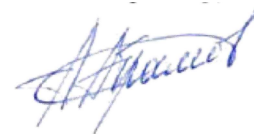


**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Российский химико-технологический университет
имени Д.И. Менделеева»**

На правах рукописи



Абрамов Андрей Александрович
**Процессы и аппараты 3D-печати изделий медицинского
назначения**

2.6.13 Процессы и аппараты химических технологий

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Меньшутина Наталья Васильевна

Москва – 2024

.....	6
1.	12
1.1.	12
1.1.1. 3D- ,	
.....	13
1.1.1. 3D- ,	
.....	15
1.1.2. 3D- ,	
.....	17
1.2. 3D- ,	
.....	22
1.3.	29
1.3.1.	30
1.3.2.	32
1.4.	35
1.5.	45
2.	47
2.1.	47
2.1.1. 3D-	
.....	48
2.1.2.	50
2.1.3.	53
,	3D-
2.1.4. ....	... 61
2.2.	65

2.2.1.		65
2.2.2.		68
2.3.		
	.....	73
	2	76
3.		
	.....	77
3.1.		
	.....	77
3.2.	« »	
	.....	82
3.2.1.		
	.....	82
3.2.2.	3D- « »	
	.....	93
3.3.		
	.....	95
3.3.1.		
	.....	95
3.3.2.		
	.....	102
3.4.		
	.....	105
	3	109

4.	3D-	.....	110
4.1.		.....	110
4.1.1.		.....	110
4.1.2.		....	111
4.1.3.	3D- « »	.....	117
4.2.		« »	.....
		.....	119
4.2.1.		« »	.....
	( , )	.....	120
4.2.2.		« »	.....
	( , )	.....	121
4.2.3.			
	3D- « »	(,)	125
4.3.		( , )	.....
		.....	127
4.4.			
3D-		.....	131
4		.....	133
5.			
	3D-	.....	135
5.1.		.....	135
5.1.1.		.....	135
5.1.2.		.....	137

Введение

Актуальность темы исследования.

«

2030 ».

• • •

.

• • •

Степень разработанности темы.

« »

.

(,

С,)

« »

• ,

3D-

« » (, 3D Bioprinting Solutions).

-

3D-

(,)

.

Цель работы

,

3D-

,

Задачи работы.

- :

1.

(« »,).

2.

« ».

3.

4.

5.

Научная новизна.

« »

(,)

3D-

« »

3D-

(), (« ».

Теоретическая и практическая значимость работы.

« »

« »

« »

(,).

Методология и методы исследования.

;
;

;

« »

;

;

Степень достоверности результатов

,

Апробация результатов.

XV, XVI XVII, XVIII

(, 2019 , 2020 , 2021 , 2022

.); Aerogels (, , 2020); XI

-

" : , , "

(, 2021); -

« - » (, 2021); XVIII

XIV - «

» (, 2022 , 2023 .); -

« »

(, 2022 , 2023).

- « » (2021-2023).

Положения, выносимые на защиту.

3D-

: - ; « »

,

,

(,);

.

« »

(,).

3D- .

Публикации.

27

, 5 ,
Science / Scopus, 2

Web of

1

1 - .

Объем и структура работы.

, ,

152

3

180

,

14

87

.

Благодарности.

... ,

..

.

.

,

.

, ...

..”

..

..

,

.

,

.

... .

.

Глава 1. Литературный обзор

... ,
 .
 , . ,
 ,
 . . [1, 2] . . [3],
 . . [4].

1.1. Аддитивные технологии

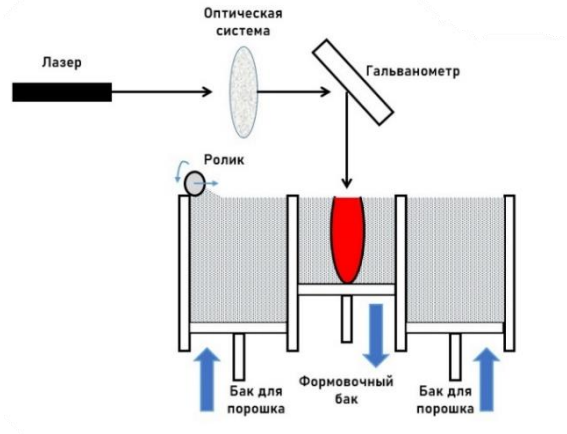
(3D-)
 . ,
 ,
 [5, 6].
 1984 .
 , .
 1984
 ,
 .
 57558-2017 [7]
 ,
 .
 3D- :
 1. ,

2. (SLS) (SLM).
- (DLP).
3. (FDM), (DIW) 3D-
- (LCD) (SLA),

1.1.1. Технологии 3D-печати, основанные на использовании порошковых материалов

[8, 9].

(1.1) [10].



1.1 – 3D-

: (SLS) [11–13]
(SLM) [9;10].

(SLS)

3D- [16, 17].

SLS

[18].

3D-

[19].

(SLM)

SLS

SLM

[20, 21].

SLS

SLM –

[22, 23].

1.1.1. Технологии 3D-печати, основанные на использовании процесса полимеризации

: (SLA), (DLP) (LCD).

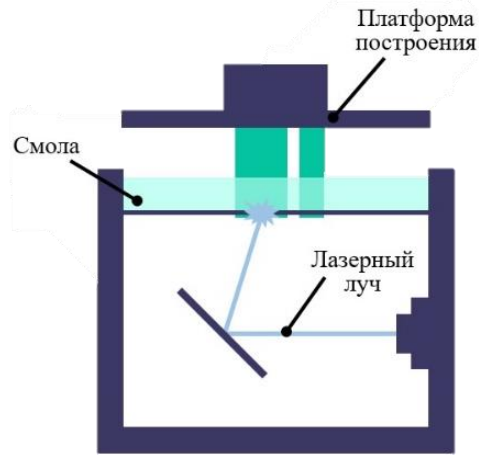
(SLA) – 3D-

[24, 25].

Z

(1.2) [26].

16



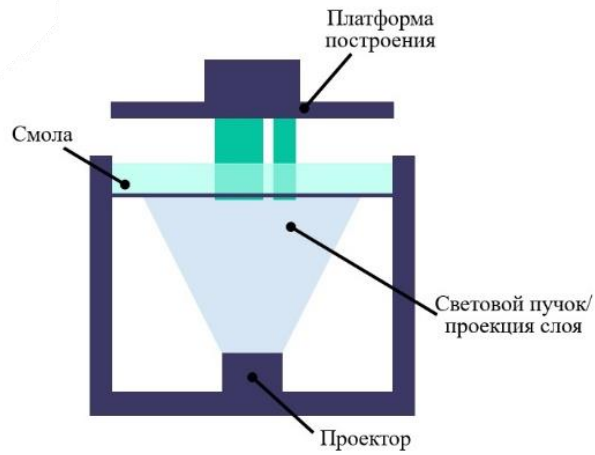
1.2 –

– 10 150 .

10 20 / [26].

(DLP),

(1.3) [27, 28].



1.3 –

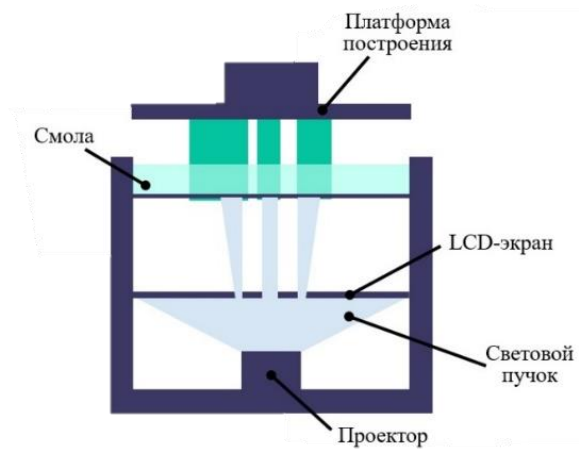
DLP

SLA

(LCD),

3D-

(1.4) [30].



1.4 –

SLA DLP,

LCD

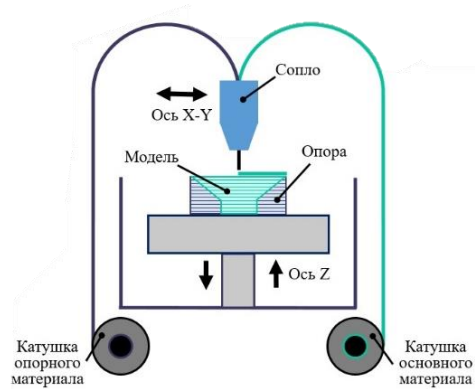
[31].

1.1.2. Технологии 3D-печати, основанные на использовании процесса экструзии

3D-

[32].

(DIW) 3D-
(FDM),
(FDM)
3D- [33].
(1.5) [34, 35].



1.5 –

(PLA), (ABS), (PETG), (PCL),
[36].

FDM

3D-

3D-

[38].

(DIW),

« » [39].

« »

3D-

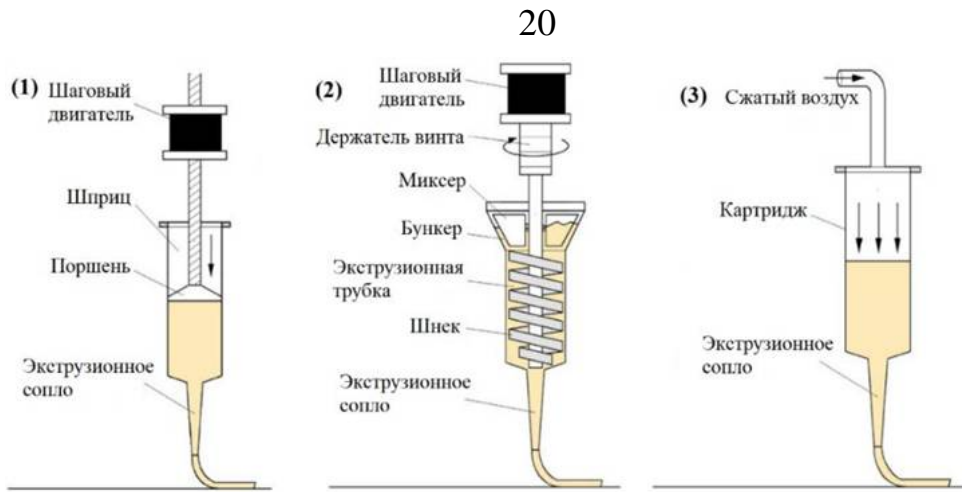
[40]. « »,

[41, 42]

[43].

3D-

(1.6).



1.6 –

: (1)

; (2)

; (3)

« »

[44].

« »

3D-

« » ,

[45].

[46].

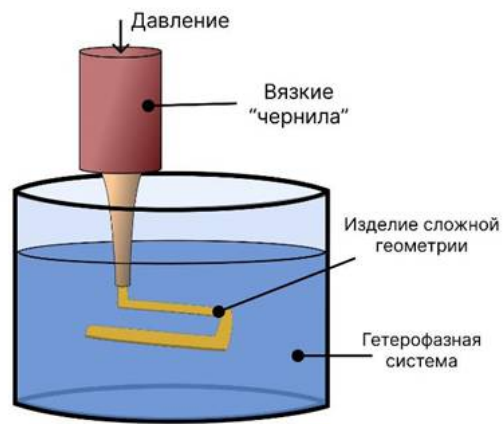
3D-

[47].

[48].

« » [49].

(1.7).



1.7 –

3D-

3D-

[50].

3D-

3D-

1.2. Области применения технологий 3D-печати, основанных на использовании процесса экструзии

3D-печать, основанная на использовании процесса экструзии, применяется для изготовления изделий из полимерных материалов. В настоящее время наиболее распространены технологии FDM (Fused Deposition Modeling) и Direct Ink Writing (DIW). Эти технологии позволяют создавать сложные трехмерные структуры с высокой точностью и детализацией. В зависимости от используемых материалов и параметров процесса, можно получать изделия с различными свойствами: механическими, термическими, оптическими и т.д.

В области биомедицины 3D-печать используется для изготовления протезов, имплантов и биосовместимых структур. Например, с помощью FDM можно создавать протезы конечностей, а с помощью DIW – биосовместимые каркасы для тканевой инженерии. Также 3D-печать применяется в производстве микрофлюидных устройств, которые используются в лабораторной диагностике и фармацевтике.

В промышленности 3D-печать используется для быстрого прототипирования и изготовления конечных изделий. Это позволяет сократить время и стоимость разработки новых изделий. Кроме того, 3D-печать используется для изготовления сложной геометрии, которую трудно реализовать традиционными методами. Например, в авиационной промышленности 3D-печать применяется для изготовления деталей двигателей и других критических компонентов.

В строительстве 3D-печать используется для изготовления архитектурных моделей и даже целых зданий. Это позволяет создавать сложные формы и структуры, которые трудно реализовать традиционными методами. Кроме того, 3D-печать используется для изготовления деталей и компонентов для строительства, таких как трубы, фитинги и т.д.

В пищевой промышленности 3D-печать используется для изготовления кондитерских изделий, напитков и других пищевых продуктов. Это позволяет создавать уникальные вкусы и текстуры, а также персонализированные продукты. Например, с помощью 3D-печати можно создавать шоколадные фигурки, напитки с заданной калорийностью и т.д.

В производстве полимерных материалов 3D-печать используется для изготовления образцов и прототипов. Это позволяет быстро проверить геометрию и свойства изделий перед началом массового производства. Кроме того, 3D-печать используется для изготовления деталей и компонентов для производства полимерных материалов, таких как трубы, фитинги и т.д.

В производстве наноматериалов 3D-печать используется для изготовления наноструктур и наночастиц. Это позволяет создавать материалы с заданными свойствами, такими как высокая прочность, термическая стабильность и т.д. Например, с помощью 3D-печати можно создавать наночастицы ZnO [55], TiO₂ [56] и Fe₃O₄ [57].

В производстве композитных материалов 3D-печать используется для изготовления композитных структур и наночастиц. Это позволяет создавать материалы с заданными свойствами, такими как высокая прочность, термическая стабильность и т.д. Например, с помощью 3D-печати можно создавать композитные структуры ABS [58] и BaTiO₃.

В производстве керамики 3D-печать используется для изготовления керамических изделий. Это позволяет создавать сложные формы и структуры, которые трудно реализовать традиционными методами. Например, с помощью 3D-печати можно создавать керамические детали и компоненты для авиационной промышленности [59].

В производстве металлов 3D-печать используется для изготовления металлических изделий. Это позволяет создавать сложные формы и структуры, которые трудно реализовать традиционными методами. Например, с помощью 3D-печати можно создавать металлические детали и компоненты для авиационной промышленности [60].

В производстве полимерных материалов 3D-печать используется для изготовления полимерных изделий. Это позволяет создавать сложные формы и структуры, которые трудно реализовать традиционными методами. Например, с помощью 3D-печати можно создавать полимерные детали и компоненты для авиационной промышленности [61, 62].

[63, 64].

3D- , « » [65]

, 3D- [66]

[67]

(61,7 / ³)

(47,4 / · 30°C).

3D- ,

3D- ,

[68]

3D- ,

[69]

[70]

3D-

,

3D-

3D-

,

,

,

3D-

,

[71]

[72, 73],

[74, 75]

« »

[76].

3D-

,

,

[77].

,

,

[78].

3D-

Ti-6Al-4V [79, 80].

[81].

[82].

3D-

[83]

« » [84].

[85].

[86]

[87].

[70]

[88],

in vitro.

[87],

[89]

[90].

[91]

3D-

[92]

« »,

« »

,
 . « »
 .
 ,
 ,
 .
 [93], - ,
 [94]. « »
 3D- .
 « »
 [46]
 .
 3D-
 ,
 -
 .
 « »
 , « », ,
 , . ,
 « »,
 .
 3D-
 , « »
 , .
 , 3D- ,
 ,
 .
 3D-

1.3. Процессы формирования высокопористой структуры материалов

[95].

()

[96].

()

[97]

[98]

1.3.1. Сублимационная сушка

,

[99].

,

[100].

.

.

,

.

,

.

,

,

(

)

.

,

.

,

,

,

.

,

.

,

-

.

,

.

[101]

2 .%

[102]

()

()

3D-

[103]

3D-

250-300

3D-

[104]

3D-

-20°C,

[105]

(80%)

3D-

1.3.2. Сверхкритическая сушка

().

« »

),

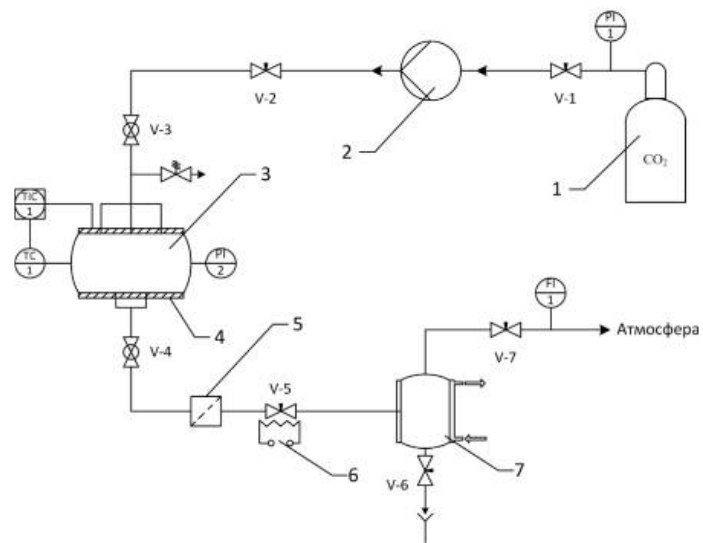
),

73.4 [106]).

31.1°

[107]

(1.8).



1.8 –

[107]: 1 –

- ; 2 –
- ; 3 –
- ; 4 –
- ; 5 –
- ; 6 –
- ; 7 –
- ; PI –
- ; TIC –
- ; TC –
- ; FI

[108]

)

[109]

Cellink BIOX,
 410 , 60 12 / .
 Process, , : 40 , 120 ,
 5-7 / , 4 ,
 2 / .
 100-400 ,
 20-30 .

[110]

3D-
 Pluronic F127. , ,
 0,1 0,3 , - 3 6 / .
 30°C, 10 , 4 .

3D-
 2,5
 [111]
 3D-
 [112],

1.4. Процессы стерилизации изделий с высокопористой структурой

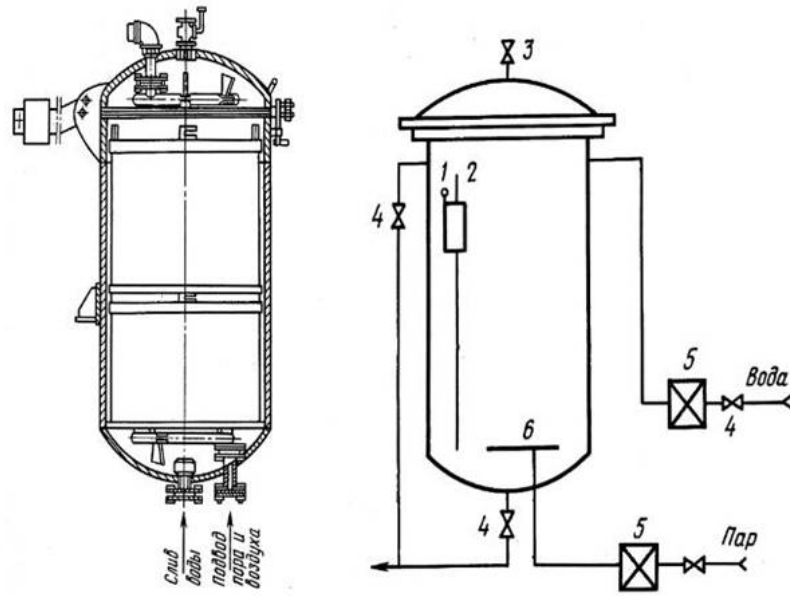
(
 [112],

[113])

(

[114]).

[112] (1.9).



1.9 –

; 3 –

: 1 –

; 2 –

; 6 –

; 4 –

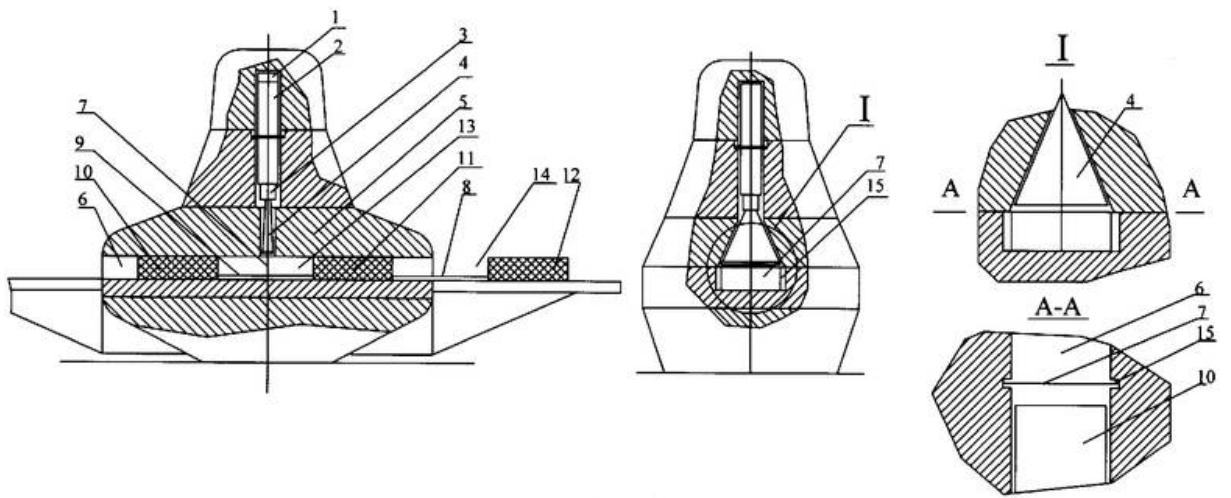
; 5 –

100° .

[115].

-60. [117]

(1.10).



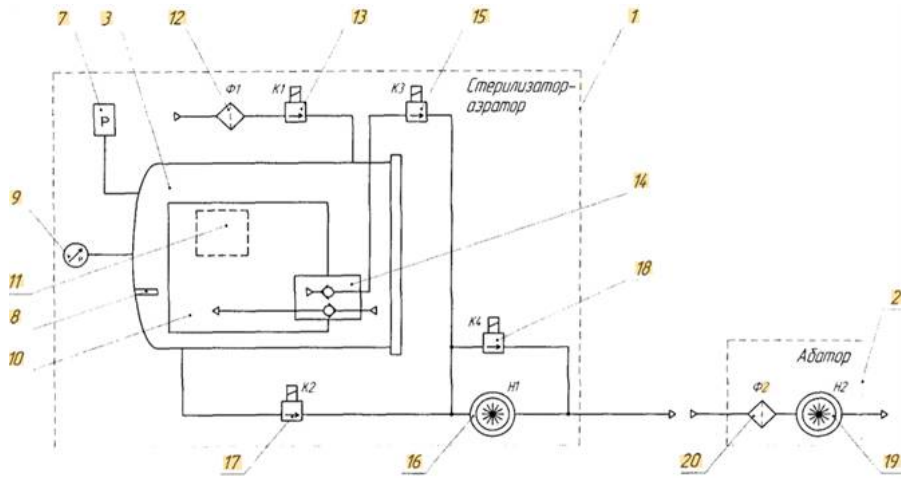
1.10 -
 : 1 - , 2 - , 3 - , 4
 - , 5 - , 6 - , 7 - , 8,9
 - , 10,11,12 - , 13,14 - , 15 -
 [113]

[118]

[119].

[117]

(1.11).



- 1.11 –
- : 1 – ; 2 – ; 3 – ; 4 –
- ; 5 – ; 6 – ; 7 – ; 11
- ; 8 – ; 9 – ; 10 – ; 11
- ; 12 –
- ; 13 – ; 14 – ; 15 – ; 16 – ; 17
- ; 18 – ; 19 –
- ; 20 – [117]

[120]

—

(, ,),
(,) [121].

— (I)
[122].

31,1°C,

73,8

[123].

[124].

/

1951 [125].

-

[126].

[127].

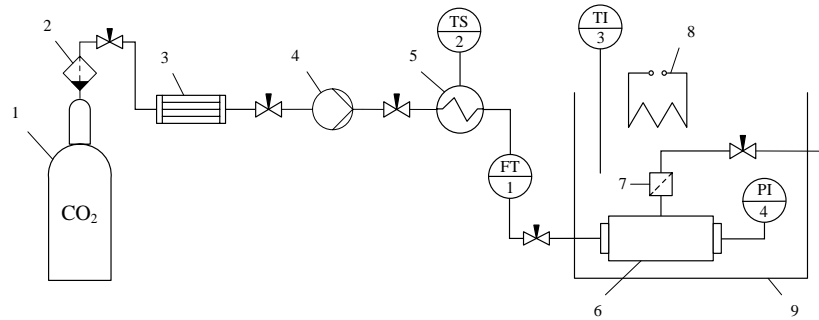
[128]

[129],

[130].

[124, 131].

, , , , : , , - () (1.12).



1.12 -

: 1 - , 2 - , 3 - , 4 - , 5 - , 6 - , 7 - , 8 - , 9 - , FT1 - , TS2 - , TI3 - , PI4 -

(6),

(9),

(8)

TI3.

(1),

- (2)

(3).

5°C,

(4),

(5),

TS2,

(6),

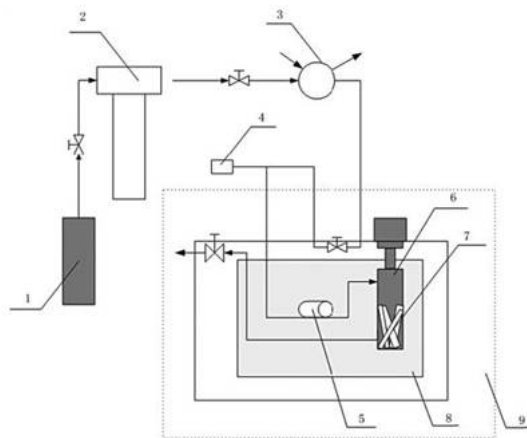
PI4.

()

FT1.

(7)

[130] (1.13).



1.13 -

, 2 -

, 3 -
, 5 -
, 9 -

, 6 -

: 1 -
, 7 -
ISCO SFX 2-10

, 4 -
, 8 -

(6) (

).

(8)

(2).

(3).

.

,

.

,

,

,

,

.

—

,

.

,

100

1000

[130].

,

,

,

8

20

,

,

, - 40

[132].

,

,

[133]

.

,

.

,

.

[133].

10

.

.

—

,

,

,

,

[134].

[135].

[136].

[134].

[137].

[138].

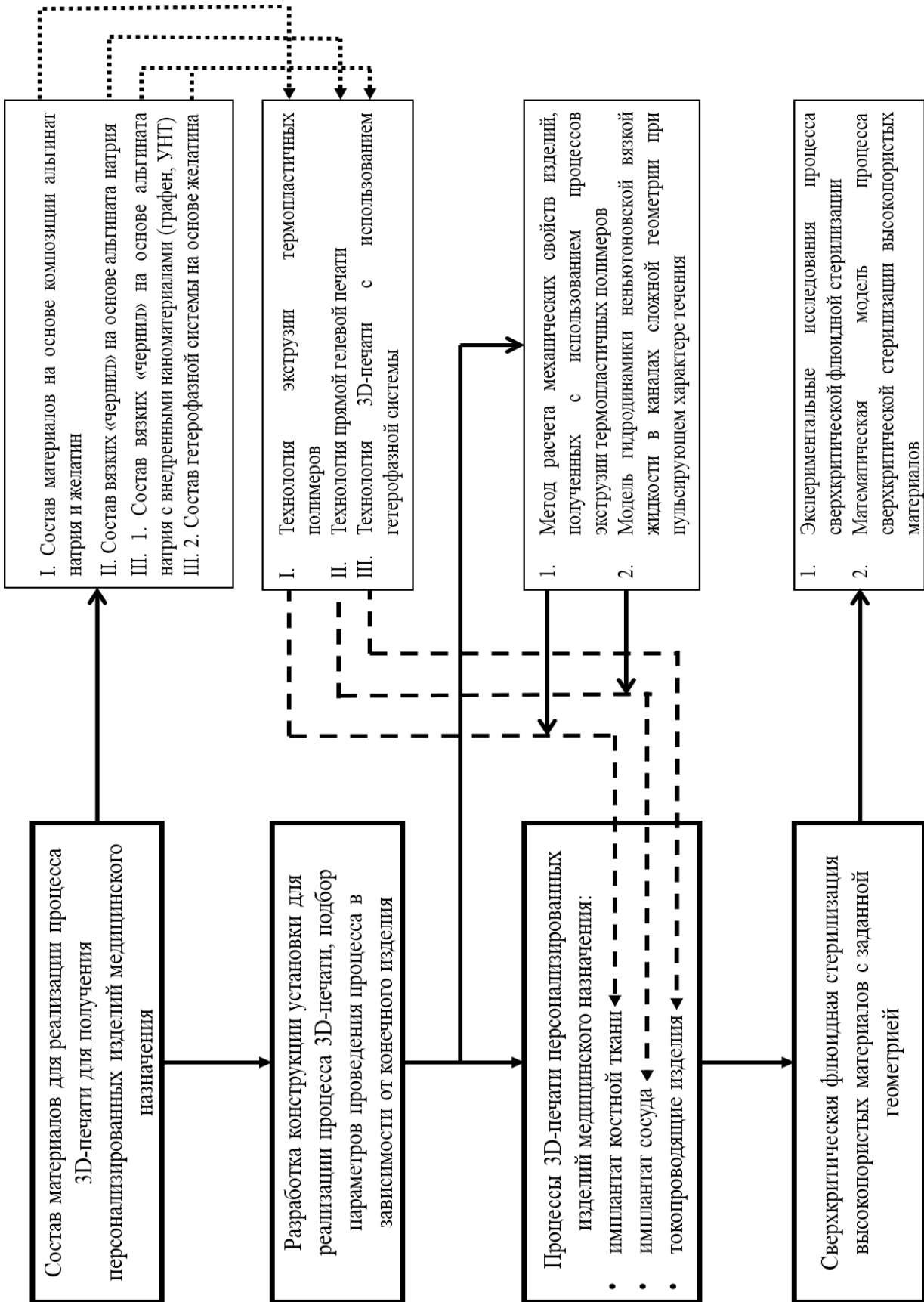
[138]

100

[130]

1.5. Постановка цели и задач исследования

- ,
- .
- ,
- .
- 1.5. Постановка цели и задач исследования**
- ,
- ,
- 3D- ,
- .
- (1.14):
1. (« »,).
 2. « ».
 - 3.
 - 4.
 - 5.
- .
- .
- ,
- .
- ,
- .



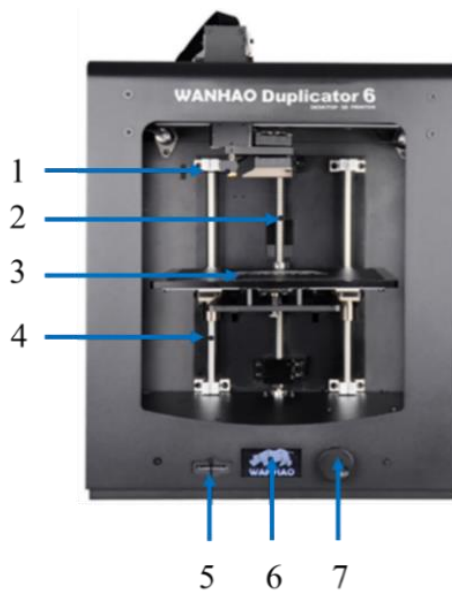
Глава 2. Процессы экструзии термопластичных полимеров для получения гибридной системы персонафицированных имплантатов костной ткани

3D-

2.1. Процессы получения твердого каркаса гибридного имплантата костной ткани с использованием экструзии термопластичных полимеров

2.1.1. Описание конструкции установки для реализации процесса 3D-печати с использованием экструзии термопластичных полимеров

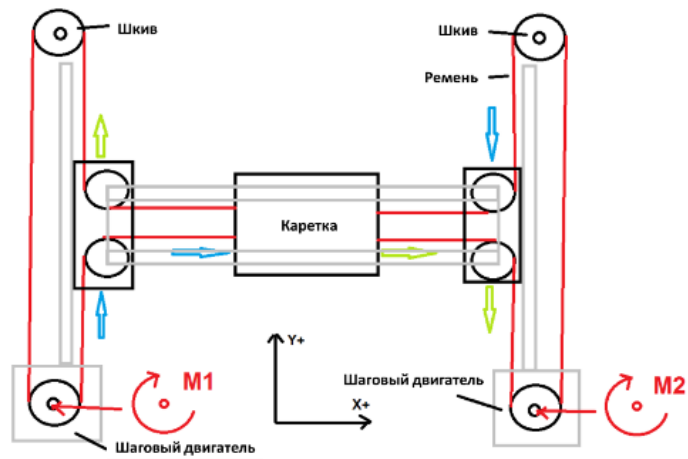
3D- (Whanhao Duplicator 6 Plus (2.1).



2.1 – 3D- Wanhao Duplicator 6 Plus: 1 – , 2 – OZ, 3 – , 4 – SD- , 5 – , 6 – , 7 –

200×200×175 . 180
260 , – 50 100 .

XY-Head Z-Bed (2.2).



2.2 – 3D XY-Head Z-Bed ()

X-Y,

XY-Head Z-Bed

– Z.

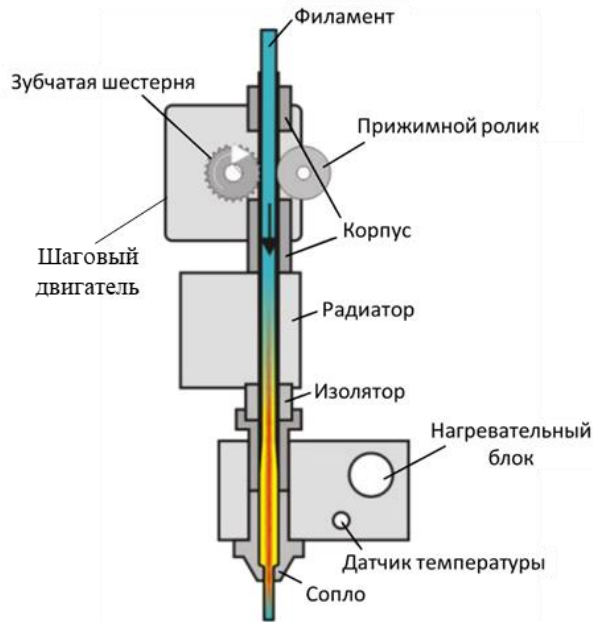
3D-

Wanhao Duplicator 6 Plus

X Y

12,5 , Z – 5 .

(2.3).



2.3 – 3D-

3D-

2.1.2. Экспериментальные исследования процесса экструзии термопластичных полимеров

(40-70)

(200-220).

(15 /)

(4 /).

60

51

60

60 .

210

210

(2.3),

(210)

(60).

20×20×20 .

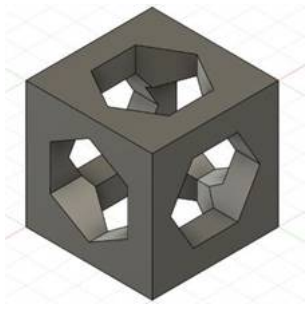
0,4

0,15 .

5%.

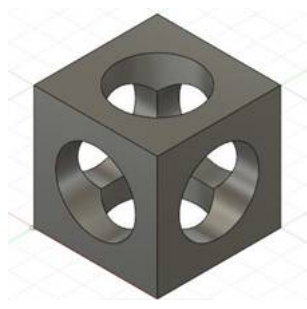
1,05.

(2.4).

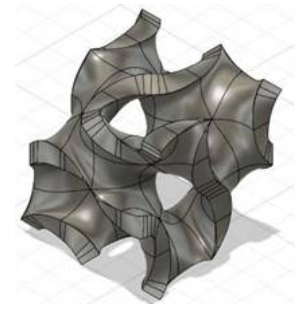


()

2.4-



()



()

: () ,
; () ,
; () ,

, -
,

[139].

,

3D-

Wanhao Duplicator 6 Plus,

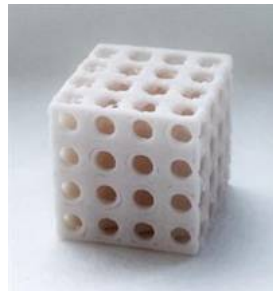
(2.5).



()

2.5-

,



()



()

: ()
; () ,
; () ,

.

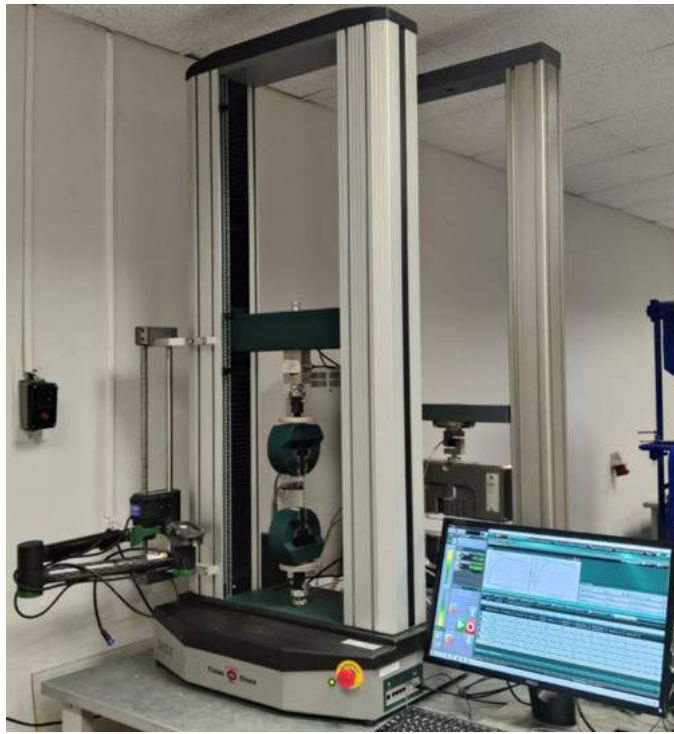
,

0,3 0,5%

3D-

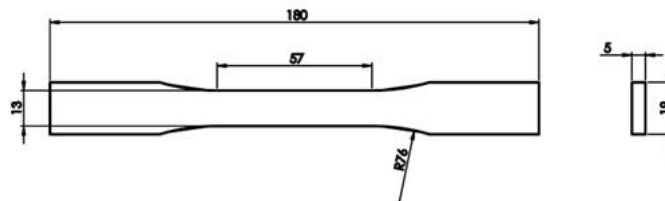
2.1.3. Разработка подхода к расчету механических свойств изделий сложной геометрии, полученных с использованием процесса 3D-печати

(2.6).
Tinius Olson 50ST
3D-
11262-2017 [140] 4651-2014
[141],



2.6 – Tinius Olson 50ST

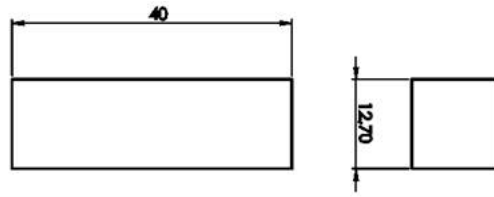
11262-2017 (2.7).



2.7 – () ASTM D638

/ , , 20

4651-2014 (2.8).

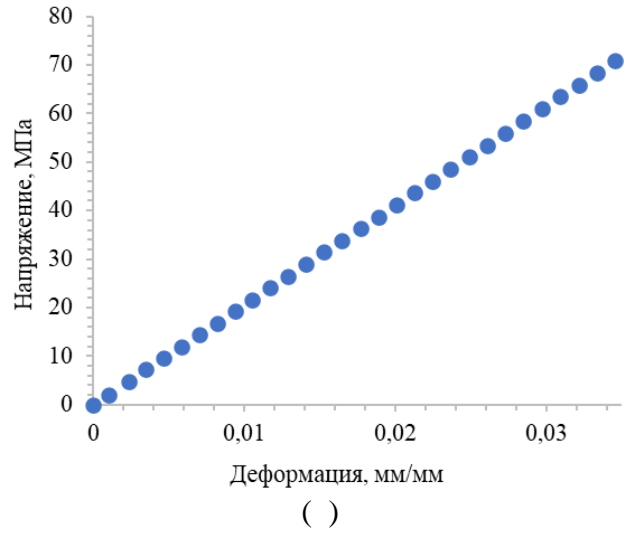
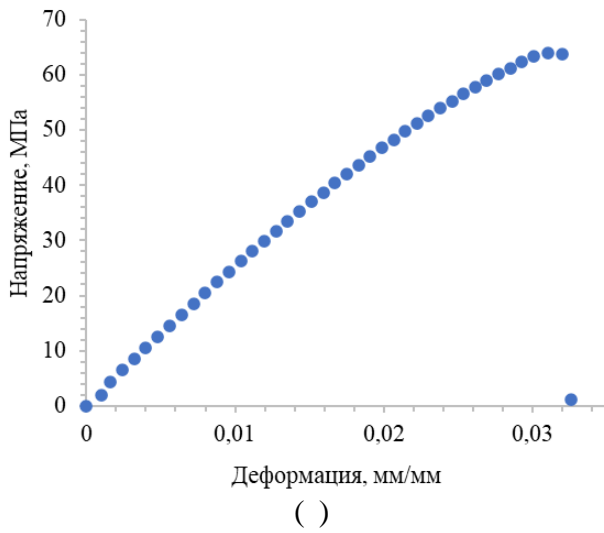


2.8 – () ASTM D695

2.1.

- 0,15 ,
- 15 / ,
- 60 .
- 100%,
- 210 ,

6 , (2.9).

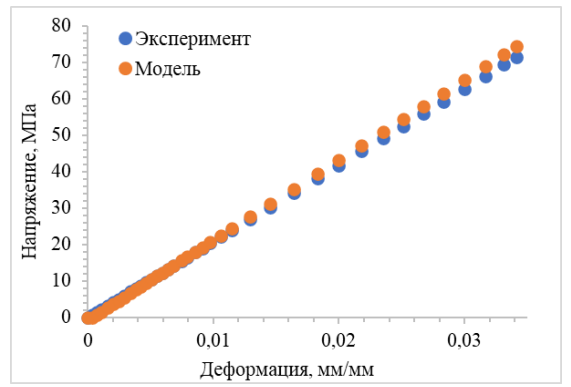
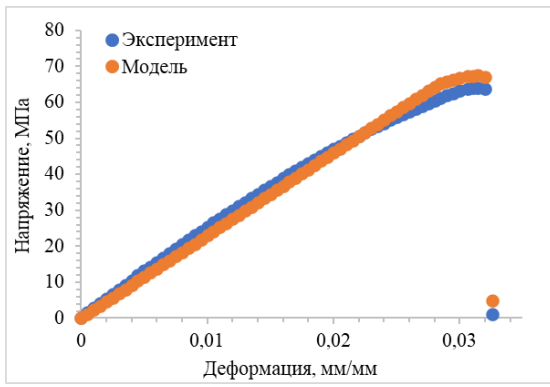


2.9 – () () ()

ANSYS Mechanical

10

(2.10).



2.10 —

7,2%

6,8%

(2.1)

60±0,5%.

$$P = \left(1 - \frac{V_k}{V_{исх}}\right) \cdot 100\%, \quad (2.1)$$

P —

(%), V_k —

$V_{исх}$ —

3D-

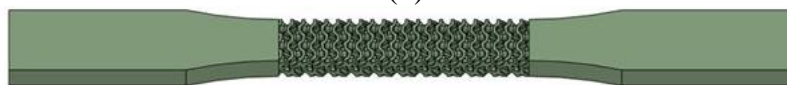
(2.11).



()



()



()

2.11– 3D-

: ()

; ()

; ()

2.1,

- 5

(2.1).

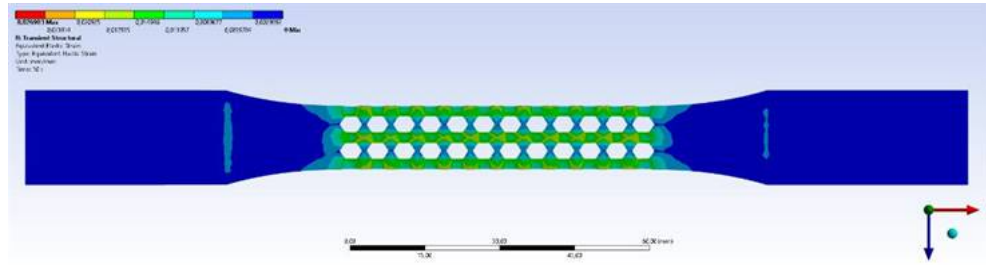
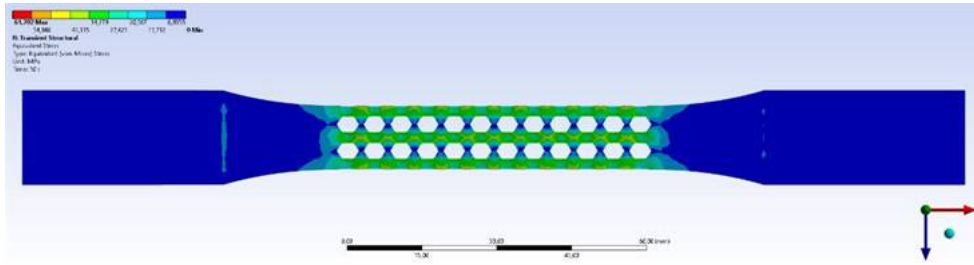
2.1 –

	,			, /		
			, %			, %
	61,7	58,4	5,6	0,027	0,024	12,5
	64,1	59,6	7,5	0,028	0,029	3,4
	66,4	62,7	5,9	0,029	0,033	12,1

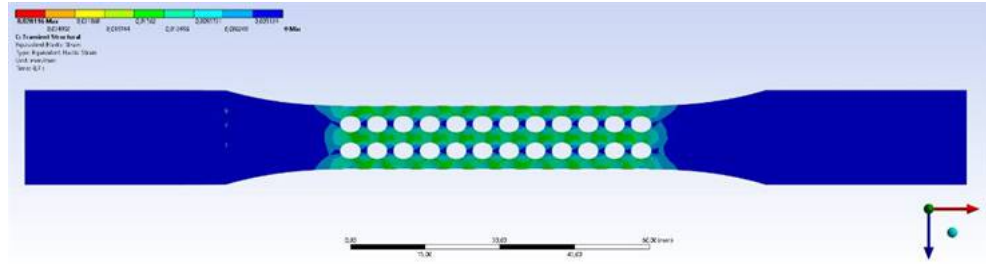
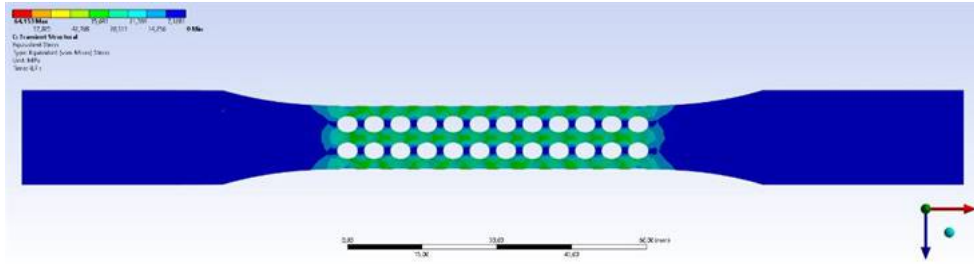
(2.12).

; () : () ; ()

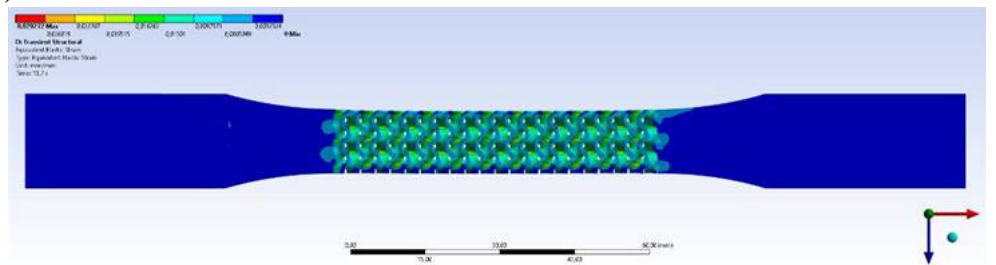
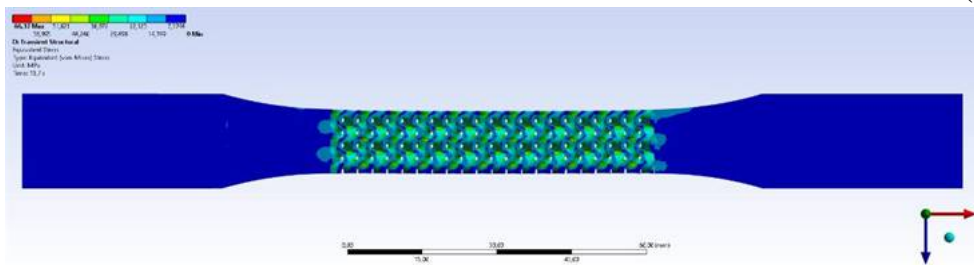
; () : () ; ()



()



()



()

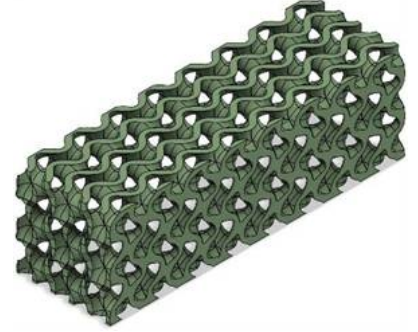
(2.13).



()
2.13 – 3D-



()
:() ,
;() ,



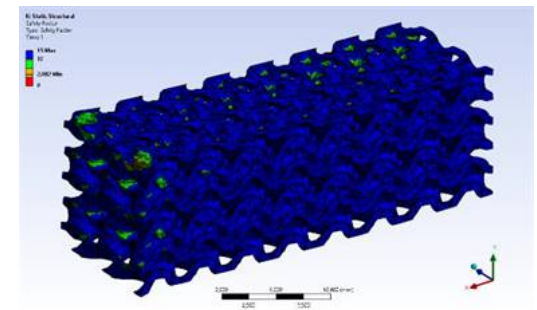
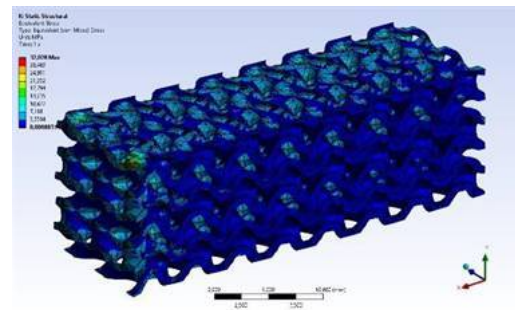
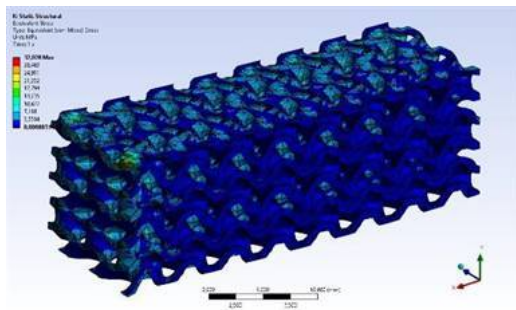
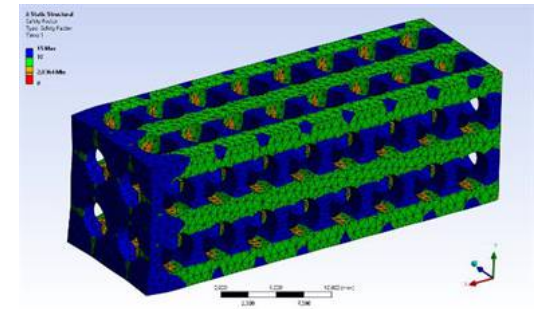
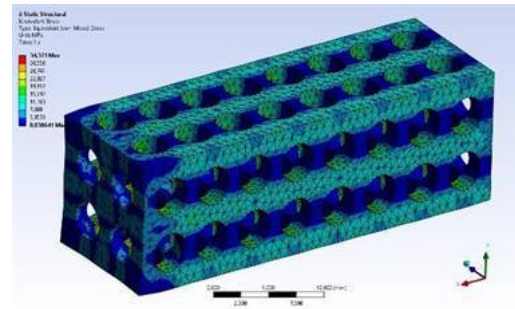
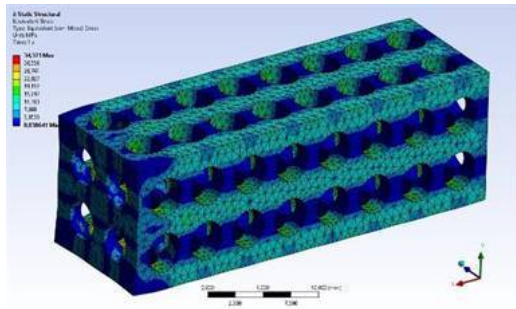
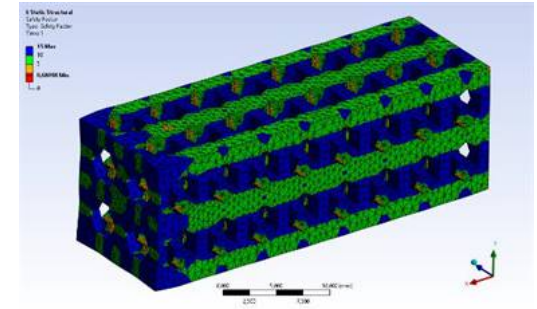
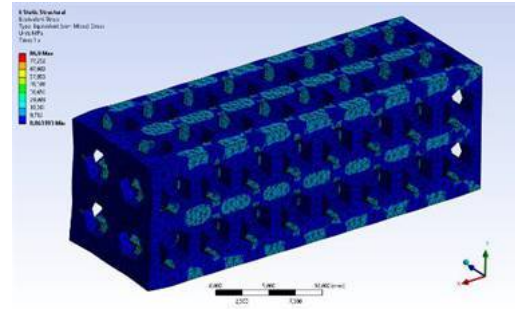
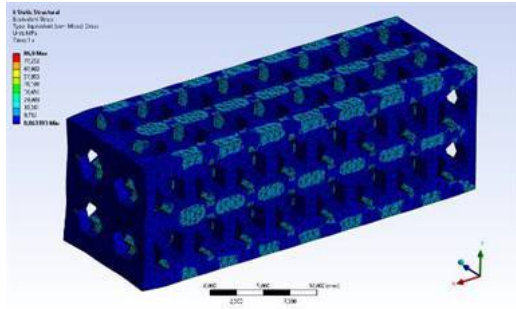
()
;() ,

,
-3 [142].

(2.14).

(),

,
.



2.2 –

	86,9	0,043	0,68
	34,4	0,016	2,04
	32,0	0,015	2,08

2.1.4. Проектирование геометрии гибридного имплантата костной ткани

299

2.15).

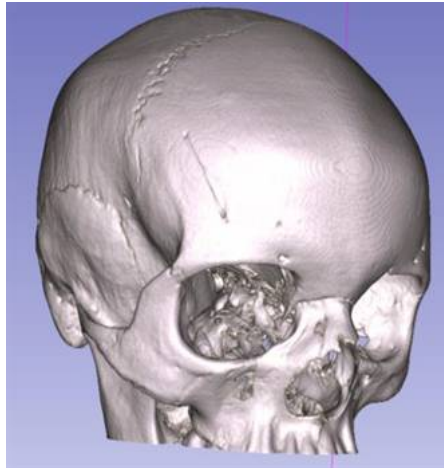


2.15 –

3D-

3D-

(2.16).



2.16 – 3D-

3DSlicer

.STL

3D-

MeshLab

Ansys SpaceClaim.

(2.17).



()

2.17 -



()

()

()

(2.18()).

(2.18()-()),

(2.18()).



()

2.18 -
();



()



()

();



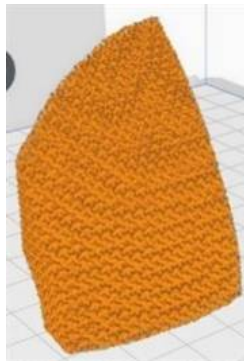
()

() ();
()

(2.2)

3D-
3D-
UltiMaker Cura.
.STL

(2.19).



2.19 – 3D-

(2.20).



2.20 –

0,15 ; 210 ; 60 ;
3D- :

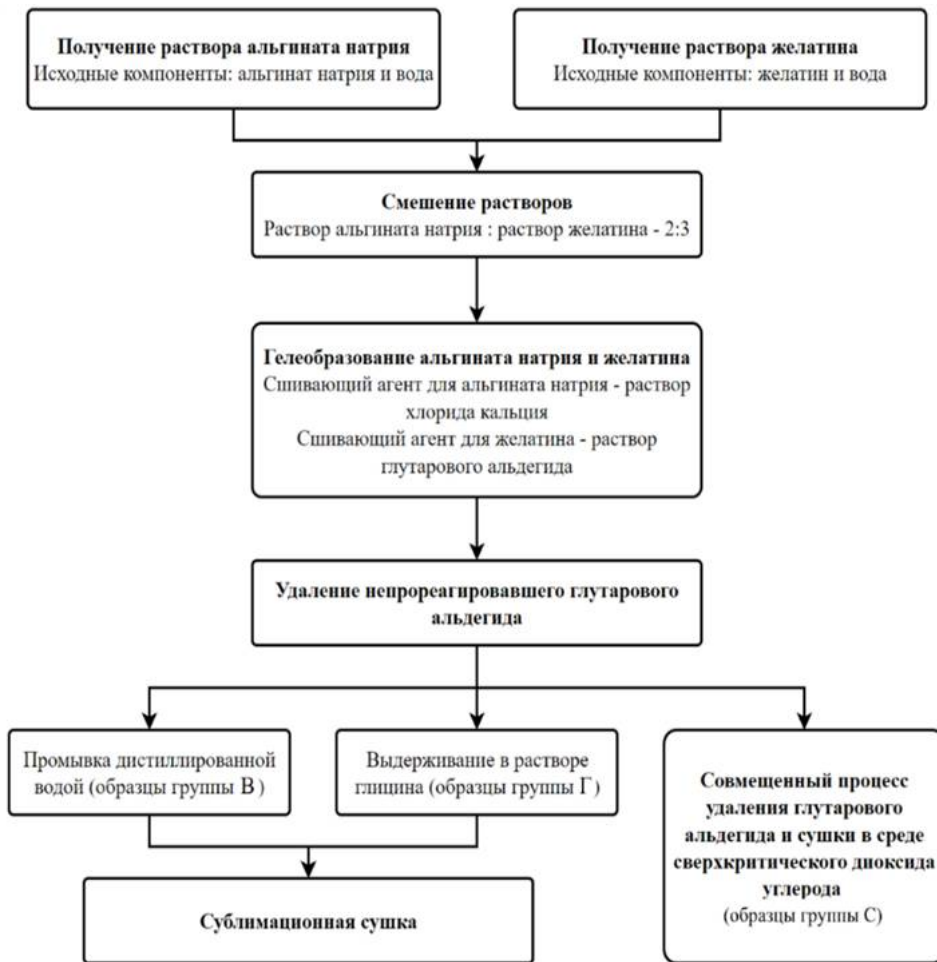
15 / , 3 25 .

0,5%.

2.2. Процессы получения высокопористых материалов для заполнения твердого каркаса гибридного имплантата костной ткани

2.2.1. Лабораторная методика получения высокопористых материалов для заполнения твердого каркаса гибридного имплантата костной ткани

(2.21).



2.21 –

2 .%

15 .

2 .%

40

5 .

2:3

10 .

2 .%

1 .

Ca²⁺.

12

0,01 0,10 .%.

24 .

,

,

.

: 1)

(); 2) (

); 3) (

) [143].

()

.

,

24 ,

- . , -

()

,

.

1 .%

24 ,

.

- .

()

,

[144].

. , ,

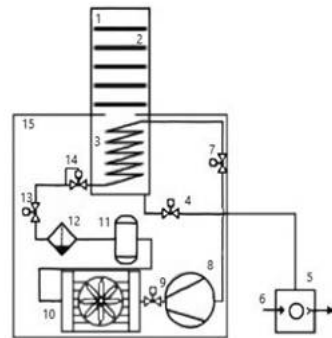
(),

2.2.2. Процессы сушки и аналитические исследования материалов

Процесс сублимационной сушки.

-196° .

LaboGene CoolSafe Touch 100-9 (2.22).



2.22 – () ()
; 2 – ; 3 –
; 6 – - ; 7 –
; 10 – ; 13 –
; 12 – - ; 13 –

LaboGene CoolSafe Touch 100-9: 1–
; 4 – ; 5 –
; 8 – ; 9 –
; 11 –
; 14 –
; 15–

[145],

: 0° (10), 5° (8), 10° (8), 15° (8), 20° (8), 25°

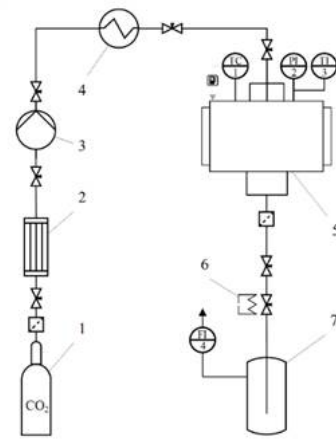
(8).

Процесс сверхкритической сушки.

С

: 30%–60%–90%–100%–100%–100%.

250 (2.23).



2.23 – () ; 1 – ; 2 – ; 3 – ; 4 –
 – TC1 – ; 5 – 250 ; 6 – ; 7 – ;
 ; PI2 – ; TI3 – ; FI4 –

[146]: 40° , 120 ,
 1000 / , 5 .
 4 / .

Аналитические исследования материалов.

(2.3).

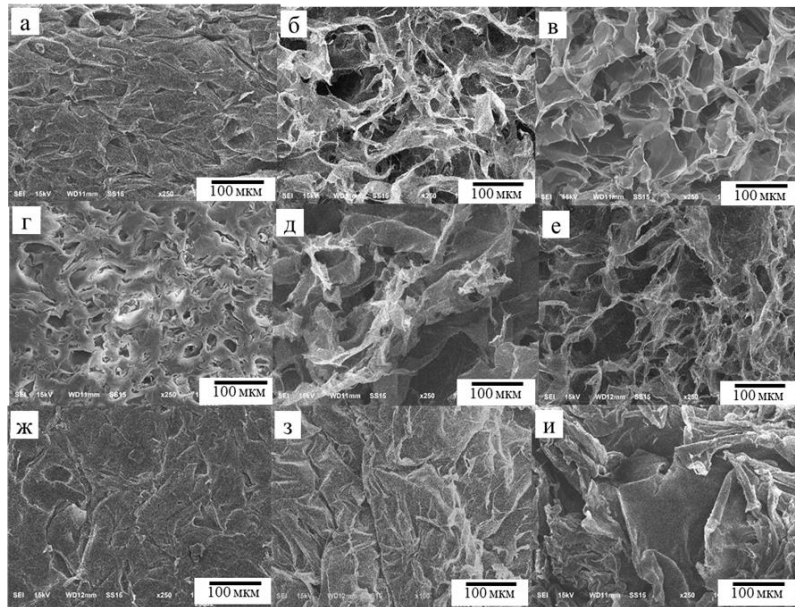
Anton Paar Ultracyc 5000.

2.3 –

	, / 3	, / 3	, %
-0,01	0,024	1,798	98,7
-0,05	0,023	1,093	97,9
-0,10	0,027	1,649	98,3
-0,01	0,022	1,579	98,6
-0,05	0,023	1,667	98,6
-0,10	0,017	1,327	98,7
-0,01	0,047	1,593	97,1
-0,05	0,047	1,592	97,1
-0,10	0,051	1,562	96,7

2.24).

JEOL 1610LV.

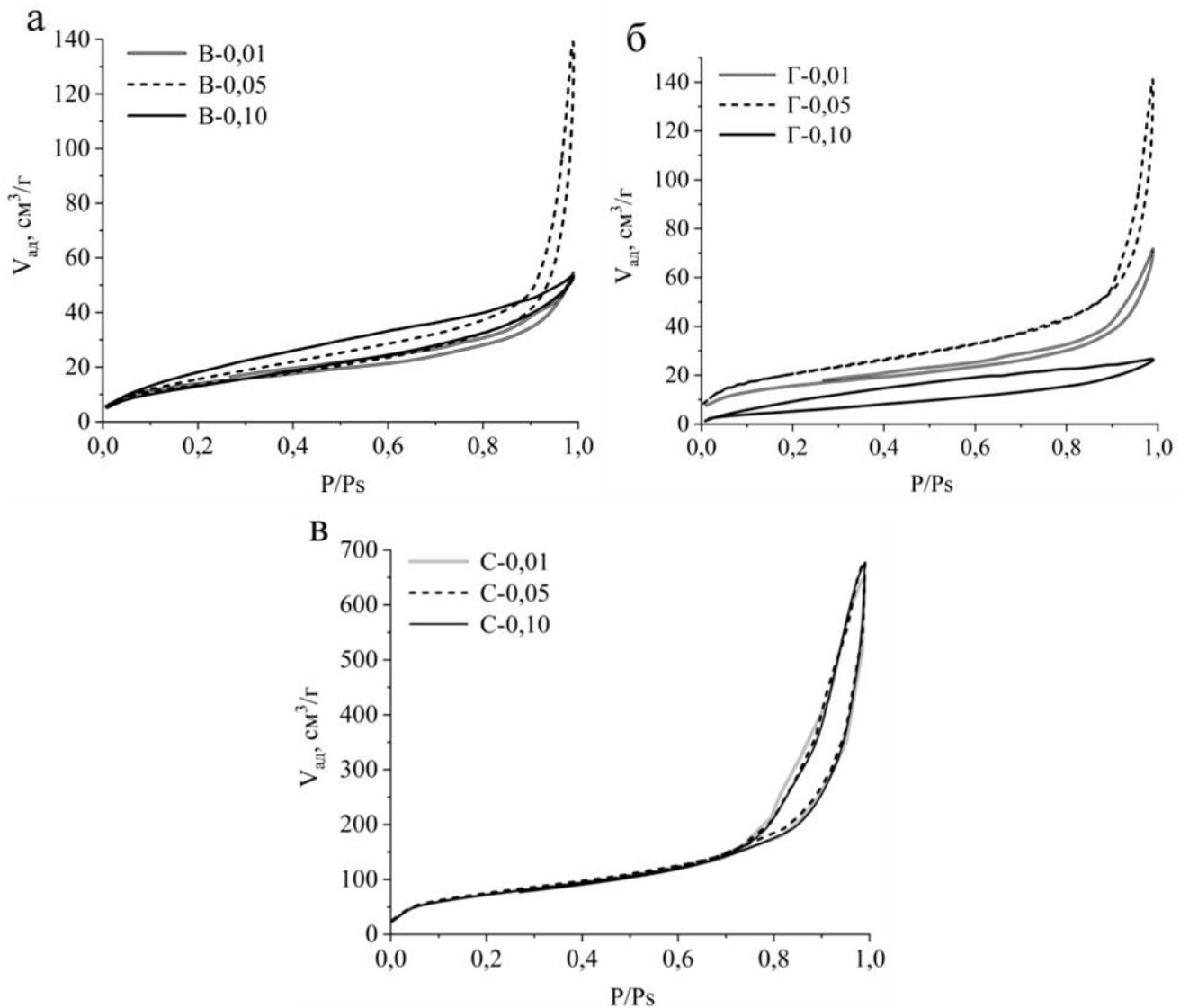


2.24 –
 -0,01; – -0,05; – -0,10; – -0,01; – -0,05; –
 -0,10; – -0,01; – -0,05; – -0,10

Quntachrome Nova 2200e.

77

(2.25).



2.25 –

- 77 : () -0,01; -0,05; -0,10; () -0,01; -0,05; -0,10; () -0,01; -0,05; -0,10

100 150 ²/ .

265 275 ²/ .

14 .

-0,01; -0,05; -0,01; -0,05
(2.26).



2.26 –

73

4

-0,10; -0,10; -0,01; -0,05; -0,10.

-0,01; -0,05; -0,01 -0,05.

-0,10; -0,10; -0,01; -0,05; -

0,10

2.3. Технология получения персонифицированной системы гибридного имплантата костной ткани

(2.27).



2.27 –

3D-

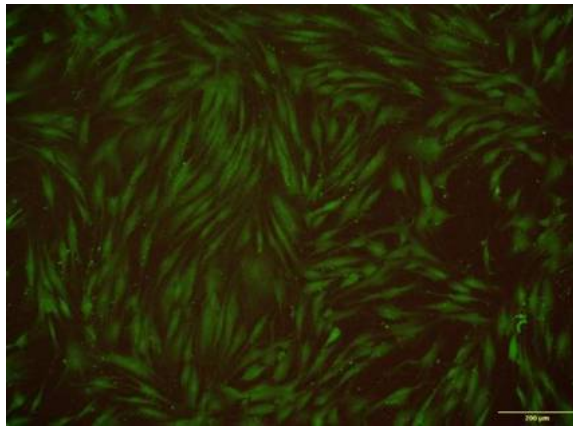
-

(2.28).



2.28 –

2.29).



2.29 –

4

(

4

Выводы по главе 2

1.

, : $-0,15$; 210 ; 60 ; 15 / . 3D-

2.

3.

3DSlicer.

4.

100 270 $^2/$.

5.

Глава 3. Процессы прямой гелевой печати для получения персонифицированных имплантатов сосудов

« »

3.1. Описание разработанной конструкции установки и экструдера для реализации процесса прямой гелевой печати

« »

« ».

XY-Head Z-Bed

« »

X Y,

XY-Head Z-Bed.

25 25

3 Autodesk

Inventor

(3.1).

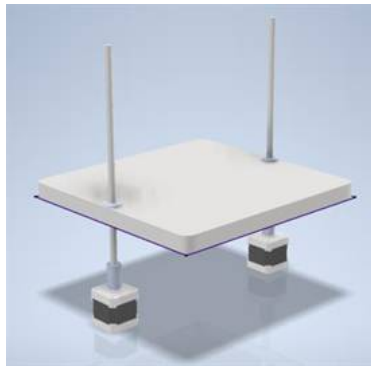


3.1 –

3D-

OZ,

(3.2).



3.2 –

(3.3).

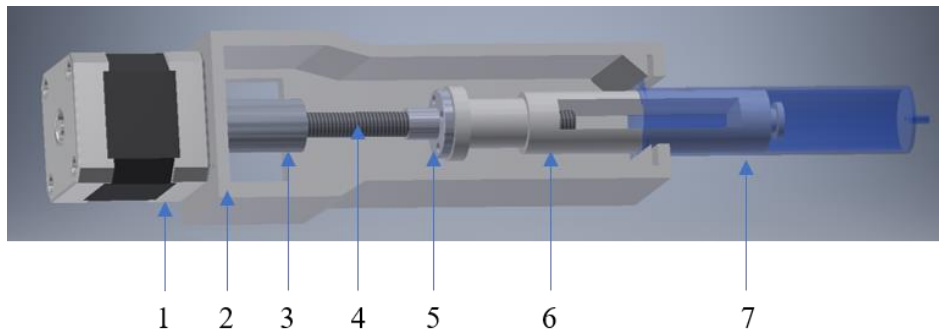


3.3 –

« ».

(3.4)

: « », , , , .



3.4 —

, 4-

« » (1-

, 5- « »)

, 2-

, 6-

, 3-

, 7-

4- 3 25.

,

.

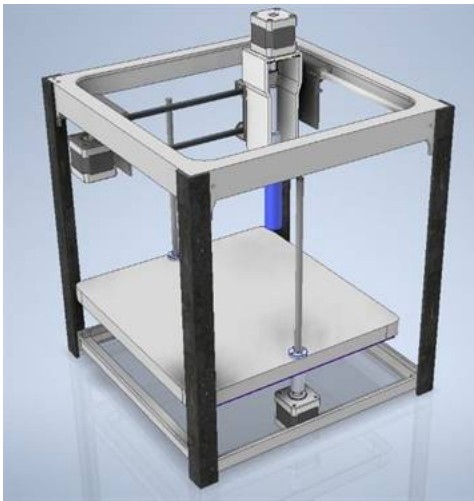
4- M3 25.

25 ,

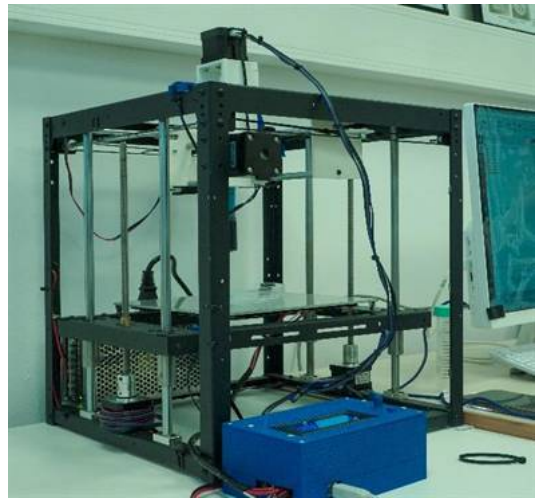
.

« »,

(3.5).



3.5 –



(),

« » ()

220 220 200 .

,

Gen L,

ATMega 2880.

MKS

6

(

« »)

Arduino Wiring.

:

•

•

3D-

1

X, Y, Z,

X

(3.1):

$$N_{XY} = \frac{a}{h_b * n'} \tag{3.1}$$

N_{XY} -

1

X Y, a -

(

Nema 17

3200), h_b -

, n -

Z

(3.2):

$$N_Z = \frac{a}{h_n * c'} \tag{3.2}$$

N_Z -

1 Z, – ,
 (Nema 17
 3200), – (Nema 17
 1/16), h_n – .
 (3.2)

, « ».

3.2. Разработка состава вязких «чернил» для реализации процесса прямой гелевой печати и экспериментальные исследования процесса

« »

« »

« »

3.2.1. Исследование реологических особенностей разработанных составов материалов на основе частично сшитого альгината натрия

« ».

2 9 .%,

AntonPaar

SmartPave 102e.

50 .
20° .

10 .

0,01 ⁻¹ (3.1).

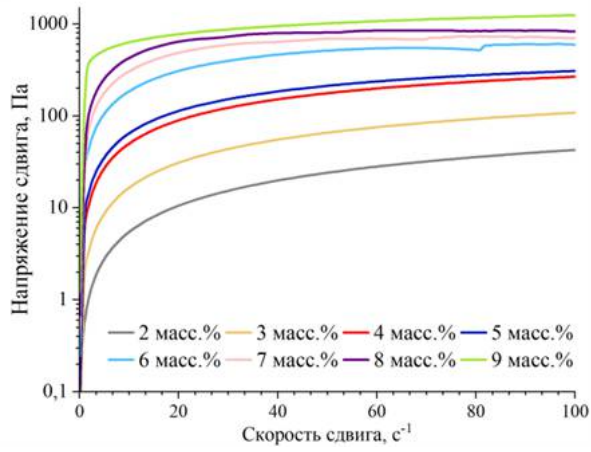
3.1 —

.%	2	3	4	5	6	7	8	9
, .	0,8	1,8	5,7	8,1	24,6	44,8	67,1	118,6

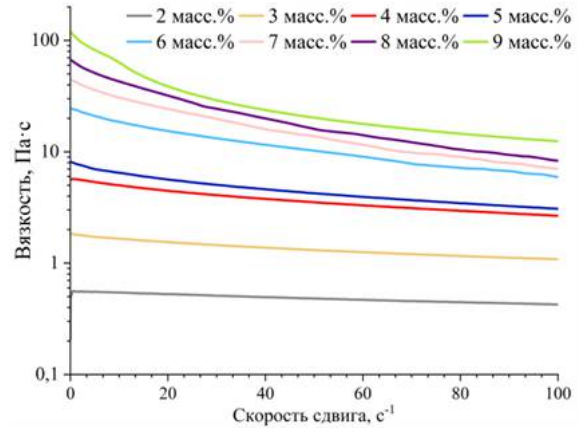
0,01

100 ⁻¹.

(3.6).



3.6 – ()



()

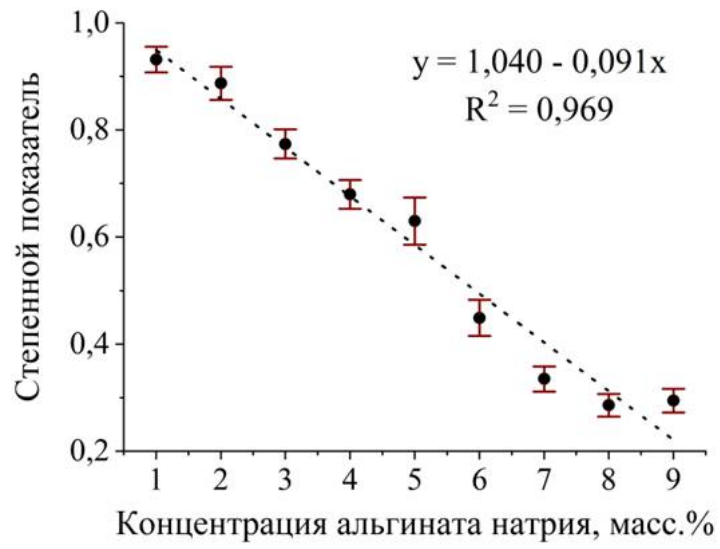
(3.3).

$$\tau = k \left(-\frac{dv}{dr} \right)^n, \tag{3.3}$$

τ – , ; k – , $\frac{dv}{dr}$ –
 , $1/n$; n – .

(3.3) 3 7 %.

(3.7).

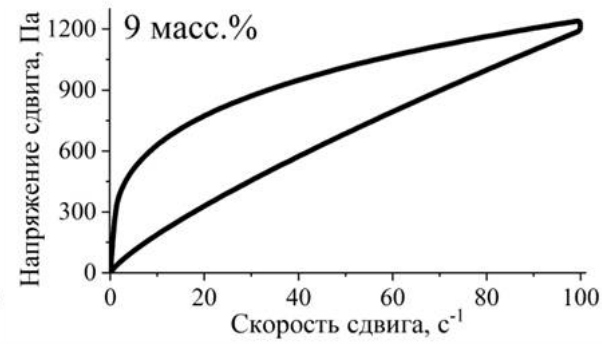
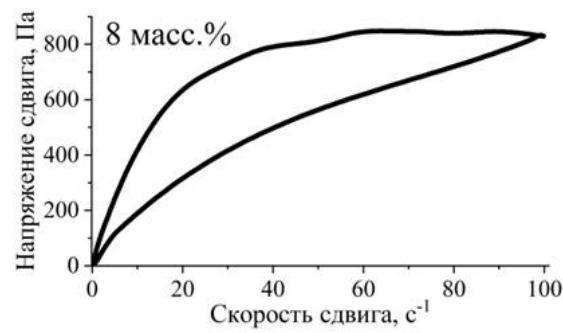
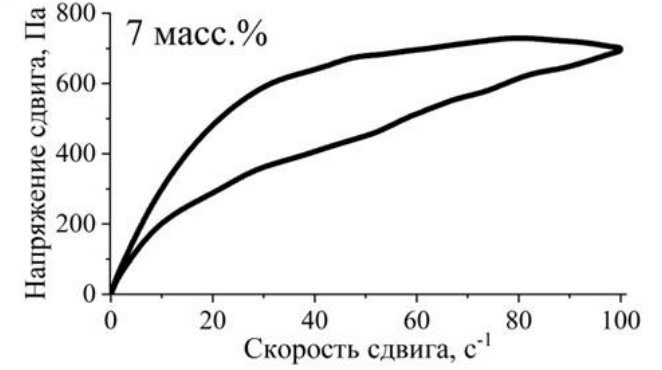
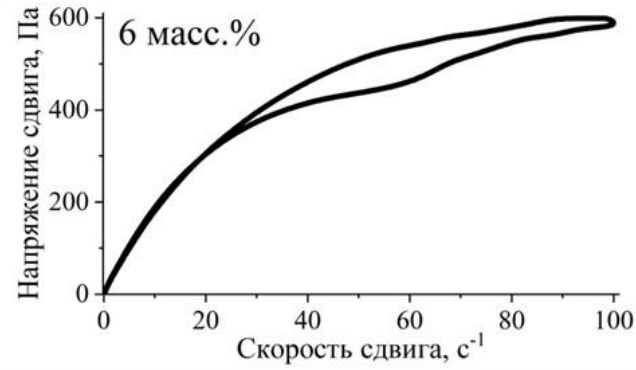
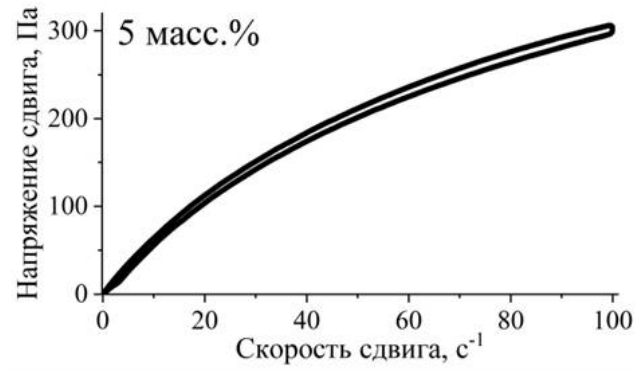
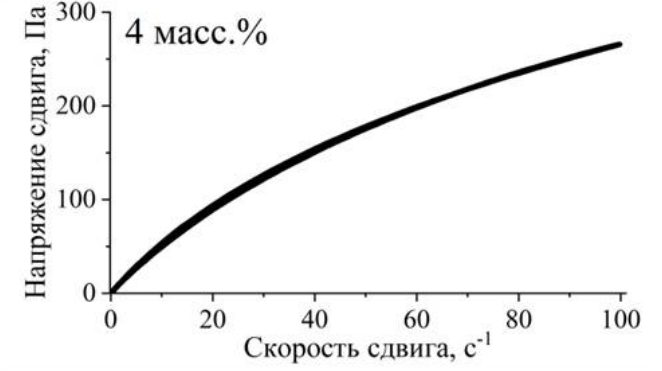
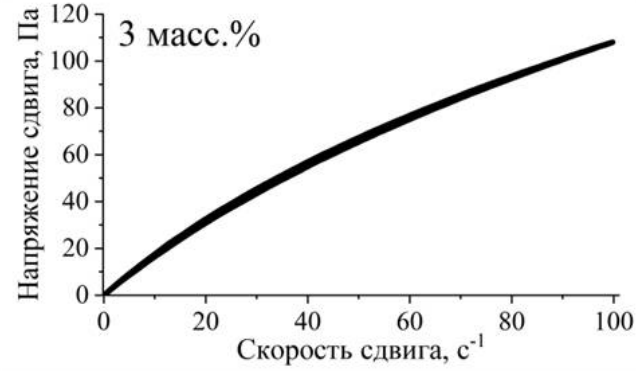
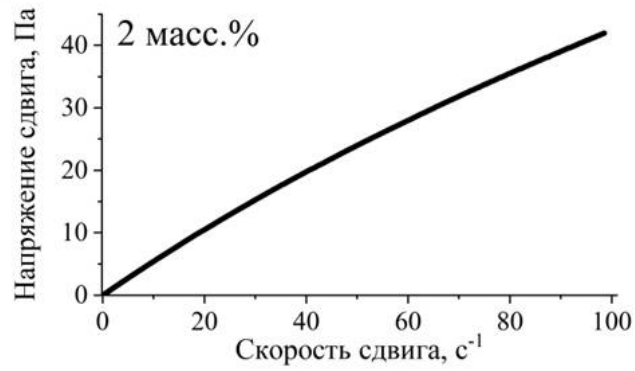


3.7 –

n 1,

0,01⁻¹ 100⁻¹.

[147] (3.8).



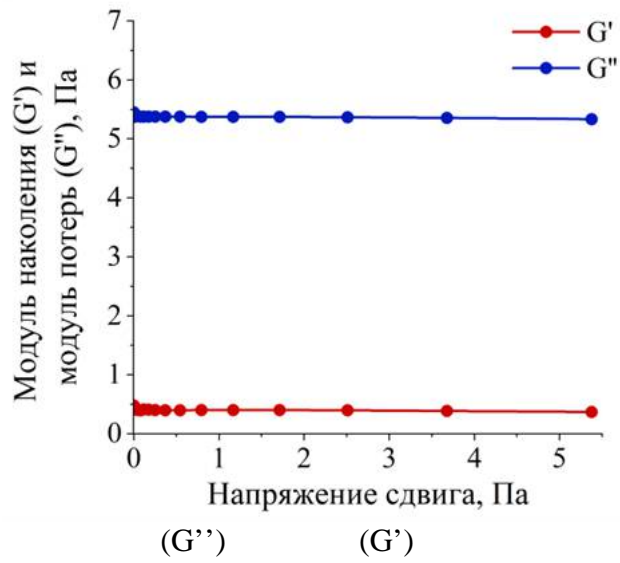
(3.2).

3.2—

	2	3	4	5	6	7	8	9
.%								
, /	9,5	133,7	176,5	487,3	2631,9	14868,1	20154,9	38606,3

2 .%.

10 / (3.9).



3.9 –

2 .%

(3.9)

[137]

« »

« »

« »

0,01⁻¹ (3.3).

3.3— « »

0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	
0,8	1,3	2,9	895,2	934,4	1349,2

0,15-0,25 .%

0,3

.(3.10).



3.10 –

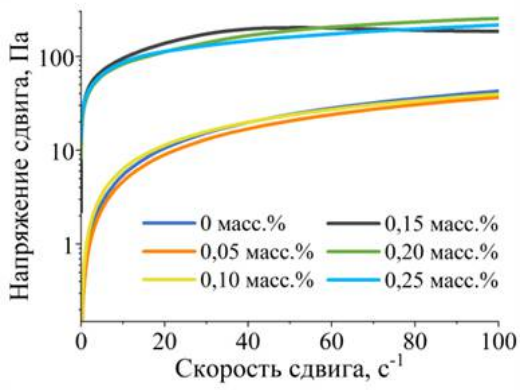
0,3 .%

2 .%

-1 (

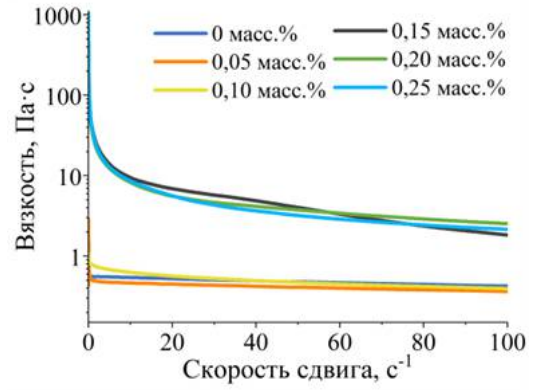
3.11).

0,01 100



3.11 –

()

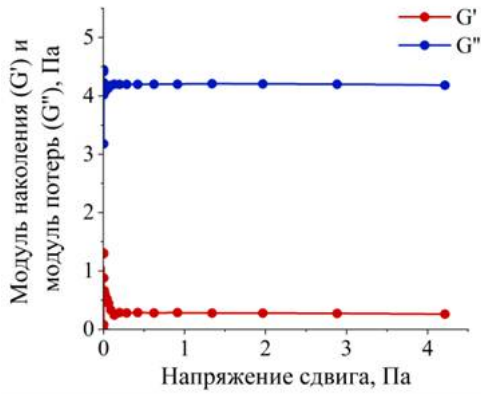


()

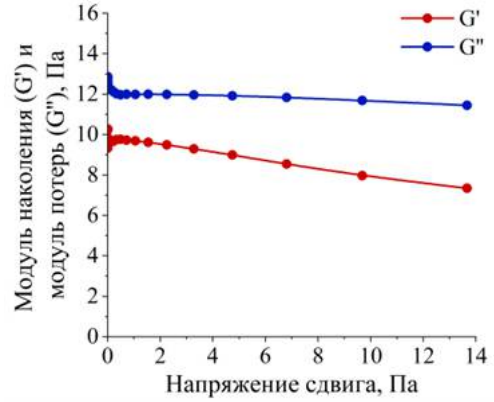
« »

0-0,10 .%

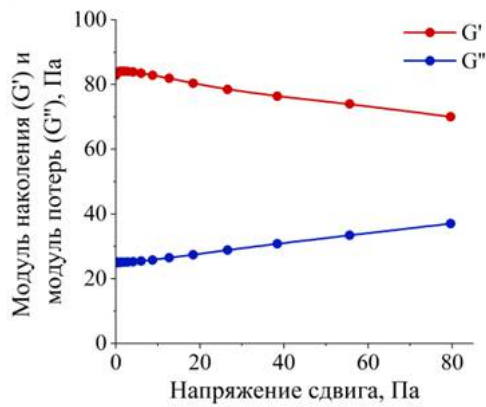
(3.12).



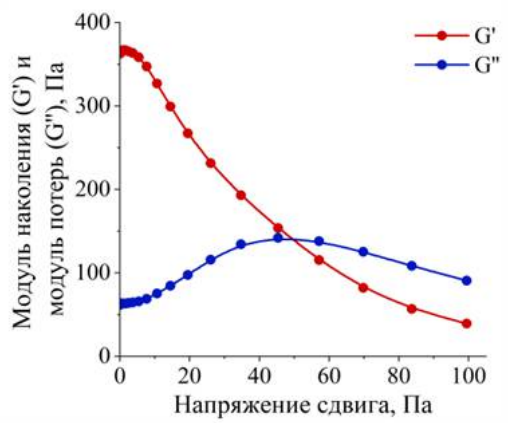
()



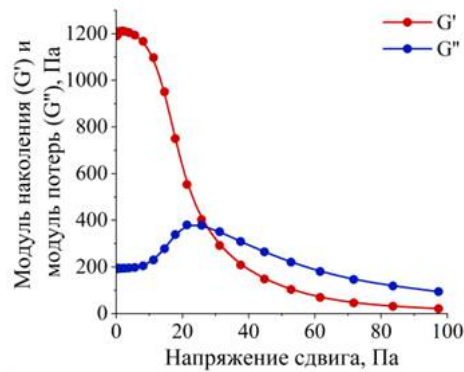
()



()



()



()

3.12 –

(G') (G'') ,
 2 .%
 : () 0,05 .%; () 0,10 .%; () 0,15 .%; () 0,20 .%;
 () 0,25 .%

(3.4).

3.4 –

	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
.%	0	0	0		51	27

0 ,

0 ,

0 ,

0,05-0,10

.%

0,15 .% (G')

(G'')

0,20-0,25 .%

(G')

(G'')

0,20 0,25 .%

(51 27).

(3.5).

3.5 –

	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
	0,2	0,4	811,4	4167,6	2374,2	610,4

, 0 .% 0,05 .%.

3D-

0,10 .% 0,25 .%

() ,

0,15 .%

3D-

2 .%

0,2 .%

(934,4 .) ,

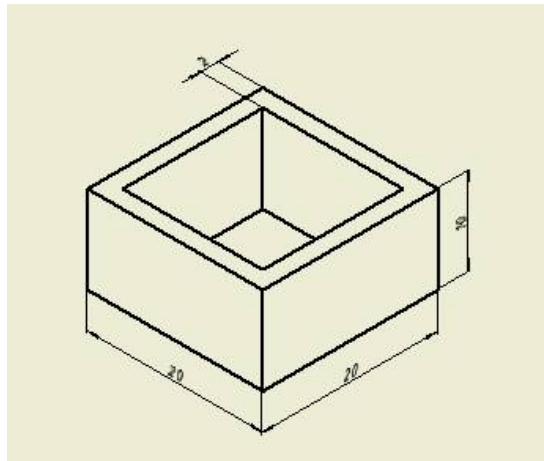
3.2.2. Подбор параметров проведения процесса 3D-печати с использованием разработанных составов вязких «чернил» на основе частично сшитого альгината натрия

« »

-

« »

(3.13).



3.13—

3D-

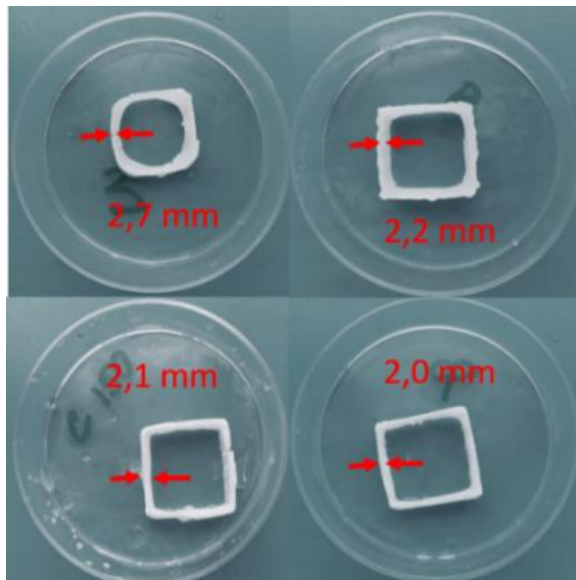
RepetierHost

3D- . (1),

(5 /)

(1 /). « »

(3.14).



3.14 —

3D- (3.6).

3.6 –

0,84	21,4	7,3	2,7
0,61	21,0	9,2	2,2
0,51	20,7	9,5	2,1
0,41	20,2	10,1	2,0

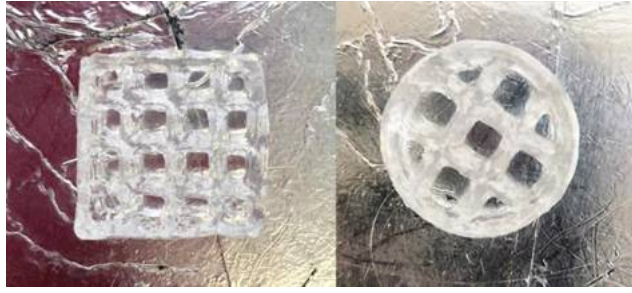
« »,
0,51; 0,61; 0,81 .

0,41

5 /

1 /

(3.15).



3.15 —

3D-
3D-

20 ,

5

1 .

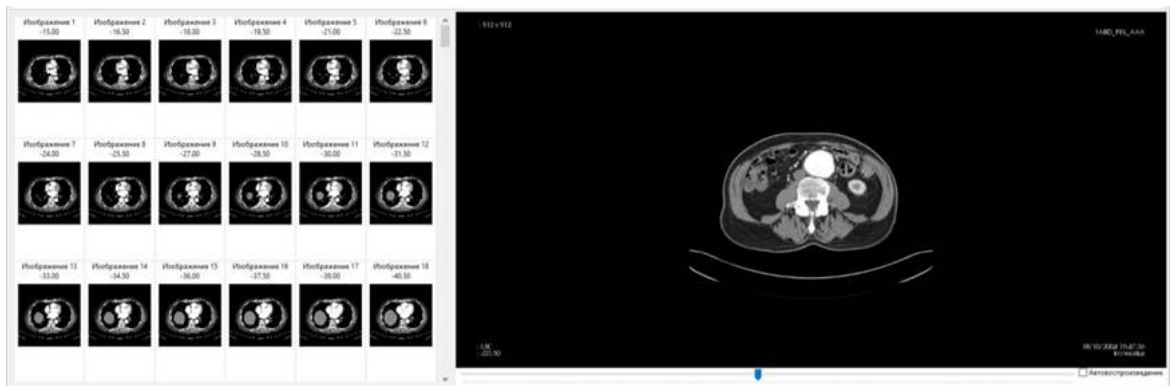
3D-

« »

3.3. Разработка математической модели для исследования гидродинамики неньютоновской вязкой жидкости в каналах сложной геометрии с пульсирующим характером течения

3.3.1. Математическое моделирование гидродинамики неньютоновской вязкой жидкости в сосудах сложной геометрии при пульсирующем характере течения

(3.16).

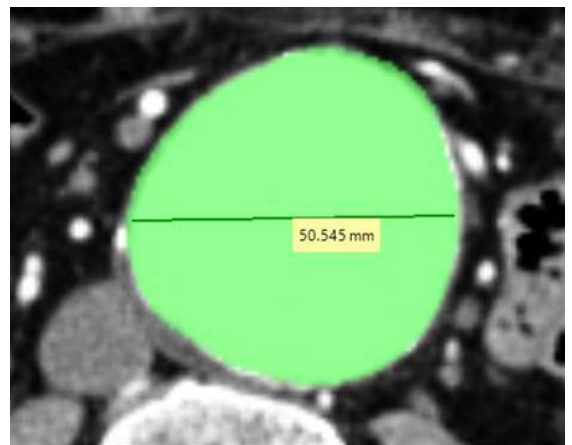
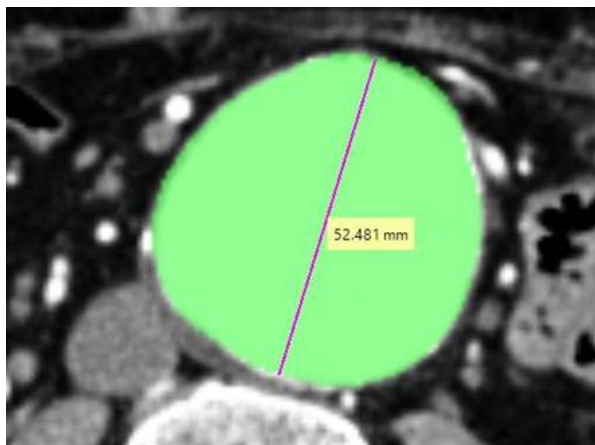


3.16 —

3D-

(),

.(3.17).



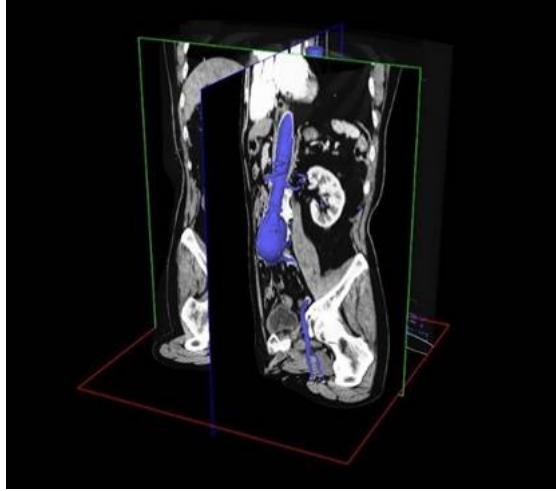
3.17 —

52,48

50,55

3D-

3D-
(3.18).



3.18 — 3D-

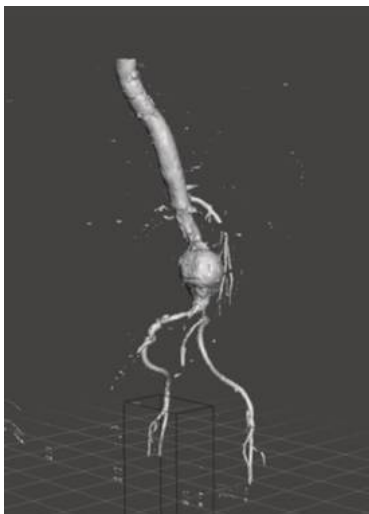
InVesalius

.STL

3D-

MeshLab,

(3.19).



3.19 — 3D-



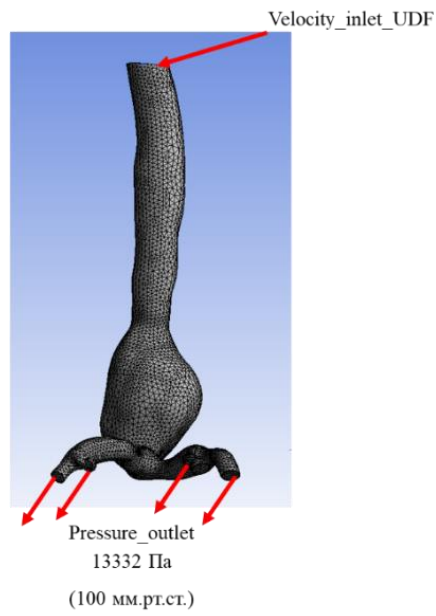
()

()

.STL.

ANSYS 17.0.

1. ;
 2. ;
 3. ;
 4. ;
 5. .
- , (3.20).



3.20 —

$$\frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \tag{3.4}$$

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla(\tau') + \rho \vec{g} \tag{3.5}$$

(3.4)–(3.5)

: (3.6) –

, (3.7) –

$$\mu = \mu_{inf} + (\mu_0 - \mu_{inf})(1 + (\lambda \dot{\gamma})^2)^{\frac{n-1}{2}}, \tag{3.6}$$

$\dot{\gamma}$ –

, μ_{inf} –

, n –

(3.7):

3.7 —

[148]

3,313	0,3568	0,056	0,0035

:

$$\tau' = \mu \left((\nabla \vec{v} - \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \vec{v} \cdot I \right) \tag{3.7}$$

(3.8) – (3.10):

$$\vec{v}(x, y, z, t)_{t=0} = v_{\text{нач}} \quad (3.8)$$

$$\vec{v}(x_{\text{BX}}, y_{\text{BX}}, z_{\text{BX}}, t) = v_{\text{in}} \quad (3.9)$$

$$\vec{v}(x_{\text{CT}}, y_{\text{CT}}, z_{\text{CT}}, t) = 0 \quad (3.10)$$

UDF

Fluent,

Visual Studio 2017.

C.

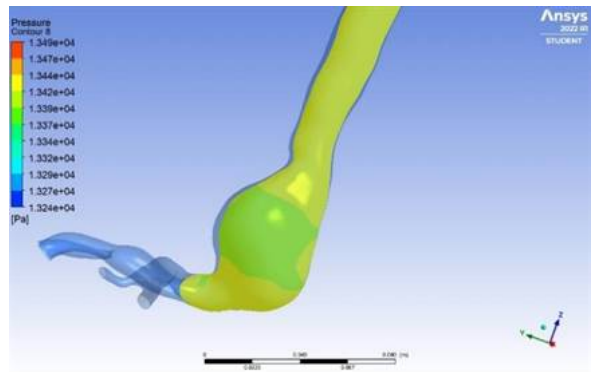
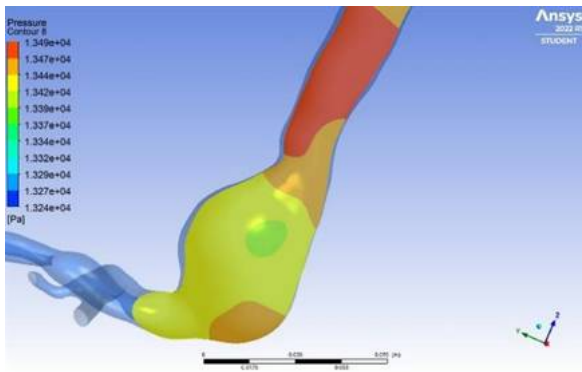
1

(3.11):

$$v_{\text{in}} = \begin{cases} 0.5\sin[4\pi(t + 0.016)], & \text{при } 0.5k < t \leq 0.5k + 0.218 \\ 0.1, & \text{при } 0.5k + 0.218 < t \leq 0.5(k + 1) \end{cases}, \quad (3.11)$$

где $k = 0, 1, 2, \dots$

(3.21).

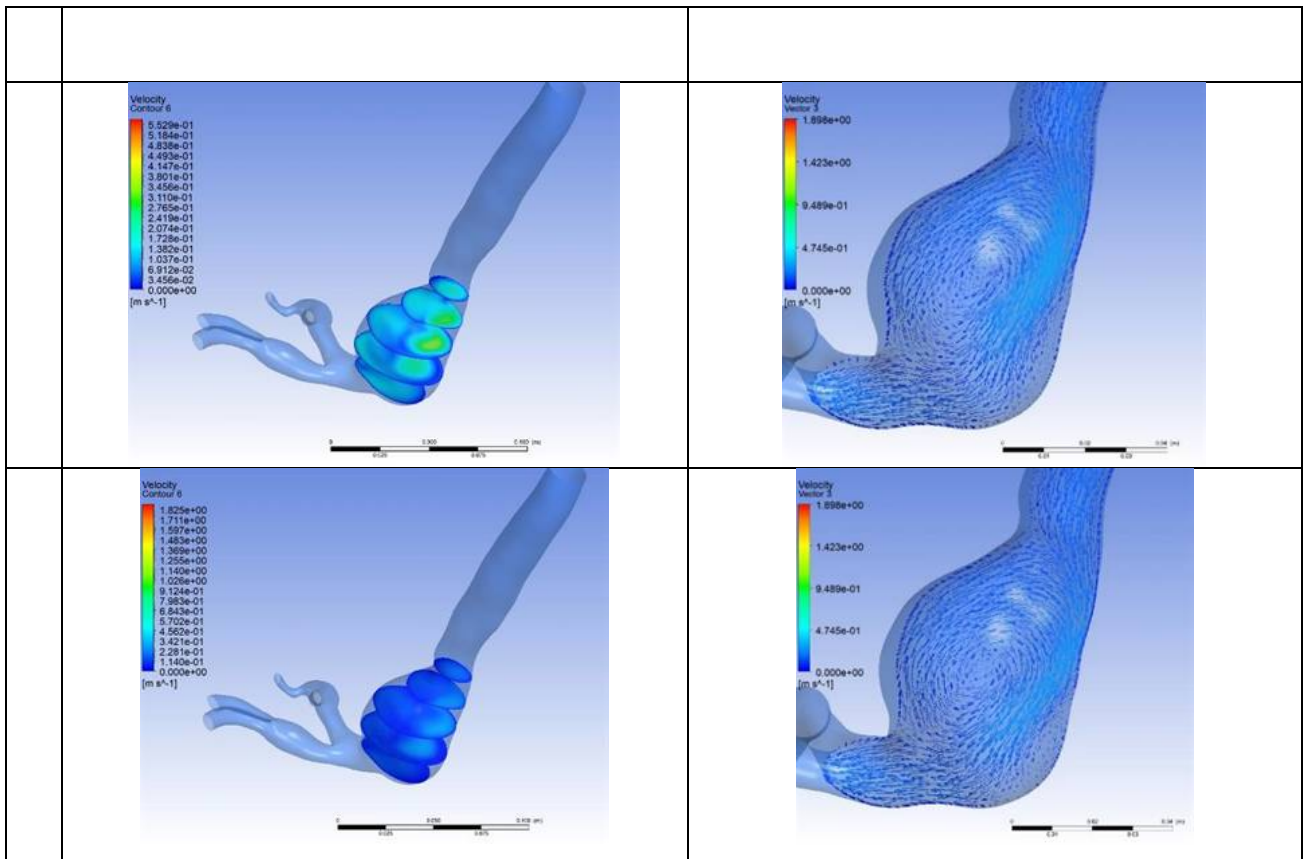


3.21 —

(3.8).

3.8 —

(-0,5 / , -0,1 /)



**вязкой жидкости в сосудах сложной геометрии при устранении дефекта
канала с использованием разработанного имплантата**

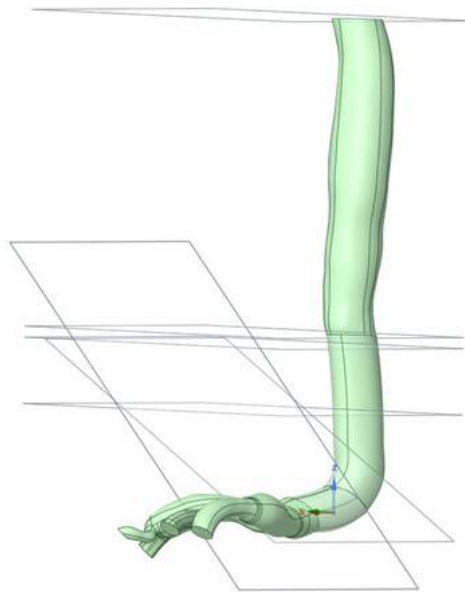
3D-

10

OZ.

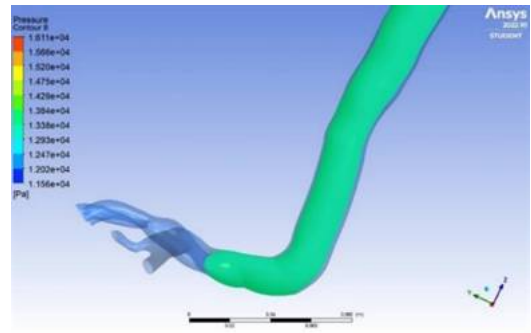
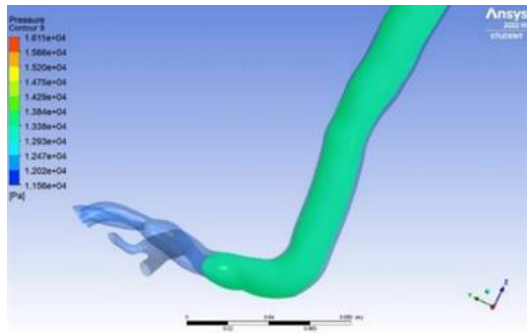
10

(3.22).



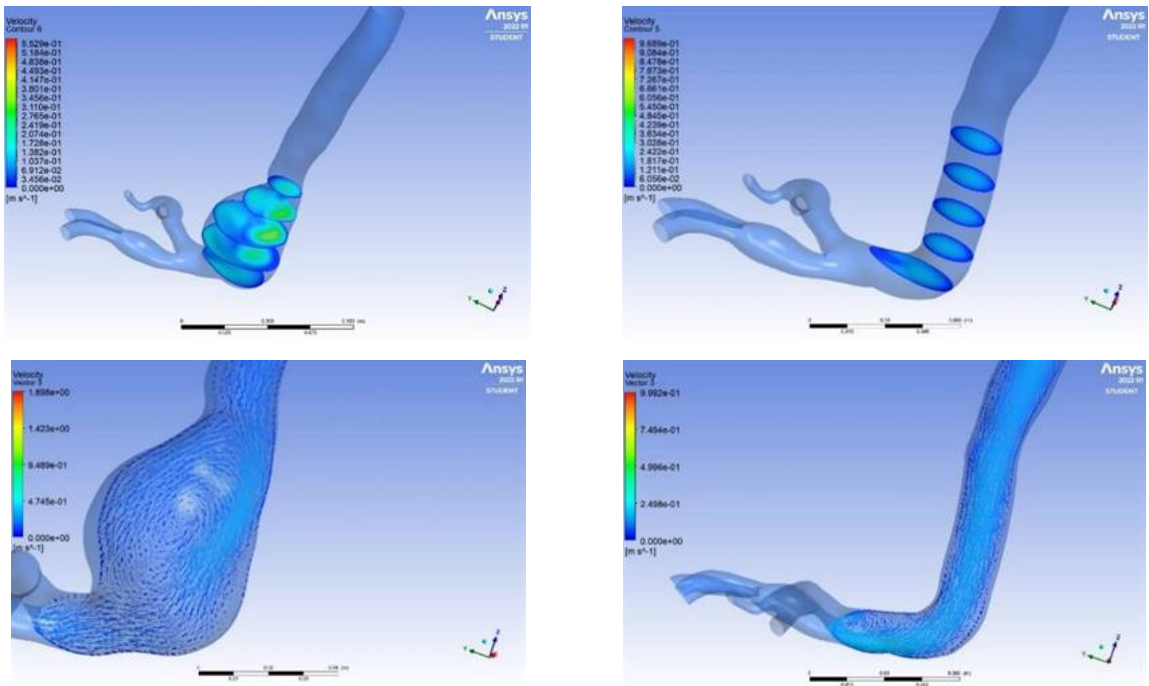
3.22—

(3.23).



3.23 — (-0,5 / , -0,1 /)

(3.24).



3.24 —

,

,

« »

3.4. Процессы получения персонафицированных имплантата сосуда с использованием технологии прямой гелевой печати

: 3D-

..

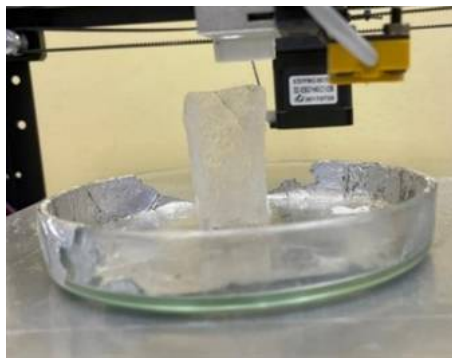
,

,

,

,

« » (3.25).



3.25 — 3D-

1 .%

2 (3.26).



3.26 —

« »



3D-

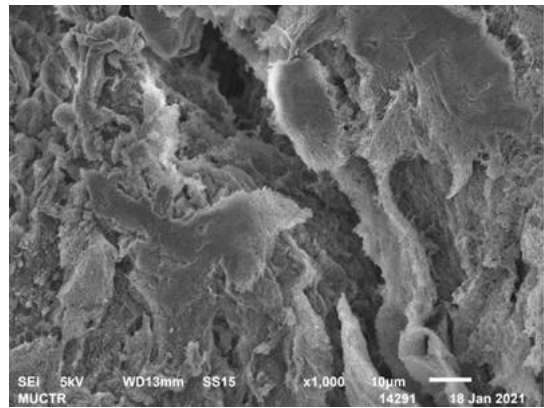
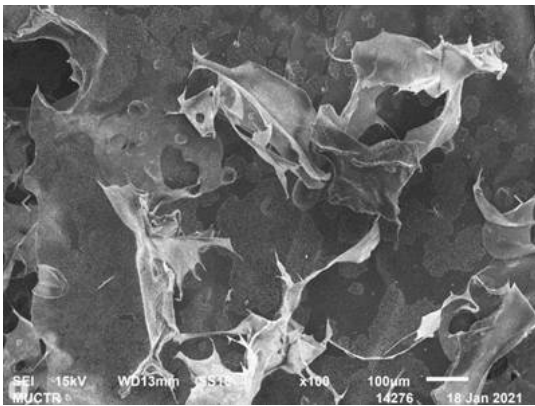
() ()

(3.27).

13. .21.0009.

JEOL 1610LV

SSD X-Max Inca Energy.



3.27 —

() ()

Выводы по главе 3

1. « »
« »
2. « »
2 .%
0,2 .%. « » 934,4
51 . ,
3. « »
934,4 . .
5 / ,
4. 1 / , 0,41 .
5. .

Глава 4. Процессы 3D-печати с использованием гетерофазной системы для получения персонифицированных токопроводящих элементов

3D-печать является перспективной технологией для изготовления персонифицированных токопроводящих элементов. В процессе печати используется гетерофазная система, состоящая из жидкой фазы и твердой фазы. Жидкая фаза содержит токопроводящие наполнители, а твердая фаза обеспечивает структурную целостность изделия. Процесс печати осуществляется с помощью лазерного излучения, которое вызывает испарение жидкой фазы и осаждение твердой фазы на подложку. Таким образом, формируется слой за слоем трехмерная структура. Для обеспечения высокой точности печати необходимо контролировать параметры процесса, такие как температура, влажность и скорость печати. Кроме того, важно использовать материалы, совместимые с технологией 3D-печати. В настоящее время ведутся исследования по оптимизации параметров печати и разработке новых материалов для получения высококачественных персонифицированных токопроводящих элементов.

4.1. Процессы формирования изделий в гетерофазной системе

4.1.1. Получение гетерофазной системы на основе желатина

Для получения гетерофазной системы на основе желатина необходимо использовать желатин в качестве связующего компонента. Желатин обладает хорошими адгезионными свойствами и высокой биосовместимостью. В процессе формирования системы желатин смешивается с токопроводящими наполнителями. Смесь наносится на подложку и подвергается воздействию лазерного излучения, что приводит к испарению жидкой фазы и осаждению твердой фазы. Таким образом, формируется гетерофазная система, состоящая из желатина и токопроводящих наполнителей. Для обеспечения высокой прочности и стабильности системы необходимо контролировать параметры процесса, такие как температура, влажность и скорость печати. Кроме того, важно использовать материалы, совместимые с технологией 3D-печати. В настоящее время ведутся исследования по оптимизации параметров печати и разработке новых материалов для получения высококачественных персонифицированных токопроводящих элементов.

-25°C.
CaCl₂
4°C.

CaCl₂

4200 /

2 .

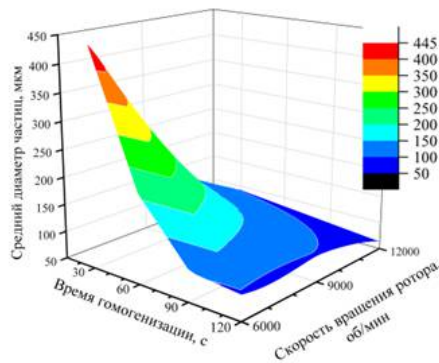
4°C

3 5 .% 0,5 .%,
6000 12000 / , 30 120 .

4.1.2. Исследование свойств гетерофазной системы различного состава

,
« ».

(4.1).



120

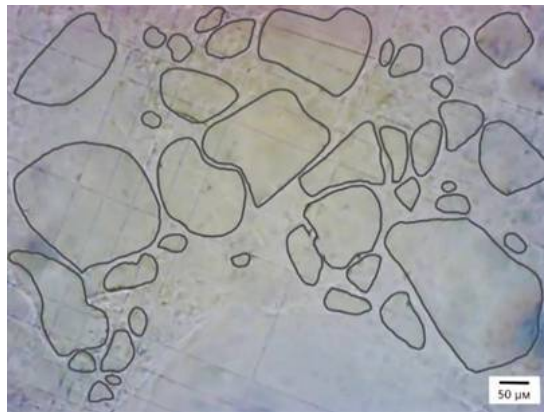
90 150

[46].

9000 / ,

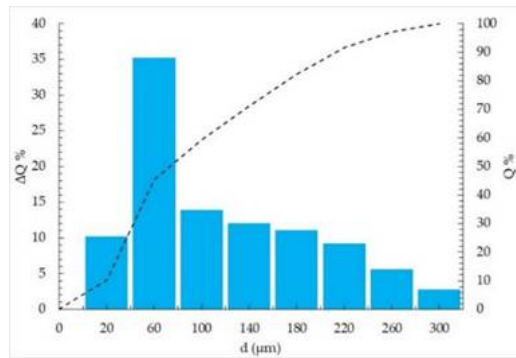
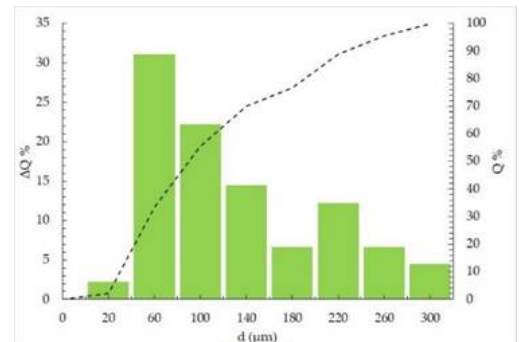
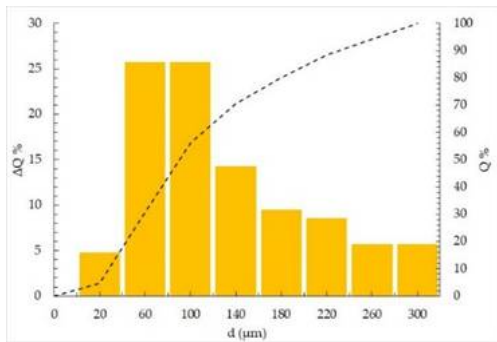
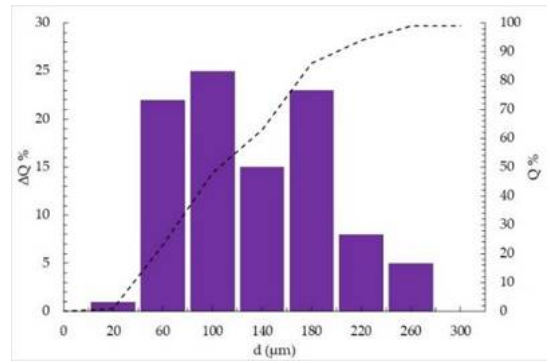
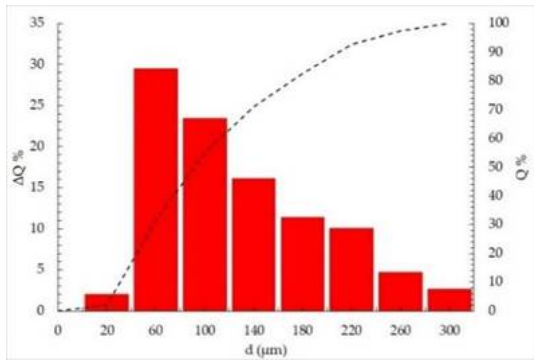
90 .

(4.2).



4.2 —

(4.3).



4.3 –

: –3 .%, –3,5 .%, –4 .%, –4,5 .%, –5 .%

,

100 120 .

3D-

AntonPaar SmartPave

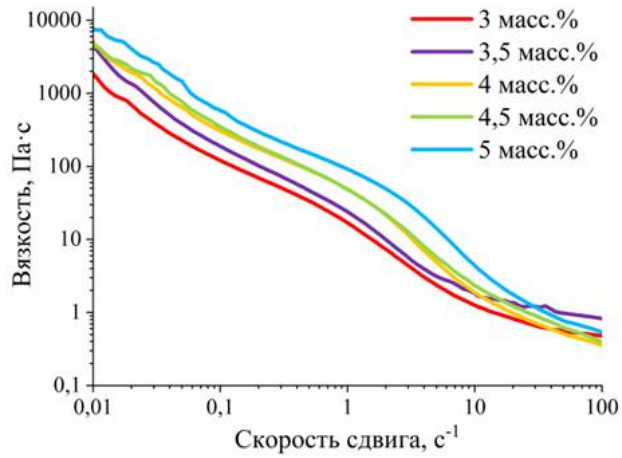
102e

50

20° .

0,01⁻¹ 100⁻¹.

(4.4).



4.4 —

0,01⁻¹ (4.1).

4.1 —

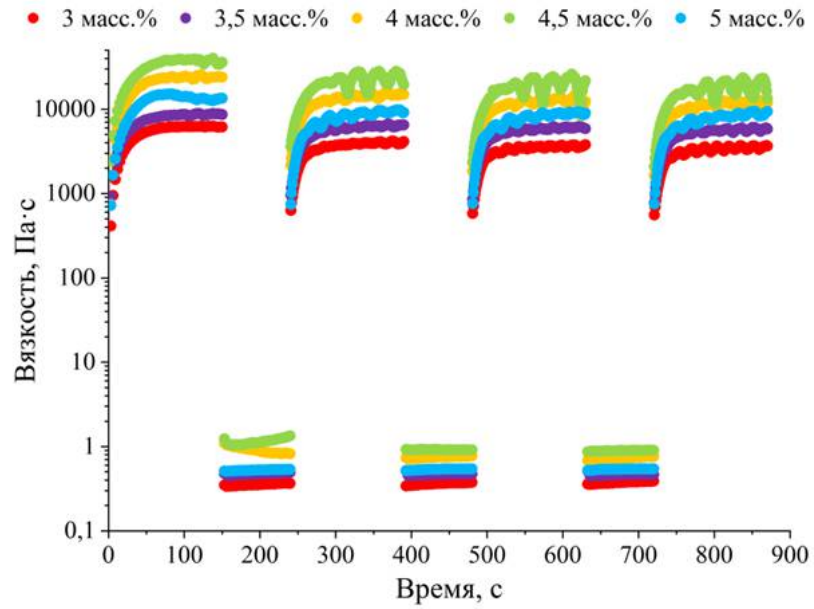
масс.%,	η _{0,01} , Па·с
3	2156
3,5	3195
4	4390
4,5	4795
5	8466

: 1)

, 2)

3)

(4.5).



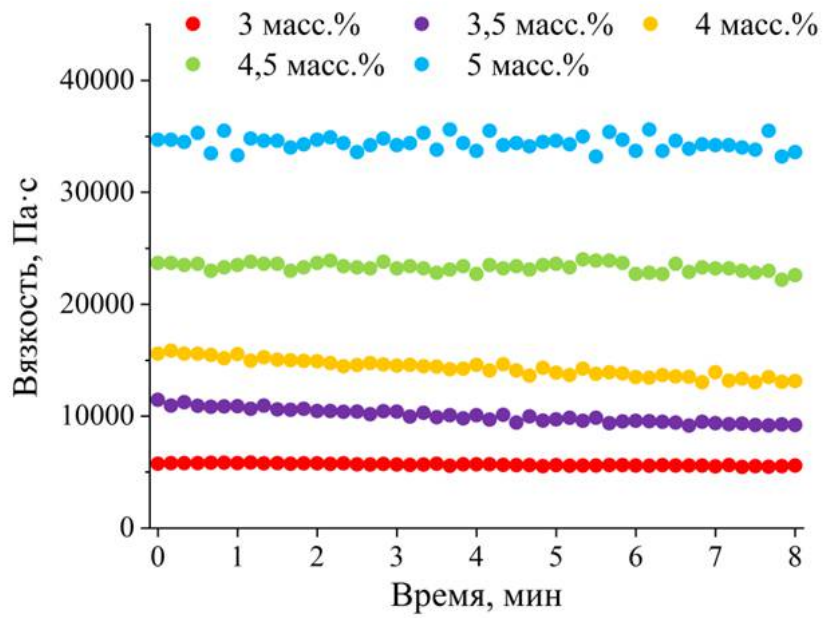
4.5 —

3D-

20°

0,01⁻¹

8 (4.6).



4.6 –

20° .

20°C

9000 /

90 .

3D- .

4.1.3. Процессы 3D-печати вязких «чернил» на основе альгината натрия и формирования изделий в гетерофазной системе

3D- .

3D- .

3-5 .%

11 .

« »

2 .%,

3.

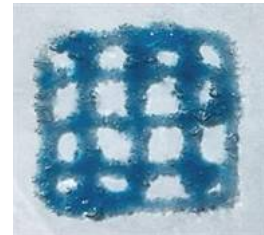
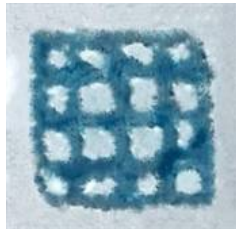
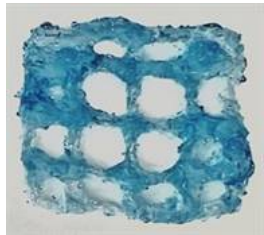
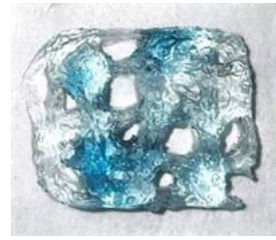
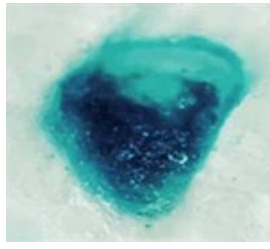
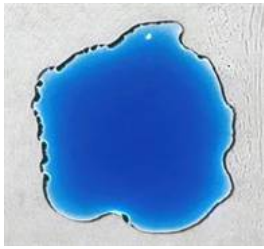
20 20 2 .

20%.

: 0,6 , 6 / ,

0,01 / , 20°

(4.7).



11 4.7 — 3D- : () 0 .%; () 3 .%; () 3,5 .%; () 4 .%; () 4,5 .%; () 5 .%.

0-4 .%

5 .%, 4,5 .%.

3D- (4.2) (4.1):

$$t = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{|A_i - A|}{A} \right) \right] \times 100\%, \quad (4.1)$$

t — %, A_i — , A — , n — .

4.2 –

	, %
0	0
3	0
3,5	8,7
4	18,1
4,5	84,3
5	56,1

3D-

4,5 .%.

3D-

2 .%,

4,5

.%.

20° ,

11

4.2. Исследования процессов формирования токопроводящих изделий сложной геометрии в гетерофазной системе с использованием вязких «чернил» на основе альгината натрия с внедренными наноматериалами

(

0,8 ·)

« ».

« »

.

()

« »

.

4.2.1. Разработка методики получения вязких «чернил» с внедренными наноматериалами (графен, МУНТ)

Процесс получения вязких «чернил» на основе альгината натрия и МУНТ

« »

:

- ;
- ;
- .

- ()

.

Triton X-100,

.

20

40 .

-

10

12000 / .

« »

0,5 1,5 .% 0,5 .%.

Процесс получения вязких «чернил» на основе альгината натрия и графена

« »

:

- ;
- ;
- .

40

20

10

12000 / .

« »

0,5 1,5 .% 0,5 .%.

4.2.2. Реологические особенности вязких «чернил» с внедренными наноматериалами (графен, МУНТ)

3D-

« »

.

Anton Paar

SmartPave102e.

- 50 .

20 .

0,01⁻¹.

(4.3).

4.3 – « »

	, .%					
	0,5	1,0	1,5	0,5	1,0	1,5
, *	71,1	241,0	910,5	9,4	10,8	11,6

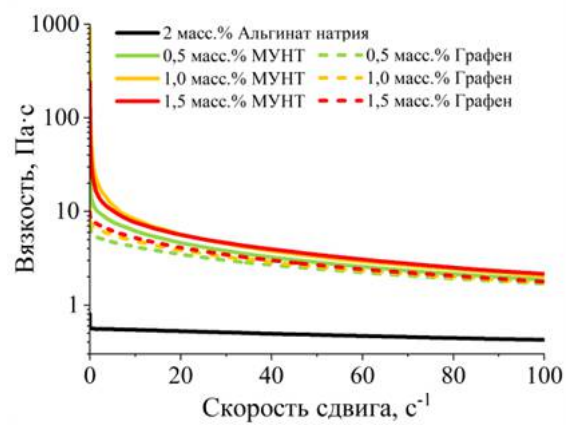
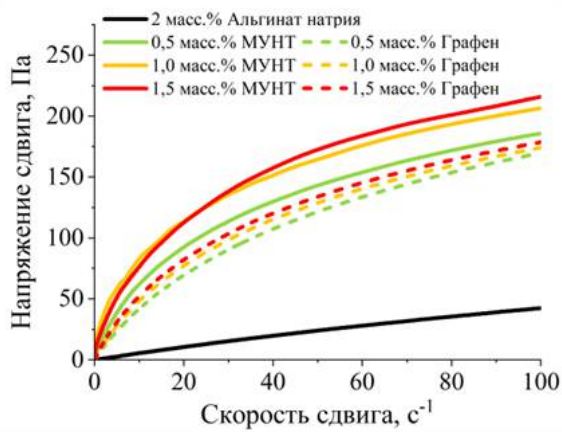
, .

, « »

100 ,

« »

(4.8).



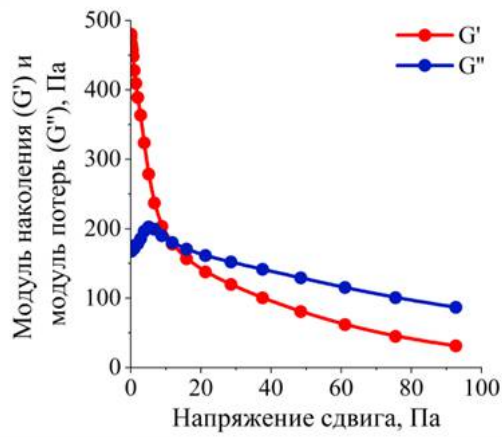
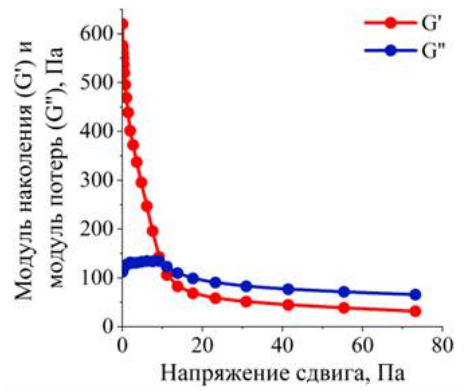
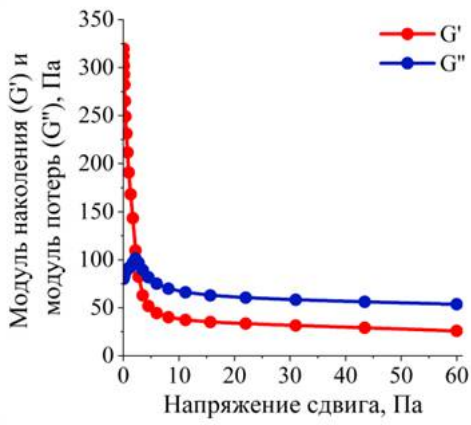
4.8 – ()

() « »

/ .

« »

(4.9).



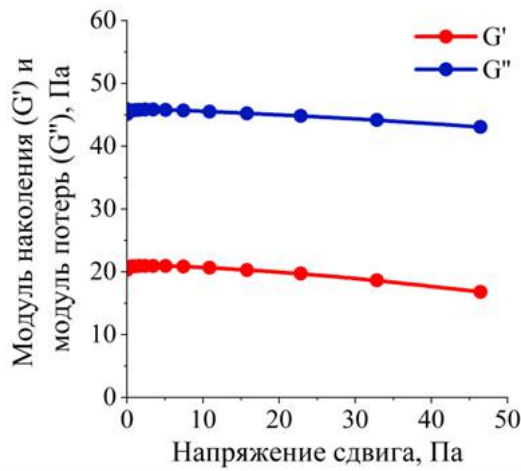
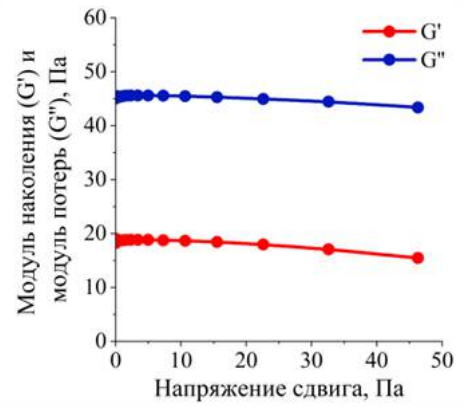
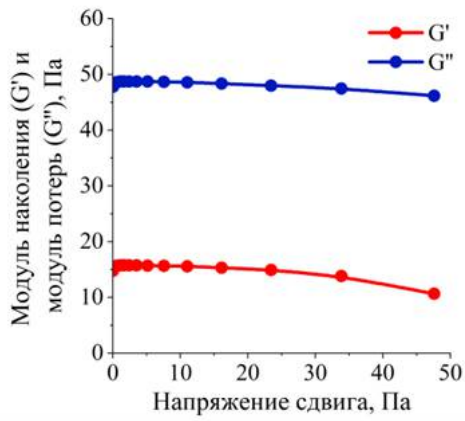
4.9 –

« »
 : () 0,5 .%; () 1,0 .%; () 1,5 .%

0,5 .% 2,8 , 1,0
 .% – 9,4 , 1,5 .% – 11,8 .

« »

(4.10).



4.10 –

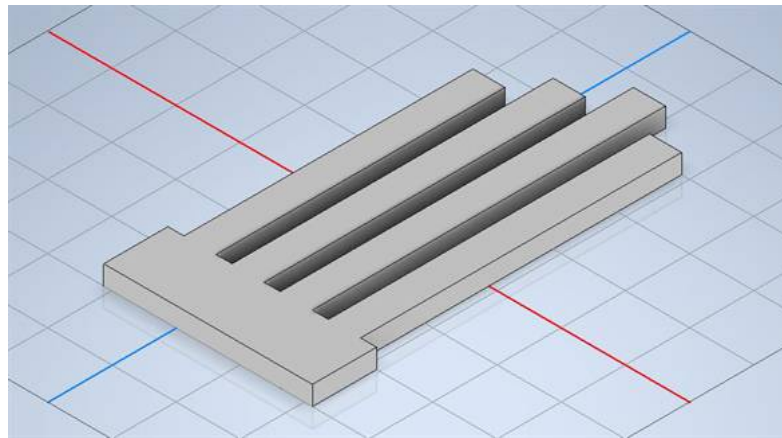
« »
 : () 0,5 .%; () 1,0 .%; () 1,5 .%

4.2.3. Процессы формирования токопроводящих изделий сложной геометрии в гетерофазной системе с использованием 3D-печати и вязких «чернил» на основе альгината натрия с внедренными наноматериалами (графен, МУНТ)

- ;
- ;
- ;
- ;
- ;

Autodesk Inventor

(4.11).



4.11 –

Autodesk Inventor

«

»

(1 .%)

(4.12).



4.12 –

, « »

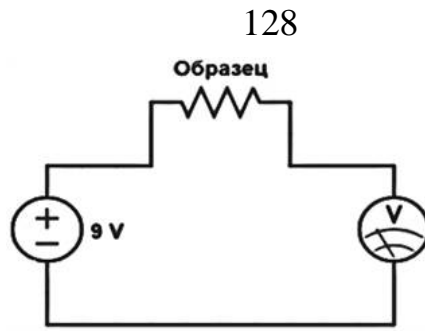
3D-

« »

4.3. Аналитические исследования изделий сложной геометрии с внедренными наноматериалами (МУНТ, графен)

2.

(4.13).



4.13 –

3D-

« »

9 ,

–

Proconnect

M830B.

11,7; 16,2 21,5

« »

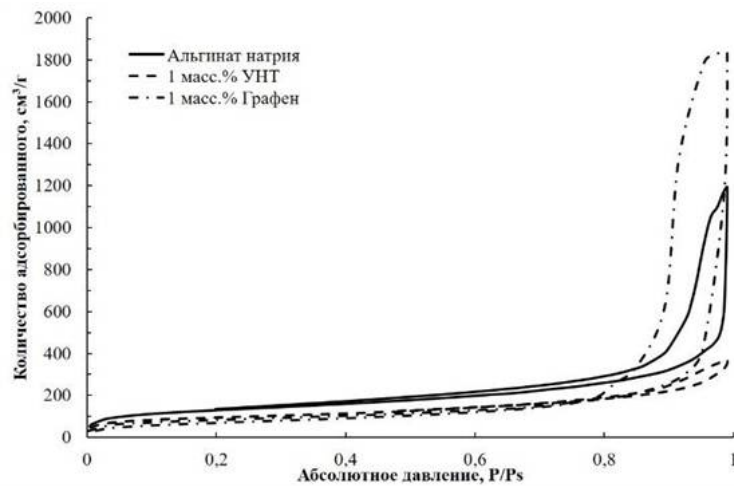
9

[150]

1 .%.

77

1 .% (4.14).



4.14 –

77

IV

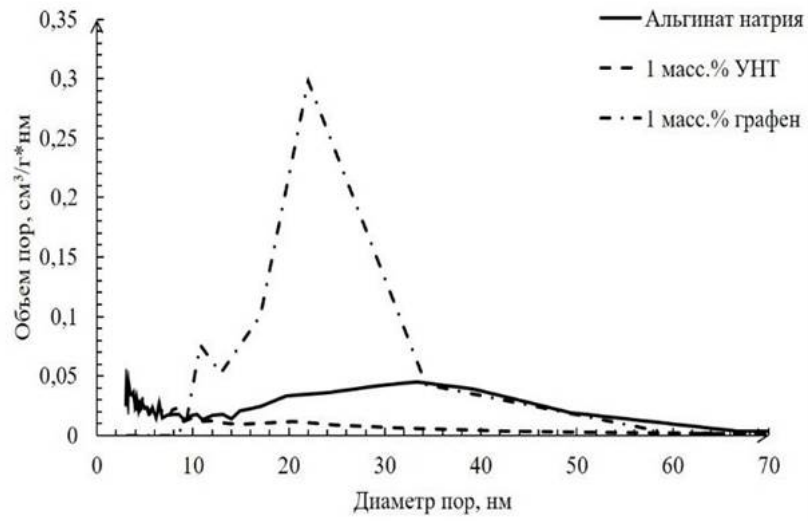
IUPAC [151].

« »

2 .%

0 1

%. .



4.15 –

21 .

35-40 .

4.1.

4.1 –

(,) 1 .%

.% ,	S , ² /	V , ³ /	, %
0	459	1,84	92
-1 .%	317	0,58	60
- 1 .%	570	3,10	96

,

,

.

.

.

,

.

,

3D-

« »

,

,

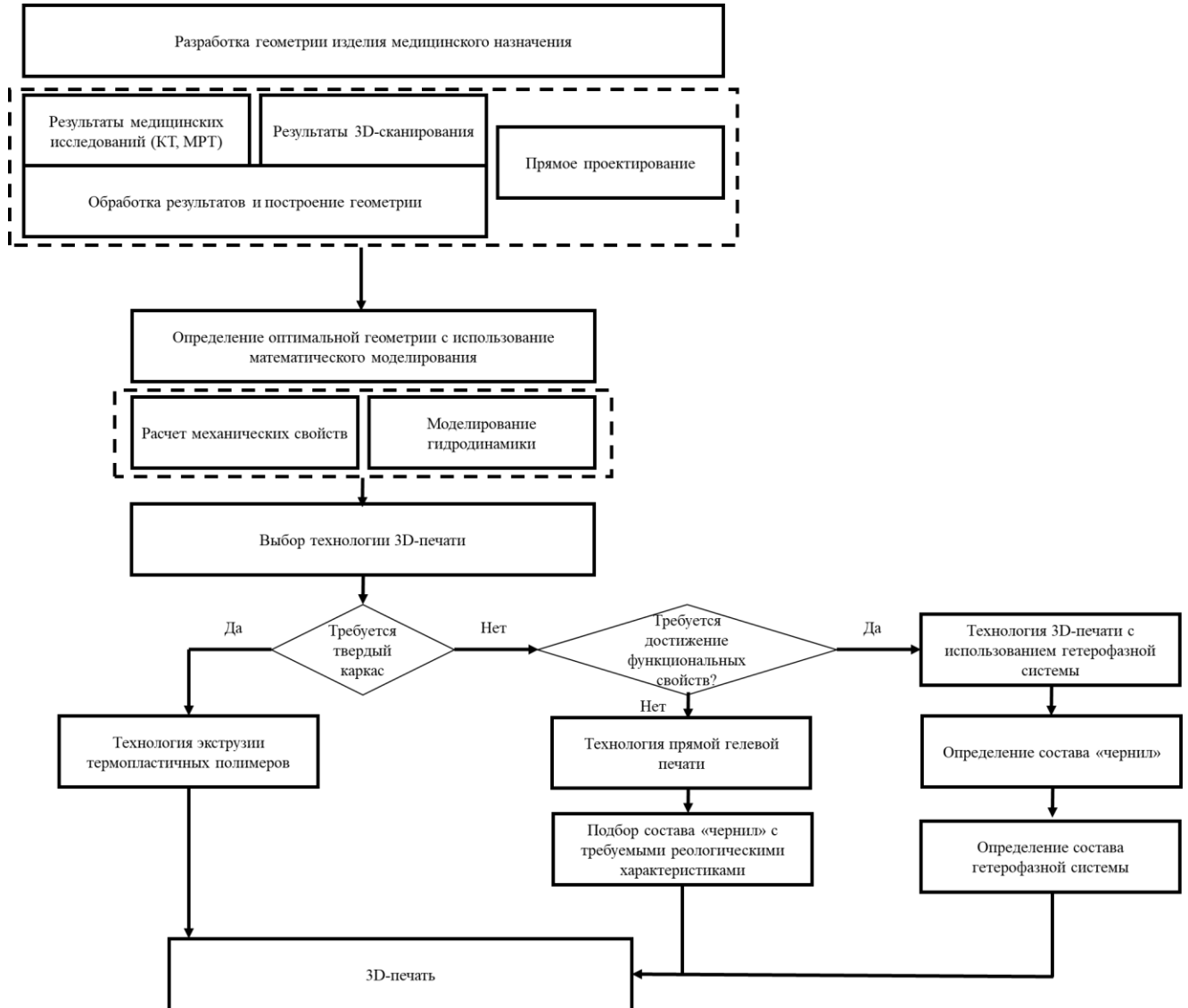
.

4.4. Алгоритм получения изделий медицинского назначения с использованием 3D-печати основанной на экструзии

,

:

(4.16).



4.16 –

Выводы по главе 4

1.

·
· ,
100 120 ,
·

2.

·
« »
· ,
4,5 .% 11 .
· ,
84,3%.

3.

« »
2 .%.
· ,
« » ,
· ,
· ,
· ,
« ».
· ,
« »

3D-

4.

, .

,

,

5. 3D-

,

0,8 . , « »

6. .

,

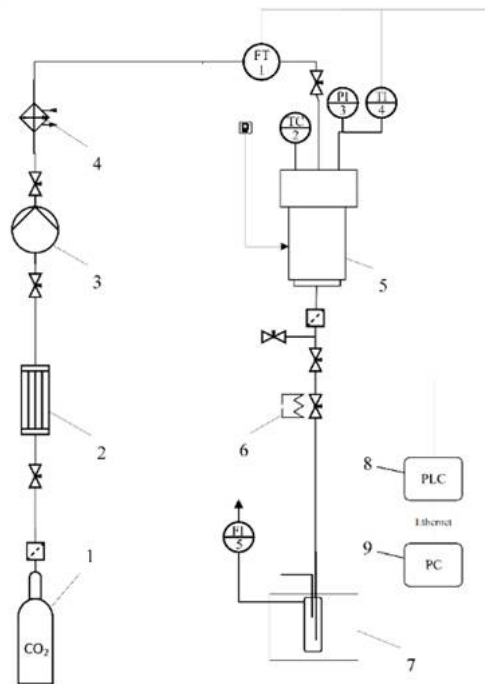
(,).

Глава 5. Процессы стерилизации высокопористых материалов полученных с использованием различных технологий 3D-печати

5.1. Исследование процесса сверхкритической стерилизации высокопористых материалов.

2

5.1.1. Схема и описание лабораторной установки для проведения процесса сверхкритической стерилизации



5.1 – : 1 – баллон диоксида углерода; 2 – конденсатор; 3 – насос; 4 – термостат; 5 – аппарат высокого давления 70 мл; 6 – нагревательный элемент; 7 – сепаратор; FT1 – ротаметр; TC2 – регулятор температуры; PI3 – манометр; TI4 – датчик температуры; FI5 – ротаметр

70

300

60

(1)

(2).

2

Maximator G35 (3)

(4),

(5).

(6).

5.1.2. Экспериментальное исследование процесса сверхкритической стерилизации и тестирование на стерильность

4.2.2316-08 «

» .1.2.4.0003.15 « ».

180 ,

40

180 .

.

:

.

50 ,

180

180 .

.

,

,

,

.

,

,

40 .

40 .

18 12

1 .

,

,

,

.

.

, 70 .%

37 .%

.

.

0,1%

.

40 ,

18

180 .

.

,

70 . %

0,002 / [152].

37 .%

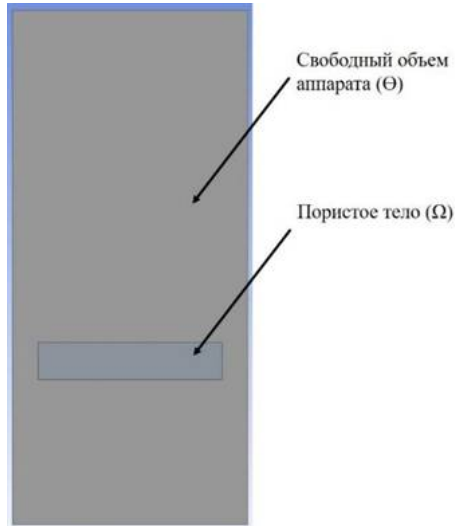
14

[118]

:

« — »;

(5.2);



5.2 –

, , ():

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial(\rho Y_1)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_1) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_1) \\ \frac{\partial(\rho Y_2)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_2) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_2) \\ \frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\tau') + \rho \vec{g} \\ \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + P)) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \end{array} \right. \quad (5.1)$$

, ():

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho Y_1)}{\partial t} = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_1) \\ \frac{\partial(\rho Y_2)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_2) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_2) \\ \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + P)) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \end{cases} \quad (5.2)$$

$$\tau' = \mu \left((\nabla \vec{v} - \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \vec{v} \cdot I \right) \quad (5.3)$$

$$P = \frac{RT}{V_M - b} - \frac{a}{V_M(V_M + b) + b(V_M - b)}$$

$$a = 0.4572 \frac{(RT_{\text{кр}1})^2}{P_{\text{кр}1}} \left[1 + 0.3746 + 1.5422\psi - 0.2699\psi^2 \left(1 - \sqrt{\frac{T}{T_{\text{кр}1}}} \right) \right]^2 \quad (5.4)$$

$$b = 0.0778 \frac{RT_{\text{кр}1}}{P_{\text{кр}1}}$$

a, b – ; V_M – , $^3/$;
R – , 8.314 / (*), P – , .

$$T(x, y, t)_{t=0} = T_{\text{нач}} \quad (5.5)$$

$$T(x_{\text{CT}}, y_{\text{CT}}, t) = T_{\text{CT}} \quad (5.6)$$

$$\forall x, y \in \Theta Y_2(x, y, t)_{t=0} = Y_{2_{\text{нач}\Theta}} \quad (5.7)$$

$$\forall x, y \in \Omega Y_2(x, y, t)_{t=0} = Y_{2_{\text{нач}\Omega}} \quad (5.8)$$

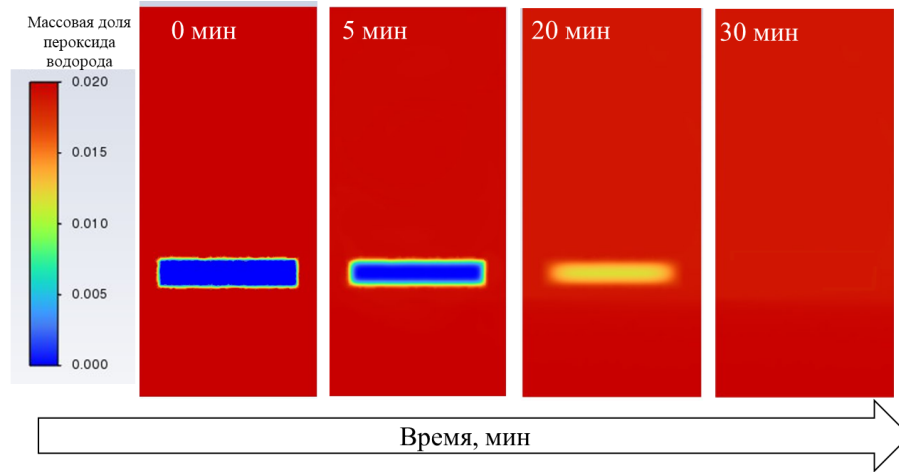
$$\vec{v}(x_{\text{CT}}, y_{\text{CT}}, t) = 0 \quad (5.9)$$

$$\vec{v}(x_{\Gamma}, y_{\Gamma}, t)_{\forall x_{\Gamma}, y_{\Gamma} \in \Theta} = 0 \quad (5.10)$$

$$\nabla T(x_{\Gamma}, y_{\Gamma}, t)_{\forall x_{\Gamma}, y_{\Gamma} \in \Theta} = \nabla T(x_{\Gamma}, y_{\Gamma}, t)_{\forall x_{\Gamma}, y_{\Gamma} \in \Omega} \quad (5.11)$$

$$\nabla Y_2(x_{\Gamma}, y_{\Gamma}, t)_{\forall x_{\Gamma}, y_{\Gamma} \in \Theta} = \nabla Y_2(x_{\Gamma}, y_{\Gamma}, t)_{\forall x_{\Gamma}, y_{\Gamma} \in \Omega} \quad (5.12)$$

– , / 3 ; \vec{v} – , / ; T –
, K; P – , ; Y_1 – , / ; Y_2



5.3 –

30 ,

Выводы по главе 5

1.

70

2.

(

).

,

,

40 ,

12

30 .

3.

,

.

,

.

Заключение

1.

(« »,)

3D- :

, , ,

(,);

.

, ,

.

3D- .

2.

3D-

« »,

« » 0,8 934,4 * .

3.

,

:

•

,

3D- ;

•

.

4.

,

(,).

5.

,

3D- .

,

,

.

6.

.

:

,

.

—

.

.

3D-

«

»

.

,

«

».

11. Wei C., Li L. Recent progress and scientific challenges in multi-material additive manufacturing via laser-based powder bed fusion // *Virtual and Physical Prototyping* – 2021 – V. 16 – . 3 – P. 347-371.
12. Charoo .A., Barakh Ali S.F., Mohamed E.M., Kuttolamadom M.A., Ozkan T., Khan M.A., Rahman Z. Selective laser sintering 3D printing – an overview of the technology and pharmaceutical applications // *Drug Development and Industrial Pharmacy* – 2020 – V. 46 – . 6 – P. 869-877.
13. Tikhomirov E., Åhlén M., Di Gallo ., Strømme M., Kipping T., Quodbach J., Lindh J. Selective laser sintering additive manufacturing of dosage forms: Effect of powder formulation and process parameters on the physical properties of printed tablets // *International Journal of Pharmaceutics* – 2023 – V. 635 – P. 1-12.
14. Jia H., Sun H., Wang H., Wu Y., Wang H. Scanning strategy in selective laser melting (SLM): a review // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* – 2021 – V. 113 – . 9 – P. 2413-2435.
15. Nandhakumar R., Venkatesan K. A process parameters review on selective laser melting-based additive manufacturing of single and multi-material: Microstructure, physical properties, tribological, and surface roughness // *Materials Today Communications* – 2023 – V. 35 – P. 1-10.
16. Xie F., He X., Cao S., Qu X. Structural and mechanical characteristics of porous 316L stainless steel fabricated by indirect selective laser sintering // *Journal of Materials Processing Technology* – 2013 – V. 213 – . 6 – P. 838-843.
17. Xie F., He X., Lv Y., Wu M., He X., Qu X. Selective laser sintered porous Ti-(4–10)Mo alloys for biomedical applications: Structural characteristics, mechanical properties and corrosion behaviour // *Corrosion Science* – 2015 – V. 95 – P. 117-124.
18. Stoia D.I., Linul E., Marsavina L. Influence of Manufacturing Parameters on Mechanical Properties of Porous Materials by Selective Laser Sintering // *Materials* – 2019 – V. 12 – . 6 – P. 1-8.
19. Senthilkumaran K., Pandey P.M., Rao P.V.M. Influence of building strategies on the accuracy of parts in selective laser sintering // *Materials & Design* – 2009 – V. 30 – . 8 – P. 2946-2954.

20. AlMangour B., Yang J.-M. Improving the surface quality and mechanical properties by shot-peening of 17-4 stainless steel fabricated by additive manufacturing // *Materials & Design* – 2016 – V. 110 – P. 914-924.
21. Schmidt M., Merklein M., Bourell D., Dimitrov D., Hausotte T., Wegener K., Overmeyer L., Vollertsen F., Levy G. . Laser based additive manufacturing in industry and academia // *CIRP Annals* – 2017 – . 66 – 2 – C. 561-583.
22. Van Bael S., Chai Y.C., Truscello S., Moesen M., Kerckhofs G., Van Oosterwyck H., Kruth J.-P., Schrooten J. The effect of pore geometry on the in vitro biological behavior of human periosteum-derived cells seeded on selective laser-melted Ti6Al4V bone scaffolds // *Acta Biomaterialia* – 2012 – V. 8 – . 7 – P. 2824-2834.
23. Fukuda A., Takemoto M., Saito T., Fujibayashi S., Neo M., Pattanayak D.K., Matsushita T., Sasaki K., Nishida ., Kokubo T., Nakamura T. Osteoinduction of porous Ti implants with a channel structure fabricated by selective laser melting // *Acta Biomaterialia* – 2011 – V. 7 – . 5 – P. 2327-2336.
24. . Method of and apparatus for production of three dimensional objects by stereolithography: . US5236637A US07840630; . 21.02.1992; . 17.08.1993, C.W. Hull.
25. Tetsuka H., Ryon Shin S. Materials and technical innovations in 3D printing in biomedical applications // *Journal of Materials Chemistry B* – 2020 – V. 8 – . 15 – P. 2930-2950.
26. Bártolo P.J. *Stereolithography: Materials, Processes and Applications*. Springer Science & Business Media, 2011. 345 p.
27. Kuang X., Wu J., Chen K., Zhao Z., Ding Z., Hu F., Fang D., Qi H.J. Grayscale digital light processing 3D printing for highly functionally graded materials // *Science Advances* – 2019 – V. 5 – . 5 – P. 1-12.
28. Katseli V., Economou A., Kokkinos C. Smartphone-Addressable 3D-Printed Electrochemical Ring for Nonenzymatic Self-Monitoring of Glucose in Human Sweat // *Analytical Chemistry* – 2021 – V. 93 – . 7 – P. 3331-3336.
29. Zuo Y., Su X., Li X., Yao Z., Yu T., Zhou J., Li J., Lu J., Ding J. Multimaterial 3D-printing of graphene/Li_{0.35}Zn_{0.3}Fe_{2.35}O₄ and graphene/carbonyl iron composites with

40. Zhang Z., Jin Y., Yin J., Xu C., Xiong R., Christensen K., Ringeisen B.R., Chrisey D.B., Huang Y. Evaluation of bioink printability for bioprinting applications // *Applied Physics Reviews* – 2018 – . 5 – . 4 – C. 041304.
41. Sarmah A., Desai S.K., Crowley A.G., Zolton G.C., Tezel G.B., Harkin E.M., Tran T.Q., Arole K., Green M.J. Additive manufacturing of nanotube-loaded thermosets via direct ink writing and radio-frequency heating and curing // *Carbon* – 2022 – V. 200 – P. 307-316.
42. Li Q., Dong Q., Wang J., Xue Z., Li J., Yu M., Zhang T., Wan Y., Sun H. Direct ink writing (DIW) of graphene aerogel composite electrode for vanadium redox flow battery // *Journal of Power Sources* – 2022 – V. 542 – P. 231-245.
43. Nayak V.V., Slavin B.V., Bergamo E.T.P., Torroni A., Runyan C.M., Flores R.L., Kasper F.K., Young S., Coelho P.G., Witek L. Three-Dimensional Printing Bioceramic Scaffolds Using Direct-Ink-Writing for Craniomaxillofacial Bone Regeneration // *Tissue Engineering Part C: Methods* – 2023 – V. 29 – . 7 – P. 332-345.
44. del-Mazo-Barbara L., Ginebra M.-P. Rheological characterisation of ceramic inks for 3D direct ink writing: A review // *Journal of the European Ceramic Society* – 2021 – V. 41 – . 16 – P. 18-33.
45. Friedrich L.M., Gunther R.T., Seppala J.E. Suppression of Filament Defects in Embedded 3D Printing // *ACS Applied Materials & Interfaces* – 2022 – V. 14 – . 28 – P. 32561-32578.
46. Shiwarski D.J., Hudson A.R., Tashman J.W., Feinberg A.W. Emergence of FRESH 3D printing as a platform for advanced tissue biofabrication // *APL Bioengineering* – 2021 – V. 5 – . 1 – P. 010904.
47. Melo P., Montalbano G., Fiorilli S., Vitale-Brovarone C. 3D Printing in alginate Bath of In-Situ crosslinked collagen composite scaffolds // *Materials* – 2021 – V. 14 – . 21 – P. 10-22.
48. Bessler ., Ogiermann D., Buchholz M.-B., Santel A., Heidenreich J., Ahmmed R., Zaehres H., Brand-Saberi B. Nydus One Syringe Extruder (NOSE): A Prusa i3 3D printer conversion for bioprinting applications utilizing the FRESH-method // *HardwareX* – 2019 – V. 6 – P. 1-7.

49. Bordoni M., Karabulut E., Kuzmenko V., Fantini V., Pansarasa O., Cereda C., Gatenholm P. 3D Printed Conductive Nanocellulose Scaffolds for the Differentiation of Human Neuroblastoma Cells // *Cells* – 2020 – V. 9 – . 3 – P. 1-15.
50. Xie Z.-T., Kang D.-H., Matsusaki M. Resolution of 3D bioprinting inside bulk gel and granular gel baths // *Soft Matter* – 2021 – V. 17 – . 39 – P. 8769-8785.
51. Zhou X., Liu C. Three-dimensional Printing for Catalytic Applications: Current Status and Perspectives // *Advanced Functional Materials* – 2017 – V. 27 – . 30 – P. 1701134.
52. Chen L., Zhou S., Li M., Mo F., Yu S., Wei J. Catalytic Materials by 3D Printing: A Mini Review // *Catalysts* – 2022 – V. 12 – . 10 – P. 1-9.
53. Zhu J., Wu P., Chao Y., Yu J., Zhu W., Liu Z., Xu C. Recent advances in 3D printing for catalytic applications // *Chemical Engineering Journal* – 2022 – V. 433 – P. 134341.
54. Hock S., Rein C., Rose M. 3D-Printed Acidic Monolithic Catalysts for Liquid-Phase Catalysis with Enhanced Mass Transfer Properties // *ChemCatChem* – 2022 – V. 14 – . 8 – P. 1-9.
55. Lee J.-H., Ko K.-H., Park B.-O. Electrical and optical properties of ZnO transparent conducting films by the sol-gel method // *Journal of Crystal Growth* – 2003 – V. 247 – . 1 – P. 119-125.
56. Miyauchi M., Li Y., Shimizu H. Enhanced Degradation in Nanocomposites of TiO₂ and Biodegradable Polymer // *Environmental Science & Technology* – 2008 – V. 42 – . 12 – P. 4551-4554.
57. Vunain E., Mishra A.K., Krause R.W. Fabrication, Characterization and Application of Polymer Nanocomposites for Arsenic(III) Removal from Water // *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials* – 2013 – V. 23 – . 2 – P. 293-305.
58. Castles F., Isakov D., Lui A., Lei Q., Dancer C.E.J., Wang Y., Janurudin J.M., Speller S.C., Grovenor C.R.M., Grant P.S. Microwave dielectric characterisation of 3D-printed BaTiO₃/ABS polymer composites // *Scientific Reports* – 2016 – V. 6 – . 1 – P. 1-13.
59. Parra-Cabrera C., Achille C., Kuhn S., Ameloot R. 3D printing in chemical engineering and catalytic technology: structured catalysts, mixers and reactors // *Chemical Society Reviews* – 2018 – V. 47 – . 1 – P. 209-230.

60. Vlachova J., Tmejova K., Kopel P., Korabik M., Zitka J., Hynek D., Kynicky J., Adam V., Kizek R. A 3D Microfluidic Chip for Electrochemical Detection of Hydrolysed Nucleic Bases by a Modified Glassy Carbon Electrode // *Sensors* – 2015 – V. 15 – . 2 – P. 2438-2452.
61. Chaloeipote G., Prathumwan R., Subannajui K., Wisitsoraat A., Wongchoosuk C. 3D printed CuO semiconducting gas sensor for ammonia detection at room temperature // *Materials Science in Semiconductor Processing* – 2021 – V. 123 – P. 1-10.
62. Feng Y., Chang J., Chen X., Zhang Q., Wang Z., Sun J., Zhang Z. Application of TDM and FDM methods in TDLAS based multi-gas detection // *Optical and Quantum Electronics* – 2021 – V. 53 – . 4 – P. 5-19.
63. Aghaei A., Firouzjaei M.D., Karami P., Aktij S.A., Elliott M., Mansourpanah Y., Rahimpour A., B. P. Soares J., Sadrzadeh M. The implications of 3D-printed membranes for water and wastewater treatment and resource recovery // *The Canadian Journal of Chemical Engineering* – 2022 – V. 100 – . 9 – P. 2309-2321.
64. Balogun H.A., Sulaiman R., Marzouk S.S., Giwa A., Hasan S.W. 3D printing and surface imprinting technologies for water treatment: A review // *Journal of Water Process Engineering* – 2019 – V. 31 – P. 1-15.
65. Wang Y., Liu H., Mei D., Yu S. Direct ink writing of 3D SiC scaffold as catalyst support for thermally autonomous methanol steam reforming microreactor // *Renewable Energy* – 2022 – V. 187 – P. 923-932.
66. Chu X., Tang X., Chen W., Yang Y., Zhou W., Huang J. Direct-ink-write printing performance of zeolite catalysts with porous structures // *Ceramics International* – 2023 – V. 49 – . 9, Part A – P. 13531-13541.
67. Ma Z., Xue T., Wali Q., Miao Y.-E., Fan W., Liu T. Direct ink writing of polyimide/bacterial cellulose composite aerogel for thermal insulation // *Composites Communications* – 2023 – V. 39 – P. 1-10.
68. Sadia M., Arafat B., Ahmed W., Forbes R.T., Alhnan M.A. Channelled tablets: An innovative approach to accelerating drug release from 3D printed tablets // *Journal of Controlled Release* – 2018 – V. 269 – P. 355-363.

69. Khaled S.A., Burley J.C., Alexander M.R., Roberts C.J. Desktop 3D printing of controlled release pharmaceutical bilayer tablets // *International Journal of Pharmaceutics* – 2014 – V. 461 – . 1 – P. 105-111.
70. Khaled S.A., Burley J.C., Alexander M.R., Yang J., Roberts C.J. 3D printing of five-in-one dose combination polypill with defined immediate and sustained release profiles // *Journal of Controlled Release* – 2015 – V. 217 – P. 308-314.
71. Markstedt K., Mantas A., Tournier I., Martínez Ávila H., Hägg D., Gatenholm P. 3D Bioprinting Human Chondrocytes with Nanocellulose–Alginate Bioink for Cartilage Tissue Engineering Applications // *Biomacromolecules* – 2015 – V. 16 – . 5 – P. 1489-1496.
72. Zhong C., Xie H.-Y., Zhou L., Xu X., Zheng S.-S. Human hepatocytes loaded in 3D bioprinting generate mini-liver // *Hepatobiliary & Pancreatic Diseases International* – 2016 – V. 15 – . 5 – P. 512-518.
73. Wu Y., Lin Z.Y. (William), Wenger A.C., Tam K.C., Tang X. (Shirley) 3D bioprinting of liver-mimetic construct with alginate/cellulose nanocrystal hybrid bioink // *Bioprinting* – 2018 – V. 9 – P. 1-6.
74. Kang H.-W., Lee S.J., Ko I.K., Kengla C., Yoo J.J., Atala A. A 3D bioprinting system to produce human-scale tissue constructs with structural integrity // *Nature Biotechnology* – 2016 – V. 34 – . 3 – P. 312-319.
75. Lawlor K.T., Vanslambrouck J.M., Higgins J.W., Chambon A., Bishard K., Arndt D., Er P.X., Wilson S.B., Howden S.E., Tan K.S., Li F., Hale L.J., Shepherd B., Pentoney S., Presnell S.C., Chen A.E., Little M.H. Cellular extrusion bioprinting improves kidney organoid reproducibility and conformation // *Nature Materials* – 2021 – V. 20 – . 2 – P. 260-271.
76. Ramesh S., Harrysson O.L.A., Rao P.K., Tamayol A., Cormier D.R., Zhang Y., Rivero I.V. Extrusion bioprinting: Recent progress, challenges, and future opportunities // *Bioprinting* – 2021 – V. 21 – P. 1-16.
77. Tellisi ., Ashammakhi .A., Billi F., Kaarela O. Three Dimensional Printed Bone Implants in the Clinic // *Journal of Craniofacial Surgery* – 2018 – V. 29 – . 8 – P. 2363.

78. Götze C., Steens W., Vieth V., Poremba C., Claes L., Steinbeck J. Primary stability in cementless femoral stems: custom-made versus conventional femoral prosthesis // *Clinical Biomechanics* – 2002 – V. 17 – . 4 – P. 267-273.
79. Mehboob H., Tarlochan F., Mehboob A., Chang S.-H., Ramesh S., Harun W.S.W., Kadirgama K. A novel design, analysis and 3D printing of Ti-6Al-4V alloy bio-inspired porous femoral stem // *Journal of Materials Science: Materials in Medicine* – 2020 – V. 31 – . 9 – P. 78.
80. Zhang G., Zhao P., Lin L., Qin L., Huan Z., Leeftang S., Zadpoor A.A., Zhou J., Wu L. Surface-treated 3D printed Ti-6Al-4V scaffolds with enhanced bone regeneration performance: an in vivo study // *Annals of Translational Medicine* – 2021 – V. 9 – . 1 – P. 39.
81. Jetté B., Brailovski V., Simoneau C., Dumas M., Terriault P. Development and in vitro validation of a simplified numerical model for the design of a biomimetic femoral stem // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* – 2018 – V. 77 – P. 539-550.
82. Jia D., Li F., Zhang C., Liu K., Zhang Y. Design and simulation analysis of Lattice bone plate based on finite element method // *Mechanics of Advanced Materials and Structures* – 2021 – V. 28 – . 13 – P. 1311-1321.
83. Iglesias-Mejuto A., García-González C.A. 3D-printed alginate-hydroxyapatite aerogel scaffolds for bone tissue engineering // *Materials Science and Engineering: C* – 2021 – V. 131 – P. 1-15.
84. Du X., Fu S., Zhu Y. 3D printing of ceramic-based scaffolds for bone tissue engineering: an overview // *Journal of Materials Chemistry B* – 2018 – V. 6 – . 27 – P. 4397-4412.
85. Ji S., Guvendiren M. Complex 3D bioprinting methods // *APL Bioengineering* – 2021 – V. 5 – . 1 – P. 1-11.
86. Grémare A., Guduric V., Bareille R., Heroguez V., Latour S., L'heureux , Fricain J.-C., Catros S., Le Nihouannen D. Characterization of printed PLA scaffolds for bone tissue engineering // *Journal of Biomedical Materials Research Part A* – 2018 – V. 106 – . 4 – P. 887-894.

87. Hernandez I., Kumar A., Joddar B. A Bioactive Hydrogel and 3D Printed Polycaprolactone System for Bone Tissue Engineering // *Gels* – 2017 – V. 3 – . 3 – P. 1-26.
88. Jang C.H., Ahn S.H., Yang G.-H., Kim G.H. A MSCs-laden polycaprolactone/collagen scaffold for bone tissue regeneration // *RSC Advances* – 2016 – V. 6 – . 8 – P. 6259-6265.
89. Kim Y., Kim G. Collagen/alginate scaffolds comprising core (PCL)–shell (collagen/alginate) struts for hard tissue regeneration: fabrication, characterisation, and cellular activities // *Journal of Materials Chemistry B* – 2013 – V. 1 – . 25 – P. 3185-3194.
90. Miralles G., Baudoin R., Dumas D., Baptiste D., Hubert P., Stoltz J.F., Dellacherie E., Mainard D., Netter P., Payan E. Sodium alginate sponges with or without sodium hyaluronate: In vitro engineering of cartilage // *Journal of Biomedical Materials Research* – 2001 – V. 57 – . 2 – P. 268-278.
91. Cabrera M.S., Sanders B., Goor O.J.G.M., Driessen-Mol A., Oomens C.W.J., Baaijens F.P.T. Computationally Designed 3D Printed Self-Expandable Polymer Stents with Biodegradation Capacity for Minimally Invasive Heart Valve Implantation: A Proof-of-Concept Study // *3D Printing and Additive Manufacturing* – 2017 – V. 4 – . 1 – P. 19-29.
92. Li L., Qin S., Peng J., Chen A., Nie Y., Liu T., Song K. Engineering gelatin-based alginate/carbon nanotubes blend bioink for direct 3D printing of vessel constructs // *International Journal of Biological Macromolecules* – 2020 – V. 145 – P. 262-271.
93. Gorain B., Choudhury H., Pandey M., Kesharwani P., Abeer M.M., Tekade R.K., Hussain Z. Carbon nanotube scaffolds as emerging nanoplatform for myocardial tissue regeneration: A review of recent developments and therapeutic implications // *Biomedicine & Pharmacotherapy* – 2018 – V. 104 – P. 496-508.
94. Zhao X., Guo B., Wu H., Liang Y., Ma P.X. Injectable antibacterial conductive nanocomposite cryogels with rapid shape recovery for noncompressible hemorrhage and wound healing // *Nature Communications* – 2018 – V. 9 – . 1 – P. 2784.

95. Koushik T.M., Miller C.M., Antunes E. Bone Tissue Engineering Scaffolds: Function of Multi-Material Hierarchically Structured Scaffolds // *Advanced Healthcare Materials* – 2023 – V. 12 – . 9 – P. 1-12.
96. Shao Y., Wang H., Zhu Y., Wang S., Jiang Y., Hu J., Wang J., Zhang K. Research progress on the construction of three-dimensional porous structure of bone tissue repair scaffolds based on silk fibroin materials // *Synthetic Biology Journal* – 2022 – V. 3 – . 4 – P. 795.
97. Kazimierczak P., Benko A., Palka K., Canal C., Kolodynska D., Przekora A. Novel synthesis method combining a foaming agent with freeze-drying to obtain hybrid highly macroporous bone scaffolds // *Journal of Materials Science & Technology* – 2020 – V. 43 – P. 52-63.
98. Meng Z.-Y., Wang L., Shen L.-Y., Li Z.-H., Zhao Z., Wang X.-Y. Supercritical carbon dioxide assisted fabrication of biomimetic sodium alginate/silk fibroin nanofibrous scaffolds // *Journal of Applied Polymer Science* – 2021 – V. 138 – . 44 – P. 51-70.
99. Abdelwahed W., Degobert G., Stainmesse S., Fessi H. Freeze-drying of nanoparticles: Formulation, process and storage considerations: 2006 Supplementary Non-Thematic Collection // *Advanced Drug Delivery Reviews* – 2006 – V. 58 – . 15 – P. 1688-1713.
100. Kumar P. Lyophilization: an important formulation technique // *International Journal of Research -GRANTHAALAYAH* – 2020 – V. 7 – . 9 – P. 11-15.
101.
// – 2021 – . 34 – 3 – C. 86-96.
102.
//
– 2021 – . 35 – 10 (245) – C. 95-97.
103. Wang Z., Florczyk S.J. Freeze-FRESH: A 3D Printing Technique to Produce Biomaterial Scaffolds with Hierarchical Porosity // *Materials* – 2020 – V. 13 – . 2 – P. 354.

113. () //
– 2017 – .23 – 3 – C. 134-147.
114.
// –
2014 – 382 – C. 230-233.
115. Dai Z., Ronholm J., Tian Y., Sethi B., Cao X. Sterilization techniques for biodegradable scaffolds in tissue engineering applications // Journal of Tissue Engineering – 2016 – V. 7 – P. 1-8.
116. Chansoria P., Narayanan L.K., Wood M., Alvarado C., Lin A., Shirwaiker R.A. Effects of Autoclaving, EtOH, and UV Sterilization on the Chemical, Mechanical, Printability, and Biocompatibility Characteristics of Alginate // ACS Biomaterials Science & Engineering – 2020 – V. 6 – . 9 – P. 5191-5201.
117. //
– 2022 – 1 (26) – C. 77-83.
118. Meyer M., Prade I., Leppchen-Fröhlich K., Felix A., Herdegen V., Haseneder R., Repke J.-U. Sterilisation of collagen materials using hydrogen peroxide doted supercritical carbon dioxide and its effects on the materials properties // The Journal of Supercritical Fluids – 2015 – V. 102 – P. 32-39.
119. Hara M. Effects of Ionizing Radiation on Biopolymers for Applications as Biomaterials // Biomedical Materials & Devices – 2023 – V. 1 – . 2 – P. 587-604.
120. França R., Mbeh D.A., Samani T.D., Le Tien C., Mateescu M.A., Yahia L., Sacher E. The effect of ethylene oxide sterilization on the surface chemistry and in vitro cytotoxicity of several kinds of chitosan // Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials – 2013 – V. 101 – . 8 – P. 1444-1455.
121. A. Garcia-Gonzalez C., Diaz-Gomez L.A., Concheiro A., Alvarez-Lorenzo C. Patent Survey on Current Applications of Supercritical Fluid Technology in Regenerative Medicine // Recent Patents on Nanomedicine – 2015 – V. 5 – . 1 – P. 48-58.

122. Perrut M. Sterilization and virus inactivation by supercritical fluids (a review): Special Edition on the Occasion of Gerd Brunner's 70th Birthday // *The Journal of Supercritical Fluids* – 2012 – V. 66 – P. 359-371.
123. Champeau M., Thomassin J.-M., Tassaing T., Jérôme C. Drug loading of polymer implants by supercritical CO₂ assisted impregnation: A review // *Journal of Controlled Release* – 2015 – V. 209 – P. 248-259.
124.
– 2018 – . 43 – 7 – C. 5-9.
125. Fraser D. Bursting Bacteria by Release of Gas Pressure // *Nature* – 1951 – V. 167 – . 4236 – P. 33-34.
126. Enomoto A., Nakamura K., Nagai K., Hashimoto T., Hakoda M. Inactivation of food microorganisms by high-pressure carbon dioxide treatment with or without explosive decompression // *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry* – 1997 – V. 61 – . 7 – P. 1133-1137.
127. Soares G.C., Learmonth D.A., Vallejo M.C., Davila S.P., González P., Sousa R.A., Oliveira A.L. Supercritical CO₂ technology: The next standard sterilization technique? // *Materials Science and Engineering: C* – 2019 – V. 99 – P. 520-540.
128. Santos-Rosales V., Ardao I., Alvarez-Lorenzo C., Ribeiro ., Oliveira A.L., García-González C.A. Sterile and Dual-Porous Aerogels Scaffolds Obtained through a Multistep Supercritical CO₂-Based Approach // *Molecules* – 2019 – V. 24 – . 5 – P. 871.
129. Bernhardt A., Wehrl M., Paul B., Hochmuth T., Schumacher M., Schütz K., Gelinsky M. Improved Sterilization of Sensitive Biomaterials with Supercritical Carbon Dioxide at Low Temperature // *PLOS ONE* – 2015 – V. 10 – . 6 – P. 1-13.
130. Zhang J., Dalal ., Matthews M.A., Waller L. ., Saunders C., Fox K.F., Fox A. Supercritical carbon dioxide and hydrogen peroxide cause mild changes in spore structures associated with high killing rate of *Bacillus anthracis* // *Journal of Microbiological Methods* – 2007 – V. 70 – . 3 – P. 442-451.
131. Soares G.C., Learmonth D.A., Vallejo M.C., Davila S.P., González P., Sousa R.A., Oliveira A.L. Supercritical CO₂ technology: The next standard sterilization technique? // *Materials Science and Engineering: C* – 2019 – . 99 – C. 520-540.

140. 11262-2017 (ISO 527-2:2012) .
 . -
 , 2017.
141. 4651-2014 (ISO 604:2002) . . -
 , 2014.
142. . . , . .
 - //
 - 2018 - . 22 - 2 - C. 178-195.
143. . . , . . , . .
 //
 . - 2023. - . 37. - C. 95-98.
144. Casali D.M., Yost M.J., Matthews M.A. Eliminating glutaraldehyde from crosslinked collagen films using supercritical CO2 // Journal of Biomedical Materials Research Part A – 2018 – V. 106 – . 1 – P. 86-94.
145. Mokhova E., Gordienko M., Menshutina . Mathematical model of freeze drying taking into account uneven heat and mass transfer over the volume of the working chamber // Drying Technology – 2022 – . 40 – 12 – C. 2470-2493.
146. Menshutina N., Tsygankov P., Khudeev I., Lebedev A. Intensification methods of supercritical drying for aerogels production // Drying Technology – 2022 – . 40 – 7 – C. 1278-1291.
147. . . : , 2003.
 311 .
148. Formaggia L., Quarteroni A., Veneziani A. Cardiovascular Mathematics: Modeling and simulation of the circulatory system. Cardiovascular Mathematics. Springer Science & Business Media, 2010. 528 p.
149. . . , . . , . . 3D-
 //
 - 2020 - 6.
150. . .
 :

2018. – 191 .
151. Thommes M., Kaneko K., Neimark A.V., Olivier J.P., Rodriguez-Reinoso F., Rouquerol J., Sing K.S.W. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report) // Pure and Applied Chemistry – 2015 – V. 87 – . 9-10 – P. 1051-1069.
152.
// – 2002
– . 40 – 2 – C. 231-234.

Приложение 1. Методика получения вязких «чернил» на основе альгината натрия

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования Российский химико-технологический университет
имени Д.И. Менделеева
(РХТУ имени Д.И. Менделеева)



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке

А.А. Щербина

» _____ 2023 г.

ЛАБОРАТОРНАЯ МЕТОДИКА АК-1

Получение «чернил» на основе альгината натрия и комбинации альгинат натрия-коллаген
для реализации процесса 3D-печати с использованием гетерофазной системы

Технологический отдел ДНТП
к.т.н., старший научный сотрудник

П.Ю. Цыганков

Москва, 2023

Содержание

1.	Введение.....	3
2.	Продукты получения.....	3
3.	Область применения.....	3
5.	Требования к наработке образцов.....	3
6.	Приборы и оборудование.....	4
7.	Материалы и реактивы.....	4
8.	Изложение последовательности операций.....	6
8.1	Получение азидов «чернил» на основе альгината натрия и композиции альгината натрия-коллаген.....	6
9.	Требования к безопасной эксплуатации.....	7
10.	Заключение.....	8

1. Введение

Данная методика описывает процесс получения вязких «чернил» на основе альгината натрия и композиции альгинат натрия-коллаген для реализации процесса 3D-печати с использованием гетерофазной системы.

В методике описаны стадии получения вязких «чернил» на основе альгината натрия и композиции альгинат натрия-коллаген для реализации процесса 3D-печати с использованием гетерофазной системы на стадии приготовления раствора, приведен список необходимых материалов и реактивов, представлено описание необходимого оборудования.

2. Продукты получения

Продуктом получения являются вязкие «чернила» на основе альгината натрия и композиции альгинат натрия-коллаген для реализации процесса трехмерной печати с использованием гетерофазной системы.

3. Область применения

Полученные по данной методике вязкие «чернила» на основе альгината натрия и композиции альгинат натрия-коллаген могут быть применены для реализации 3D-печати с использованием гетерофазной системы.

4. Цель и назначение методики

Целью настоящей методики является пошаговое описание процесса получения вязких «чернил» на основе альгината натрия и композиции альгинат натрия-коллаген.

5. Требования к наработке образцов

Необходимо обеспечить периодическое техническое обслуживание оборудования, используемого в процессе приготовления вязких «чернил» на основе альгината натрия. Последовательность выполняемых операций должна в полной мере соответствовать данной методике. Допускается использование только тех реактивов, которые перечислены в пункте «материалы и реактивы» (п. 7 методики). Используемые материалы должны соответствовать классу ХЧ (химический чистый), если иное не указано в п. 7 данной методики. Используемые реактивы должны иметь этикетки с указанием сведений о наименовании вещества, его концентрации, даты производства и сроков хранения. Должны быть соблюдены основные требования безопасности: во время работы, необходимо надевать лабораторный халат, при работе с реактивами необходимо использовать защитные перчатки и лабораторные очки. К работе допускается персонал, не имеющий противопоказаний по состоянию здоровья и прошедший инструктаж по технике безопасности работы в химической лаборатории, о чем должна иметься запись в соответствующем журнале.

6. Приборы и оборудование

Емкости, весы, ротор-статорный гомогенизатор.

7. Материалы и реактивы

Краткая характеристика сырья, полупродуктов, готового продукта приведена в таблице В.1. Токсичность, пожаро- и взрывоопасные свойства сырья, полупродуктов, готового продукта приведены в таблице В.2.

Таблица В.1 – Характеристика сырья, вспомогательных материалов и полупродуктов

Назначение сырья, полупродуктов, готового продукта	Обозначения ИД	Сорт или артикул	Показатели, обязательные для проверки	Примечания
1	2	3	4	5
альгинат натрия	ГОСТ Р 928422	ХЧ	внешний вид и консистенция: мелкий порошок или порошок, состоящий из единичных и агломерированных частиц; допускается незначительное количество комочков, рассыпающихся при легком механическом воздействии	
			цвет от белого до желтоватого	
			без запаха и вкуса	
			растворимость не менее 10 % посторонние примеси не допускаются	
коллаген	ГОСТ 33692-2015		внешний вид и консистенция: сухой продукт однородной консистенции в виде волокнистой массы или сыпучего мелкого порошка, или сыпучего порошка, содержащего единичные или агломерированные частицы. Для порошков допускается наличие комочков более крупного размера, рассыпающихся при легком механическом надавливании	
			цвет от белого до желтоватого	
			без запаха и вкуса	
			растворимость не менее 10 % посторонние примеси не допускаются	

вода дистиллированная	ГОСТ 6709-72	ХЧ	электрическая проводимость при 20 °С, См/м, не более $5 \cdot 10^{-4}$
			массовая концентрация остатка после выпаривания, мг/дм ³ , не более 5
			массовая концентрация аммиака и аммонийных солей (NH ₃), мг/дм ³ , не более 0,2
			массовая концентрация нитратов (NO ₃), мг/дм ³ , не более 0,02
			массовая концентрация сульфатов (SO ₄), мг/дм ³ , не более 0,5
			массовая концентрация хлоридов (Cl), мг/дм ³ , не более 0,02
			массовая концентрация алюминия (Al), мг/дм ³ , не более 0,05
			массовая концентрация железа (Fe), мг/дм ³ , не более 0,05
			массовая концентрация кальция (Ca), мг/дм ³ , не более 0,8
			массовая концентрация меди (Cu), мг/дм ³ , не более 0,02
			массовая концентрация свинца (Pb), %, не более 0,05
			массовая концентрация цинка (Zn), мг/дм ³ , не более 0,2
			массовая концентрация веществ, восстанавливающих KMnO ₄ (O), мг/дм ³ , не более 0,08
			pH воды 5,4-6,6

Таблица В.2 – Токсичность, пожаро- и взрывоопасные свойства сырья, полупродуктов, готового продукта

Наименование сырья, полупродуктов, готового продукта	Характеристика токсичности (воздействие на организм человека)	Класс взрывоопасности	Характеристика пожароопасных свойств
Альгинат натрия	индивидуальная непереносимость, аллергические реакции	-	пожаробезопасен
Коллаген	индивидуальная непереносимость, аллергические реакции	-	пожаробезопасен

Вода дистиллированная	безопасна	-	пожаробезопасен
-----------------------	-----------	---	-----------------

8. Изложение последовательности операций

8.1 Получение вязких «чернил» на основе альгината натрия и композиции альгината натрия-коллаген

Соотношения и концентрации всех реагентов при получении вязких «чернил» на основе альгината натрия в таблице В.3.

Таблица В.3 – Соотношения и концентрация всех реагентов при получении вязких «чернил» на основе альгината натрия путем гомогенизации и центрифугирования

Тип альгината натрия	№ образца	Концентрация исходного раствора альгината натрия, масс.%	Концентрация коллагена в исходном растворе, масс.%	pH реакционной среды
Альгинат натрия «РусХим»	АН1	2	0	7
			1	
			2	
			3	
Альгинат натрия «Sigma»	АН2	2	0	7
			1	
			2	
			3	

- В пластиковую емкость растворяют порошок коллагена до достижения требуемой концентрации (0-3 масс.%).
- В полученный раствор добавляют порошок сухого альгината натрия для получения раствора с концентрацией 2 масс.%.
- Раствор диспергируется на ротор-статорном гомогенизаторе в течение 5 минут со скоростью 13000 об/мин для достижения однородности «чернил».
- Раствор подвергается центрифугированию в течение 2 минут со скоростью 4200 об/мин для удаления пузырьков воздуха из объема вязких «чернил».
- В результате получают композиционный состав «чернил» на основе альгината натрия и коллагена при концентрации альгината натрия 2 масс.% и различной концентрации коллагена.

9. Требования к безопасной эксплуатации

Основные свойства реактивов, характеризующие их токсичность и опасность, приведены в таблице В.5. При работе необходимо соблюдать технику охраны труда, работать в лабораторном халате, защитных химических стойких силиконовых перчатках и защитных очках. При работе с легколетучими веществами требуется проведение работ под вытяжкой и обеспечение регулярного проветривания помещения. Отходы химических веществ собираются в специальные емкости, после чего утилизируются в соответствии с установленным порядком.

Таблица В.5 – Требования к безопасной эксплуатации

Наименование сырья, полупродуктов, готовой продукции (вещества -%масс.), отходов производств		Класс опасности (ГОСТ 12.1.007-76)	Агрегатное состояние при нормальных условиях		Плотность паров газа по воздуху	Удельный вес для твердых и жидких веществ в г/см ³	Растворимость в воде, % масс
1		2	3		4	5	6
1. Альгинат натрия		4	твердое вещество		-	не определен	Растворимость 10 масс.%
2. Коллаген		-	-		-	не определен	Растворимость 10 масс.%
Возможно ли воспламенение или взрыв при взаимодействии		Температура, °С					
Воды (да, нет)	Кислой среды	Кипения	Плавления	Самовоспламенения	Воспламенения	Вспышки	Начала экзотермического разложения
1, нет	нет	не определена	-	не определена	не определена	не определена	не определена
2, нет	нет	не определена	-	не определена	не определена	не определена	не определена
ПДК или ОБУВ в воздухе рабочей зоны производственных помещений		характеристика токсичности (взаимодействие на организм человека)			Литература		

10. Заключение

Проект лабораторной методики разработан в рамках выполнения работ по прикладному научно-исследовательскому проекту молодых штатных работников РХТУ им. Д.И. Менделеева в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» №ВИГ_2022_006 и предназначен для внутреннего пользования для наработки объектов испытаний. Для увеличения производительности допускается пропорциональное увеличение количества реагентов. Возможна корректировка методики в случае не достижения требуемых показателей получаемых материалов.

Инженер-исследователь
Технологический отдел ДНТП



А.А. Абрамов

Приложение 2. Методика получения гетерофазной системы на основе желатина

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования Российский химико-технологический университет
имени Д.И. Менделеева
(РХТУ имени Д.И. Менделеева)



УТВЕРЖДАЮ
Проректор по науке

А.А. Щербина

2023 г.

ЛАБОРАТОРНАЯ МЕТОДИКА ГЖХ-1
Получение гетерофазной системы «желатин-хлорид кальция-вода»

Технологический отдел ДНТП
к.т.н., старший научный сотрудник

П.Ю. Цыганков

Москва, 2023

1. Введение

Данная методика описывает процесс получения гетерофазной системы «желатин-хлорид кальция-вода».

В методике описаны стадии получения гетерофазной системы «желатин-хлорид кальция-вода», приведен список необходимых материалов и реактивов, представлено описание необходимого оборудования.

2. Продукты получения

Продуктом получения является гетерофазная система «желатин-хлорид кальция-вода»

3. Область применения

Полученная по данной методике гетерофазная система «желатин-хлорид кальция-вода» может быть использована в качестве поддерживающей матрицы для реализации 3D-печати вязкими материалами.

4. Цель и назначение методики

Целью настоящей методики является пошаговое описание процесса получения гетерофазной системы «желатин-хлорид кальция-вода».

5. Требования к наработке образцов

Необходимо обеспечить периодическое техническое обслуживание оборудования, используемого в процессе приготовления композиции «аэрогель на основе белка – лекарственное средство». Последовательность выполняемых операций должна в полной мере соответствовать данной методике. Допускается использование только тех реактивов, которые перечислены в пункте «материалы и реактивы» (п. 7 методики). Используемые материалы должны соответствовать классу ХЧ (химический чистый), если иное не указано в п. 7 данной методики. Используемые реактивы должны иметь этикетки с указанием сведений о наименовании вещества, его концентрации, даты производства и сроков хранения. Должны быть соблюдены основные требования безопасности: во время работы, необходимо надевать лабораторный халат, при работе с реактивами необходимо использовать защитные перчатки и лабораторные очки. К работе допускается персонал, не имеющий противопоказаний по состоянию здоровья и прошедший инструктаж по технике безопасности работы в химической лаборатории, о чем должна иметься запись в соответствующем журнале.

6. Приборы и оборудование

Емкости, весы, магнитная мешалка, нагревательная плита, морозильная камера, холодильная камера, ротор-статорный гомогенизатор, центрифуга.

1. Введение

Данная методика описывает процесс получения гетерофазной системы «желатин-хлорид кальция-вода».

В методике описаны стадии получения гетерофазной системы «желатин-хлорид кальция-вода», приведен список необходимых материалов и реактивов, представлено описание необходимого оборудования.

2. Продукты получения

Продуктом получения является гетерофазная система «желатин-хлорид кальция-вода»

3. Область применения

Полученная по данной методике гетерофазная система «желатин-хлорид кальция-вода» может быть использована в качестве поддерживающей матрицы для реализации 3D-печати вязкими материалами.

4. Цель и назначение методики

Целью настоящей методики является пошаговое описание процесса получения гетерофазной системы «желатин-хлорид кальция-вода».

5. Требования к наработке образцов

Необходимо обеспечить периодическое техническое обслуживание оборудования, используемого в процессе приготовления композиции «аэрогель на основе белка – лекарственное средство». Последовательность выполняемых операций должна в полной мере соответствовать данной методике. Допускается использование только тех реактивов, которые перечислены в пункте «материалы и реактивы» (п. 7 методики). Используемые материалы должны соответствовать классу ХЧ (химический чистый), если иное не указано в п. 7 данной методики. Используемые реактивы должны иметь этикетки с указанием сведений о наименовании вещества, его концентрации, даты производства и сроков хранения. Должны быть соблюдены основные требования безопасности: во время работы, необходимо надевать лабораторный халат, при работе с реактивами необходимо использовать защитные перчатки и лабораторные очки. К работе допускается персонал, не имеющий противопоказаний по состоянию здоровья и прошедший инструктаж по технике безопасности работы в химической лаборатории, о чем должна иметься запись в соответствующем журнале.

6. Приборы и оборудование

Емкости, весы, магнитная мешалка, нагревательная плита, морозильная камера, холодильная камера, ротор-статорный гомогенизатор, центрифуга.

			массовая концентрация свинца (Pb), %, не более 0,05	
			массовая концентрация цинка (Zn), мг/дм ³ , не более 0,2	
			массовая концентрация веществ, восстанавливающих KMnO ₄ (O), мг/дм ³ , не более 0,08	
			pH воды 5,4-6,6	
хлорид кальция	ГОСТ 450-77	ХЧ	порошок или гранулы белого цвета	
			массовая доля хлористого кальция, %, не менее 90%	

Таблица В.2 – Токсичность, пожаро- и взрывоопасные свойства сырья, полупродуктов, готового продукта

Наименование сырья, полупродуктов, готового продукта	Характеристика токсичности (воздействие на организм человека)	Класс взрывоопасности	Характеристика пожароопасных свойств
желатин технический	индивидуальная непереносимость, аллергические реакции	-	пожаробезопасен
вода дистиллированная	безопасна	-	пожаробезопасен
хлорид кальция	безопасен	-	пожаробезопасен

8. Изложение последовательности операций

8.1 Получение микрочастиц на основе желатина

Соотношения и концентрации всех реагентов при получении микрочастиц на основе желатина приведены в таблице В.3.

Таблица В.3 – Соотношения и концентрация всех реагентов при получении микрочастиц на основе желатина.

Тип желатина	№ образца	Концентрация исходного раствора желатина, масс%	pH реакционной среды
Технический	Ж1	4,0	7
Технический	Ж2	4,5	7
Технический	Ж3	5,0	7

а) В стеклянную емкость с дистиллированной водой добавляют хлорид кальция для достижения концентрации 11мМ. Раствор подвергают перемешиванию на магнитной мешалке в течение 5 минут.

- б) К раствору хлорида кальция добавляют порошок желатина для достижения раствора с концентрацией 4,0; 4,5 или 5,0 масс.%. Раствор нагревают до 60°C и одновременно перемешивают на мешалке с подогревом до полного растворения желатина.
- в) Раствор желатина замораживают на 10-15 минут до полного застывания.
- г) В пластмассовую емкость с дистиллированной водой добавляют хлорид кальция для достижения концентрации 11мМ. Раствор подвергают перемешиванию на магнитной мешалке в течение 5 минут и охлаждают.
- д) Полученные растворы желатина и хлорида кальция диспергируют на ротор-статорном гомогенизаторе в течение 90 секунд со скоростью 9000 об/мин.
- е) Полученный раствор подвергают центрифугированию в течение 2 минут при скорости 4300 об/мин в заранее охлажденной камере центрифуги.
- ж) После осаждения желатина излишек воды сливают, а гетерофазную систему на основе желатина помещают в холодильную камеру.
- з) Полученная гетерофазная система может быть использована для проведения процесса 3D-печати с использованием вязких «чернил».

9. Требования к безопасной эксплуатации

Основные свойства реактивов, характеризующие их токсичность и опасность, приведены в таблице В.5. При работе необходимо соблюдать технику охраны труда, работать в лабораторном халате, защитных химических стойких силиконовых перчатках и защитных очках. При работе с легколетучими веществами требуется проведение работ под вытяжкой и обеспечение регулярного проветривания помещения. Отходы химических веществ собираются в специальные емкости, после чего утилизируются в соответствии с установленным порядком.

Таблица В.5 – Требования к безопасной эксплуатации

Наименование сырья, полупродуктов, готовой продукции (вещества -%масс.), отходов производств	Класс опасности (ГОСТ 12.1.007-76)	Агрегатное состояние при нормальных условиях	Плотность паров газа по воздуху	Удельный вес для твердых и жидких веществ в г/см ³	Растворимость в воде, % масс
1	2	3	4	5	6
1. желатин	4	твердое вещество	-	1,03	смешивается
2.хлорид кальция	3	твердое вещество	-	2,15	74,5 г на 100 г H ₂ O
Возможно ли возпламенение или	Температура, °С				

взрыв при воздействии							
Воды (да, нет)	Кислой среды	Кипения	Плавления	Самовоспламенения	Воспламенения	Вспышки	Начала экзотермического разложения
1. нет	нет	60	20-31	не определена	не определена	не определена	не определена
2. нет	нет	1 935	772	не определена	не определена	не определена	не определена

10. Заключение

Проект лабораторной методики разработан в рамках выполнения работ по прикладному научно-исследовательскому проекту молодых штатных работников РХТУ им. Д.И. Менделеева в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» №ВИГ_2022_006 и предназначен для внутреннего пользования для наработки объектов испытаний. Для увеличения производительности допускается пропорциональное увеличение количества реагентов. Возможна корректировка методики в случае не достижения требуемых показателей получаемых материалов.

Инженер-исследователь
Технологический отдел ДНТП



А.А. Абрамов

Приложение 3. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023662238

**Программный модуль для описания результатов
реологических исследований**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева" (РХТУ им. Д. И. Менделеева) (RU)*

Авторы: *Абрамов Андрей Александрович (RU), Меньшутина Наталья Васильевна (RU), Окишева Мария Константиновна (RU), Цыганков Павел Юрьевич (RU)*

Заявка № **2023661200**
Дата поступления **31 мая 2023 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программы для ЭВМ **07 июня 2023 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Ю.С. Зубов


ДОКУМЕНТ ПОДЛЕЖИТ ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСИ
Сертификат: 42956429.2023.040470123.04047
Идентификатор: Зубов Ю.С. Сергеевич
Действителен с 2023.06.07 по 02.08.2034