



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

БНЦ

Кафедра «Общая и неорганическая химия»

И.К. ГАРКУШИН, М.С. КОЗЫРЕВА, М.А. СУХАРЕНКО

ФАЗОВЫЕ РАВНОВЕСИЯ  
И ХИМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ  
В ПЯТИКОМПОНЕНТНОЙ ВЗАИМНОЙ СИСТЕМЕ  
ИЗ ФТОРИДОВ И ХЛОРИДОВ ЛИТИЯ, НАТРИЯ,  
КАЛИЯ И ЦЕЗИЯ

Самара  
Самарский государственный технический университет  
2019

Печатается по решению ученого совета СамГТУ (протокол № 9 от 27.04.2018)

УДК 543.572.3: 541.123.7 + 549.451

ББК 24.5

Г 204

**Гаркушин И.К.**

Г 204 Фазовые равновесия и химическое взаимодействие в пятикомпонентной взаимной системе из фторидов и хлоридов лития, натрия, калия и цезия / *И.К. Гаркушин, М.С. Козырева, М.А. Сухаренко.* – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2019. – 167 с.

ISBN 978-5-7964-2163-5

Приведены данные по теоретическому и экспериментальному исследованию методами дифференциального термического и рентгенофазового анализа фазовых равновесий и химического взаимодействия в пятикомпонентной взаимной системе из фторидов и хлоридов лития, натрия, калия и цезия. Приведено сравнение экспериментальных данных и данных, полученных с использованием известных расчетных и расчётно-экспериментальных методов. Выполнен прогноз числа и состава кристаллизирующихся фаз на основе древ фаз, температуры и энтальпии плавления эвтектик.

Материал рекомендуется для студентов, магистрантов, аспирантов, научных и педагогических работников, изучающих фазовые равновесия в многокомпонентных системах с участием органических и неорганических веществ.

Рецензенты: д-р хим. наук, профессор *И.М. Кондратюк*  
канд. хим. наук, доцент *Е.М. Егорова*

УДК 543.572.3: 541.123.7 + 549.451

ББК 24.5

Г 204

ISBN 978-5-7964-2163-5

© И.К. Гаркушин, М.С. Козырева,  
М.А. Сухаренко, 2019

© Самарский государственный  
технический университет, 2019



## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ПРИМЕНЕНИЕ СОСТАВОВ СОЛЕВЫХ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМ В ТЕХНИКЕ И НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ.....	7
1.1. Применение фторидных солей.....	8
1.2. Применение хлоридных солей.....	9
1.3 Анализ элементов ограничения пятикомпонентной взаимной системы $Li^+, Na^+, K^+, Cs^+    F^-, Cl^-$ ...	11
1.3.1 Индивидуальные вещества.....	11
1.3.2 Двухкомпонентные системы.....	12
1.3.3 Трехкомпонентные системы.....	14
1.3.4 Четырехкомпонентные взаимные системы.....	17
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЧЕТЫРЕХКОМПОНЕНТНОЙ ВЗАИМНОЙ СИСТЕМЫ $Na^+, K^+, Cs^+    F^-, Cl^-$ .....	18
2.1 Разбиение на симплексы.....	18
2.2 Прогноз числа и состава кристаллизирующихся фаз на основе древа фаз.....	21
2.3 Описание химического взаимодействия конверсионным методом.....	22
2.4 Описание химического взаимодействия методом ионного баланса.....	24
2.5 Прогноз температур плавления и составов стабильных треугольников в четырехкомпонентной взаимной системе $Na^+, K^+, Cs^+    F^-, Cl^-$ .....	30
2.6 Экспериментальное исследование секущего стабильного треугольника $NaF-KCl-CsCl$ .....	32
2.7 Экспериментальное исследование секущего стабильного треугольника $NaF-KF-CsCl$ .....	34
2.8 Прогноз температур плавления эвтектик стабильных тетраэдров в четырехкомпонентной взаимной системе $Na^+, K^+, Cs^+    F^-, Cl^-$ .....	39
2.9 Экспериментальное исследование стабильного тетраэдра $NaF-KF-CsF-CsCl$ .....	42
2.10 Экспериментальное исследование стабильного тетраэдра $NaF-KF-KCl-CsCl$ .....	46
2.11 Экспериментальное исследование стабильного тетраэдра $NaF-NaCl-KCl-CsCl$ .....	49
ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЧЕТЫРЕХКОМПОНЕНТНОЙ ВЗАИМНОЙ СИСТЕМЫ $Li^+, Na^+, Cs^+    F^-, Cl^-$ .....	53
3.1 Разбиение на симплексы.....	53
3.2 Прогноз числа и состава кристаллизирующихся фаз.....	55
3.3 Описание химического взаимодействия конверсионным методом.....	56
3.4 Описание химического взаимодействия методом ионного баланса.....	58
3.5 Прогноз температур плавления и составов эвтектик стабильных треугольников в четырехкомпонентной взаимной системе $Li^+, Na^+, Cs^+    F^-, Cl^-$ .....	62
3.6 Прогноз температур плавления эвтектик стабильных тетраэдров в четырехкомпонентной взаимной системе $Li^+, Na^+, Cs^+    F^-, Cl^-$ .....	64
3.7 Экспериментальное исследование секущего треугольника $LiF-NaCl-CsCl$ .....	66
3.8 Экспериментальное исследование секущего треугольника $LiF-NaF-CsCl$ .....	69
3.9 Экспериментальное исследование стабильного тетраэдра $LiF-NaF-CsF-CsCl$ .....	71
3.10 Экспериментальное исследование объединенного стабильного тетраэдра $LiF-LiCl-NaCl-CsCl$ .....	73
3.11 Экспериментальное исследование стабильного тетраэдра $LiF-NaF-NaCl-CsCl$ .....	74
ГЛАВА 4. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЧЕТЫРЕХКОМПОНЕНТНОЙ ВЗАИМНОЙ СИСТЕМЫ $Li^+, K^+, Cs^+    F^-, Cl^-$ .....	77



4.1 Разбиение на симплексы .....	77
4.2 Прогноз числа и состава кристаллизующихся фаз.....	80
4.3 Описание химического взаимодействия конверсионным методом.....	81
4.3 Описание химического взаимодействия в четырехкомпонентной системе $Li^+, K^+, Cs^+    F^-, Cl^-$ методом ионного баланса.....	83
4.4 Прогноз температур плавления и составов стабильных треугольников в четырехкомпонентной взаимной системе $Li^+, K^+, Cs^+    F^-, Cl^-$ .....	86
4.5 Прогноз температур плавления эвтектик стабильных тетраэдров в четырехкомпонентной взаимной системе $Li^+, K^+, Cs^+    F^-, Cl^-$ .....	88
4.6 Экспериментальное исследование четырехкомпонентной взаимной системы $Li^+, K^+, Cs^+    F^-, Cl^-$ .....	90
4.7 Экспериментальное исследование секущего треугольника $LiF-KCl-CsCl$ .....	91
4.8 Экспериментальное исследование секущего треугольника $LiF-KF-CsCl$ .....	92
4.9 Экспериментальное исследование стабильного тетраэдра $LiF-KF-KCl-CsCl$ .....	94
4.10 Экспериментальное исследование объединенного стабильного тетраэдра $LiF-LiCl-KCl-CsCl$ .....	96
4.11 Экспериментальное исследование объединенного стабильного тетраэдра $LiF-KF-CsF-CsCl$ .....	97
<b>ГЛАВА 5. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЧЕТЫРЕХКОМПОНЕНТНОЙ ВЗАИМНОЙ СИСТЕМЫ <math>Li^+, Na^+, K^+    F^-, Cl^-</math> .....</b>	<b>100</b>
5.1 Описание химического взаимодействия конверсионным методом.....	100
<b>ГЛАВА 6. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЯТИКОМПОНЕНТНОЙ ВЗАИМНОЙ СИСТЕМЫ <math>Li^+, Na^+, K^+, Cs^+    F^-, Cl^-</math> .....</b>	<b>103</b>
6.1 Разбиение на симплексы .....	103
6.2 Прогноз числа и состава кристаллизующихся фаз.....	106
6.3 Описание химического взаимодействия методом ионного баланса.....	110
6.4 Прогноз температур плавления эвтектик стабильных тетраэдров в пятикомпонентной взаимной системе $Li^+, Na^+, K^+, Cs^+    F^-, Cl^-$ .....	115
6.5 Экспериментальное исследование стабильного тетраэдра $LiF-NaF-KCl-CsCl$ .....	117
6.6 Экспериментальное исследование стабильного тетраэдра $LiF-KF-NaF-CsCl$ .....	118
6.7 Экспериментальное исследование стабильного тетраэдра $LiF-KCl-NaCl-CsCl$ .....	120
6.8 Экспериментальное исследование объединенного стабильного пентатопа $LiF-LiCl-NaCl-KCl-CsCl$ .....	121
<b>ГЛАВА 7. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ .....</b>	<b>124</b>
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>159</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>160</b>