4_t,k4_r,k4_z,k4_f:real;
tauprint:real;
{$I mat}
Function dv_dt(r,f,z,v,w,u,m,t:real):real;
begin
  dv_dt:=-3/4*c*rov*Pi*d*d/(6*m)*sqrt((v-vg)*(v-vg)
    +(u-ug)*(u-ug)+(w-wg)*(w-wg))*(v-vg)+w*w/r;
end;
Function dw_dt(r,f,z,v,w,u,m,t:real):real;
begin
  dw_dt:=-3/4*c*rov*Pi*d*d/(6*m)*sqrt((v-vg)*(v-vg)
    +(u-ug)*(u-ug)+(w-wg)*(w-wg))*(w-wg)-v*w/r;
end;
Function du_dt(r,f,z,v,w,u,m,t:real):real;
begin
  du_dt:=-3/4*c*rov*Pi*d*d/(6*m)*sqrt((v-vg)*(v-vg)
    +(u-ug)*(u-ug)+(w-wg)*(w-wg))*(u-ug)+g;
end;
Function dm_dt(r,f,z,v,w,u,m,t:real):real;
begin
  dm_dt:=-Pi*d*dif*(Ck-Cv)*sh;
end;
function dt_dt(r,f,z,v,w,u,m,t:real):real;
begin
  dt_dt:=-S/cpg/m/d*(lav*(t-tb)*nu+l_g*dif*(Ck-Cv)*sh)
end;
function dr_dt(r,f,z,v,w,u,m,t:real):real;
begin
  dr_dt:=v
end;

```

```

function df_dt(r,f,z,v,w,u,m,t:real):real;
begin
  df_dt:=w/r
end;
function dz_dt(r,f,z,v,w,u,m,t:real):real;
begin
  dz_dt:=u
end;

function tf(r,f,z,v,w,u,m,t:real):real;
begin

  if r>r1 then vg:=-abs(vk)*rk/r
  else vg:=-abs(vk)*rk/rc/e*(r/rc-(1-e)*rc/r);
  if r>rfm then wg:=wk*pwr(rk/r,k-1)
  else
    wg:=wk*pwr(rk/r1,k-1)*rc/r*(1-exp(-k/2*pwr(r/rc,2)))/(1-exp(-k/2));
  if r>r1 then ug:=0
  else ug:=wk/e/a0*(h-z)/h;
  re:=sqrt((v-vg)*(v-vg)+(w-wg)*(w-wg)+(u-ug)*(u-ug))*d*rov/muv;
  c:=24/re+4.4/sqrt(re)+0.32;
  pnt:=101325*pwr(10,-3.142305*(1000/t-1000/373.15)
    +8.2*lg(373.6/t)-0.0024804*(373.15-t));
  Ck:=pnt*mp/rg/t;
  sh:=2+0.552*pwr(re,0.5)*pwr(sc,0.33);
  nu:=2+0.552*pwr(re,0.5)*pwr(pr,0.33);
  l_g:=(6.023647e3-4.603400e1*t+2.654752e-1*t*t
    -8.107155e-4*t*t*t+1.249284e-6*t*t*t*t
    -7.812500e-10*t*t*t*t*t)*1e3;
  Cpg:=1.8936175e5-2.7523623e3*T+1.63549938e1*T*T
    -4.8558809e-2*T*T*T+7.201481e-5*T*T*T*T
    -4.26566e-8*T*T*T*T*T;
end;

```

```

{=====}
=====}

```

BEGIN

CLRSCR;

tb:=tb0;

{teplofizicheskie cv-va vozduha}

pntb:=101325*pwr(10,-3.142305*(1000/tb-1000/373.15)
 +8.2*lg(373.6/tb)-0.0024804*(373.15-tb));

Cv:=mp*pntb/rg/tb*fi/100;

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

```

rov:=pa*mv/rg/tb;
muv:=1.88714594e-3-4.59080945e-5*tb+4.75031658e-7*tb*tb
-2.69723763e-9*tb*tb*tb+9.08767361e-12*tb*tb*tb*tb
-1.81705729e-14*tb*tb*tb*tb*tb+1.99652778e-17*tb*tb*tb*tb*tb*tb
-9.30059524e-21*tb*tb*tb*tb*tb*tb*tb;
dif:=0.0805/(pa/1e5)/3600*pwr(tb/273,1.8);
sc:=muv/rov/dif;
lav:=1.02819680e1-2.73620298e-1*tb+3.11195824e-3*tb*tb
-1.95804894e-5*tb*tb*tb+7.36051432e-8*tb*tb*tb*tb
-1.65245226e-10*tb*tb*tb*tb*tb+2.05078125e-13*tb*tb*tb*tb*tb*tb
-1.08506944e-16*tb*tb*tb*tb*tb*tb*tb*tb;
pr:=muv*cpv/lav;
v:=v0;
w:=w0;
u:=u0;
m:=m0;
t:=t0;
r:=r0;
f:=f0;
z:=z0;
tau:=0;
r1:=rk*(exp(1.13*rc/rk)-1);
rfm:=pwr(a0,0.43)/1.55*rc;
if r>r1 then vg:=-abs(vk)*rk/r
else vg:=-abs(vk)*rk/rc/e*(r/rc-(1-e)*rc/r);
if r>rfm then wg:=wk*pwr(rk/r,k-1)
else
wg:=wk*pwr(rk/r1,k-1)*rc/r*(1-exp(-k/2*pwr(r/rc,2)))/(1-exp(-k/2));
if r>r1 then ug:=0
else ug:=wk/e/a0*(h-z)/h;
writeln(' r f z v w u vg wg ug',
'm t tau');
window(1,2,80,25);
writeln(r:5:2,f*180/pi:6:2,z:6:2,v:7:2,w:7:2,u:7:2,vg:7:2,wg:7:2,ug:7:2,
m*1e9:7:3,t-273.2:6:1,tau:7:3);
Tauprint:=hprint;
repeat {z}
{-----}
tf(r,f,z,v,w,u,m,t);
k1_r:=hh*dr_dt(r,f,z,v,w,u,m,t);
k1_f:=hh*df_dt(r,f,z,v,w,u,m,t);
k1_z:=hh*dz_dt(r,f,z,v,w,u,m,t);
k1_v:=hh*dv_dt(r,f,z,v,w,u,m,t);
k1_w:=hh*dw_dt(r,f,z,v,w,u,m,t);

```

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

```

k1_u:=hh*du_dt(r,f,z,v,w,u,m,t);
k1_m:=hh*dm_dt(r,f,z,v,w,u,m,t);
k1_t:=hh*dt_dt(r,f,z,v,w,u,m,t);

tf(r+k1_r/2,f+k1_f/2,z+k1_z/2,v+k1_v/2,w+k1_w/2,u+k1_u/2,
  m+k1_m/2,t+k1_t/2);
k2_v:=hh*dv_dt(r+k1_r/2,f+k1_f/2,z+k1_z/2,v+k1_v/2,w+k1_w/2,u+k1_u/2,
  m+k1_m/2,t+k1_t/2);
k2_w:=hh*dw_dt(r+k1_r/2,f+k1_f/2,z+k1_z/2,v+k1_v/2,w+k1_w/2,u+k1_u/2,
  m+k1_m/2,t+k1_t/2);
k2_u:=hh*du_dt(r+k1_r/2,f+k1_f/2,z+k1_z/2,v+k1_v/2,w+k1_w/2,u+k1_u/2,
  m+k1_m/2,t+k1_t/2);
k2_m:=hh*dm_dt(r+k1_r/2,f+k1_f/2,z+k1_z/2,v+k1_v/2,w+k1_w/2,u+k1_u/2,
  m+k1_m/2,t+k1_t/2);
k2_t:=hh*dt_dt(r+k1_r/2,f+k1_f/2,z+k1_z/2,v+k1_v/2,w+k1_w/2,u+k1_u/2,
  m+k1_m/2,t+k1_t/2);
k2_r:=hh*dr_dt(r+k1_r/2,f+k1_f/2,z+k1_z/2,v+k1_v/2,w+k1_w/2,u+k1_u/2,
  m+k1_m/2,t+k1_t/2);
k2_z:=hh*dz_dt(r+k1_r/2,f+k1_f/2,z+k1_z/2,v+k1_v/2,w+k1_w/2,u+k1_u/2,
  m+k1_m/2,t+k1_t/2);
k2_f:=hh*df_dt(r+k1_r/2,f+k1_f/2,z+k1_z/2,v+k1_v/2,w+k1_w/2,u+k1_u/2,
  m+k1_m/2,t+k1_t/2);

tf(r+k2_r/2,f+k2_f/2,z+k2_z/2,v+k2_v/2,w+k2_w/2,u+k2_u/2,m+k2_m/2,
  t+k2_t/2);
k3_v:=hh*dv_dt(r+k2_r/2,f+k2_f/2,z+k2_z/2,v+k2_v/2,w+k2_w/2,u+k2_u/2,
  m+k2_m/2,t+k2_t/2);
k3_w:=hh*dw_dt(r+k2_r/2,f+k2_f/2,z+k2_z/2,v+k2_v/2,w+k2_w/2,u+k2_u/2,
  m+k2_m/2,t+k2_t/2);
k3_u:=hh*du_dt(r+k2_r/2,f+k2_f/2,z+k2_z/2,v+k2_v/2,w+k2_w/2,u+k2_u/2,
  m+k2_m/2,t+k2_t/2);
k3_m:=hh*dm_dt(r+k2_r/2,f+k2_f/2,z+k2_z/2,v+k2_v/2,w+k2_w/2,u+k2_u/2,
  m+k2_m/2,t+k2_t/2);
k3_t:=hh*dt_dt(r+k2_r/2,f+k2_f/2,z+k2_z/2,v+k2_v/2,w+k2_w/2,u+k2_u/2,
  m+k2_m/2,t+k2_t/2);
k3_r:=hh*dr_dt(r+k2_r/2,f+k2_f/2,z+k2_z/2,v+k2_v/2,w+k2_w/2,u+k2_u/2,
  m+k2_m/2,t+k2_t/2);
k3_z:=hh*dz_dt(r+k2_r/2,f+k2_f/2,z+k2_z/2,v+k2_v/2,w+k2_w/2,u+k2_u/2,
  m+k2_m/2,t+k2_t/2);
k3_f:=hh*df_dt(r+k2_r/2,f+k2_f/2,z+k2_z/2,v+k2_v/2,w+k2_w/2,u+k2_u/2,
  m+k2_m/2,t+k2_t/2);

tf(r+k3_r,f+k3_f,z+k3_z,v+k3_v,w+k3_w,u+k3_u,m+k3_m,t+k3_t);
k4_v:=hh*dv_dt(r+k3_r,f+k3_f,z+k3_z,v+k3_v,w+k3_w,u+k3_u,m+k3_m,t+k3_t);

```

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

```

k4_w:=hh*dw_dt(r+k3_r,f+k3_f,z+k3_z,v+k3_v,w+k3_w,u+k3_u,m+k3_m,t+k3_t);
k4_u:=hh*du_dt(r+k3_r,f+k3_f,z+k3_z,v+k3_v,w+k3_w,u+k3_u,m+k3_m,t+k3_t);

k4_m:=hh*dm_dt(r+k3_r,f+k3_f,z+k3_z,v+k3_v,w+k3_w,u+k3_u,m+k3_m,t+k3_t);
k4_t:=hh*dt_dt(r+k3_r,f+k3_f,z+k3_z,v+k3_v,w+k3_w,u+k3_u,m+k3_m,t+k3_t);
k4_r:=hh*dr_dt(r+k3_r,f+k3_f,z+k3_z,v+k3_v,w+k3_w,u+k3_u,m+k3_m,t+k3_t);
k4_z:=hh*dz_dt(r+k3_r,f+k3_f,z+k3_z,v+k3_v,w+k3_w,u+k3_u,m+k3_m,t+k3_t);
k4_f:=hh*df_dt(r+k3_r,f+k3_f,z+k3_z,v+k3_v,w+k3_w,u+k3_u,m+k3_m,t+k3_t);

v_:=v;
w_:=w;
u_:=u;
m_:=m;
t_:=t;
r_:=r;
f_:=f;
z_:=z;
tau_:=tau;

v:=v+(k1_v+2*k2_v+2*k3_v+k4_v)/6;
w:=w+(k1_w+2*k2_w+2*k3_w+k4_w)/6;
u:=u+(k1_u+2*k2_u+2*k3_u+k4_u)/6;
m:=m+(k1_m+2*k2_m+2*k3_m+k4_m)/6;
t:=t+(k1_t+2*k2_t+2*k3_t+k4_t)/6;
r:=r+(k1_r+2*k2_r+2*k3_r+k4_r)/6;
f:=f+(k1_z+2*k2_z+2*k3_z+k4_z)/6;
z:=z+(k1_z+2*k2_z+2*k3_z+k4_z)/6;

tau:=tau+hh;
{-----}
if m<=3.213e-9 then
begin
v:=(v_+v)/2;
u:=(u_+u)/2;
w:=(w_+w)/2;
m:=(m_+m)/2;
t:=(t_+t)/2;
r:=(r_+r)/2;
f:=(f_+f)/2;
z:=(z_+z)/2;
tau:=(tau+tau_)/2;
end;
{ If Wherey=23 then

```

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

```

Begin
  If Readkey<>#13 then halt;
  Clrscr;
End;}
If ABS(tau-tauprint)<(hh/2) Then
  Begin
    writeln(r:5:2,f*180/pi:6:2,z:6:2,v:7:2,w:7:2,u:7:2,vg:7:2,
      wg:7:2,ug:7:2,m*1e9:7:3,t-273.2:6:1,tau:7:3);
    tauprint:=tauprint+hprint;
  End;
until m<=mk;
writeln(r:5:2,f*180/pi:6:2,z:6:2,v:7:2,w:7:2,u:7:2,vg:7:2,
  wg:7:2,ug:7:2,m*1e9:7:3,t-273.2:6:1,tau:7:3);

Writeln('---END---');
Readln;
END.

```

```

Unit simula;
interface

{$N+,E+,F+}
type
  realtype=extended;
const
  arraysize=(2*maxint) div sizeof(realtype);
type
  arraytype=array[1..arraysize] of realtype;
  proctype=procedure (t:realtype;var y,yp);

procedure rkf45(f:proctype;
  neqn:integer;
  var y;
  var t:realtype;
  tout:realtype;
  var relerr:realtype;
  abserr:realtype;
  var iflag:integer;
  var work,iworki);
procedure runge(f:proctype;
  neqn:integer;
  var yi;
  var t:realtype;
  tout:realtype;
  h:realtype;

```

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

```

        var work);
            implementation
function amax1(x,y:realtype):realtype;
begin
    if x>y then amax1:=x else amax1:=y;
end;
procedure rkf45(f:proctype;
                neqn:integer;
                var y;
                var t:realtype;
                tout:realtype;
                var relerr:realtype;
                abserr:realtype;
                var iflag:integer;
                var work,iworki);
var
    w:arraytype absolute work;
    iwork:array [1..5] of integer absolute iworki;
    k1,k2,k3,k4,k5,k6,klm:integer;
procedure rkfs(f: proctype;neqn:integer; var yi;
                var t:realtype;
                tout, relerr,abserr:realtype;
                var iflag:integer;
                var ypi,hi,f1i,f2i,f3i,f4i,f5i;
                var saverei,saveaei,nfei,kopi;
                var initi,jflagi,kflagi);
var
    y:arraytype absolute yi;
    yp:arraytype absolute ypi;
    h:realtype absolute hi;
    f1:arraytype absolute f1i;
    f2:arraytype absolute f2i;
    f3:arraytype absolute f3i;
    f4:arraytype absolute f4i;
    f5:arraytype absolute f5i;
    savere:realtype absolute saverei;
    saveae:realtype absolute saveaei;
    nfe:integer absolute nfe;
    kop:integer absolute kopi;
    init:integer absolute initi;
    jflag:integer absolute jflagi;
    kflag:integer absolute kflagi;
const
    remin=1e-12;

```

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

```

maxnfe=3000;
var
a,ae,dt,ee,eeoet,esttol,et,hmin,rer,
s,scale,tol,toln,u26,eps,ypk:realtype;
k,mflag:integer;
hfaild,output:boolean;
label
10,40,45,50,60,65,80,100,200;
procedure fehl(f:proctype;necn:integer;var yi;
var t:realtype;
h:realtype;
var ypi,f1i,f2i,f3i,f4i,f5i,si);
var
y:arraytype absolute yi;
yp:arraytype absolute ypi;
f1:arraytype absolute f1i;
f2:arraytype absolute f2i;
f3:arraytype absolute f3i;
f4:arraytype absolute f4i;
f5:arraytype absolute f5i;
s:arraytype absolute si;
var
ch:realtype;
k:integer;
begin
ch:=h/4;
for k:=1 to neqn do
f5[k]:=y[k]+ch*yp[k];
f(t+ch,f5,f1);
ch:=3*h/32;
for k:=1 to neqn do
f5[k]:=y[k]+ch*(yp[k]+3*f1[k]);
f(t+3*h/8,f5,f2);
ch:=h/2197;
for k:=1 to neqn do
f5[k]:=y[k]+ch*(1932*yp[k]+(7296*f2[k]-7200*f1[k]));
f(t+12*h/13,f5,f3);
ch:=h/4104;
for k:=1 to neqn do
f5[k]:=y[k]+ch*((8341*yp[k]-845*f3[k])+
(29440*f2[k]-32832*f1[k]));
f(t+h,f5,f4);
ch:=h/20520;
for k:=1 to neqn do

```

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

```

f1[k]:=y[k]+ch*((-6080*yp[k]+(9295*f3[k]-5643*f4[k]))+
(41040*f1[k]-28352*f2[k]));
f(t+h/2,f1,f5);
ch:=h/7618050;
for k:=1 to neqn do
s[k]:=y[k]+ch*((902880*yp[k]+(3855735*f3[k]-
1371249*f4[k]))+(3953664*f2[k]+277020*f5[k]))
end;

begin
mflag:=abs(iflag);
if (neqn<1) or (relerr<0) or (abserr<0)
or (mflag=0) or (mflag>8) then
begin
10: iflag:=8;
exit
end;
if mflag=1 then
begin
eps:=1;
while 1+eps<>1 do eps:=eps/2;
u26:=26*eps
end
{} else
begin
if (t=tout) and (kflag<>3) then goto 10;
if mflag=2 then
begin
if (kflag=3) or (init=0) then goto 45;
if kflag=4 then goto 40;
if (kflag=5) and (abserr=0) or
(kflag=6) and (relerr<=saver)
and (abserr<=saveae) then halt;
goto 50
end
else
begin
if (iflag=3) or (iflag=5) and (abserr>0)
then goto 45;
if iflag=4 then goto 40;
halt
end;
40: nfe:=0;
if mflag=2 then goto 50;

```

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

```

45: iflag:=jflag;
    if kflag=3 then mflag:=abs(iflag)
    end;
50: jflag:=iflag;
    kflag:=0;
    savere:=relerr;
    saveae:=abserr;
    rer:=2*eps+remin;
    if relerr<rer then
        begin
            relerr:=rer;
            iflag:=3;
            kflag:=3;
            exit
        end;
    dt:=tout-t;
    if mflag=1 then goto 60;
    if init=0 then goto 65;
    goto 80;
60: init:=0;
    kop:=0;
    a:=t;
    f(a,y,yp);
    nfe:=1;
    if t=tout then
        begin
            iflag:=2; exit
        end;
65: init:=1;
    h:=abs(dt);
    toln:=0;
    for k:=1 to neqn do
        begin
            tol:=relerr*abs(y[k])+abserr;
            if tol<>0 then
                begin
                    toln:=tol;
                    ypk:=abs(y[k]);
                    if ypk*h*h*h*h>tol then
                        h:=exp(0.2*ln(tol/ypk))
                    end
                end;
            if toln<=0 then h:=0;
            h:=amax1(h,u26*amax1(abs(t),abs(dt)));

```

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		79

```

    if iflag<0 then jflag:=-2 else jflag:=2;
80: if dt>0 then h:=abs(h) else h:=-abs(h);
    if abs(h)>=2*abs(dt) then inc(kop);
    if kop>=100 then
        begin
            kop:=0;
            iflag:=7;
            exit
        end;
    if abs(dt)<=u26*abs(t) then

        begin
            for k:=1 to neqn do y[k]:=y[k]+dt*yp[k];
            a:=tout;
            f(a,y,yp);
            inc(nfe); t:=tout; iflag:=2;
            exit
        end;
    output:=false;
    scale:=2/reterr;
    ae:=scale*abserr;
100: hfaild:=false;
    hmin:=u26*abs(t);
    dt:=tout-t;
    if abs(dt)<abs(h) then
        begin
            h:=dt; output:=true
        end
    else
        if abs(dt)<2*abs(h) then h:=dt/2;
200: if nfe>maxnfe then
        begin
            iflag:=4; kflag:=4; exit
        end;
{}    fehl(f,neqn,y,t,h,yp,f1,f2,f3,f4,f5,f1);
    nfe:=nfe+5;
    eeoet:=0;
    for k:=1 to neqn do
        begin
            et:=abs(y[k])+abs(f1[k])+ae;
            if et<=0 then
                begin
                    iflag:=5; exit
                end;

```

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80

```

ee:=abs((-2090*yp[k]+(21970*f3[k]-15048*f4[k]))+
(22528*f2[k]-27360*f5[k]));
eeoet:=amax1(eeoet,ee/et)
end;
esttol:=abs(h)*eeoet*scale/52440;
if esttol>1 then
begin
hfaild:=true;
output:=false;
if esttol<52049
then s:=0.9/exp(0.2*ln(esttol))
else s:=0.1;
h:=s*h;
if abs(h)>hmin then goto 200
else
begin
iflag:=6; kflag:=6; exit
end
end;
t:=t+h;
for k:=1 to neqn do y[k]:=f1[k];
a:=t;
f(a,y,yp);
inc(nfe);
if esttol>1.889568e-4
then s:=0.9/exp(0.2*ln(esttol))
else s:=5;
if hfaild then if s>1 then s:=1;
s:=amax1(s*abs(h),hmin);
if h<0 then h:=-s else h:=s;
if not output then
if iflag>0 then goto 100
else iflag:=-2
else iflag:=2
end;{rkfs}

begin
klm:=neqn+1;
k1:=klm+1;
k2:=k1+neqn;
k3:=k2+neqn;
k4:=k3+neqn;
k5:=k4+neqn;
k6:=k5+neqn;

```

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

```

rkfs(f,neqn,y,t,tout,relerr,abserr,iflag,w[1],w[klm],
    w[k1],w[k2],w[k3],w[k4],w[k5],w[k6],w[k6+1],
    iwork[1],iwork[2],iwork[3],iwork[4],iwork[5])
end;

```

```

procedure runge(f:proctype;
    neqn:integer;
    var yi;
    var t:realtype;
    tout:realtype;
    h:realtype;
    var work);
var
    w:array[1..3,1..arraysize div 3] of realtype
        absolute work;
    y:arraytype absolute yi;
    k:integer;
    dt:realtype;
const
    eps:realtype=0;
begin
    if (neqn<=0) or (h=0) then halt;
    if eps=0 then
        begin
            eps:=1;
            while 1+eps/2<>1 do eps:=eps/2;
            eps:=20*eps
        end;
    repeat
        f(t+0,y,w);
        dt:=tout-t;
        if abs(dt)<=abs(t)*eps then
            begin
                for k:=1 to neqn do y[k]:=y[k]+dt*w[1,k];
                t:=tout;
                exit
            end;
        if abs(dt)<abs(h) then h:=dt;
        if dt<0 then h:=-abs(h) else h:=abs(h);
        for k:=1 to neqn do w[2,k]:=y[k]+h*w[1,k]/2;
        f(t+h/2,w[2,1],w[3,1]);
        for k:=1 to neqn do
            begin
                w[1,k]:=w[1,k]+2*w[3,k];

```

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

```

        w[2,k]:=y[k]+h*w[3,k]/2
    end;
    f(t+h/2,w[2,1],w[3,1]);
    for k:=1 to neqn do
    begin
        w[1,k]:=w[1,k]+2*w[3,k];
        w[2,k]:=y[k]+h*w[3,k]
    end;
    f(t+h,w[2,1],w[3,1]);
    for k:=1 to neqn do
        y[k]:=y[k]+h*(w[1,k]+w[3,k])/6;
    t:=t+h
    until t=tout
end;

                                end.

(* {$N+,E+,F+}
uses simula,crt;
var
    alfasq:realtype;
const
    neqn=4;

procedure orb(t:realtype; var yi, ypi);
var
    y: array[1..neqn] of realtype absolute yi;
    yp:array[1..neqn] of realtype absolute ypi;
    r:realtype;
begin
    r:=y[1]*y[1]+y[2]*y[2];
    r:=r*sqrt(r)/alfasq;
    yp[1]:=y[3];
    yp[2]:=y[4];
    yp[3]:=-y[1]/r;
    yp[4]:=-y[2]/r
end;
var
    y:array[1..neqn] of realtype;
    work:array[1..6*neqn+3] of realtype;
    t,tout,relerr,abserr,tfinal,tprint,ecc,alfa:realtype;
    iwork:array[1..5] of integer;
    iflag:integer;
begin
    clrscr;
    ecc:=0.25;

```

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83

```

alfa:=pi/4;
alfasq:=sqr(alfa);
t:=0; tfinal:=12; tprint:=2.0;
relerr:=1e-9; abserr:=0;
iflag:=1;
y[1]:=1-ecc;
y[2]:=0;
y[3]:=0;
y[4]:=alfa*sqrt((1+ecc)/(1-ecc));
tout:=tprint;
writeln('    RKF45:                RUNGE:');
repeat
rkf45(orb,neqn,y,t,tout,relerr,abserr,iflag,work,iwork);
writeln(t:4:1,y[1]:15:10,y[2]:15:10);
case iflag of
  1: begin writeln('Неправильный вызов');halt end;
  2: tout:=tout+tprint;
  3: writeln('Слишком высокая требуемая точность:',#13,
    #10,'relerr=',relerr,' abserr=',abserr);
  4: writeln('Слишком много шагов');
  5: begin
    abserr:=1e-9;
    writeln('Слишком высокая требуемая точность:',#13,
    #10,'relerr=',relerr,' abserr=',abserr);
    end;
  6: begin
    relerr:=10*relerr;
    writeln('Слишком высокая требуемая точность:',#13,
    #10,'relerr=',relerr,' abserr=',abserr);
    end;
end;
until tout>tfinal;
y[1]:=1-ecc;
y[2]:=0;
y[3]:=0;
y[4]:=alfa*sqrt((1+ecc)/(1-ecc));
window(40,2,80,25);
t:=0;
repeat
runge(orb,neqn,y,t,t+tprint,0.02,work);
writeln(y[1]:15:10,y[2]:15:10);
until t=tfinal

end.

```

					02.15.EE2221.KPM.2024-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84