Межвузовский
международный конгресс

# ВЫСШАЯ ШКОЛА:
# НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ



Коллектив авторов

Сборник научных статей по итогам работы
Межвузовский международный конгресс

# ВЫСШАЯ ШКОЛА: НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Том 2

Москва, 2025

ББК 65
В42



**Высшая школа: научные исследования**. Материалы Межвузовского международного конгресса (г. Москва, 1 мая 2025 г.): Том 2. – Москва: Издательство Инфинити, 2025. – 161 с.

В42

**DOI 10.34660/conf.2025.17.46.047**

Сборник составлен по итогам работы Межвузовского научного конгресса. Включает в себя доклады российских и зарубежных представителей высшей научной школы, в которых рассматриваются современные научные тенденции, новые научные и прикладные решения в различных областях науки, практика применения результатов научных разработок. Служит инструментом обмена опыта научных работников, апробации исследований путем их публичного обсуждения.

Предназначено для научных работников, профессорско-преподавательского состава, соискателей ученой степени и студентов вузов.

ББК 65

© Издательство Инфинити, 2025
© Коллектив авторов, 2025

## СОДЕРЖАНИЕ


ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

*Нугманов А. М., Фирсова Л. Ю.*
Катодная защита стали в морской воде: закономерности формирования солевых отложений на стальной поверхности.....7

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

*Шепилова Е. Г., Браун Е. С.*
Роль и место математических методов в анализе и управлении сложными транспортными системами.....19

*Дикиджи О. О., Овчинников В. В.*
Технология получения композиционных материалов системы Fe–Cu коаксиальным лазерным плавлением.....25

*Быченков Е. Р., Медникова О. В., Биленко А. В.*
Интерфейс и пользовательский опыт в сервисах визуализации турнирных сеток.....33

*Быченкова М. И., Медникова О. В., Медников Д. А.*
Исследование современных алгоритмов и методов сетевого планирования в строительстве: анализ и перспективы развития.....36

*Файзуллаев А. Ф., Белаш В. Ю.*
Проектирование модели информационной системы киберплощадки на базе университета.....39

*Самуйленко П. А.*
Методика управления качеством минерального порошка в процессе производства.....45

*Липагин Н. С.*
Веб-приложения для рекламных услуг: значимость и перспективы в 2025 году.....53

*Кузьмина Д. В.*
Методика определения эффективности применения инновационных материалов в строительстве.....58

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

*Мелихов И. В., Веденяпин В. В., Аджиев С. З.*
Подходы к оптимизированному математическому обеспечению исследований, приводящих к созданию материалов нового поколения.....64

*Белашов А. Н.*
Дополнения к механизму образования вращения планеты Земля вокруг своей оси .....115

*Ихсанова Г. Р.*
Прогнозирование исходов ишемического инсульта методами машинного обучения ..... 137

АРХИТЕКТУРА

*Аменздаде Райха*
К проблеме монументальных строений средневекового Азербайджана (кофейни)..... 144

*Сорокин И. С.*
Исторический процесс наименования улиц и площадей в кварталах около особняка Субботина-Шихобалова..... 150

**DOI** 10.34660/INF.2025.56.13.181
**УДК** 620.197.5

# КАТОДНАЯ ЗАЩИТА СТАЛИ В МОРСКОЙ ВОДЕ: ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СОЛЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА СТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

**Нугманов Анас Масхарович**
*научный сотрудник*
**Фирсова Людмила Юрьевна**
*кандидат химических наук, доцент*
*Морской государственный университет им. адм. Г.И.Невельского, Владивосток, Россия*

***Аннотация.*** *Представлены результаты исследований процесса образования солевых катодных отложений (СКО, calcareous deposits) при катодной защите стали от коррозии в морской воде. При поддерживаемой постоянной величине напряжения между катодом - защищаемым от коррозионного разрушения стальным образцом и нерастворимым анодом ($Ti/RuO_2$) для конкретной конфигурации и геометрии размещения противоэлектродов в системе со временем устанавливаются близкие к постоянным значения плотностей катодного и анодного токов и потенциалов катода и анода. Полученные значения этих параметров в виде вольтамперных зависимостей могут быть соотнесены с количественными и качественными характеристиками формирования СКО, а также позволяют оценить эффективность конкретных режимов формирования катодных отложений.*

***Ключевые слова:*** *морская коррозия, катодная защита, солевой катодный осадок, защитный потенциал.*

## Введение

В исследованиях электрохимических процессов в электродных системах, для которых характерны гетерофазность и неравновесность, к каковым относятся и механизмы катодной защиты стальных морских инженерных сооружений, основное значение имеет такой параметр, как защитный потенциал, который может поддерживаться на постоянном уровне током в цепи или напряжением, прикладываемым между катодом (защищаемый объект) и нерастворимым (инертным) анодом. Наличие в морской воде карбонат-

но-кальциевой системы и ионов магния снижает ее коррозионную агрессивность даже при отсутствии защиты вследствие формирования солевых катодных отложений (СКО, calcareous deposits) на металлической поверхности. При катодной защите металла от коррозии в естественной морской среде происходит ускоренный процесс образования СКО на защищаемой поверхности [1].

Согласно нормативным документам по катодной защите, в морской воде для защиты стальных объектов, на которых сформированы солевые катодные отложения, достаточно поддержание плотности катодного тока на уровне порядка 50 мА/м$^2$ [2, 3]. Предварительное формирование СКО требует режимов, когда плотность катодного тока в несколько раз больше данного значения.

**Методика экспериментов**

Для наработки СКО в режиме поддержания постоянного значения величины напряжения между катодом (образец, на котором формируется СКО) и анодом исследовался интервал напряжений, начиная с заведомо низких (1,6 В) до достаточно высоких (2,5 В). Формирование СКО в морской воде соленостью 29,6‰ велось на стальных (Ст.3-кп по ГОСТ 19903-74) образцах размером 80×50 мм (площадь поверхности $\boldsymbol{S}_к$ = 80 см$^2$) массой порядка 50 г – с тем, чтобы иметь возможность точного измерения изменения массы на аналитических весах при лабораторном контроле процесса. В качестве анода использовался титан, покрытый оксидом рутения ($Ti/RuO_2$), с площадью поверхности $\boldsymbol{S}_а$ = 40 см$^2$ ($\boldsymbol{S}_к = 2 \cdot \boldsymbol{S}_а$). Расстояние между электродами составляло 5 см.

В качестве источника питания использовался прибор “АТН-1030”, работавший в режиме поддержания заданного значения постоянного напряжения. Для измерения и записи величины тока в цепи применялся логгер “Hantek 365A”, а для измерения и записи значений потенциалов катода и анода – логгеры “BDV 01”. Потенциалы измерялись относительно хлорсеребряного электрода ЭВЛ-1М3.1-100 ($\boldsymbol{\varphi}$ = +201 мВ НВЭ). Образцы взвешивались на аналитических весах AW-220 (“Shimadzu”) с точностью ±0,0001 г. Параметры морской воды определялись прибором “MX300 X-mate Pro” (“Mettler Toledo”). Использование портативных логгеров для измерения и записи было продиктовано возможностью их использования в реальных морских условиях.

Образцы подвергались механической зачистке, обезжиривались, подтравливались соляной кислотой, промывались дистиллированной водой, сушились и взвешивались. После электролиза образцы промывались, сушились и снова взвешивались. По разности показаний определялась масса катодных отложений. По результатам потенциометрических измерений строились и анализировались вольтамперные зависимости, которые имеют место при электролизе в процессе формирования катодных отложений.

**Результаты и обсуждение**

При оценке формирования солевых катодных отложений при катодной защите в морской воде, последняя имела следующие показатели: соленость SAL = 29,6‰, удельная эдектропроводность **λ** = 43,8 мСм/см, температура воды 20°С, *pH* = 7,66.

При катодной защите стального образца ток в цепи, соответственно, и плотность катодного тока, резко уменьшаются в течение первых 20 мин, а затем испытывают незначительные колебания около некоторого постоянного уровня (рисунок 1).

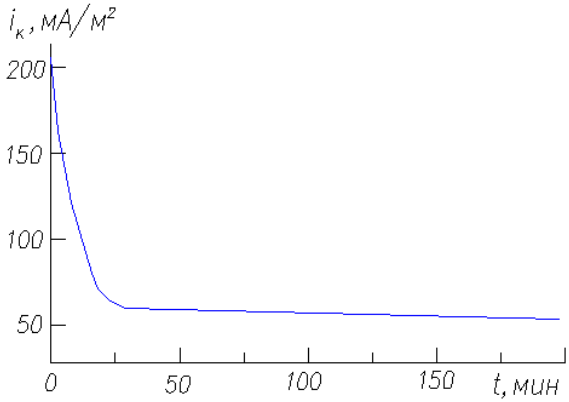



***Рисунок 1.*** *Изменение плотности катодного тока во времени в режиме поддержания постоянной величины напряжения между электродами: U = 1,6 В;* $i_{к,ср}$ *= 60 мА/м²*

Потенциал катода быстро (~5 мин) достигает некоторого постоянного уровня и затем практически не изменяется (рисунок 2). Постоянные значения потенциалов анода и катода достигаются намного быстрее, чем постоянные значения токов. При этом сдвиг потенциалов незначительный – потенциалы и анода и катода сдвигаются приблизительно на 0,1 В в сторону более положительных значений.

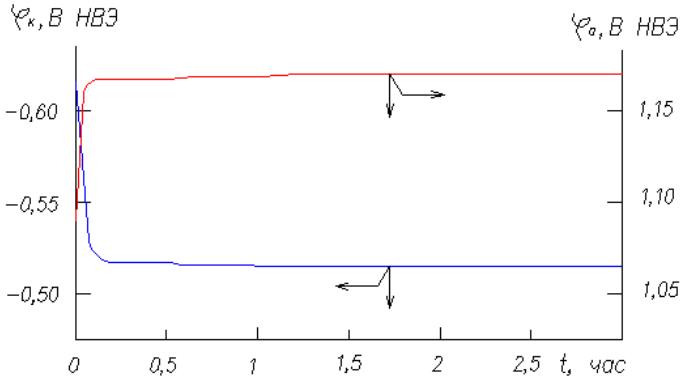



***Рисунок 2.*** *Изменение во времени потенциалов катода и анода в режиме поддержания постоянной величины напряжения между электродами: U = 1,7 В; $\varphi_к$ = -0,53; $\varphi_а$ = 1,17 В НВЭ*

Полученные экспериментальные данные обработки током при различных (1,5-2,5 В) напряжениях между электродами в течение 3 часов представлены в таблице 1.

***Таблица 1***

*Экспериментальные данные*

| № | *U*, В | Средняя величина тока в цепи; $I_{ср}$, мА | Наработка СКО фактическая; Δ*m*, мг | Потенциал, В НВЭ | | Область потенциалов (см. рис. 3) | Состав СКО (см. рис. 4) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | катода; $\varphi_к$ | анода; $\varphi_а$ | | |
| 1 | 1,6 | 0,50 | 1,1 | -0,50 | 1,10 | I | $CaCO_3$ |
| 2 | 1,65 | 0,88 | 2,7 | -0,53 | 1,12 | | |
| 3 | 1,7 | 0,90 | 2,8 | -0,53 | 1,17 | | |
| 4 | 1,75 | 1,06 | 3,4 | -0,61 | 1,14 | II | |
| 5 | 1,8 | 1,29 | 4,0 | -0,63 | 1,17 | | |
| 6 | 1,85 | 1,38 | 5,8 | -0,67 | 1,16 | | |
| 7 | 1,9 | 1,49 | 7,4 | -0,70 | 1,19 | | |
| 8 | 1,95 | 1,92 | 9,7 | -0,75 | 1,17 | | |
| 9 | 2,0 | 2,39 | 10,2 | -0,75 | 1,24 | | $CaCO_3$ + $Mg(OH)_2$ |
| 10 | 2,1 | 2,63 | 10,7 | -0,78 | 1,31 | | |
| 11 | 2,2 | 5,04 | 17,6 | -0,85 | 1,33 | | |
| 12 | 2,25 | 11,9 | 34,9 | -0,86 | 1,35 | III | |
| 13 | 2,3 | 12,7 | 38,3 | -0,91 | 1,34 | | |
| 14 | 2,4 | 18,8 | 44,9 | -0,92 | 1,40 | | |
| 15 | 2,5 | 24,6 | 57,3 | -0,95 | 1,45 | | $Mg(OH)_2$ |

Для каждого заданного значения напряжения между электродами определялись средние значения тока в цепи ($\boldsymbol{I}_{ср}$), рассчитывались средние плотности катодного ($\boldsymbol{i}_{к,ср} = \frac{I_{ср}}{Sк}$) и анодного ($\boldsymbol{i}_{а,ср} = 2\boldsymbol{i}_{к,ср}$) токов, фиксировались установившиеся значения катодного ($\boldsymbol{\varphi}_к$) и анодного ($\boldsymbol{\varphi}_а$) потенциалов. Полученные данные использовались при анализе вольтамперных зависимостей ($\boldsymbol{\varphi}$ – lg$\boldsymbol{i}$).

Реакции на аноде: 1) с выделением кислорода

$$4OH^- - 4e^- \rightarrow O_2\uparrow + 2H_2O \ (\varphi^o = 0{,}40 \text{ В НВЭ}); \quad (1)$$

2) образованием гипохлорита

$$Cl^- + 2OH^- - 2e^- \rightarrow ClO^- + H_2O \ (\varphi^o = 0{,}89 \text{ В НВЭ}); \quad (2)$$

3) выделением хлора

$$2Cl^- - 2e^- \rightarrow Cl_2 \ (\varphi^o = 1{,}36 \text{ В НВЭ}), \quad (3)$$

уравновешиваются катодными реакциями с выделением водорода, генерацией щелочи

$$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2\uparrow + 2OH^- \ (\varphi^o = -0{,}83 \text{ В НВЭ}) \quad (4)$$

и разрядом кислорода по реакции, обратной реакции (1).

На катоде, кроме того, идет процесс формирования твердофазных отложений за счет реакций образования карбоната кальция

$$Ca^{2+} + HCO_3^- + OH^- \rightarrow CaCO_3\downarrow + H_2O, \quad (5)$$

и гидроксида магния

$$Mg^{2+} + 2OH^- \rightarrow Mg(OH)_2\downarrow \quad (6)$$

за счет защелачивания прикатодного пространства.

Площадь катода выбрана вдвое большей площади анода ($S_к = 2S_а$) с тем, чтобы при заданном напряжении между электродами поддерживать на аноде ток, вдвое превышающий ток на катоде (соответственно и вдвое большую плотность тока: $\boldsymbol{i}_а = 2\boldsymbol{i}_к$ и lg$\boldsymbol{i}_а$ = lg$\boldsymbol{i}_к$ + 0,30). Такое соотношение площадей электродов позволяет, как минимум, соотнести между собой реакции (1) и (4).

Для реакции выделения кислорода на аноде необходимо преодолеть потенциальный барьер $\Delta\boldsymbol{\varphi} = \boldsymbol{\varphi}_а - \boldsymbol{\varphi}_к = 0{,}40 - (-0{,}83) = 1{,}23$ В. В данном случае он превышен: $\Delta\boldsymbol{\varphi}_{min} = 1{,}6$ В > 1,23 В. Соотнося катодные реакции с анодными реакциями по очередности преодоления потенциальных барьеров, можно выделить три области (таблица 2):

***Таблица 2***

*Анодные реакции при катодной защите стальной поверхности в морской воде*

| **Область** | $\Delta\boldsymbol{\varphi} = \boldsymbol{\varphi}_а - \boldsymbol{\varphi}_к$, В | **Анодные реакции** |
|---|---|---|
| I | < 1,72 | $4OH^- - 4e^- \rightarrow O_2\uparrow + 2H_2O$ |
| II | 1,72 … 2,19 | $4OH^- - 4e^- \rightarrow O_2\uparrow + 2H_2O$<br>$Cl^- + 2OH^- - 2e^- \rightarrow ClO^- + H_2O$ |

| | | |
|---|---|---|
| III | > 2,19 | $4OH^- - 4e^- \rightarrow O_2\uparrow + 2H_2O$<br>$Cl^- + 2OH^- - 2e^- \rightarrow ClO^- + H_2O$<br>$2Cl^- - 2e^- \rightarrow Cl_2$ |

Эти области (I÷III) показаны на рисунке 3 в виде анодных и катодных тафелевских прямых зависимостей потенциалов от логарифмов плотностей токов. Для анализа этих зависимостей достаточно условия по величине перенапряжения - как для анода, так и для катода значения перенапряжений должны отвечать ограничению $\boldsymbol{\eta} >> \frac{RT}{F}$. При больших катодных и анодных перенапряжениях уравнение Тафеля можно представить в виде [4]:

$$\boldsymbol{\eta} = a + \frac{RT}{\alpha \cdot F} \cdot \ln i_a - \frac{RT}{(1-\alpha) \cdot F} \cdot \ln i_к , \qquad (7)$$

где $\boldsymbol{\alpha}$ – фактор симметрии в действии потенциала на анодный и катодный процессы.

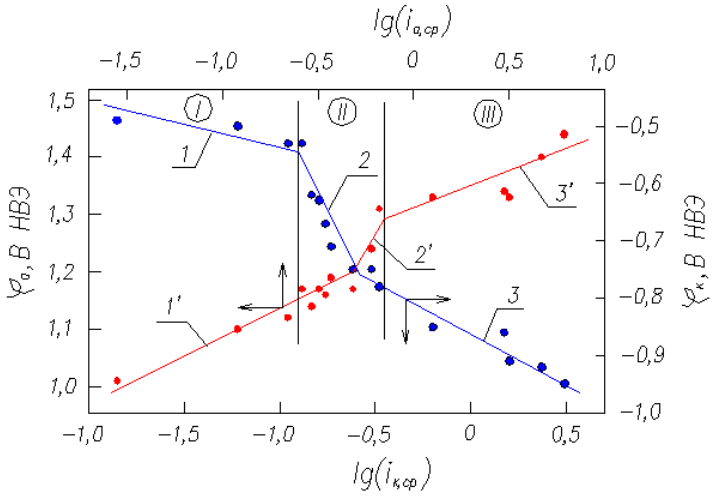



***Рисунок 3.*** *Катодная (а) и анодная (б) вольтамперные кривые* ($\boldsymbol{i}_{к,ср}$ *и* $\boldsymbol{i}_{а,ср}$ *в А/м²)*

При T = 20°C выражение (7), согласно [4]:, преобразуется к виду:

$$\boldsymbol{\eta} = a' + b_a \cdot \lg i_a - b_к \cdot \lg i_к = \frac{0{,}0581}{\alpha_a} \cdot \lg i_a - \frac{0{,}0581}{\alpha_к} \cdot \lg i_к . \qquad (8)$$

На кривых $\boldsymbol{\varphi}_к = f(\lg \boldsymbol{i}_к)$ и $\boldsymbol{\varphi}_a = f(\lg \boldsymbol{i}_a)$ можно выделить прямолинейные участки 1÷3 и 1'÷3' - соответственно на катодной и анодной кривой (рисунок 3). Наклоны прямых на этих участках, найденные методом линейного приближения, и рассчитанные по ним значения $\boldsymbol{a}_к$ и $\boldsymbol{a}_a$ для (8) представлены в таблице 3:

***Таблица 3***

*Расчетные значения параметров тафелевых зависимостей*

| Область | Смежные участки (рис.3) | $\alpha_к$ | $\alpha_a$ | $\alpha_к + \alpha_a$ | Перенапряжение |
|---|---|---|---|---|---|
| I | 1 - 1’ | 0,73 | 0,35 | 1,08 | Анодное |
| II | 2 - 1’ | 0,09 | 0,35 | 0,44 | Катодное |
| | 3 - 2’ | 0,33 | 0,10 | 0,43 | Анодное |
| III | 3 - 3’ | 0,33 | 0,45 | 0,78 | Катодное |

Теоретически сумма факторов симметрии должна быть $\boldsymbol{\alpha}_к + \boldsymbol{\alpha}_a = 1$, но практически такого не происходит – по данным из таблицы 3 $\boldsymbol{\alpha}_к + \boldsymbol{\alpha}_a < 1$ подобное имеет место только на смежных участках 1 и 1’. Сопоставляя данные по найденным значениям $\boldsymbol{\alpha}$ для смежных участков в разных областях потенциалов (I÷III), можно выделить электрод, на котором перенапряжение контролирует процесс электролиза. С увеличением плотности защитного тока анодное и катодное перенапряжения последовательно сменяют друг друга.

Вольтамперные зависимости тесно связаны с твердофазными превращениями веществ на катоде – формированием солевых катодных отложений. При малых плотностях катодного тока (рисунок 3, участки 1-1’) образование $CaCO_3$ не испытывает затруднений, имеет место анодное перенапряжение (таблица 3). Катодное перенапряжение появляется, когда осаждение $CaCO_3$ начинает тормозиться с началом осаждения $Mg(OH)_2$ (рисунок 3, участки 2-1’). Процесс в этой области плотностей тока лимитируется тем, что осаждение $Mg(OH)_2$ не может компенсировать потерю плотности тока за счет уменьшения количества осаждаемого $CaCO_3$.

На сопряженных участках 3-2’ (рисунок 3, таблица 3) происходит совместное осаждение $CaCO_3$ и $Mg(OH)_2$, реакция (1) на аноде тормозится за счет начала реакции (2), что приводит к анодному перенапряжению. На участках 3-3’ (рисунок 3, таблица 3) реализуются все реакции (1-3), анодный процесс не испытывает затруднений. На катоде в основном происходит осаждение $Mg(OH)_2$, процесс лимитируется плотностью его тока осаждения при катодном перенапряжении.

***Скорость образования солевых катодных отложений***.

Исходя из массы катодных отложений, можно рассчитать скорость наработки СКО:

$$v = \frac{\Delta m}{t \cdot S}, \text{ где} \qquad (9)$$

$\Delta m$ – изменение массы образца, г; $t$ – продолжительность наработки, ч; $S$ – площадь поверхности катода, м$^2$.

Скорость наработки СКО монотонно возрастает с увеличением средних значений плотности катодного тока (рисунок 4*а*). На кривой имеются участ-

ки ускорения-замедления. Максимальная скорость образования СКО наблюдается в области $i_{к,ср} \approx 0{,}2$ А/м$^2$.

***Выход по току***.

При электролизе морской воды катодная поляризация стального электрода приводит к защелачиванию прикатодной области, при этом при прохождении тока $I$ в течение времени $t$ образуется $\frac{I \cdot t}{F}$ молей $OH^-$., где $I$ – ток (А), $t$- время (с), $F$ – постоянная Фарадея ($F$ = 96500 Кл/моль = 26,8 (мА·ч)/ммоль). За счет такого защелачивания на металлической поверхности образуется солевой катодный осадок, состоящий, в основном, из $CaCO_3$ и $Mg(OH)_2$. В работе [1] предложена модель образования катодных отложений и рассчитаны плотности катодных токов начала кристаллизации твердых продуктов в виде кальциевой и магниевой составляющих – карбоната кальция и гидроксида магния. Так для толщины диффузионного слоя $\delta = 4 \cdot 10^{-5}$ м (ВДЭ, $\omega$ = 270 об/мин) плотности катодного тока были порядка 0,5 и 5 А/м$^2$ соответственно для $CaCO_3$ и $Mg(OH)_2$. В отсутствии перемешивания плотности токов начала кристаллизации $CaCO_3$ и $Mg(OH)_2$ намного меньше - соответственно 0,03 и 0,3 А/м$^2$, что соответствует толщине диффузионного слоя $\approx 6 \cdot 10^{-4}$ м [5].

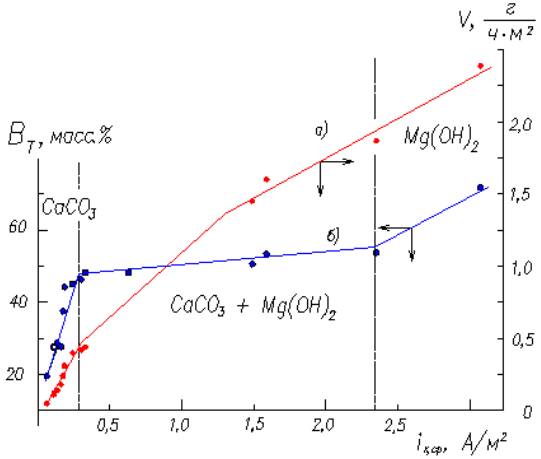



***Рисунок 4.*** *Зависимость скорости наработки СКО (а) и выхода по току (б) от средней плотности катодного тока*

Методами РФА в осадках, полученных при $i_к$ = 0,04-0,3 А/м$^2$, идентифицированы кристаллические фазы $CaCO_3$ в виде арагонита и кальцита, в образцах, полученных при $i_к$ = 0,34-3 А/м$^2$, обнаруживается кристаллическая фаза $Mg(OH)_2$ (брусит), во всех образцах присутствует рентгеноаморфная фаза.

При малых плотностях катодного тока происходит образование только $CaCO_3$, в количестве, эквивалентном генерированным на катоде гидроксид-ионам:

$$\Delta m_{CaCO_3} = \frac{I \cdot t}{F} \cdot M_{CaCO_3}. \qquad (10)$$

Расчетная формула наработки массы для определения выхода по току при времени электролиза $t$ = 3 ч $\Delta m_{CaCO_3} = 89{,}6\, i_{к,ср}$ ($i_{к,ср}$ – средняя плотность катодного тока, А/м$^2$). При расчетах брались эквивалентные по щелочному агенту массы $CaCO_3$ и $Mg(OH)_2$ – соответственно 100 и 29: $\Delta m_{CaCO_3 + Mg(OH)_2} = 0{,}896 \cdot [100 \cdot (1\text{-}x) + 29 \cdot x] \cdot i_{к,ср}$ (x – мольная доля гидроксида магния; $i_{к,ср}$ – средняя плотность катодного тока, А/м$^2$).

Кривая выхода по току (рисунок 4*б*) в точке, соответствующей началу кристаллизации $Mg(OH)_2$, испытывает излом, с увеличением плотности тока выход по току возрастает незначительно.

Статистическая оценка данных по области совместного осаждения $CaCO_3$ и $Mg(OH)_2$ приводит к параболической зависимости мольной доли $Mg(OH)_2$ в осадке от плотности катодного тока ( $\mu_{Mg(OH)_2} = 0{,}56 \cdot \sqrt{i_{к,ср}}$ , в точке $i_{к,ср}$ = 0,3 А/м$^2$ мольная доля $Mg(OH)_2$ составляет 0,25 и возрастает до 1,0 при $i_{к,ср} \approx 25$ А/м$^2$.) (рисунок 5*а*), при том, что увеличение массы катодного осадка с ростом плотности тока происходит линейно ($\Delta m = 6{,}5 + 17{,}2 \cdot i_{к,ср}$) (рисунок 5*б*).

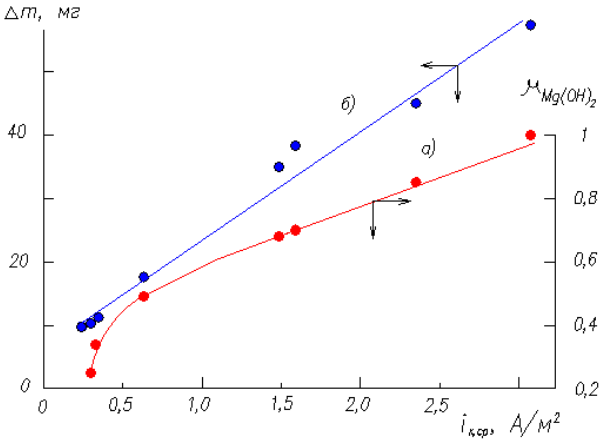



***Рисунок 5.*** *Изменение мольной доли* ***μ*** $Mg(OH)_2$ *в осадке в области совместного осаждения с* $CaCO_3$ *(а) и общий рост массы осадка (б) в зависимости от плотности катодного тока*

При $\Delta\varphi > 2{,}1$ В ($i_{к,ср} > 0{,}33$ А/м$^2$) резко меняется наклон кривой $i_{к,ср}(\Delta\varphi)$ (рисунок 6*а*), дальнейшее увеличение напряжения между электродами ста-

новится неэффективным. При больших плотностях тока происходит не только формирование осадка на поверхности катода, но и образование твердофазных продуктов непосредственно в объеме жидкой фазы. К тому же сам продукт, осаждающийся на катоде, представляет собой более рыхлое образование. Вследствие этого есть смысл рассмотреть отдельно область первоначального наклона кривой $i_{к,ср}(\Delta\varphi)$, которая отвечает в основном, как было показано выше, образованию осадка $CaCO_3$.

***Топохимическая модель формирования катодных отложений***.

Как при естественной морской коррозии стали, когда одновременно с образованием сульфатсодержащей "зеленой ржавчины" $GR(SO_4^{2-}$ [6] происходит также формирование СКО, так и в случае непосредственного получения СКО при катодной защите, эти отложения представлены кристаллическими структурами $CaCO_3$ (кальцит, арагонит) и $Mg(OH)_2$ (брусит) [7]. Процесс идет непосредственно в объеме твердофазных продуктов превращения.

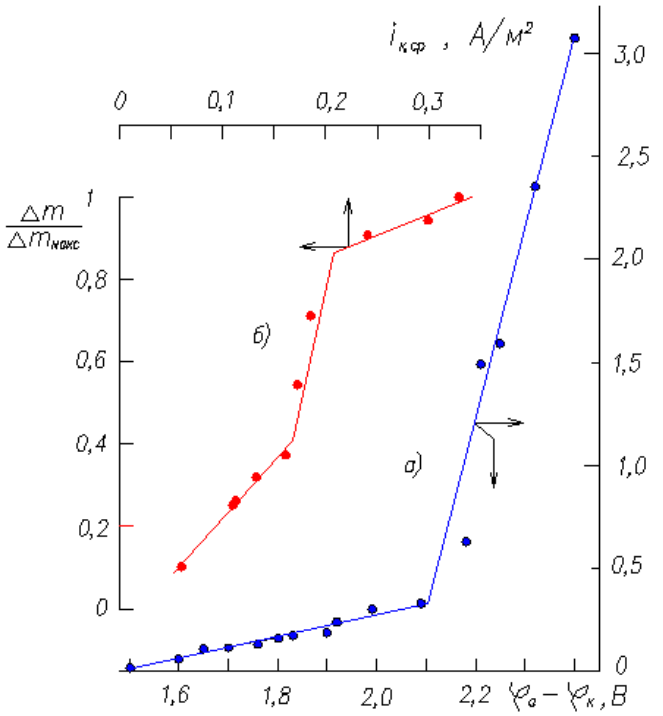



***Рисунок 6.*** *Вольтамперная кривая в координатах I – U (а) и относительный прирост массы образцов в зависимости от средней плотности катодного тока (б)*

Такого рода процессы характеризуются как топохимические [8], для которых представлены различные модели [9]. Топохимическую модель формирования солевых отложений на катодно поляризуемой можно представить уравнением зависимости степени превращения отношения текущих изменений (прироста) массы образца к максимальному значению

$$x\left(i_{к,ср}\right)=\frac{\Delta m}{\Delta m_{макс}}\left(i_{к,ср}\right)=1-e^{-k\cdot i_{к,ср}^{n}}, \qquad (11)$$

где $\boldsymbol{n}=\boldsymbol{\beta}+\boldsymbol{\lambda}$ ($\boldsymbol{\beta}$ – число направлений роста зародышей кристаллов, $\boldsymbol{\lambda}$ – число элементарных стадий процесса образования зародышей).

Это типичная зависимость для топохимического процесса, который можно разделить на три этапа: 1) разгон, 2) ускорение и 3) замедление и остановка. Экспериментальные точки, обработанные методом нелинейного оценивания, приводят к топохимической зависимости $x\left(i_{к,ср}\right)=\frac{\Delta m}{m_{\max}}\left(i_{к,ср}\right)=1-e^{-91,8\cdot i_{к,ср}^{n}}$. График зависимости представлен на (рисунок 6*б*).

Значение $\boldsymbol{n}=\boldsymbol{\beta}+\boldsymbol{\lambda}$ в уравнении (11) близко к трем, это, видимо, обусловлено тем, число направлений роста кристаллов $\boldsymbol{\beta}\approx 2$ при числе элементарных стадий $\boldsymbol{\lambda}=1$. Кроме роста кристаллов в направлении, перпендикулярном поверхности катода, должно происходить расширение области кристаллизации в параллельных плоскостях.

Округлив значение $\boldsymbol{n}=2{,}68\approx 3$, получим зависимость:

$$x\left(i\right)=1-e^{-k\cdot i^{3}}. \qquad (12)$$

Первая производная выражения (12) дает скорость топохимического превращения в произвольной точке $\boldsymbol{i}$:

$$\frac{dx}{di}=3ki^{2}\cdot e^{-ki^{3}}\cdot \qquad (13)$$

Вторая производная

$$\frac{d^{2}x}{di^{2}}=3ki\cdot e^{-ki^{3}}\cdot\left(2-3k\cdot i^{3}\right) \qquad (14)$$

позволяет определить местоположение точки, где скорость топохимического превращения максимальна:

$$i_{m}=\sqrt[3]{\frac{2}{3k}}=0{,}19\ \text{А/м}^{2}. \qquad (15)$$

Таким образом, в области плотностей катодного тока, соответствующих формированию на поверхности катода $CaCO_3$, наибольшая скорость образования твердых отложений наблюдается при $i_{к,ср}=190$ мА/м$^2$, что отвечает четырехкратному превышению нормативно-стационарного значения 45 мА/м$^2$ [2, 3], рекомендуемому для катодной защиты после завершения процесса наработки СКО.

**Выводы**

Наработка солевых отложений на катодно защищаемой металлической поверхности зависит от взаиморасположения и соотношения площадей

защищаемого объекта и нерастворимого анода, в соответствии с этим выбирается величина напряжения между этой электродной парой. Соотношение площадей нерастворимого анода и защищаемого объекта при заданной плотности катодного тока определяет, какие реакции на аноде будут обеспечивать катодный процесс и на каком из электродов будет преобладать перенапряжение.

Оптимальной для наработки СКО является область плотностей катодных токов, лежащая в интервале $i_к$ = 150… 300 мА/м$^2$. В этой области происходит преимущественное осаждение $CaCO_3$. Найдено, что скорость формирования кальциевых солевых катодных отложений максимальна при плотности катодного тока 190 мА/м$^2$.

**Литература**

*1. Чернов Б.Б., Пустовских Т.Б. Кинетика образования минеральных осадков из морской воды на катодно поляризуемой металлической поверхности // Защита металлов, 1989, т.25. – с.506-512.*

*2. РД 31.35.07-83. Руководство по электрохимической защите от коррозии металлоконструкций морских гидротехнических сооружений в подводной зоне. – Москва, 1983.*

*3. ВСН 39-84. Катодная защита от коррозии оборудования и металлических конструкций гидротехнических сооружений. – Ленинград, 1985.*

*4. Феттер К. Электрохимическая кинетика / Под ред. Я.М.Колотыркина. – М.: Химия, 1967. – 856 с., с.146.*

*5. Розенфельд И.Л. Коррозия и защита металлов. Локальные коррозионные процессы. – М.: Металлургия, 1969. – 448 с.*

*6. Ch. Barchiche, C. Deslouis, O. Gil, S. Joiret, Ph. Refait, B. Tribollet. Role of sulphate ions on the formation of calcareous deposits on steel in artificial seawater; the formation of Green Rust compounds during cathodic protection // Electrochimica Acta 54 (2009) – P.3580–3588.*

*7. Möller H. The influence of $Mg^{2+}$ on the formation of calcareous deposits on a freely corroding low carbon steel in seawater // Corr. Sci., V.49, 2007. – P.1992-2001*

*8. Розовский А.Я. Кинетика топохимических реакций // М.: Химия, 1974. – 224 с.*

*9. Браун М., Доллимор Д., Галвей А. Реакции твердых тел // Под ред. В.В.Болдырева. – М.: Мир, 1983. – 360 с.*

**DOI** 10.34660/INF.2025.91.50.182
**УДК** 656: 519.75 + 06

# РОЛЬ И МЕСТО МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В АНАЛИЗЕ И УПРАВЛЕНИИ СЛОЖНЫМИ ТРАНСПОРТНЫМИ СИСТЕМАМИ

**Шепилова Елена Григорьевна**
*доктор технических наук, профессор*
*Ростовский государственный университет путей сообщения,*
*г. Ростов-на-Дону, Россия*

**Браун Евгений Сергеевич**
*аспирант*
*Ростовский государственный университет путей сообщения,*
*г. Ростов-на-Дону, Россия*

***Аннотация.*** *Обозначена возрастающая роль и прописаны места применение математических методов в анализе и управлении сложными транспортными системами. Дан краткий обзор традиционных подходов к моделированию (основаны на априори известной сущности исследуемых объектов) и статистических методов, требующих стационарных и репрезентативных данных. Особое внимание уделено методам имитационного моделирования. Нарушение условий применения данных методов служит основой разработки инновационных подходов к моделированию транспортных процессов. В данном исследовании внимание уделено генетическим алгоритмам, нейро-сетевым моделям, теории нечетких множеств, теории конечных и клеточных автоматов.*

***Ключевые слова:*** *Производственных процессы, параллельные реальности, пространство признаков, фазовое пространство, дополненное и виртуальное пространства.*

***Abstract.*** *The article highlights the increasing role of mathematical methods and indicates the area of their application in the analysis and management of complex transport systems. Traditional approaches to modeling (based on the a priori known nature of the studied objects) are reviewed and statistical methods requiring stationary and representative data are considered. Special attention is paid to the methods of simulation modeling. The development of innovative approaches to modeling transport processes is caused by violating the conditions of application of these methods. The study focuses on genetic algorithms, neural network models, fuzzy set theory and theory of finite and cellular automata.*

***Keywords:*** *production processes, parallel realities, attribute space, phase space, augmented and virtual spaces.*

**Введение.**

Математические модели технико-технологических систем на транспорте можно отнести к одному из двух типов, различающихся по способу получения данных.

Первый тип – *модели, основанные на фундаментальных законах природы*, таких, как законы сохранения (энергии, импульса, заряда, массы, движения центра масс и пр.). Законы известны, поэтому известны структуры моделей, их описывающих. Типичными представителями этих моделей являются:

- Балансовые модели В.В. Леонтьева. В рамках замкнутой системы, например, экономика страны, холдинга (например, ОАО «РЖД») перетоки ресурсов из одной сферы в другую должны быть сбалансированы.

- Производственная функция предприятия, отражающая результативность предприятия в зависимости от значений имеющихся ресурсов (финансовых и кадровых). Показано, что результативность предприятия можно сохранить, компенсировав недостающие у предприятия финансы трудовыми ресурсами и наоборот.

- Модели, связывающие параметры исследуемых процессов с помощью дифференциальных уравнений. Например, известно, что скорость локомотива пропорциональна пройденному пути (то есть, известен закон движения), тогда можно записать:

$$dx/dt = kx. \quad (1)$$

Из соотношения (1) легко находится и сам закон движения – функция:

$$x(t) = e^{kt+c}. \quad (2)$$

*Второй тип моделей основан на правдоподобных гипотезах о внутреннем устройстве и механизмах функционирования объектов*. Эти гипотезы, как правило, отражают:

- статистически значимые корреляции (например, сезонные колебания спроса и предложения на транспортные услуги);

- априорные представления о моделируемом объекте, сложившиеся у опытных специалистов.

Примерами таких моделей служат статистические законы распределения случайных величин, регрессионные модели (например, зависимость времени, скорости скатывания отцепов с горки от характеристик отцепов).

Вместе с тем, область применения статистических моделей ограничена. Они неприменимы в случаях перестройки структуры и внутренних взаимосвязей в системе. Так как в этом случае нарушается требование репрезентативности исходных данных. Она нарушается, так как при любой перестрой-

ке деятельности транспортного предприятия действуют иные закономерности. Поэтому необходимость в долгосрочном прогнозировании поведения сложных систем потребовала разработки других подходов к моделированию сложных объектов. Рассмотрим их подробнее.

***Имитационное моделирование (ИМ).*** ИМ занимает промежуточное место между традиционным математическим моделированием (использует априорную информацию об исследуемом объекте) и методами статистического моделирования (проверка гипотез осуществляется на основе статистического анализа). Развитие ИМ обязано развитию ЭВМ. Оно позволяет строить содержательные модели сложных транспортных систем [1, 2].

Суть имитационного моделирования заключается в исследовании сложной математической модели с помощью экспериментирования с моделью и обработки результатов этих экспериментов. Характерным примером ИМ на транспорте является построение статистических моделей скатывания отцепов с горки методом активного эксперимента [3].

В основе методики построения моделей с помощью ИМ лежит легко объясняемая идея максимально использовать всю имеющуюся в распоряжении исследователя априорную информацию о системе, а также количественные и качественные данные, полученные в эксперименте.

Имитационная модель может получиться разной у разных авторов, даже при одних и тех же данных о функционировании реальной системы, то есть создание имитационной модели – неформальный процесс.

***Природоподобные модели.*** Это широкий класс моделей, включающие генетические алгоритмы, эволюционное программирование, самоорганизующиеся модели, модели теории нечетких множеств. Прокомментируем их сущность и возможность применения на транспорте.

*Генетические алгоритмы*. В исследовании [4] поставлена логистическая транспортная задача, решаемая с помощью генетического алгоритма (ГА). ГА – это эвристический алгоритм поиска решения путём случайного подбора, комбинирования и вариации искомых параметров с использованием механизмов, аналогичных естественному отбору в природе. Естественный отбор в природе опирается на наследование, мутации, отбор лучших вариантов и кроссинговер (скрещивание вариантов). ГА оперирует простыми решениями: комбинируя их, и отбирая лучшие варианты удается найти нетривиальные решения, удовлетворяющие возрастающим требованиям ОАО «РЖД» к моделированию ключевых процессов.

На каждом этапе процедуры из полученного множества решений (текущего «поколения») по значению функции «приспособленности» выбираются наиболее приспособленные решения – «новое поколение». Для них также вычисляется значение приспособленности, и затем производится отбор («селекция») лучших решений в следующее поколение. Эта процедура

выполняется до тех, пор пока качество решений не будет соответствовать установленным значениям.

*Нейронные сети (НС).* НС – это математическая модель, программно и аппаратно реализованная по принципу организации биологических нейронных сетей (в частности, коры головного мозга человека) [5]. В основе нейросети лежит понятие «искусственного нейрона» – аналога биологического нейрона.

Нейронные сети не программируются в привычном смысле этого слова, они обучаются. Возможность обучения — одно из главных преимуществ нейронных сетей перед традиционными алгоритмами. Технически обучение заключается в нахождении коэффициентов связей между нейронами. В процессе обучения нейронная сеть способна выявлять сложные зависимости между входными и выходными данными, а также выполнять обобщение.

НС применяются на транспорте в самых различных сферах [6]:

- Обнаружение и классификация транспортных средств (ТС).

- Анализ характера движения ТС (динамика, пропускная способность, очереди, пробки и т. п.).

- Прогнозирование трафика движения. Стратегическое прогнозирование предсказывает транспортные потоки на месяцы или годы и влияет на основные решения по планированию дорог. Краткосрочные прогнозы используются в системах управления текущим движением транспорта.

*Теория нечетких множеств (ТНМ)* [7].

ТНМ позволяет преодолеть ряд трудностей классической теории множества.

Во-первых, она предполагает, что объект может или принадлежать, или не принадлежать множеству. Рассуждения человека же размыты (нечетки). Объект транспортной инфраструктуры не может быть только опасным или безопасным, а специалист только хорошим или плохим. ТНМ использует функции принадлежности, характеризующие нечеткую (частичную) принадлежность элемента множеству.

Другая проблема связана с использованием человеком вербально выраженных характеристик объекта (а не в числовой форме). Например, отцеп может быть «хорошим бегуном» или «плохим бегуном», риск «высоким», «средним», «низким». ТНМ вводит и пользуется, так называемыми, «лингвистическими переменными».

В ТНМ выработаны технологии принятия решений с использованием нечетких множеств и лингвистических переменных (алгоритмы Мамдани, Сугено, Ларсена и др.) [7]. Они имитируют рассуждения человека (руководителя, опытного специалиста).

На транспорте ТНМ используется для описания состояния объектов транспортной инфраструктуры (состояния дорог, транспортных средств),

решения оптимизационных задач логистики, маршрутизации, строительства, управления.

*Конечные и клеточные автоматы* [8].

Под коне́чным автома́том (КА) понимается математическая абстракция (некоторое дискретное устройство), имеющее несколько состояний, для каждого из них установлены входы и выходы, в зависимости от которых КА меняет свое состояние.

Примером КА может служить устройство «умный светофор». Его состояния: включен «зеленый», включен «красный», включен режим ожидания (желтый цвет). Входы: транспорт (люди) на данном направлении, транспорт (люди) на перпендикулярном направлении. Выходы: сигналы на переключение светофора (переход из одного состояния в другое).

Совокупность КА расположенных в некоторой решетке дают клеточный автомат (КлА). КлА позволяют:

- Сформировать эффективно работающую команду (экипаж локомотива, управленческая команда, обслуживающий персонал, …). В этом случае каждый человек моделируется с помощью КА. Объединив их в КлА, можно увидеть результаты совместной работы и отобрать наиболее эффективный.

- Оценить действия группы людей (пассажиров, персонала) в экстренных ситуациях (задымление вагона, аварийная ситуация). И на этой основе разработать регламенты поведения участников.

- Исследовать перспективы принятия тех или иных решений (повышение цены на транспортные услуги, установление льгот на проезд и провоз багажа, назначение налогов на ведение бизнеса и производства на транспорте) и др. задачи.

Выше рассмотрены «чистые» модельные конструкции. В ряде случаев целесообразно объединить их. Одним из важнейших тому примеров являются нейро-нечеткие модели, синтезируемые сочетанием методов ТНМ и НС моделирования.

**Выводы.**

1. Актуализирована задача разработки инновационных математических моделей на транспорте.

2. Проанализированы традиционные подходы к моделированию (основанные на априори известной сущности исследуемых объектов), статистические методы, требующие стационарных и репрезентативных данных, и методы имитационного моделирования.

3. Дан обзор природоподобных методов исследования сложных объектов: генетических алгоритмов, нейро-сетевых моделей, теории нечетких множеств, теории конечных и клеточных автоматов.

**Литература**

*1. Моисеев Н.Н., Свирежев Ю.М. Методы системного анализа в проблеме «Человек – биосфера». – Имитационное моделирование и экология, материалы семинара СКОПЕ. М.: Наука, 1975.*

*2. Моисеев Н. Н., Евтушенко Ю.Г., Краснощеков П.С, Павловский Ю.Н. Имитационные системы. – Экономика и организация промышленного производства. 1973, № 6.*

*3. Муха Ю.А. Описание процесса скатывания отцепов с горки при помощи метода планирования эксперимента // Сб.науч. ст. ДИИТа. Днепропетровск:975. вып.168/9.*

*4. Сидоренко Д.О., Городилов А.Ю. Подвижный генетический алгоритм для решения задачи маршрутизации транспорта // материалы Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых с междунар. участием «Математика и междисциплинарные исследования». 2021. С. 177–180.*

*5. Ерёмин Д. М., Гарцеев И. Б. Искусственные нейронные сети в интеллектуальных системах управления. — М.: МИРЭА, 2004. — 75 с. — ISBN 5-7339-0423-2.*

*6. Хамидулин Т.Г. ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ТРАНСПОРТНОЙ ОТРАСЛИ // «Экономика и социум». – №4 (59). – 2019. С. 851 – 858.*

*7. Болодурина, И. П. Введение в теорию нечѐтких множеств и систем: учебное пособие / И. П. Болодурина, С. Т. Дусакаева; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2021 –172 с.*

*8. Кравченко, И. Ф. Применение теории конечных автоматов в моделировании маневровой работы / И. Ф. Кравченко, А. О. Полунина // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство. Материалы международной научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону, 2023. – С. 108–111.*

**DOI** 10.34660/INF.2025.92.63.183

# ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ СИСТЕМЫ FE–CU КОАКСИАЛЬНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ПЛАВЛЕНИЕМ

**Дикиджи Ольга Олеговна**
*студент*
**Овчинников Виктор Васильевич**
*доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой*
*Московский политехнический университет*

Система Fe–Cu относится к такому типу систем компонентов, которые в жидком состоянии могут смешиваться при определенных условиях, таких как повышение температуры выше температуры плавления меди 1356 K и увеличение энтропийного фактора. Проявление расслаивания сплава на две фазы в свою очередь может возникнуть самопроизвольно при недостаточно высоких температурах, так как в системе силы взаимодействия одноименных атомов Fe–Fe и Cu–Cu превышает силу взаимодействия разноименных Fe–Cu.

Также ликвации способствует добавление углерода даже в малых количествах (около 0,1%) в сплав. Это обусловлено тем, что углерод является легкоподвижным элементом, более того активен при высоких температурах. Так как углерод перераспределяется в структуре стали после затвердевания, для предотвращения ликвации в системах несмешивающихся компонентов необходимо сначала достигнуть равномерного взаимного распределения металлических составляющих.

В свете решения данной задачи весьма перспективным представляется использование для получения композиционных материалов системы Fe–Cu технологии коаксиального лазерного плавления. Коаксиальное лазерное плавление представляет собой один из методов изготовления деталей сложной конструкции из порошков, подаваемых в наплавочную головку и последующей подачей потока порошка распылением по одной оси с лазерным лучом. Наплавка на используемом волоконном лазере ЛС-3 производится из 16 каналов по кругу коаксиально лазера послойно, толщина слоя 0,3 мм, ширина 1,2 мм. Особенности применения данной технологии позволяют создавать при сравнительно небольших затратах времени детали из тех материа-

лов, которые несколько лет назад было принято считать нецелесообразными в производстве в силу трудоемкости и недостаточной эффективности традиционных металлургических методов.

В исследовании технологии коаксиального лазерного плавления на волоконном лазере ЛС-3 были использованы порошки AISI316-аустенит содержащий 66% Fe, 0,08% C, 16% Cr, 12% Ni, 3% Mo, обладающий низкой тепло- и электропроводностью и БрХ08 – хромированная бронза с содержанием Cr 0,4-0,7%, обладающая высокими показателями тепло- и электропроводности в соотношении 40% и 60% соответственно. Схема процесса коаксиального лазерного плавления представлена на рисунке 1 [1].

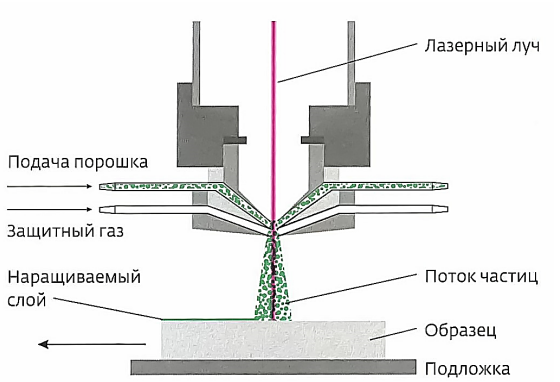



***Рисунок 1.*** *Схема процесса коаксиального лазерного плавления (КЛП) [1]*

Выбор вышеупомянутой системы компонентов обусловлен высоким потенциалом к смешиванию железа и меди в состоянии твердо-жидкого взаимодействия, но при этом низкой растворимостью одного компонента в другом при комнатной температуре и большой разницей в температурах плавления компонентов.

При исследовании технологии коаксиального лазерного плавления предстояло решить проблему возможного возникновения трещин и неоднородности в образующемся микрослое, для чего были приняты нижеследующие меры:

– Наплавление слоев как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении с перекрытием 50%;

– Выбор оптимального режима работы лазера для поддержания необходимой температуры и напряжения: мощность лазерного излучения 600 Вт, скорость перемещения 400 мм/мин, диаметр луча 1,0 мм (для одиночного валика);

– Для предотвращения возникновения оксидных пленок при контакте с атмосферой, вызывающих неоднородность, осуществлялась подача аргона.

При каждом нанесении последующего слоя металлы активно перемешивались в зоне ванны расплава, вследствие чего между слоями нанесения образовывались промежуточные слои. В атмосфере созданной аргоном удалось избежать окисления слоев и получить однородный образец размером 10x20x20 мм.

В отличие от других методов получения композиции Fe–Cu аддитивный метод проще в реализации за счёт отсутствия необходимости изготовления специальных форм и применения горячего прессования в сравнении с порошковым методом и необходимости жидкой пропитки при получении псевдосплавов. Пористость при КЛП минимальная, в сравнении с другими методами. Метод коаксиального лазерного плавления отличается значительно меньшей трудоёмкостью, чем все другие методы.

Был опробован вариант смешения порошков стали AISI316 и бронзы БрХ0,8. Микроструктура материала 40% AISI316 и 60% БрХ0,8 показана на рисунке 2.

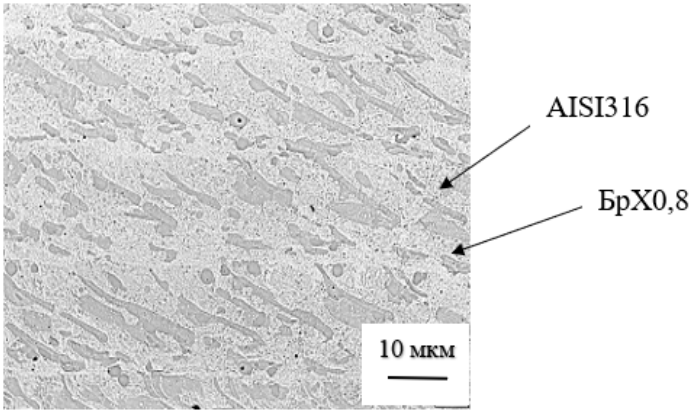



***Рисунок 2.*** *Микроструктура материала 40% AISI316 и 60% БрХ0,8, полученного КЛП*

На фото рис. 2 видно, что стальные частицы распределены в бронзовой матрице без расслоения в процентном соотношении, соответствующем составу введённого порошка. Проведённый анализ состава частиц на электронном растровом микроскопе показал, что в стальные частицы содержат 64,9%Fe; 15,65%Cr; 11,92%Ni; 3,99%C; 2,79%Mo; 0,75%Si, что соответствует исходному состоянию стальных частиц. Бронзовая составляющая имеет 98,4% Cu и остальное примеси. Таким образом очевидно, что в процессе

КЛП состав порошков практически не меняется и легирующие элементы не приводят к расслоению, что типично для литейного процесса. Установленный феномен требует дополнительного тщательного изучения. В дальнейшем планируется детальное исследование свойств полученных материалов и разработка технологий создания конкретных деталей.

Подробные металлографические исследования показали, что в зоне контактирования стали AISI316 и бронзы БрХ0,8 отмечаются области взаимного проникновения компонентов материала друг в друга (рис. 3).

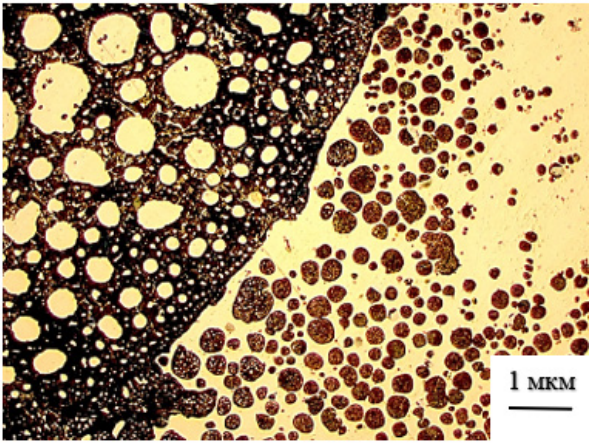



***Рисунок 3.*** *Граница между сталью AISI316 (светлая область) и бронзы БрХ0,8*

На рисунке 3 отчетливо видно, что в сталь AISI316 (светлая область) проникли отдельные кластеры бронзы БрХ0,8 (более темные вкрапления). Установлено, что по мере удаления от границы областей стали AISI316 и бронзы БрХ0,8 размеры кластеров бронзы уменьшаются. В тоже самое время кластеры стали в бронзе более крупные на некотором удалении от границы двух областей, а в непосредственной близости от границы отмечаются мелкие кластеры, которые расположены в виде цепочки вдоль границы.

Также в микроструктуре синтезированных образцов отмечено наличие микропористости на уровне 3,71–8,17%. Микропористость в основном располагается вблизи граница треков (рис. 4).

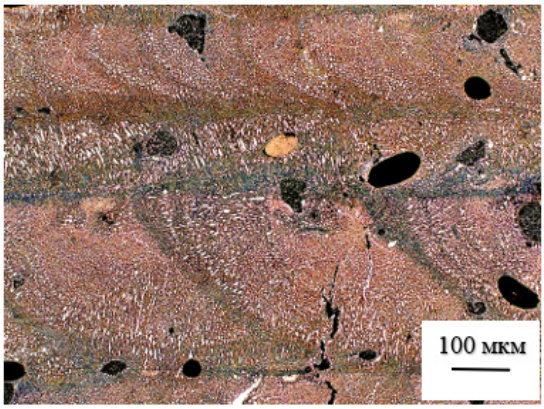



***Рисунок 4.*** *Микропористость на границе смежных треков при выращивании образца*

Твердость образцов по Виккерсу определяли с помощью микротвердомера марки KB50S, который позволяет быстро и точно измерять твердость в автоматическом режиме на любых поверхностях. Проведенные измерения показали следующие результаты: твердость стали AISI316 составляет 552 МПа, твердость бронзы БрХ0,8 – 395 МПа, а твердость синтезированного композиционного материала – 472 МПа.

Для определения коэффициента трения и весового износа использовались образцы в виде дисков толщиной 5 мм и диаметром 45 мм, вырезанные из выращенной заготовки с помощью электроэрозионной обработки непрофилированным инструментом (проволокой).

Штифтодисковые испытания трибологических свойств проводились с помощью штифтодискового трибометра THT800 Anton Paar (рис. 5) при температурах 24°C (комнатная температура), 20–250 °C.

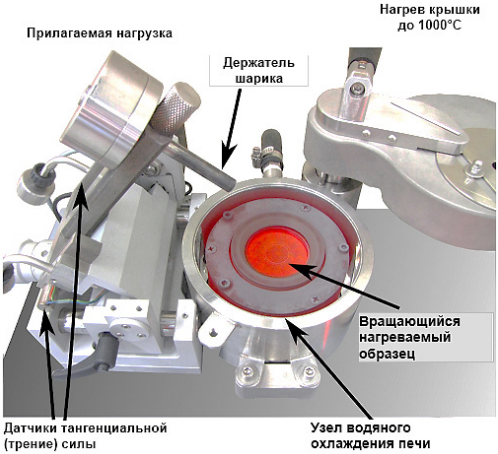



***Рисунок 5.*** *Штифтодисковый трибометр THT1000 с нагреваемыми образцами, представляющий основные компоненты для измерения приложенной силы и тангенциальной силы. Верхний нагреватель используется для быстрого получения максимальной температуры 1000 °C*

Предварительные испытания показали, что использование нормальной нагрузки 7 Н (10 Н для испытаний при 24 °С), глиноземного шарика диаметром 6 мм в качестве контртела и частоте вращения образца 310 об/мин измеряемый износ на большинстве наплавленных слоев.

Продолжительность трибологических испытаний составила 22000 кругов для исследуемых материалов. Общая продолжительность испытания, в зависимости от радиуса дорожки износа, составила от ~ 120 минут до ~ 240 минут.

В условиях сухого трения для исследуемого материала 40% AISI316 и 60% БрХ0,8 определено значение коэффициента трения. Величина коэффициента трения для данных условий испытаний составила 0,27–0,28.

Для композиционного материала системы 40% AISI316 и 60% БрХ0,8 была определена температурная зависимость коэффициента трения (рис. 6). Исходя из полученной зависимости можно отметить, что значение коэффициента трения для данного материала достаточно стабильно в температурном интервале 20–150 °С. Начиная с температуры нагрева 200 °С можно отметить начало нарастания значения коэффициента трения для исследуемого материала.

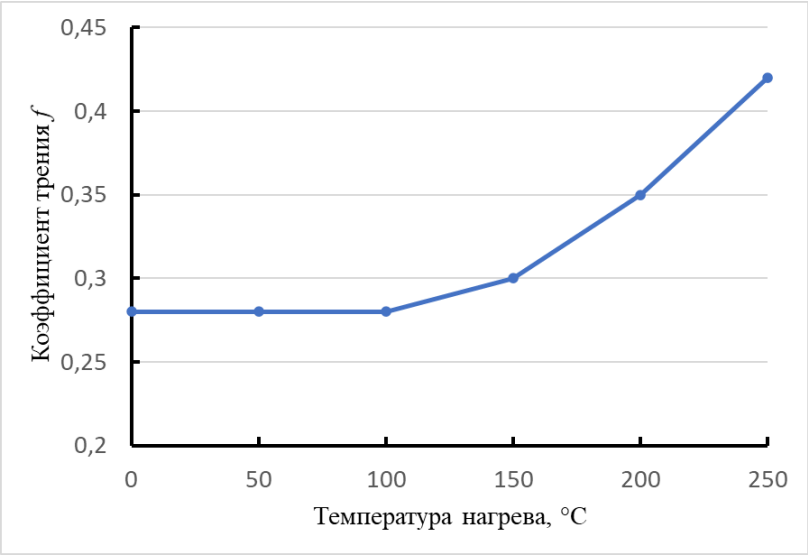



***Рисунок 6.*** *Температурная зависимость коэффициента трения композиционного материала 40% AISI316 и 60% БрХ0,8*

С помощью аналитических весов DL-200 производилось измерение массы образцов до и после испытаний на износостойкость. Перед началом взвешивания весы устанавливались по пузырьковому уровню. Все взвешивания проводились в противосквозняковом боксе с целью исключения влияния давления ветра на результат измерения.

Установлено, что весовой износ полученного композиционного материала составил 0,138 г/м$^3$.

Поверхность трения образца состава 40% AISI316 и 60% БрХ0,8 была исследована с помощью растрового электронного микроскопа с рентгеновским энергодисперсионным спектрометром в режиме высокого вакуума. На поверхности трения исследуемых образцов обнаружено частичное истирание поверхности. Возможно, произошел перенос материала образца на поверхность контртела из стали ШХ15. Интенсивного износа и разрушения поверхностного слоя не наблюдается.

Спектрограмма поверхности трения и анализ состава участка поверхности трения показывают уменьшение содержания меди до 46,28 % и соответственно увеличение содержания железа – до 70,55 %, что можно объяснить возможным явлением избирательного переноса частей медной пленки на поверхность контртела. Также на поверхности трения обнаружены следы хрома – 2,77 %, равномерно распределенные по всей поверхности. Т.е. про-

изошло обогащение поверхности трения одной детали пары трения химическими элементами контртела.

*Результаты получены в процессе выполнения проекта по государственному заданию FZRR-2023-0005 «Разработка основополагающих технологических принципов применения концентрированных потоков энергии для получения новых импортозамещающих композиционных материалов специального назначения на основе систем несмешивающихся компонентов»*

**Литература**

*1. Авраамов Ю.С., Шляпин А.Д., Сплавы на основе систем с ограниченной растворимостью в жидком состоянии (теория, технология, структура и свойства), Монография. – М.: Интерконтакт наука, 2002. – 371 с.*

*2. Авраамов Ю.С., Шляпин А.Д. Новые конструкционные материалы на основе несмешивающихся компонентов: получение, структура, свойства. – М.: РИЦ МГИУ 1999. – 206 с.*

*3. Sprague E. A., Mazumder J., Misra A. Direct-metal-deposited Cu–Fe alloys. // Materials Science and Engineering. 2020. – №10. – P.445–453.*

*4. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Лазерные аддитивные технологии в машиностроении. – М.: Из-во МГТУ им. Н.Э. Баумана 2020. – 350 с.*

**DOI** 10.34660/INF.2025.75.21.184

# ИНТЕРФЕЙС И ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИЙ ОПЫТ В СЕРВИСАХ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ТУРНИРНЫХ СЕТОК

**Быченков Егор Романович**
*магистрант*
*Российский университет транспорта, г. Москва, Россия*
**Медникова Оксана Васильевна**
*кандидат технических наук, доцент*
*Российский университет транспорта, г. Москва, Россия*
**Биленко Александр Васильевич**
*инженер-программист*
*Учебно-научная лаборатория «Моделирование бизнес процессов»*
*Института экономики и финансов;*
*Российский университет транспорта, г. Москва, Россия*

***Аннотация.*** *Сервисы визуализации турнирных сеток являются важным инструментом для упрощения восприятия спортивных событий, в частности, турниров и чемпионатов. Эти сервисы используются для отображения результатов матчей, а также для построения сеток с последующими этапами. Важным аспектом таких сервисов является интерфейс и пользовательский опыт (UX), которые должны способствовать интуитивному восприятию и удобству использования. В статье рассматриваются основные принципы разработки интерфейсов сервисов визуализации турнирных сеток, влияние пользовательского опыта на восприятие информации, а также современные тренды в данной области. Особое внимание уделяется вопросам доступности, мобильных платформ и эффективности визуальных решений.*

***Ключевые слова:*** *интерфейс, пользовательский опыт, турнирные сетки, визуализация, дизайн, доступность, мобильные приложения, UX, сервисы.*

***Annotation.*** *Tournament bracket visualization services are an essential tool for simplifying the perception of sports events, especially tournaments and championships. These services are used to display match results and build brackets with subsequent stages. An important aspect of such services is the interface and user experience (UX), which should contribute to intuitive perception and ease of use. The article discusses the main principles of interface development*

*for tournament bracket visualization services, the impact of user experience on information perception, and current trends in this field. Special attention is paid to issues of accessibility, mobile platforms, and effective visual solutions.*

***Keywords:*** *interface, user experience, tournament brackets, visualization, design, accessibility, mobile apps, UX, services.*

В последние десятилетия рост популярности электронных сервисов визуализации турнирных сеток стал значительным, поскольку такие инструменты позволяют быстро и наглядно отображать результаты спортивных турниров. Правильная визуализация помогает пользователю эффективно ориентироваться в процессе соревнования, отслеживать результаты и прогнозировать будущие матчи. Разработка интерфейса таких сервисов требует учета множества факторов, включая удобство использования, интуитивность, а также правильную подачу информации. Важнейшими аспектами являются не только функциональные возможности, но и пользовательский опыт (UX), который значительно влияет на восприятие интерфейса.

Интерфейс пользователя является важным элементом в системе взаимодействия между пользователем и сервисом. В контексте визуализации турнирных сеток интерфейс должен обеспечить легкий доступ к информации о результатах матчей, а также обеспечить простоту взаимодействия с различными этапами турнира. Использование четких визуальных элементов, таких как цветовая кодировка, иерархия, а также возможность интерактивного взаимодействия, помогает пользователю лучше воспринимать информацию.

Пользовательский опыт (UX) включает в себя все аспекты взаимодействия пользователя с сервисом, включая восприятие интерфейса, удобство и эффективность работы с платформой. Важно, чтобы интерфейс был интуитивно понятным, а визуализация турнирных сеток — легко воспринимаемой и адаптируемой к потребностям пользователя. Это включает в себя как представление сетки в виде таблиц или деревьев, так и возможность настраивать отображение информации в зависимости от предпочтений пользователя.

Одним из ключевых принципов разработки интерфейсов является простота использования. Пользователи должны без труда ориентироваться в системе и понимать, как пользоваться сервисом. Поэтому визуализация турнирных сеток должна быть четкой, без перегрузки информацией. Элементы интерфейса должны быть понятными, а само взаимодействие - логичным и последовательным.

Современные пользователи ожидают, что сервисы будут доступны на разных устройствах, включая мобильные телефоны и планшеты. Адаптивный дизайн интерфейса, который корректно отображается на различных экранах, является важным фактором при разработке сервисов визуализации турнирных сеток.

Интерактивные элементы позволяют пользователю не только просматривать сетку, но и взаимодействовать с ней: переходить между этапами турнира, фильтровать информацию, просматривать подробности о матчах и участниках. Это добавляет динамичности и улучшает опыт пользователей.

С развитием технологий появляется все больше инструментов, которые позволяют создавать визуализации с использованием интерактивных элементов, анимации и других инновационных решений. Например, сервисы визуализации турнирных сеток могут использовать карты, 3D-графику и другие визуальные эффекты для улучшения восприятия информации. Кроме того, в последние годы активно развиваются искусственный интеллект и машинное обучение, которые могут помогать в автоматическом построении турнирных сеток и анализе данных.

Интерфейс и пользовательский опыт являются важнейшими аспектами при разработке сервисов визуализации турнирных сеток. От удобства интерфейса и интуитивности взаимодействия зависит, насколько эффективно пользователи смогут воспринимать информацию о турнире. Адаптивность, доступность и интерактивные элементы играют ключевую роль в создании успешных сервисов. В будущем можно ожидать дальнейшее развитие технологий и улучшение интерфейсов, что сделает использование таких сервисов еще более комфортным.

**Список использованных источников**

*1. Морозова, С. П. Современные тенденции в веб-дизайне / С.П. Морозова. – Текст // Журнал «Информационные технологии». – 2021. – № 15(2). – С. 45-58.*

*2. Стрельникова, В. Э. Адаптивный дизайн в проектировании интерфейсов / В. Э. Стрельникова. – Текст // Молодой ученый. – 2020. – № 25 (315). - С. 68-70.*

**DOI** 10.34660/INF.2025.38.24.185

# ИССЛЕДОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ АЛГОРИТМОВ И МЕТОДОВ СЕТЕВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ: АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

**Быченкова Маргарита Игоревна**
*магистрант*
*Российский университет транспорта», г. Москва, Россия*
**Медникова Оксана Васильевна**
*кандидат технических наук, доцент*
*Российский университет транспорта, г. Москва, Россия*
**Медников Дмитрий Андреевич**
*кандидат технических наук, фронтенд разработчик*
*«Сравни.ру», г. Москва, Россия*

***Аннотация.*** *Статья посвящена исследованию современных алгоритмов и методов сетевого планирования, которые применяются в строительных проектах. Авторы анализируют потенциал методологий, включая метод критического пути (Critical Path Method, CPM), метод програмно-целевого анализа (PERT) и их интеграцию с информационными потоками. Рассматриваются преимущества для строительства, ограничения и перспективы развития инновационных решений в области сетевого планирования.*

***Ключевые слова:*** *сетевое планирование, CPM, PERT, информационные технологии, строительство.*

***Annotation.*** *The article is devoted to the study of modern algorithms and methods of network planning used in construction projects. The authors analyze the potential of methodologies, including the Critical Path Method (CPM), Program Evaluation and Review Technique (PERT), and their integration with information flows. The advantages for construction, limitations, and prospects for the development of innovative solutions in the field of network planning are discussed.*

***Keywords:*** *network planning, CPM, PERT, information technologies, construction.*

Сетевое планирование стало критически важным элементом успешной реализации сложных строительных проектов. Оно обеспечивает четкое определение сроков, ресурсов и задач, а также обнаружение потенциальных проблем и задержек. С развитием современных технологий сетевое планирование получает новые возможности и перспективы. Введение инновационных алгоритмов позволяет повысить точность прогнозирования, оптимизировать процессы и минимизировать риски.

Современные методы сетевого планирования включают метод критического пути (CPM) и метод программно-целевого анализа (PERT). Метод критического пути позволяет выделить ключевые задачи, определяющие минимальную продолжительность проекта. Он широко используется для создания графиков выполнения работ и управления проектами. Метод программно-целевого анализа направлен на оценку временных параметров выполнения проекта при наличии неопределенности. PERT особенно полезен в ситуациях, где требуются расчеты вероятностных сроков выполнения задач. Современные IT-решения позволяют автоматизировать сбор и анализ данных, что улучшает качество планирования и контроля выполнения проектов.

Применение методов сетевого планирования в строительстве обеспечивает оптимизацию процессов. Алгоритмы помогают минимизировать временные затраты на выполнение задач и согласование этапов. Четкое распределение материалов, оборудования и трудовых ресурсов предотвращает перерасход и задержки. Сетевое планирование позволяет выявить узкие места и потенциальные проблемы на ранних этапах. Информация о ходе выполнения проекта становится доступной в режиме реального времени, что позволяет принимать своевременные управленческие решения.

Однако существуют и ограничения: необходимость в высококвалифицированных специалистах, требование к качеству исходных данных и высокая стоимость внедрения и поддержки современных технологий.

Будущее сетевого планирования связано с дальнейшей цифровизацией строительной отрасли. Возможные направления развития включают расширение использования искусственного интеллекта для автоматизации процессов планирования, углубленную интеграцию с BIM для создания комплексных цифровых двойников проектов и разработку облачных платформ для совместной работы над проектами в режиме реального времени.

Современные методы и алгоритмы сетевого планирования играют ключевую роль в повышении эффективности строительства. Их внедрение позволяет оптимизировать сроки, ресурсы и повысить качество реализуемых проектов. В условиях цифровой трансформации строительной отрасли важным направлением остается развитие технологий, обеспечивающих интеграцию сетевого планирования с информационными потоками и другими инновационными инструментами.

**Список использованных источников**

*1. Жаров, Я. В. Алгоритмизация систем планирования, управления и обработки информации в строительстве / Я. В. Жаров. – Текст // Новые технологии в строительстве. – 2024. – №10(1). – С. 34-43.*

*2. Омельченко, Д. Ю. Обзор задачи оптимизации планирования строительных работ на основе модели сетевого графа / Д. Ю. Омельченко. – Текст // Экономика. Информатика. – 2024. – №51(3). –С. 682–698.*

**DOI** 10.34660/INF.2025.39.59.186

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОДЕЛИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ КИБЕРПЛОЩАДКИ НА БАЗЕ УНИВЕРСИТЕТА

**Файзуллаев Аскар Фарходович**
*магистрант*
*Научный руководитель –* **Белаш Виктория Юрьевна**
*кандидат педагогических наук, доцент*
*Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского*

***Аннотация.*** *В статье рассматривается процесс проектирования информационной системы для киберплощадки на базе университета. В современных реалиях, когда киберспорт получил широкое распространение, проявляется необходимость внедрения такой системы в каждом учебном заведении, заинтересованном в организации и проведении подобных турниров.*

*Автор уделяет особое внимание комплексному подходу к обеспечению максимальной производительности системы и комфорта пользователей при эксплуатации, а также организации хранения данных. Основные методы увеличения производительности, которые выделены автором: улучшение персональных компьютеров, стабильность интернет-соединения и качественно сформированная информационная система. Особенно важна стабильность работы, так как это играет ключевую роль в реализации киберплощадки.*

***Ключевые слова:*** *интерфейс, информационная система, киберплощадка, производительность, турнир.*

Проектирование модели информационной системы (ИС) киберплощадки на базе университета – это процесс создания детального плана структуры, функциональности, хранения данных и взаимодействия компонентов системы для обеспечения эффективной работы информационной системы для киберплощадки.

Кибер клуб на базе университета – это важный шаг в развитии киберспорта. Эта система позволяет грамотно и продуктивно организовать турнир и провести обучение игроков, а также поспособствовать развитию органи-

зации в своем университете. Важным аспектом при этом является стабильность, которая понимается в следующем плане:

1. Стабильная работа компьютеров, интернета, сети в общем.
2. Уборка периферии.
3. Очистка самих компьютеров.
4. Стабильная помощь от администратора.

Все это является важной частью работы киберплощадки.

В рамках проектирования модели информационной системы киберплощадки необходимо определить следующие аспекты:

1. Функциональные требования к системе – полное оснащение системы различными функциями, которые предоставляются пользователю.
2. Требования к безопасности – обеспечение защиты данных пользователей, а также системы от внешних угроз.
3. Требования к производительности – обеспечение эффективной работы системы при большом количестве пользователей и нагрузке на сервер.
4. Требования к интерфейсу – реализация удобного и понятного интерфейса для пользователей.
5. Требования к расширяемости – возможность дальнейшего развития системы и добавления новых функций и возможностей.

Для проектирования модели информационной системы сайта кибер клуба используются различные методы и нотации моделирования, такие как UML (Unified Modeling Language), ER-моделирование (Entity-Relationship), DFD (Data Flow Diagrams) и другие.

Важным аспектом проектирования модели информационной системы является учет требований заказчика, а также возможностей и ограничений выбранной технологии разработки сайта кибер клуба. Все аспекты проектирования должны быть документированы в техническом задании на разработку системы.

Для создания ИС нам будет нужна команда разработчиков. Перед началом разработки следует подготовить техническое задание. Представим разрабатываемую модель сайта, в виде диаграммы в нотации IDEF0 (Рис.1).




***Рисунок 1.*** *Контекстная диаграмма для процесса создания информационной системы*

Контекстная диаграмма описывает процессы создания информационной системы. Проведем её анализ:

1. Центральный процесс: «Создание ИС для кибер площадки». Это основная часть диаграммы.
2. Входы: «Информация о установленных играх», «Техническое задание», «Эрогономичность». Это данные, которые поступают для создания системы.
3. Выходы: «Панель управления для администратора», «Опубликованная ИС». Это готовая информационная система.
4. Механизмы: «Среда разработки», «Группа разработки». Инструменты и технологии, используемые для создания информационной системы.

Опираясь только на данную модель, не до конца понятно, что и как устроено. Поэтому для более подробного описания процесса создания ИС следует привести пример диаграммы рабочих процессов в нотации IDEF3 (Рис. 2).

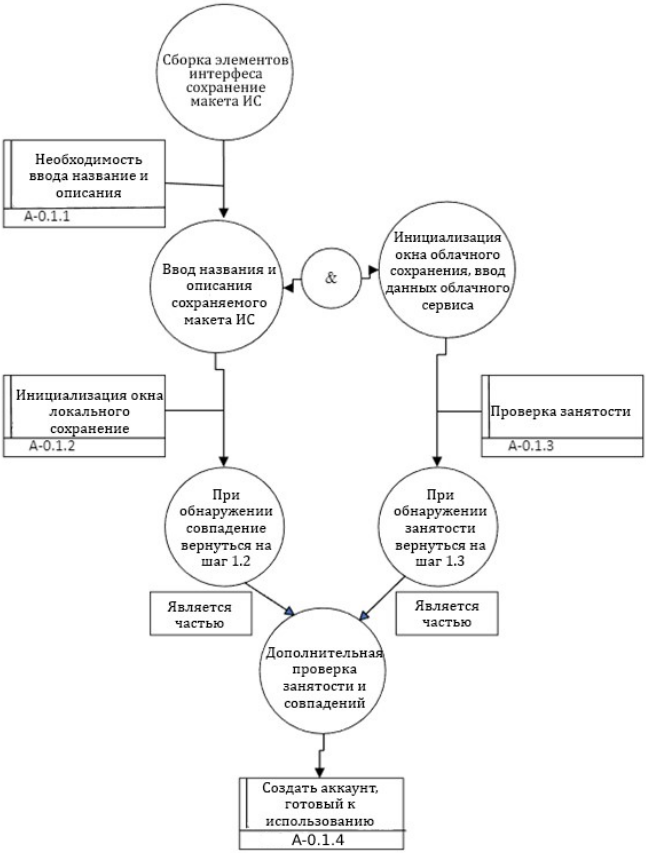



***Рисунок 2.*** *Диаграмма рабочих процессов в нотации IDEF3*

На данном этапе моделирования уже представлена авторизация и связанные с этим действия программы.

Теперь следует создать диаграмму деятельности в нотации UML. Эта нотация обладает рядом преимуществ, например:

- Возможность рассмотреть задачу с разных сторон.
- Простое чтение диаграмм, ничего лишнего.
- Позволяет сократить число ошибок подпрограмм.
- Учитывая, что это объектно-ориентированный язык все методы описания близки к способам программирования на современных языках.

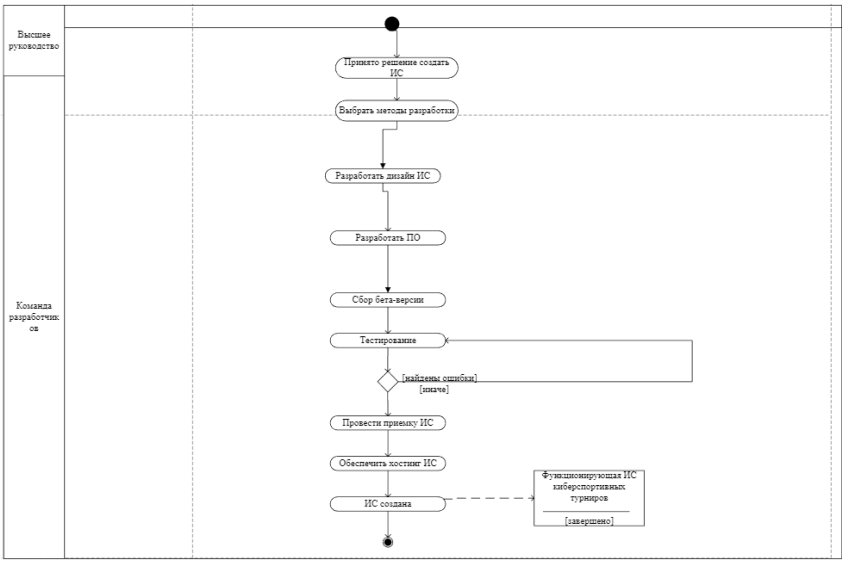



***Рисунок 3.*** *Диаграмма деятельности на языке UML*

Учитывая приведенные диаграммы, можно сформулировать следующие аспекты, на которые нужно обратить внимание в процессе проектирования информационной системы:

- В системе должна быть реализована авторизация для обеспечения безопасности хранения данных;
- Для системы нужен высокоскоростной, безопасный хостинг;
- Потребуется база данных MySQL.

Важно обратить внимание на безопасность базы данных, так как в ней будут храниться конфиденциальные данные. Современные угрозы информационной безопасности, такие как SQL-инъекции, требуют комплексного подхода к защите данных [4, С. 10–12]. Исследования показывают, что 67% утечек в образовательных учреждениях связаны с недостаточной настройкой прав доступа [6, С. 32].

Параметризованные запросы – использование подготовленных выражений (prepared statements) в MySQL снижает риск эксплуатации уязвимостей [4, С. 14]. Например, функция mysqli_prepare() позволяет отделить код от данных [2, С. 57].

Шифрование данных – встроенные функции MySQL, такие как AES_ ENCRYPT(), обеспечивают защиту конфиденциальной информации на уровне СУБД [2, С. 58-60]. Для передачи данных рекомендуется настраивать SSL/TLS-соединения [5, С. 18].

Аудит доступа – регулярная проверка прав пользователей в соответствии с принципом минимальных привилегий (PoLP) – ключевое требование стандарта ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001—2021, с. 22 1, с. 48–49.

**Заключение**

Реализация данной информационной системы позволит университетам значительно упростить организацию и проведение киберспортивных турниров, снизить затраты на поиск и аренду сторонних площадок, а также создать удобную платформу для обучения и развития студентов и других участников университетского сообщества в области киберспорта.

Отсутствие прямых аналогов проектируемой системы свидетельствует о необходимости продолжения работы в данном направлении и доведения ее до стадии тестирования и выпуска в массовое использование в общественных организациях любого уровня и любой структуры.

Таким образом, информационная система «Киберклуб на базе университета» является важным инструментом для университетов, которые стремятся развивать и поддерживать киберспортивную культуру среди своих студентов и участников университетского сообщества. Представленная система позволяет университетам создать свой собственный киберклуб, снизить затраты на организацию турниров и обучение, а также повысить уровень вовлеченности и развития участников в сфере киберспорта.

**Список используемых источников**

*1. Серебрякова Т.А., Щепилова Н.И. Актуальные вопросы защиты информации в системах управления базами данных // Вопросы устойчивого развития общества. 2021. № 3. С. 45–51.*

*2. Климов А.В., Новиков Д.С. Методологии обеспечения безопасности в системах управления базами данных // Информационная безопасность. 2023. № 2. С. 56–62.*

*3. Васильев П.К., Белова Е.Р. Современные подходы к защите данных в распределённых СУБД // Byzoni. 2025. № 5. С. 88–94.*

*4. Пантюхин М.А. SQL Injection: основы, угрозы и современные подходы к защите // Научный журнал «Аспект». 2024. № 4. С. 10–15.*

*5. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001—2021. Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Системы менеджмента информационной безопасности. Требования. М.: Стандартинформ, 2021. 38 с.*

*6. Микков А.Д. Кибербезопасность в образовательных учреждениях: вызовы и решения // Научный журнал «Аспект». 2024. № 2. С. 30–37.*

**DOI** 10.34660/INF.2025.24.79.187

# МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ МИНЕРАЛЬНОГО ПОРОШКА В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА

**Самуйленко Полина Арсеновна**
*магистрант*
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

***Аннотация.*** *Снижение эксплуатационных характеристик асфальтобетона во многом связано с снижением качества составляющих его компонентов. Минеральный порошок определяет стоимость и характеристики асфальтового вяжущего вещества. Качество минерального порошка зависит от характеристик сырья и технологических режимов при производстве. Для нивелирования степени разброса физико-механических показателей минерального порошка требуется внедрение методик управления качеством при его производстве. Описанная в статье методика позволяет повысить качество продукции со сниженными показателями качества за счет применения к ней метода химической активации. Применение методики на предприятии-изготовителе делает возможным производство высококачественных порошков сразу двух марок: МП-1 и МП-2 (ГОСТ 32761-2014).*

***Ключевые слова:*** *минеральный порошок, технологические процессы, управление качеством, производство, химическая активация минерального порошка.*

## Введение

В статье рассматривается вопрос необходимости внедрения методик управления качеством при производстве минерального порошка. Характеристики минерального порошка определяются вариабельностью физико-химических показателей сырья и технологических режимов производства. Для усреднения качественных показателей продукции рекомендуется использовать методы управления качеством при производстве. Применение таких методик гарантирует постоянное соответствие продукции стандартам качества и минимизирует риск получения бракованной продукции. Целью исследования является разработка нового подхода к управлению качеством минерального порошка в процессе производства, основанного на применении метода химической активации порошка.

**Проблемы, связанные с качеством минерального порошка**

Вопрос разработки методик управления качеством минерального порошка стал актуален в связи с растущими требованиями к качеству асфальтобетона. Согласно Постановлению Правительства РФ №658 от 30.05.2017 [1] срок службы автодорог увеличен до 24 лет, что объясняет необходимость разработки более прочных составов асфальтовых смесей. Минеральный порошок определяет ряд эксплуатационных характеристик асфальтобетона, таких как морозостойкость, прочность, трещиностойкость. А так же определяет необходимое количество битума для приготовления смеси. [2]

Качество производимого минерального порошка регламентируется ГОСТ Р 52129-2003 «Порошок минеральный для асфальтобетонных и органоминеральных смесей. Технические условия» и ГОСТ 32761-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Порошок минеральный. Технические требования» [3],[4]. В нормативной документации минеральные порошки по качеству и типу сырья делятся на марки.

Контроль качества при производстве минеральных порошков обычно включает системный подход, который охватывает несколько критических этапов: проверку сырья, контроль за производством и анализ готовой продукции. Проблемы в контроле качества минеральных порошков включают в себя изменчивость сырья, сложность производственных процессов и необходимость точной оценки качества. Сосредоточение внимания на характеристиках сырья и контроле процессов имеет решающее значение для предотвращения дефектов и оптимизации эффективности производства. [5]

Среди проблем, приводящих к снижению качества минерального порошка были выделены :

1. Физико-химическая неоднородность сырья.

Наличие в сырье для производства минерального порошка оксидов щелочноземельных металлов определяет их структурирующую способность и степень сродства с битумом. Чем выше структурирующая способность порошка, тем выше его привлекательность для потребителей [6]. Поэтому важно обеспечить однородность сырья по степени содержания оксидов кальция и магния. Достичь этого можно за счет применения интеллектуальных систем управления качеством добываемого сырья [7].

2. Неравномерность степени помола минерального порошка.

Важнейшей особенностью минерального порошка является развитая удельная поверхность, позволяющая связываться с частицами битума. Мерой оценки удельной поверхности является гранулометрический состав минерального порошка, который во многом зависит от типа и режимов работы помольного оборудования [8]. Наилучшими считаются шаровые мельницы [8],[9]. Интеграция автоматизации линии производства предоставляет воз-

можности для отслеживания и управления степенью помола сырья, однако является очень дорогостоящей в реализации [10].

Вопросу разработки технологий и методов управления качеством посвящено множество исследований, предлагающих организационные и экономические методы управления производством, например, использование регламентов [11]. Однако, предложенные методики не решают вопросы связанные с причиной изменения качества минерального порошка – неоднородностью сырья и технологическими особенностями производства. В условиях недостатка методологии и проблем с усреднением качественных характеристик порошка целью исследования становится создание методики, сочетающей в себе мониторинговые мероприятия с наукоемкими и технологичными методами управления качеством минерального порошка в процессе его производства.

**Описание методики**

Разработанная методика управления качеством производства минерального порошка основана на применении метода химической активации к продукции низкого качества. Оценка качества минерального порошка предполагается за счет использования интегрального показателя качества и его оптимизации за счет химической активации порошка. Суть метода активации состоит в добавлении в горячий порошок анионных или катионных ПАВ или готовых химических добавок [12]. За счет применения метода активации повышается удельная поверхность частиц порошка и снижается его битумоемкость.

Интегральный показатель качества – это обобщенный показатель качества наиболее важных характеристик вычисляемых по степени их близости к идеальным характеристикам [13]. В качестве характеристик, иллюстрирующих качество минерального порошка были выбраны:

1)Гранулометрический состав, то есть степень помола фракции мельче 0,063 сита.

2)Битумоемкость порошка. От битумоемкости минерального порошка зависит расход битума - самого дорогостоящего компонента в асфальтовом вяжущем.

3) Содержание активных соединений оксида кальция и магния.

Для каждого из выделенных показателей предлагаются эталонные значения частных показателей качества $\{p_i^{e0}\}$ на основе требований ГОСТ или нормативной документации производителя. При этом фактическое значение каждого отдельного частного показателя $p_i^e$должно удовлетворять условию:

$$p_i^{e\,min} \le p_i^e \le p_i^{e\,max}, \quad (1)$$

где $p_i^{e\,min}$, $p_i^{e\,max}$–минимальное и максимальное значение i-го частного показателя;.$i = 1,2,\dots,m^e$

Предполагается нормирование значений частных показателей, в соответствии с выражениями:

для максимизируемых частных показателей, увеличение которых обуславливает повышение качества минерального порошка

$$q_i^{e(a)} = \frac{p_i^{e(a)}}{p_i^{e(a)0}}, i \in \{1,2,\dots,m^{e(a)}\} \quad (2)$$

для минимизируемых частных показателей, увеличение которых обуславливает снижение качества минерального порошка

$$q_i^{e(a)} = \frac{p_i^{e(a)0}}{p_i^{e(a)}}, i \in \{1,2,\dots,m^{e(a)}\} \quad (3)$$

Для расчета обобщенного критерия качества минерального порошка целесообразно использовать аддитивную свертку частных показателей

$$Q^{mp} = \sum_{i=1}^{m} a_i^e \cdot q_i^e = \sum_{i \in I^{e\,max}} a_i^e \cdot \frac{p_i^e}{p_i^{e0}} + \sum_{i \in I^{e\,min}} a_i^e \cdot \frac{p_i^{e0}}{p_i^e} \to 1 \quad (4)$$

где $Q^{mp}$- значение обобщенного критерия оценки качества минерального порошка;

$a_i^e$ - значение коэффициента значимости i-того частного показателя качества;

$q_i^e$ - нормированное значение i-того частного показателя качества;

$p_i^e$ - фактическое значение i-того частного показателя качества;

$p_i^{e0}$ - эталонное значение i-того частного показателя качества;

$I^{e\,max}, I^{e\,min}$ - множество значений индекса для минимизируемых и максимизируемых частных показателей качества

Для получения интегрального показателя качества требуется выполнить расчет коэффициентов значимости для каждого из частных показателей $a_i^e$. Расчет коэффициентов значимости и их ранжирование предлагается определить методом опроса экспертной группы с последующим анализом. [14] Ранжирование полученных в результате расчета значений обобщенного показателя качества предлагается с использованием шкалы значимости Харрингтона. [15]

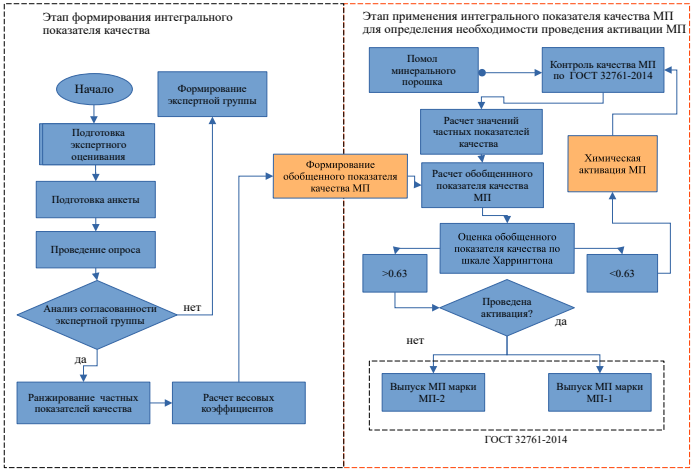



***Рисунок 1.*** *Схема методики управления качеством производства минерального порошка с применением метода химической активации.*

Применение методики в процессе производства предполагает принятие решения о химической активации порошка после помола партии доломита до состояния порошка. Образец с производства поступает на контроль качества, где проводят испытания порошка по ГОСТ 32761-2014 для количественной оценки значений частных показателей качества и сопоставления их с нормативными значениями. При соответствии показателей качества порошка требованиям ГОСТ, становится возможен расчет интегрального показателя качества на основе нормированных частных показателей качества порошка с использованием весовых коэффициентов, определенных экспертами. При несоответствии показателей качества минерального порошка требованиям ГОСТ, партия подлежит браковке и дальнейшие этапы методики на бракованную партию не распространяются.

После расчета интегрального показателя качества минерального порошка производится его оценка по шкале желательности Харрингтона. По результатам оценки главный технолог принимает решение о применении химического активатора минерального порошка. Чем меньше оценка по шкале желательности Харрингтона, тем более высокая концентрация активатора рекомендуется для повышения качества минерального порошка.

После добавления активирующей добавки необходимо провести повторный контроль качества минерального порошка. При достижении значения интегрального показателя качества минерального порошка оценки “хорошо” и выше по шкале желательности Харрингтона возможен выпуск продукции.

При этом, если минеральный порошок был активирован, то он классифицируется маркой МП-1 (ГОСТ 32761-2014) , если же изначально после помола порошок имел высокие качественные показатели и по результатам оценки интегрального показателя качества продемонстрировал оценку “хорошо” по шкале желательности Харрингтона – то принимается решение о выпуске продукции марки МП-2 (ГОСТ 32761-2014) и такой порошок считается неактивированным.

**Заключение и результат**

Для нивелирования физико-механических показателей и повышения качества производство минерального порошка требует внедрения методик управления качеством производства. Проблемы в управлении качеством минерального порошка состоят в неоднородности сырья по химическим показателям и в различии качества удельной поверхности порошка при помоле.

Разработана методика, основанная на применении метода химической активации к продукции низкого качества, что способствует снижению битумоемкости и повышению удельной поверхности частиц порошка. Оценка качества производимого порошка происходит за счет формирования интегрального показателя качества и его ранжировании по шкале Харрингтона.

Полученная методика позволит в будущем производить порошок 2-х марок (активированный и неактивированный) с высокими усредненными показателями качества. Однако, требуется экспериментальная апробация методики на данных, полученных с производства минерального порошка.

**Вывод**

Методика, построенная на управлении качеством производства минерального порошка за счет применения метода химической активации, позволяет нивелировать вариабельность физико-химических показателей минерального порошка и предлагает потенциальное решение проблемы снижения качества асфальтобетона. Предложенная методика в отличие от разработанных ранее позволяет управлять технологическим процессом, основываясь на анализе обобщенного показателя качества порошка, способствующего принятию технологами проектных решений в процессе производства. Основополагающей является идея не только об управлении, но и о повышении качества продукции с минимальными затратами и максимальным эффектом. Полученный за счет химической активации порошок марки МП-1 по ГОСТ 32761-2014 обладает улучшенными характеристиками по отношению к МП-2 и является наиболее предпочтительным для производства асфальтобетонных смесей. Необходимо провести дальнейшую апробацию методики на производствах минерального порошка из различного сырья, для подтверждения ее универсальности, работоспособности и воспроизводимости результатов. Особенно актуален вопрос внедрения активации в Северо-Западном регионе, где прослеживается рост динамики темпов производства как порошка, так и асфальтобетона.

**Список литературы**

*1. О нормативах финансовых затрат и Правилах расчета размера бюджетных ассигнований федерального бюджета на капитальный ремонт, ремонт и содержание автомобильных дорог федерального значения: постановление Правительства Российской Федерации от 30.05.2017 № 658//Гарант.ру: информационно-правовой портал: сайт. URL: https://base.garant.ru/71689744/ (дата обращения: 18.09.2024).*

*2. Гезенцвей Л.Б. Дорожный асфальтобетон / Л.Б. Гезенцвей, Н.В. Горелышев, А.М. Богуславский, И.В. Королев. – М.: Транспорт, 1985. – 350 с*

*3. ГОСТ Р 52129-2003. Порошок минеральный для асфальтобетонных и органоминеральных смесей. Технические условия (с Поправкой) : принят и введен в действие Постановлением Госстроя России от 27 июня 2003 г. N 119 : дата введения 2003-10-01. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200034281?section=text&marker=64U0IK (дата обращения: 15.05.2024). – Текст : электронный.*

*4. ГОСТ 32761–2014. Дороги автомобильные общего пользования. Порошок минеральный. Технические требования : введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 24 сентября 2014 г. № 1204-ст : дата введения 2015-02-01. – URL: https://www.euro-test.ru/Pub.Lib/Normativ_docs/GOST32761.pdf (дата обращения: 15.05.2024). – Текст : электронный.*

*5. Исмаилов А.М. Методы управления качеством технологических процессов приготовления и транспортировки асфальтобетонных смесей на основе теории рисков: дисс. канд. техн. наук: 2.1.8.. - СПб., 2023. - 241 с.*

*6. Галдина, В.Д. Минеральные порошки из горючих сланцев / В.Д. Галдина, Е.В. Гурова, О.И. Кривонос, Е.Н. Терехова, Г.В. Плаксин, Е.А. Райская // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2015. – № 2. – С. 20–24.*

*7. Макаров В. А. Динамическая система управления качеством минерального сырья / В. А. Макаров, Е. Г. Малиновский, И. И. Кацер, Г. С. Курчин, А. В. Ефимов // Журнал СФУ "Техника и технологии". – 2016. – №9(1). – С.126-132.*

*8. Битуев, А. В. Влияние структурирующей способности минерального порошка на физико-механические свойства асфальтобетона / А. В. Битуев, Е. В. Харитонова // Образование и наука. Технические науки : материалы национальной научно-практической конференции ВСГУТУ, Улан-Удэ, 14–15 апреля 2020 года. – Улан-Удэ: Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, 2020. – С. 63-67.*

*9. Батаев Д. К. С. Влияние степени дисперсности минеральных порошков природного и техногенного происхождения на свойства вяжущей щелочной системы / Д. К. С. Батаев, С. А. Ю. Муртазаев, М. Ш. Саламанова, С. А. Алиев // Вестник КНИИ РАН. – 2020. – № 3(3). – С. 16-29.*

*10. Остроух, А. В. Автоматизированная система управления измельчительной установкой для завода по изготовлению минерального порошка / А. В. Остроух // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 4-3. – С. 536-539.*

*11. Ефимов В.В. Средства и методы управления качеством. М.: КНОРУС, 2007.*

*12. Ушаков, В.В. Устройство асфальтобетонных покрытий при пониженной температуре воздуха: учеб. пособие / В.В. Ушаков, В.А. Ярмолинский. – М.: МАДИ, 2018. – 104 с*

*13. Оденбах И.А. Интегральные показатели качества процесса "Мобильное образование" // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2011. – № 2 (121). – С.259-262.*

*14. Данелян Т. Я. Формальные методы экспертных оценок // Статистика и экономика. 2015. – № 1. – С. 183-187.*

*15. Пичкалев А. В. Обобщенная функция желательности Харрингтона для сравнительного анализа технических средств/ А. В. Пичкалев // Космические аппараты и технологии. – 2012. – №1. – С.25-28.*

**DOI** 10.34660/INF.2025.90.89.188

# ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ РЕКЛАМНЫХ УСЛУГ: ЗНАЧИМОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВЫ В 2025 ГОДУ

**Липагин Никита Сергеевич**
*студент*
*Калужский государственный университет имени К.Э. Циолковского*
*Калуга, Россия*

С каждым годом мир рекламы становится все более динамичным и многогранным. В условиях стремительного роста числа пользователей интернета и постоянного развития технологий, реклама приобретает новые формы и методы воздействия на целевую аудиторию. Прогнозируется, что к 2025 году количество интернет-пользователей превысит 6 миллиардов, что создаст уникальные возможности для рекламных агентств и бизнеса в целом. В этой статье подробно рассмотрим значимость веб-приложений для предоставления рекламных услуг, их влияние на рынок и потребительские предпочтения, а также определим ключевые цели нашего исследования.

Основная цель данной статьи заключается в глубоком анализе значимости веб-приложений для рекламных услуг в контексте современных тенденций и прогнозов на 2025 год. Для достижения этой цели следует реализовать несколько задач:

1. Изучение изменения потребительских предпочтений:

Мы проанализируем, как современные потребители воспринимают рекламу и какие факторы влияют на их выбор.

2. Анализ технологических достижений:

Рассмотрим, как технологии искусственного интеллекта (AI) и машинного обучения (ML) могут быть интегрированы в веб-приложения для повышения эффективности рекламных кампаний.

3. Оценка конкурентной среды:

Исследуем текущее состояние рынка рекламных услуг, выявим ключевых игроков и их стратегии.

4. Обзор существующих платформ:

Проанализируем популярные платформы для размещения рекламы и их возможности для таргетинга и аналитики.

5. Выявление текущих трендов в онлайн-рекламе:

Определим основные направления развития онлайн-рекламы, включая персонализацию контента и использование видеоконтента.

6. Определение целевой аудитории:

Охарактеризуем различные сегменты целевой аудитории, которые могут быть заинтересованы в рекламных услугах.

7. Формулирование рекомендаций:

Предложим рекомендации для рекламных агентств по использованию веб-приложений с целью повышения эффективности своих кампаний.

Современные потребители становятся все более требовательными к рекламе. Исследования показывают, что более 80% пользователей предпочитают получать рекламу, соответствующую их интересам и потребностям. Это подчеркивает необходимость персонализированного подхода к рекламе, который может быть реализован с помощью веб-приложений. Такие решения позволяют рекламным агентствам разрабатывать индивидуальные медиапланы и обеспечивать качественное обслуживание клиентов.

Кроме того, важно отметить, что пользователи все чаще обращают внимание на контент, который они видят в интернете. Они ищут не просто информацию о продукте или услуге, но также ценят развлекательный аспект рекламы. Это создает необходимость в создании креативного контента, который будет не только информативным, но и увлекательным.

Технологии искусственного интеллекта (AI) и машинного обучения (ML) продолжают трансформировать рынок рекламы. Эти технологии позволяют создавать более точные и эффективные рекламные кампании за счет анализа больших объемов данных о поведении пользователей. Веб-приложения могут интегрировать эти технологии для оптимизации рекламных стратегий в реальном времени.

Например, AI может анализировать поведение пользователей на сайте или в приложении и предлагать наиболее релевантные объявления именно тем пользователям, которые с высокой вероятностью заинтересуются продуктом или услугой. Это значительно повышает эффективность рекламы и снижает затраты на привлечение клиентов.

Помимо внедрения искусственного интеллекта в рекламные кабинеты, такие как «Яндекс.Директ» и «ВКонтакте», AI не просто автоматизирует процессы, но и значительно повышает их эффективность. Например, он способен быстро обрабатывать анкеты потенциальных клиентов, транскрибировать текст и заносить данные в таблицы, что сокращает время выполнения этих задач до 15 минут.

Кроме того, искусственный интеллект проводит глубокий анализ целевой аудитории и конкурентов за считанные секунды. Если раньше на выполнение таких задач уходило в среднем два дня, то теперь этот процесс зани-

мает всего 10-15 минут, включая возможность задавать уточняющие вопросы. AI также позволяет проверять разработанные веб-приложения и вносить необходимые коррективы, что делает их более эффективными и удобными для пользователей.

Благодаря внедрению ИИ компании могут существенно сократить расходы на штатных сотрудников и оптимизировать скорость запуска рекламных кампаний. Это не только повышает общую продуктивность работы, но и позволяет сосредоточиться на стратегическом развитии бизнеса, оставляя рутинные задачи на плечах умных технологий. Искусственный интеллект становится надежным партнером в мире рекламы, открывая новые горизонты для роста и успеха.

Таким образом, интеграция ИИ в рекламные процессы не только упрощает работу агентств, но и создает новые возможности для креативного подхода к рекламе. В условиях быстро меняющегося рынка компании, использующие AI-технологии, получают значительное конкурентное преимущество, позволяя им быть на шаг впереди своих соперников.

С увеличением числа компаний, предлагающих аналогичные товары и услуги, необходимость выделяться на фоне конкурентов становится критически важной. Эффективные рекламные кампании могут значительно повысить видимость бренда и привлечь новых клиентов. Веб-приложения предоставляют инструменты для таргетинга и аналитики, которые помогают рекламным агентствам находить свою целевую аудиторию.

На сегодняшний день рынок рекламы насыщен как крупными международными игроками с обширными ресурсами, так и небольшими локальными компаниями с узкой специализацией. Это создает высокую конкуренцию по ценам и качеству услуг. Агентства должны постоянно совершенствовать свои предложения и повышать качество обслуживания клиентов для достижения успеха.

На рынке уже существуют различные платформы для размещения рекламы:

1. ВКонтакте: Платформа с более чем 100 миллионами активных пользователей предлагает разнообразные форматы рекламы — от таргетированной до видеорекламы.

2. Telegram Ads: Мессенджер с более чем 700 миллионами пользователей позволяет размещать рекламу через каналы и боты, обеспечивая высокий уровень вовлеченности.

3. Яндекс Директ: Система контекстной рекламы от Яндекса позволяет размещать объявления на страницах результатов поиска и на сайтах-партнерах.

Эти платформы предоставляют мощные инструменты аналитики, которые помогают рекламодателям оптимизировать свои кампании на основе собранных данных о поведении пользователей.

В настоящее время наблюдается значительный сдвиг в сторону персонализированного подхода к рекламе. Бренды используют данные о поведении пользователей для создания уникальных предложений и рекламных сообщений. Технологии AI становятся неотъемлемой частью рекламных стратегий, позволяя анализировать большие объемы данных и предсказывать поведение пользователей.

Видеоконтент продолжает набирать популярность на платформах социальных сетей. Короткие видеоролики становятся основным форматом для привлечения внимания аудитории благодаря своей способности быстро донести информацию до зрителя. Сотрудничество с влиятельными личностями также остается важным инструментом для брендов — это позволяет им расширять охват аудитории за счет доверия к блогерам или знаменитостям.

Одним из наиболее значительных преимуществ, которые искусственный интеллект (ИИ) приносит в сферу рекламных агентств, является возможность внедрения так называемого «Контент-завода». Это инновационное приложение, основанное на технологиях ИИ, предназначено для автоматизированной генерации и публикации видео-контента. Оно анализирует специфику бизнеса, в частности рекламного агентства, выявляет актуальные тренды и самостоятельно создает видеоролики или посты. Для этого используются аватары, также разработанные с помощью ИИ, что позволяет значительно упростить процесс создания контента и сделать его более привлекательным для целевой аудитории.

Современные потребители обращают внимание не только на качество продукта или услуги, но также на социальную ответственность брендов. Компании, демонстрирующие свою приверженность устойчивому развитию или этическим практикам ведения бизнеса, получают конкурентное преимущество среди потребителей.

Целевая аудитория для рекламного агентства может быть разнообразной:

- малый бизнес ищет способы продвижения своих товаров или услуг в интернете.
- стартапы нуждаются в поддержке по маркетингу для выхода на рынок.
- онлайн-магазины требуют эффективных стратегий цифрового маркетинга.
- некоммерческие организации ищут способы повышения осведомленности о своих инициативах.
- местные компании заинтересованы в геотаргетированной рекламе для привлечения клиентов из своего региона.

Каждый из этих сегментов имеет свои уникальные потребности и ожидания от рекламных кампаний, что требует от агентств гибкости в подходах к каждому клиенту.

Создание веб-приложений для предоставления рекламных услуг отвечает современным требованиям рынка и открывает новые горизонты для бизнеса. Эффективное взаимодействие с клиентами через инновационные технологии станет ключевым фактором успеха в будущем мире онлайн-рекламы.

В заключение можно сказать, что реклама продолжает эволюционировать вместе с технологиями и изменениями в поведении потребителей. Веб-приложения играют важную роль в этом процессе — они позволяют компаниям адаптироваться к новым условиям рынка и эффективно взаимодействовать со своей аудиторией.

**Список литературы**

*1. Котлер, Ф., Keller, К. Л. Маркетинг: управление : учебник / Ф. Котлер, К. Л. Keller. – 15-е изд. – Санкт-Петербург : Питер, 2016. – 720 с.*

*2. Чаффи, Д. Цифровой маркетинг: стратегия, реализация и практика : учебник / Д. Чаффи. – Санкт-Петербург : Питер, 2020. – 400 с.*

*3. Кунар, В., Рейнартц, В. Создание устойчивой ценности для клиентов : В. Кунар, В. Рейнартц. – Журнал маркетинга, 2016. – Т. 80, № 6. – С. 36-68.*

*4. Руст, Р. Т., Хуанг, М.-Х. Революция услуг и трансформация маркетинговой науки : Р. Т. Руст, М.-Х. Хуанг. – Маркетинг Наука, 2014. – Т. 33, № 2. – С. 206-221.*

*5. Дэвенпорт, Т. Х., Ронаки, Р. Искусственный интеллект для реального мира : Т. Х. Дэвенпорт, Р. Ронаки. – Гарвардский бизнес-обзор, 2018. – Т. 96, № 1. – С. 108-116.*

*6. Лемон, К. Н., Верхоеф, П. С. Понимание клиентского опыта на протяжении всего пути клиента : К.Н Лемон, П.С Верхоеф . – Журнал маркетинга, 2016 . – Т .80 , №6 .– С .69-96 .*

**DOI** 10.34660/INF.2025.65.62.189

# МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

**Кузьмина Дарья Владимировна**
*магистрант*
*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого*

***Аннотация.*** *В статье рассматривается методика определения эффективности применения инновационных материалов в строительстве, а именно самовосстанавливающегося бетона. Описаны свойства самовосстанавливающегося бетона, позволяющие относить его к инновационным, его функции, этапы протекания процесса самовосстановления и причины его редкого применения в строительстве. Методика основана на сравнении суммарных затрат на всем жизненном цикле материала, а также учитывает эффект от его применения. Применение методики позволит точно определить целесообразность использования самовосстанавливающегося бетона и докажет его эффективность при долгосрочном строительстве. Также разработанная методика может способствовать популяризации применения инновационных материалов в строительной отрасли.*

***Ключевые слова:*** *инновационный материал, самовосстанавливающийся бетон, эффективность, жизненный цикл материала, экономический эффект.*

## Введение

Актуальными требованиями в строительстве являются повышенная долговечность и прочность зданий и сооружений. Поэтому все чаще создаются и применяются инновационные материалы, к которым и относится самовосстанавливающийся бетон. При росте интереса к данному инновационному материалу, его применение все еще ограничено. Этот факт обуславливается недостаточной информированностью о его достоинствах и высокой стоимостью его производства. Также к требованиям в строительстве относят повышение экологической безопасности и минимизацию средств, затрачиваемых при эксплуатации здания или сооружения. Таким образом, для определения удовлетворенности данных требований, необходимо разработать методику

определения эффективности применения инновационного материала, с учетом всех этапов его жизненного цикла.

**Обзор самовосстанавливающегося бетона как инновационного материала**

В настоящее время к инновационным материалам относят все новые материалы, которые раньше не применялись, и старые материалы, усовершенствованные каким-либо способом. Отличительной чертой современных инновационных материалов являются способности придавать конструкциям, изготовленным из них, следующие свойства [1]: энергоэффективность, увеличенный срок службы, экологичность и уменьшение веса. Одним из наиболее востребованных материалов, относящихся к данному виду, является самовосстанавливающийся бетон.

Самовосстанавливающийся бетон – модифицированный бетон, способный самостоятельно и своевременно устранять дефекты, в особенности трещины без посторонней помощи. Отличительной чертой состава самовосстанавливающегося бетона от обычного являются бактерии, находящиеся для длительного действия в капсулах или трубках [2].

От данного материала ожидается выполнение следующих функций: определение трещины в момент ее возникновения, начало ее устранения, восстановление бетона не только визуальное, но и его свойств, максимально приближенным к исходным. Основным условием является отсутствие каких-либо вмешательств людей в данные процессы [3]. Процесс самовосстановления бетона происходит следующим образом, согласно этапам, на рисунке 1.

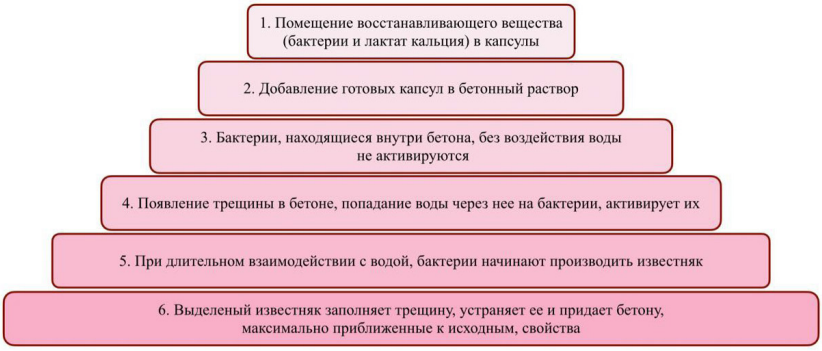



***Рисунок 1.*** *Этапы самовосстановления бетона*

Самовосстанавливающийся бетон целесообразно применять в конструкциях, подверженных работе на растяжение или изгиб. Наибольшую пользу он принес бы в промышленных зданиях, поскольку они состоят из таких

конструктивных элементов как, колонны, фермы, различные балки, плиты. Помимо этого, его рационально применять в зданиях и сооружениях с повышенными нагрузками, относящимся к технически сложным или находящихся в зонах с высокой сейсмической активностью [4].

Из-за его свойств он имеет высокую стоимость, поскольку внедрение свойства самовосстановления требует дорогостоящих исходных материалов. Данный фактор выставляет такой бетон менее привлекательным в коммерческом плане и поэтому покупатели отдают предпочтение более знакомому и бюджетному варианту.

К препятствиям для привлечения покупателей и повышения заинтересованности к инновационным материалам относят следующие [5]:

1. Отсутствие стимулирования проведения лабораторных испытаний;
2. Отсутствие демонстрационных проектов;
3. Отсутствие стандартов и сертификатов;
4. Сомнения в расширении производства;
5. Недостаток долгосрочных данных о материале.

Таким образом, оценка эффективности применения самовосстанавливающегося бетона позволит определять для различных проектов целесообразно или нет его применение в данных условиях.

**Описание методики**

Эффективность применения материалов в строительстве показывает насколько рационально использовались финансовые ресурсы, и как в целом себя ведет материал на протяжении всего своего жизненного цикла. Жизненный цикл продукта – это последовательность этапов, начиная от идеи о его производстве, заканчивая утилизацией продукта [6].

При оценке эффективности использования того, или иного материала выбирают критерий, по которому будет строиться решение. В роли критерия чаще выбирают чистый дисконтированный доход, срок окупаемости, приведенные затраты и прочее. Но данные критерии как правило затрагивают не все этапы жизненного цикла строительного материала. Таким образом наиболее рациональной будет оценка эффективности применения инновационного материала на основе суммарных затрат на всех этапах, с последующим сравнением значения с материалом, на основе которого он был изготовлен (материалом аналогом) [7].

Суммарные затраты на материалы определяются по формуле (1):

$$З = З_{пр-во} + З_{стр-во} + З_{экспл} + З_{ут}, \quad (1)$$

где $З_{пр-во}$ - затраты на производство материала;

$З_{стр-во}$ - затраты на использование материала в строительстве;

$З_{экспл}$ - затраты на обслуживание конструкций из материала во время эксплуатации;

$З_{ут}$ - затраты на утилизацию материала или его повторное использование.

Так как затраты стремятся уменьшить, то при сравнении получившихся значений, наилучшим и соответственно эффективным вариантом будет с меньшими суммарными затратами на протяжении всего жизненного цикла материала.

При определении эффективности материала, следует так же не забывать про экономический эффект от его применения. Поскольку эффективность представляет собой отношение эффекта от затрат для его получения. В свою очередь, эффект, согласно [8], демонстрирует пользу для общества от применения данного материала.

Экономический эффект от применения инновационного материала определяется в соответствии с СН 509-78 «Инструкции по определению экономической эффективности использования в строительстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений» [9]. Поскольку рассматриваемый материал является усовершенствованной разновидностью уже существующего материала, экономический эффект от его использования определяется по формуле (2):

$$Э = \left[ З_{пр-во1} \cdot \frac{У_1}{У_2} + \frac{\left(З_{стр-во1} - З_{стр-во2}\right) - E_H \left(K_2' - K_1'\right)}{У_2} - З_{пр-во2} \right] \cdot A, \qquad (2)$$

где $З_{пр-во1}, З_{пр-во2}$ - затраты на производство сравниваемых материалов;

$У_1, У_2$ - расход сравниваемых материалов на единицу конструктивного элемента;

$З_{стр-во1}, З_{стр-во2}$ - затраты на строительство из сравниваемых материалов;

$E_H$ - нормативный коэффициент перспективности вложений;

$K_2', K_1'$ - капитальные вложения в строительство на единицу конструктивного элемента;

$A$ - объем производства инновационного материала за год.

**Заключение и результат**

Таким образом при сравнении суммарных затрат на материал возможно определить его эффективность. Для этого определяют разность полученных данных по формуле (3):

$$\Delta З = З_{ОБ} - З_{СБ}, \qquad (3)$$

где $З_{ОБ}$ - суммарные затраты на применение обычного бетона, руб.;

$З_{СБ}$ - суммарные затраты на применение самовосстанавливающегося бетона, руб.

Если $\Delta З > 0$ - применение инновационного материала более экономично, если же $\Delta З < 0$ - экономичным является материал аналог. При этом, во время расчета экономического эффекта, суждения о применении того или иного материала могут изменится, так как материалы способны полностью окупить все затраты и даже принести прибыль.

**Вывод**

Разработанная методика определения эффективности применения инновационных материалов в строительстве, с учетом всех этапов его жизненного цикла, позволяет не только сделать выводы о целесообразности применения материала, но и подчеркнуть его пользу для экологии и общества в целом. Использование самовосстанавливающегося бетона в строительстве зданий и сооружений изначально приписывают к статусу «не эффективно» поскольку первоначальные затраты на его производство значительно превышают затраты на производство его материала аналога. Однако при рассмотрении других этапов его жизненного цикла, например, эксплуатации, отмечаются меньшие затраты, так как нет необходимости постоянных проверок состояния конструкций, сделанных из него, и последующего устранения обнаруженных дефектов, для чего понадобятся рабочая сила и строительные материалы. Таким образом самовосстанавливающийся бетон эффективно применять в зданиях и сооружениях с долгосрочным сроком эксплуатации, так как затраты на производство смогут вполне окупиться на следующих этапах.

**Список литературы**

*1. Хамдан, Д. Р. Инновационные строительные материалы / Д. Р. Хамдан, К. Г. Тарасова // Поколение будущего: Взгляд молодых ученых - 2022: сборник научных статей 11-й Международной молодежной научной конференции, Курск, 10–11 ноября 2022 года. Том 3. – Курск: Юго-Западный государственный университет. - 2022. – С. 559-561. – EDN MOSGFC.*

*2. Артамонова, О. В. Экспериментальные исследования самовосстанавливающихся цементных композитов: Часть 2. Методы автономного самовосстановления по капсульной и сосудистой технологиям / О. В. Артамонова // Химия, физика и механика материалов. – 2024. – № 2(41). – С. 90-116. – EDN YJHYQV.*

*3. Бредихин, В. В. Эффективность применения самовосстанавливающихся смесей при трещинообразовании в эксплуатируемых бетонных конструкциях / В. В. Бредихин, К. И. Лось // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2024. – № 2(74). – С. 50-57. – DOI 10.36622/2541-7592.2024.74.2.004. – EDN BIVAYA.*

*4. Соловьев, Д. С. Самовосстанавливающийся бетон: область применения и себестоимость / Д. С. Соловьев // Проблемы и перспективы развития России: Молодежный взгляд в будущее: Сборник научных статей 5-й Всероссийской научной конференции. В 4-х томах, Курск, 20–21 октября 2022 года / Ответственный редактор А.А. Горохов. Том 3. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. – С. 530-532. – EDN ZDUONA.*

*5. Сердюков, А. И. Проблема отсутствия требований/спецификаций в проектах со стороны архитекторов и инженеров / А. И. Сердюков, К. В. Самойлова // Информационные системы и технологии АПК и ПГС : Сборник научных статей 2-й Международной научно-технической конференции, Курск, 10 октября 2024 года. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2024. – С. 314-317. – EDN BVZGZG.*

*6. Баранчикова, С. Г. Экономическая эффективность технических решений: учебное пособие / С. Г. Баранчикова [и др.]; под общ. ред. проф. И. В. Ершовой. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 140 с.*

*7. Дубровский, Н. А. Определение эффективности применения строительных материалов с учетом жизненного цикла / Н. А. Дубровский, Е. Н. Чабурдо // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия D. Экономические и юридические науки. – 2012. – № 14. – С. 42-48. – EDN UHRMGH.*

*8. Гаджиев, М. М. Виды и содержание эффектов и сравнительной эффективности, подлежащих определению и анализу при сопоставлении новой техники и технологии производства / М. М. Гаджиев, В. А. Хамзатов // Вопросы структуризации экономики. – 2003. - №2. – С. 26-30.*

*9. СН 509-78. Инструкции по определению экономической эффективности использования в строительстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. Утверждена постановлением Государственного комитета СССР по делам строительств от 13 декабря 1978 № 229. – Москва, 1979. — 66 С.*

**DOI** 10.34660/INF.2025.92.52.190

# ПОДХОДЫ К ОПТИМИЗИРОВАННОМУ МАТЕМАТИЧЕСКОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ, ПРИВОДЯЩИХ К СОЗДАНИЮ МАТЕРИАЛОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

**Мелихов Игорь Витальевич**
*доктор химических наук, член-корреспондент РАН, профессор*
*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

**Веденяпин Виктор Валентинович**
*доктор физико-математических наук, профессор*
*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия*

**Аджиев Сергей Загирович**
*кандидат физико-математических наук*
*Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия*

***Аннотация.*** *В настоящей статье рассмотрены подходы к созданию кинетической модели фазообразования, приводящего к получению дисперсных веществ с заданными свойствами при оптимальных энергозатратах. В качестве первого варианта создания такой модели были сформулированы кинетические уравнения агрегации, учитывающие дальнодействующие гравитационное и электромагнитное притяжения атомов и их агрегатов. При этом пришлось привлечь к рассмотрению экспериментальные данные о ряде материалов нового поколения, что привело к приближению методик их получения к оптимальным. Кроме того, указанные данные привели к формулировке задач, решение которых дало возможность приблизиться к математическому обеспечению исследований, направленных на создание новых материалов. Рассматривается многопараметрическое кинетическое описание зарождения, роста и агрегирования нанодисперсного твёрдого вещества из пересыщенного пара или раствора и его преобразование в материал. Предполагается описывать дальнодействующее притяжение частиц и столкновения частиц кинетическим уравнением, обобщающим уравнения Больцмана и Власова. Оказывается, что и в случае многопараметрического описания подстановка в виде суммы $\delta$-функций в*

*получающееся уравнение типа Власова проходит и оказывается, что оно содержит в себе динамику системы взаимодействующих попарно тел. Мы вывели уравнение Власова для частиц различающихся по свойствам из принципа наименьшего действия. Выписываются граничные условия на стенках реактора, задающего рассматриваемую систему. Осуществляется переход к уравнению типа Фоккера–Планка (уравнению типа Эйнштейна–Колмогорова или диффузному приближению). Рассматриваются примеры такого многопараметрического описания, когда учитывается форма взаимодействующих частиц. Авторы надеются, что и в силу самого подхода, и в силу общности физико-химической кинетики настоящая работа может оказаться полезной и специалистам других специальностей, занимающихся построением структур, различающихся по свойствам.*

***Ключевые слова:*** *агрегация, иерархическая структура, многопараметрическое описание, оптимизированные воздействия, априорное моделирование, кинетическая теория, физико-химическая кинетика, наноматериал, дисперсное вещество, уравнения Смолуховского, уравнения Беккера–Дёринга, уравнение Власова, дальнодействие, гидродинамическая подстановка, динамика системы тел, уравнение Больцмана, уравнение Фоккера–Планка, уравнение Эйнштейна–Колмогорова, диффузное приближение.*

***. Введение**

В настоящее время наука о веществе обеспечила возможность изучать частицы любого вещества с учётом того, что они могут иметь иерархическую структуру. Такое изучение было неоднократно осуществлено исследователями разного профиля с использованием новых методов многопараметрической характеризации каждой из указанных структур. Однако такая характеризация с помощью этих новых методов исследования потребовала столь больших затрат, что исследователям пришлось ограничиваться малопараметрической характеризацией этих структур. А это не позволило достаточно точно описать превращения исходных веществ (ИВ) в материалы нового поколения (МНП) в изученных системах. Вместе с тем, была накоплена разнообразная информация о кинетике процессов, приводящих к превращению ИВ в МНП. Эта информация была использована при детализации кинетических уравнений, основанных на законах сохранения, принятых в науке о веществе. Подходы к необходимой детализации уравнений рассмотрены в данной статье. При этом принято, что такая детализация не может быть достоверна без учёта дальнодействующего взаимодействия всех атомов изучаемой системы, обусловленного гравитационными и электромагнитными силами. Учтено также, что при описании указанной детализации необходимо использовать информацию о математическом обеспечении решения соответствующих кинетических уравнений.

***. Современное состояние математического обеспечения исследований, связанных с созданием материалов нового поколения**

Судя по состоянию науки о материалах, математическое обеспечение исследований, связанных с созданием материалов нового поколения следует считать оптимальным, если оно обеспечивает извлечение максимального количества информации о создании материала из минимального числа экспериментальных данных [1, 2]. В настоящее время такая информация, включающая данные об изменении состояния частиц ИВ и МНП при внешних воздействиях на них, была накоплена в заметных количествах и стала доступной для использования. На это указывают экспериментальные данные о движении отдельных атомов, их кластеров и кватернеонов в газовых и жидких средах [3, 4], а также результаты изучения образования наноагрегатов и их объединения в макрочастицы ИВ и МНП при разных воздействиях [5, 6]. (Кватернион представляет собой расширение комплексных чисел, содержащее одно действительное число и три мнимых с разными мнимыми единицами. Для нас более важным является то, что для любого вращения можно построить нормированный кватернион, в котором будут закодированы направление оси этого вращения и угол поворота вокруг неё. Задав базовую ориентацию молекулы, можно записать кватернион, переводящий её из базовой ориентации в текущую, и использовать его как «координаты» этой текущей ориентации. Таким образом, четыре числа кватерниона однозначно описывают текущую ориентацию молекулы, подобно тому, как три проекции радиус-вектора описывают положение её центра масс.) Доступной оказалась и информация о связи свойств каждой частицы создаваемого материала с подвижностью атомов в ее объеме [7, 8]. Изучение процессов, влияющих на указанное объединение, привело к установлению ряда закономерностей, характеризующих отклик частиц вещества на внешние воздействия [9, 10]. Некоторые из установленных закономерностей удалось представить в виде математических моделей процессов, протекающих при превращении частиц ИВ в МНП. Были разработаны модели кластерообразования, зарождения частиц ИВ в пересыщенном растворе или паре [11–12]. Удалось создать ряд моделей роста и растворения частиц ИВ и МНП [14], а также перехода примеси из среды в эти частицы [15, 16, 17]. Разработаны модели объединения наночастиц в агрегаты с последующим их превращением в макрочастицы [18, 19]. Однако указанные модели не удалось объединить в общую математическую модель превращения исходных веществ в материалы. Несмотря на то, что необходимость такого объединения непрерывно увеличилась вследствие возрастания требований к свойствам материалов. Это возрастание оказалось столь значительным, что была начата разработка новых методик многопараметрической характеризации исходных веществ и материалов с высокодетализированными результатами определения их свойств, причём использование указанных методик привело к важным результатам [20–22].

Исследования показали, что частицы многих твёрдых исходных веществ и материалов обладают морфологической памятью (МП): они сохраняют информацию о процессах, которые привели к их созданию, в форме, доступной для использования при изучении кинетики превращения исходных веществ в материалы [23–25]. Важную информацию об указанных процессах можно извлечь из результатов изучения самоорганизации частиц, имеющих иерархическую структуру [26–29]. Возможность такого извлечения была доказана на примере агрегатов микрокристаллов ряда неорганических веществ, изучение которых показало, что контакты поверхности микрокристаллов были образованы скоплениями дислокаций, исчезающих при самоорганизации, стимулированной нагреванием агрегатов [30]. При этом эксперименты указали на возможность детализации математических моделей любых микрокристаллов в соответствии с новыми требованиями к ИВ и МНП [31, 32]. Эксперименты показали, что результаты этой детализации могут привести к существенному ускорению создания оптимизированного математического обеспечения исследований, приводящих к превращению ИВ в МНП [33, 34].

***. Подход к математической модели создания материала**

В последнее время информацию о превращении ИВ в МНП, необходимую при разработке современной математической модели образования МНП, получают путём изучения модельных систем, в которых протекают все предусмотренные фундаментальной наукой процессы, влияющие на частицы ИВ и МНП [7, 8, 35, 36, 37]. При этом результаты изучения стремились представить в виде множества кинетических уравнений, описывающих влияние любых внешних воздействий на скорости перехода ИВ в МНП. И учитывали, что любое воздействие приводит к изменению состояния всех их атомов, взаимодействующих друг с другом электромагнитными и гравитационными силами [38–40]. А для ускоренного решения поставленной задачи в рассмотрение необходимо вводили результаты изучения следующих процессов:

1. Объединение одиночных атомов, молекул и агрегатов в растворе или паре с сохранением информации о кинетике агрегации в морфологической памяти агрегатов [41, 42].

2. Объединение агрегатов в макрочастицы с заданной иерархической структурой [43, 44].

3. Зарождение, рост и растворение нанокристаллов ИВ в системе, где обеспечена реализация самоорганизации агрегатов [45–47].

4. Сорбция модифицирующих веществ частицами ИВ и МНП с образованием частиц нового вида [48–50].

5. Соосаждение и сокристаллизация веществ с образованием новых материалов [51–54].

6. Разрушение частиц при термомеханических воздействиях [55–58].

7. Изотопный обмен частиц ИВ и МНП с окружающей средой [59].

Есть основания полагать, что информация об указанных процессах позволит ускоренно приблизиться к созданию математической модели превращения исходных веществ в МНП при заданных свойствах его частиц, приобретённых при минимальных энергозатратах [32, 60–63].

Такую разработку целесообразно начать с описания частиц в аппарате простейшей конструкции. Подходы к такому описанию рассмотрены далее с учетом следующих фактов.

***1. Макрочастицы большинства материалов, полученных в аппарате простейшей конструкции, имеют иерархическую структуру.***

Характеризация многих материалов показала, что их макрочастицы собраны из более мелких частиц, которые составлены из мельчайших частиц [22, 23]. Например, было обнаружено, что в объёме частиц ряда полимерных материалов имеются полимолекулярные кластеры в виде микрочастиц, состоящих из наночастиц [24]. А объём каждого кристалла ряда неорганических веществ разделен на участки (блоки), контактные поверхности которых содержат множество дислокаций [25].

***2. Частицы фазообразующих веществ, атомы которых малоподвижны, обладают морфологической памятью, доступной для исследования.***

Исследования показали, что в морфологической памяти (МП) частиц многих фазообразующих веществ сохраняется информация о процессах, которые привели к их созданию [26–28]. Было показано, что из МП плёнки, образовавшейся в результате испарения слоя раствора полистирола, можно извлечь информацию о скоростях процессов, протекавших в испаряющемся растворе. А МП частиц фосфатов кальция, выделенных из водных суспензий, можно использовать при изучении нанокристаллизации [29].

***3. Агрегация часто сопровождается самоорганизацией агрегатов.***

Согласно экспериментальным данным, явление самоорганизации широко распространено в системах, содержащих частицы с иерархической структурой. При этом самоорганизующиеся частицы доступны для изучения на современном уровне требований результатов их исследования [30–32].

В последнее время уровень методического оснащения изучения указанных явлений повышается в связи с новыми требованиями к МНП. Разработаны новые методики исследований, включающие многостадийное математическое моделирование процессов, влияющих на МНП [33–35].

На первой стадии такого моделирования создают априорную математическую модель основных процессов, которые протекают в аппарате простейшей конструкции, где исходные вещества превращается в ИВ и МНП. При этом характеристики процессов включают в априорную модель в виде новых уравнений, допускающих описание аппарата на современном уровне детализации, исходя из первых принципов [36, 38–40].

На второй стадии исследований априорную модель, созданную на первой стадии, используют для детализации новых уравнений применительно

к превращению модельных веществ в МНП. При этом из результатов экспериментов накапливают информацию об изменении свойств этих веществ при специальных диагностических воздействиях на них, извлекая из этой информации сведения, необходимые для детализации описания превращения модельных веществ в МНП.

На третьей стадии исследований данные о модельных веществах, накопленные на второй стадии, включают в систему уравнений о создании МНП из любых исходных веществ [41]. При этом каждое уравнение пытаются представить таким, чтобы оно вносило вклад в информацию о том, при каких воздействиях можно получить нужный МНП при минимальных затратах [64].

Исследования показали, что в эту информацию необходимо включить данные о следующих процессах:

1) образование кластеров и атомномолекулярных агрегатов в растворах и парах [42];

2) зарождение и рост кристаллов в переохлаждённых средах [43];

3) объединение и разрушение частиц при столкновениях [44];

4) миграция атомов в объёме [45];

5) коагуляция и фрагментация при кристаллизации и растворении [46–48];

6) полимеризация с агрегацией [49, 50];

7) спекание при нагружении и диспергирование [51–53];

8) осаждение и сорбция модифицирующих веществ [54];

9) другие процессы, приводящие к созданию материалов [55–58].

Информация об этих процессах даёт возможность приблизиться к оптимизированному математическому обеспечению исследований, связанных с созданием материалов нового поколения [32, 60–63].

Один из вариантов такого приближения основан на создании априорной математической модели процессов в многосекционном аппарате, в каждой секции которого реализуется воздействие одного вида на частицы ИВ. Исследования показали, что в указанную модель необходимо включить описание всех процессов, которые могут влиять на ИВ, согласно представлениям фундаментальной науки [65, 66]. При этом описание приходится представлять в виде столь сложных уравнений, что возникает задача их преобразования в ряды более простых соотношений. На необходимость такого преобразования указывает широкая распространённость трактовки результатов описания воздействий на ИВ с помощью более простых классических уравнений типа Больцмана и Фоккера–Планка с упрощениями типа Леннарда–Джонса и Морзе. Однако такие преобразования не решают проблемы описания процессов, влияющих на ИВ. К такому решению может приблизить изучение аппарата, в каждой секции которого воздействия обеспечивают изменение

скорости только основного процесса. Исследования показали, что изучение целесообразно начать с описания процесса объединения атомов в агрегаты в результате их электромагнитного и гравитационного взаимодействий. При описании первой секции образование первичных агрегатов целесообразно считать основным процессом. При рассмотрении второй секции необходимо принять, что в неё вводится поток молекул ИВ и первичных агрегатов, аналогичных образовавшимся в первичной секции, а основным процессом является объединение первичных агрегатов во вторичные агрегаты. В третьей и последующих секциях, куда вводятся макроколичества молекул ИВ, основным процессом целесообразно считать образование МНП с заданными свойствами. На реальность априорного изучения образования МНП указывает созданная в последнее время математическая модель процессов в аппарате, заполненном молекулами ИВ и инертного газа, с учётом внешних воздействиях. При этом к основным процессам отнесено образование и укрупнения агрегатов в результате их низкоэнергетических столкновений с молекулами и ранее образовавшимися агрегатами, а также распад агрегатов в результате их столкновений друг с другом и со свободными атомами и молекулами. При описании указанных процессов пришлось ограничиться характеризацией каждой частицы (молекулы и агрегата) массой, объёмом, параметрами формы и рельефом поверхности, а также пространственными координатами и скоростью её движения. Множество же частиц в аппарате удалось охарактеризовать функциями распределения частиц по параметрам состояния. Исследования показали, что совокупность описаний указанных функций распределения, дополненная описанием связи параметров состояния каждой частицы с кинетикой основных процессов, может составить основу математической модели образования агрегатов [67].

***. Подход к априорной математической модели создания материала**

Исследования показали, что априорная математическая модель создания материала должна описывать явления в аппарате, в котором столкновения приводят к возбуждению частиц, уровень которого зависит от скорости их сближения при контакте. Если скорость сближения частиц мала, то возбуждение не препятствует их объединению в частицу нового вида. А если скорость сближения велика, то возбуждение вызывает распад образовавшихся частиц нового вида и даже разрушение исходных частиц.

Простейшим вариантом накопления информации, позволяющей ускоренно приблизиться к созданию математической модели появления МНП при термомеханических воздействиях, может быть описание процессов в закрытом модельном аппарате с регулируемой температурой стенок, в который введено ограниченное количество дисперсного ИВ, нагретого до их полного испарения с последующим охлаждением образовавшегося пара до уровня, при котором пар становится пересыщенным, и происходит осаж-

дение модифицированного ИВ. При этом в аппарате образуется аэрозоль с равномерным распределением его частиц по объёму аппарата.

Разработку математической модели образования такого аэрозоля при воздействиях разных видов целесообразно начать с его описания, при условии закона сохранения числа всех атомов фазообразующего вещества:

$$N_0 = \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=n_{0k}} nN_{kn} \,. \tag{1}$$

Здесь $N_0$ – число атомов, введённых в аппарат, $N_{kn}$ – число состоящих из *n* атомов частиц *k* вида (атомов, молекул, димеров, наноагрегатов и т.д.) в аппарате, $n_{0k}$ и $n_{Mk}$ – число атомов в самой мелкой и самой крупной частице *k* вида, $(k_M + 1)$ – число видов частиц, находящихся в аппарате.

Число $N_{kn}$ целесообразно считать изменяющимся в результате парных столкновений частиц в аппарате в соответствии с уравнением

$$\frac{\Delta N_{kn}}{\Delta t} = G_k(n,t) - W_k(n,t)N_{kn}\,, \tag{2}$$

где $\Delta N_{kn}$ – изменение $N_{kn}$ за интервал времени от $t$ до $t + \Delta t$, $G_k(n,t)$ – частотная функция, описывающая увеличение числа частиц вида *k*, состоящих из *n* атомов; $W_k(n,t)$ – функция, характеризующая вероятность ухода этих частиц в единицу времени в результате воздействия, вызванного столкновениями.

Частотную функцию $G_k(n,t)$ можно представить соотношением

$$G_k(n,t) = \sum_{p=1}^{k-1} \sum_{a=n_{0p}}^{n-n_{0k}} \alpha_{kp}(n-a,a,t)N_{k,n-a}(t)N_{pa}(t) + \sum_{p=k+1}^{K_M} \sum_{a=n_{0p}}^{n_{Mp}-n} \beta_{kp}(n,a,t)N_{p,n+a}(t), \tag{3}$$

где $\alpha_{kp}(n,a,t)$ – функция, характеризующая частоту актов объединения частиц, находящихся в аппарате в количествах $N_{k,n-a}(t)$ и $N_{pa}(t)$; $\beta_{kp}(n,a,t)$ – частота актов распада частиц в результате их возбуждения; *p* и $n + a$ означают вид и размер частиц, приводящихся в результате их распада к частице *k* вида, состоящей из *n* атомов.

Аналогичным соотношением следует характеризовать частотную функцию $W_k(n,t)$. Функциям же $\alpha_{kp}(n,a,t)$ и $\beta_{kp}(n,a,t)$, выявив их зависимость от интенсивности воздействий на аппарат, стремятся придать вид, соответствующий требованиям исходной математической модели модельного аппарата, каждую частицу которого характеризует только вид и число составляющих её атомов.

При разработке создания МНП на современном уровне детализации каждую частицу следует характеризовать параметрами

$$\mathbf{Z} = (m, v, s, \mathbf{y}, \mathbf{r}, \mathbf{v}), \tag{4}$$

а именно: массой *m*; объёмом *v*; площадью поверхности *s*; совокупностью параметров состояния **y**, описывающих остальные внешние параметры (в частности, форму частиц) и процессы внутри частицы; пространственными координатами **r** и скоростью её движения **v**.

Состояние аппарата в целом целесообразно описывать функцией распределения

$$F(\mathbf{Z},t)=\Delta N(\mathbf{Z},\Delta\mathbf{Z},t)/(\Delta Z_1\cdot\Delta Z_2\cdot\ldots\cdot\Delta Z_M), \quad (5)$$

где $\Delta N(\mathbf{Z},\Delta\mathbf{Z},t)$ – число частиц в аппарате со свойствами, принимающими значения из прямоугольного параллелепипеда в пространстве свойств, состоящего из точек $\mathbf{z}\equiv(z_1,z_2,\ldots,z_M)$ таких, что $\forall i\ z_i\in(Z_i,Z_i+\Delta Z_i)$, в момент времени *t*.

При описании аппарата используют данные о функциях распределения $F(\mathbf{Z})$ его частиц по $\mathbf{Z}$ [68–73]. При этом имеет место факторизация или формула Байеса из теории вероятности [18], [74]:

$$F(\mathbf{Z})=F(m)\cdot f(v)_m\cdot f(s)_{m,v}\cdot\ldots, \quad (6)$$

где $F(m)=\Delta N_m/\Delta m$; $\Delta N_m$ – число частиц в аппарате, имеющих массу в интервале от *m* до $m+\Delta m$; $f(v)_m$ – плотность вероятности частиц иметь объём *v* для частиц с массой *m*; $f(s)_{m,v}$ – плотность вероятности частиц иметь площадь поверхности *s* для частиц с массой *m* и объёмом *v*. А так как частицы состоят из атомов одного вида, то $F(m)=m_0F(n)$ и $F(n)=\Delta N(n,\Delta n)/\Delta n$, где $m_0$ – масса атома; а $\Delta N(n,\Delta n)$ – число частиц, состоящих из количества атомов в интервале от *n* до $n+\Delta n$.

Функцию распределения $F(\mathbf{Z})$ использовали при изучении многих модельных систем [12, 75, 76]. При этом методику изучения непрерывно уточняли с ориентацией на переход к накоплению высокодетализированных данных для комплекса кинетических уравнений, причём уточнённые методики дали возможность ускоренного перехода от $F(\mathbf{Z},0)$ к $F(\mathbf{Z},t)$ с помощью уравнения

$$\partial F(\mathbf{Z},t)/\partial t=G_k(\mathbf{Z},t)-W_k(\mathbf{Z},t)F_k(\mathbf{Z},t), \quad (7)$$

при частотных функциях $G_k(\mathbf{Z},t)$ и $W_k(\mathbf{Z},t)$, аналогичных функциям $G_k(n,t)$ и $W_k(n,t)$.

Уравнения (7) необходимо дополнить хорошо согласующимися с проводимыми экспериментами соотношениями

$$N(\mathbf{Z},t)=VC(\mathbf{Z},t), \quad (8)$$

$$G(\mathbf{Z},t)=G(\mathbf{Z},0)(J(t)/J_M)^{n_1}, \quad (9)$$

$$W(\mathbf{Z},t)=W(\mathbf{Z},0)(J(t)/J_M)^{n_2}. \quad (10)$$

В этих соотношениях:

$N(\mathbf{Z},t)$ – число частиц в состоянии $\mathbf{Z}$ в момент времени *t*;

$C(\mathbf{Z},t)$ – средняя концентрация таких частиц в аппарате при его объёме *V*;

$G(\mathbf{Z},0)$ и $W(\mathbf{Z},0)$ – частотные функции в момент $t=0$ начала изучения процессов в аппарате;

$J(t)$ – интенсивность термомеханических воздействий на частицы в момент времени $t$;

$n_1$ и $n_2$ – показатели уровня влияния воздействий на укрупнение и распад частиц;

$J_M$ – реперная интенсивность воздействия.

Было показано также, что частотные функции могут быть детализированы с помощью соотношений, характеризующих связь интенсивности воздействий $J(t)$ с параметрами состояния аппарата $\mathbf{X} = \{X_1, X_2, \ldots, X_M\}$, зависящими от режима его работы. При этом детализированные функции $J(t) = J(\mathbf{X}, \mathbf{Z}, t)$ оказались доступными для их трактовки, исходя из представлений фундаментальной науки. Это указывает на то, что с помощью математических моделей процессов, определяющих параметры $\mathbf{X}$ и функции $J(t)$, можно подойти к математическому обеспечению оптимизированного поиска воздействий на аппарат, способных внести заданные изменения в функцию $F(\mathbf{Z}, t)$ при оптимальных затратах.

Соотношения (7)–(10) следует использовать при описании изменения состояния частиц при единичном воздействии на модельный аппарат, в котором обеспечивается многократный отбор проб аэрозоля с определением его функции распределения $F(\mathbf{Z}, t)$ в соответствии с уравнением

$$F(\mathbf{Z}, t_2) = F(\mathbf{Z}, t_0) + \int_{t_0}^{t_1} [g(\mathbf{Z}, t') - w(\mathbf{Z}, t') F(\mathbf{Z}, t)] dt' + \int_{t_1}^{t_2} g_R(\mathbf{Z}, t') dt' \cdot \qquad (11)$$

Здесь:

$g(\mathbf{Z}, t)$ и $w(\mathbf{Z}, t)$ – частотные функции, описывающие скорости образования и ухода частиц со свойствами $\mathbf{Z}$ в объёме аппарата под влиянием воздействия, наложенного на аппарат в момент $t_0$;

$g_R(\mathbf{Z}, t)$ – частотная функция, описывающая изменение состояния частиц после окончания воздействия в момент $t_1$;

$t_2$ – момент завершения характеризации частиц, извлечённых из аппарата.

Уравнения (11) включают величины, которые доступны для определения с точностью, позволяющей сравнивать полученные результаты с данными, опубликованными в классических работах Максвелла и Больцмана, Беккера и Дёринга, Фоккера и Планка, Эйнштейна и Колмогорова [77, 78–81, 19]. При этом такое сравнение оказалось особенно информативным при включении в описание любого аэрозоля данных о всех процессах, протекающих в его объёме согласно представлениям фундаментальной науки. Исследования показали, что данные об указанных процессах могут быть использованы при выявлении связи частотных функций $g(\mathbf{Z}, t)$ и $w(\mathbf{Z}, t)$ каждого аэрозоля с его характеристиками $g(\mathbf{Z}, 0)$ и $w(\mathbf{Z}, 0)$ с помощью результатов определения функций распределения $F(\mathbf{Z}, 0)$ и $F(\mathbf{Z}, t_2)$.

Исследования показали, что указанные функции доступны для определения в виде уравнений, допускающих трактовку, исходя из представлений фундаментальной науки. При этом найденные уравнения оказались применимыми при поиске интенсивности воздействий на аппарат, приводящих к заданному изменению свойств частиц в его объёме при оптимальных затратах. Было установлено, что оптимизированный поиск необходимых воздействий на аппарат может быть реализован путём выявления связи неизвестных функций с интенсивностью термических, механических, химических и радиационных воздействий, направленных на превращение ИВ в вещества, используемые при создании материалов нового поколения. На реальность оптимизированного поиска указывают многие работы, выполненные в рамках программы многостадийных исследований.

Возникает множество задач, связанных с высокодетализированным описанием результатов определения функции $F(\mathbf{Z}, t_2)$ при различных воздействиях при многопараметрической характеризации частиц в модельном аппарате в широком интервале варьирования интенсивности каждого воздействия на аппарат. Применительно к частицам ИВ одной из таких задач является представление указанных результатов в виде системы уравнений, каждое из которых описывает отклик аппарата на воздействия в упрощённой форме, приемлемой для реальной характеризации частиц ИВ. На целесообразность поиска упрощённых форм указывает широкая распространённость использования кинетических уравнений типа Больцмана и Фоккера–Планка с упрощениями типа Ленорда–Джонса и Морзе.

При описании системы, содержащей $p$ аппаратов, используют данные о функции распределения

$$F(\mathbf{Z}) = \sum_{i=1}^{p} F(\mathbf{Z})_i ,$$

где $F(\mathbf{Z})_i$ – функция распределения частиц $i$-го из аппаратов, которая равна нулю в пространстве вне его. Функцию распределения $F(\mathbf{Z})$ применяют при описании различных модельных систем [12, 75, 76]. При этом методику использования $F(\mathbf{Z})$ при изучении каждой системы непрерывно уточняют. Эксперименты показали, что эти уточнения приводят к необходимости перехода исследований от описания модельных систем с использованием классического уравнения Дж.К. Максвелла и Л. Больцмана [77–79] к изучению систем с помощью кинетических уравнений, включающих данные о процессах, приводящих к тому, что частицы изучаемой системы представляют собой иерархическую структуру [67, 82] и приобретают морфологическую память [18, 26–28, 74, 83]. На это указывают результаты работ многих исследователей, включая Максвелла [77, 78] и Больцмана [79], Власова [83, 84], Беккера и Дёринга [80], Фоккера и Планка [19], Эйнштейна и Колмогорова [81]. Ими сформулирован ряд основополагающих кинетических уравнений,

описывающих изменение функции распределения частиц по параметрам состояния при воздействиях на аппарат. В уравнения введены величины, признанные фундаментальной наукой как характеристики всех систем, а вошедшие в эти уравнения частотные функции описывают результаты воздействий на частицы любых веществ. Учитывая это, указанные уравнения принято использовать при разработке априорных математических моделей создания МНП. Один из вариантов такой разработки предусматривает описание процессов в нагреваемом аппарате, в который введены частицы ИВ, равномерно распределённые по объёму аппарата с помощью перемешивающего устройства. При начальном описании такого аппарата целесообразно ограничиться рассмотрением одиночных столкновений частиц со стенками аппарата и парных столкновений частиц друг с другом. При этом следует принять также, что возбуждение, вызванное столкновением при малой скорости сближения, может способствовать превращению сближающихся частиц ИВ в одну частицу нового вида. При большой же скорости сближения частиц ИВ их столкновения могут приводить к их разрушению. Поэтому при начальном описании аппарата необходимо учитывать возможность образования и распада частиц в его объёме. Исследования показали, что такой учёт целесообразно реализовать с использованием условия сохранения числа атомов ИВ, введённых в аппарат, причём в континуальном приближении. Это условие следует представить в виде уравнения (11), характеризующего изменение функции распределения $F(\mathbf{Z},t)$ введённых частиц по параметрам состояния.

На первой стадии исследования необходимо характеризовать парные столкновения как результат взаимодействия частиц всех видов (атомов, молекул, агрегатов первого и последующих поколений) электромагнитными и гравитационными силами с последующим перемещением столкнувшихся частиц в соответствии с известными законами миграции частиц в газах и жидкостях [68–70, 72, 73].

При такой характеризации необходимо учесть, что в результате столкновений частиц происходит их возбуждение, уровень которого зависит от скорости их сближения до контакта. В связи с этим целесообразно выявлять воздействия, при которых скорость сближения частиц, приводящего к их столкновению, возрастает до величины, обеспечивающей возбуждение с перестройкой электронной структуры атомов столкнувшихся частиц, рассматриваемой как переход от физического контактного процесса к химической реакции, а распределение частиц необходимо характеризовать суммой функций распределения его частиц всех видов по состояниям [12, 75, 76]. При таком описании Дж.К. Максвелл [77, 78], Л. Больцман [79] и другие исследователи использовали функцию распределения молекул по скоростям и координатам, зависящую от времени. Однако, в настоящее время появи-

лась необходимость перехода к многопараметрическому описанию с учетом того, что агрегаты каждого поколения имеют свою иерархическую структуру [67, 82]. У агрегатов первого поколения (первичных агрегатов) иерархическая структура определяется тем, что они укрупняются за счет присоединения молекул без соответствующей внутренней самоорганизации (случай Беккера–Дёринга) [80]. Структура агрегатов второго (вторичных агрегатов) и следующих поколений определяется тем, что они укрупняются в результате присоединения как атомов и отдельных молекул, так и агрегатов меньших поколений. Агрегаты второго и последующих поколений, имеющие морфологическую память, сохраняют информацию о том, какие частицы перешли в их объём, причём существенную часть этой информации можно извлечь из морфологической памяти агрегатов [18, 74, 83]. Чтобы ускорить такое извлечение, целесообразно разработать математическую модель процессов в аппарате после однократного ввода в него множества атомов и молекул ИВ с последующей гомогенизацией объёма аппарата. Если в модель ввести извлечение проб частиц из аппарата с последущим их изучением, то целесообразно использовать соотношение

$$\frac{\partial F(\mathbf{Z},t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial \mathbf{Z}}\left(W_{\mathbf{Z}} F(\mathbf{Z},t)\right) + \frac{\partial^2}{\partial \mathbf{Z}^2}\left(D_{\mathbf{Z}} F(\mathbf{Z},t)\right),$$

где $t$ – длительность интервала времени от момента ввода частиц в аппарат до момента определения функции распределения $F(\mathbf{Z},t)$ частиц по $\mathbf{Z}$, $W_{\mathbf{Z}}$ и $D_{\mathbf{Z}}$ – частотные функции, характеризующие возрастание и уменьшение числа частиц с параметрами состояния $\mathbf{Z} = (m, v, s, \mathbf{y}, \mathbf{r}, \mathbf{v})$, изменяющимися в результате детерминированных и стохастических процессов. При этом

$$F(\mathbf{Z},t) = F(\mathbf{Z},t_э) - \int_{t}^{t_э} \Omega_{\mathbf{Z}}(\tau) d\tau,$$

где $F(\mathbf{Z},t_э)$ – функция распределения в момент $t_э$, завершения её определения; $\Omega_{\mathbf{Z}}(t)$ – частотная функция, характеризующая изменение состояния частиц при воздействиях. Исследования показали, что указанные частотные функции могут быть описаны так, что их можно включать в априорную модель. На это указывают результаты работ многих исследователей, включая Максвелла [77, 78], Больцмана [79], Фоккера и Планка [19], Власова [84, 85], Эйнштейна и Колмогорова [81]. Сформулировано множество кинетических уравнений, описывающих изменение функции распределения частиц по параметрам состояния при различных воздействиях на аппарат. Появилась возможность объединения сформулированных кинетических уравнений в априорную математическую модель создания МНП. Попытки такого объединения на первой стадии исследований связаны с вводом в модель общих характеристик агрегатов, учитываемых фундаментальной наукой.

Это подтверждает одно из исследований, которое привело к накоплению информации об основных процессах в аппарате, заполненном молекулами

исходных веществ, при внешнем воздействии на аппарат [67]. При этом к основным процессам отнесено укрупнение агрегатов в результате их низкоэнергетичных парных столкновений с молекулами и ранее образовавшимися агрегатами, а также распад агрегатов в результате высокоэнергетичных столкновений. При изучении указанных процессов пришлось ограничиться описанием функций распределения агрегатов частиц по параметрам состояния на каждом участке аппарата. Исследования показали, что совокупность указанных функций распределения может составить основу математической модели образования агрегатов.

При этом решение каждого уравнения должно быть сводимо к имитатору, способному сообщить о состоянии частиц в любой момент исследования. На второй стадии исследований модель должна обеспечить имитатора информацией о том, что происходит с частицами при групповых воздействиях на аппарат.

Априорную математическую модель целесообразно детализировать последовательно для аппаратов малого объёма и макроаппаратов. При описании процессов в аппарате малого объёма, содержащего небольшое число частиц модельного вещества, необходимо ограничиваться описанием парных столкновений частиц, взаимодействующих друг с другом электромагнитными силами. При описании процессов в большом аппарате, где образуются макрочастицы, необходимо учесть роль рельефа их поверхности, изменяющегося в результате взаимодействия частиц электромагнитными и гравитационными силами.

Исследования показали, что изучение указанной системы может привести к выявлению оптимальных условий создания МНП, если её рассматривать как множество атомов, молекул и агрегатов, которые взаимодействуют друг с другом электромагнитными и гравитационными силами и перемещаются в соответствии с известными законами миграции частиц в газах [68–70, 72, 73].

При детализированном описании системы целесообразно рассмотреть аппарат, в котором организован поток газа, содержащего частицы исходного вещества. На входе в аппарат в потоке преобладают атомы и молекулы, которые при движении в нём образуют агрегаты. Вблизи входа в аппарат имеется участок потока, в котором успевают сформироваться в основном первичные агрегаты. К аппарату подводится поток тепловой энергии, поддерживающей его стенки при заданной температуре.

Частицы потока притягиваются друг к другу дальнодействующими силами притяжения, действие которых компенсируется близкодействующим отталкиванием, связанным с возбуждением частиц при столкновениях. При этом возбуждение увеличивает вероятность распада агрегатов. При столкновениях частицы изменяют форму, которая определяется конфигурацией электронных оболочек атомов. При этом, если изменение электронных

оболочек невелико, то столкновения частиц рассматривают как физическое явление. Если же изменение конфигураций оболочек превышает определенный предел, то столкновения считают причиной образования химической связи.

Исследования показали, что перечисленные явления можно детализировано описать, имея экспериментальные данные о многопараметричных функциях распределения частиц потока по параметрам состояния на разном расстоянии от входа в аппарат. Определив ряд таких функций, можно подойти к определению режима работы аппарата, при котором заданного изменения функций распределения можно достичь при минимальных затратах. Выявление такого режима целесообразно начать с изучения агрегации вблизи входа в аппарат, где агрегатов мало.

Изучение целесообразно начать с рассмотрения простейшей системы, а именно: с закрытого аппарата с термостатированными стенками, в который введены атомы и молекулы исходного вещества и газа-носителя. При изучении такой системы следует сосредоточиться на описании столкновений частиц, взаимодействующих друг с другом электромагнитными и гравитационными силами. При описании макрочастиц необходимо учесть роль рельефа их поверхности.

В настоящее время решение перечисленных задач представляется достижимым, так что указанный подход к априорной математической модели является перспективным.

При этом описание рассмотренных процессов содержит информацию об оптимальных условиях создания МНП. Это подтверждают результаты изучения процессов в системе, состоящей из термостатирующих устройств и закрытого аппарата, в который введены пар исходного вещества и газноситель [68–73]. Рассматриваемую систему описывали как множество однородных участков, находящихся в газообмене друг с другом, при образовании и распаде агрегатов на каждом участке. При этом каждый агрегат характеризовали числом составляющих его атомов, пространственными координатами и скоростью его движения на каждом участке с учетом того, что все атомы взаимодействуют друг с другом электромагнитными и гравитационными силами, а число атомов на участке изменяется в соответствии с законами миграции атомов в газах. Указанная характеризация оказалась достаточной для того, чтобы считать результаты работ, опубликованные в [68–73], попыткой реализации поиска оптимальных условий создания МНП. При получении МНП часто используют пар исходного вещества, охлаждение которого делает его пересыщенным.

***. Подход к математическому обеспечению изучения кинетики процессов в системе**

Изучение кинетики процессов в системе целесообразно начать с описания замкнутого аппарата, в который введена смесь молекул или атомов фазообразующего вещества и молекул среды. Как известно, агрегаты любого поколения могут длительно сохранять информацию о том, какие частицы перешли в их объём в процессе укрупнения [67]. Причём существенную часть этой информации можно извлечь из результатов многопараметрической характеризации укрупнённых агрегатов. Вследствие этого необходимо характеризовать каждый агрегат внутренними и внешними параметрами его состояния. При этом в состав внешних параметров необходимо включить массу, объем и параметры формы агрегата, а также пространственные координаты и скорость его движения в рассматриваемом участке аппарата. А в состав внутренних параметров состояния агрегата следует внести характеристики всех иерархических структур в его объеме.

При детализированном описании системы целесообразно рассмотреть аппарат, в который вводится поток молекул (атомов, радикалов, ионов), которым придана заданная скорость. Первоначальный поток является бесстолкновительным. Затем за счёт притяжения друг к другу частицы начинают сталкиваться и образовывать агрегаты. Рассматривается парное взаимодействие, т.к. вероятность тройных столкновений мала. При столкновении двух частиц сила притяжения между ними существенно больше, чем сила притяжения к остальным частицам [67]. При этом в начале процесса все параметры являются постоянными, но в дальнейшем они изменяются. Частицы взаимодействуют со стенками аппарата [86, 87], оказывая на них давление. К системе подводится поток тепловой энергии поддерживающий заданную температуру стенок. При этом важнейшим предметом описания является взаимодействия двух молекул. Молекулы взаимодействуют друг с другом силами гравитационного и электромагнитного взаимодействия, которые приводят к изменению электронных оболочек атомов вследствие взаимодействия ядер атомов и электронов. Взаимодействие молекул характеризуется дальнодействующим притяжением и близкодействующим отталкиванием. При столкновениях частицы изменяют форму, которая определяется конфигурацией электронных оболочек атомов.

Притяжение обеспечивает столкновения частиц, которые могут привести либо к объединению частиц, либо к последующему их распаду. Поэтому как в случае жидкой среды, так и в случае газа для кинетического описания целесообразно рассмотреть уравнение типа Власова [84, 85, 88–93, 94]. При этом понадобится определять потенциал (или потенциальную энергию) притяжения с учетом того, что энергия отталкивания возникает из-за того, что сталкивающиеся частицы изменили свою форму, которая определяется конфигурацией электронных оболочек. Следует учитывать, что в аппарате, в который введены молекулы фазообразующего вещества и газа-носителя,

первоначально образуются димеры, которые часто облучаются фотонами. Изучение образования димеров можно считать первым приближением к выявлению законов фазообразования.

Второе приближение предполагает изучение взаимодействия множества молекул, находящихся в аппарате. Такое изучение целесообразно начать с рассмотрения ранней стадии процесса, когда агрегатов мало. Описание такого множества молекул удается свести к уравнениям типа Фоккера–Планка [19, 18, 67, 82, 83] (или типа Эйнштейна–Колмогорова [81]). Эксперименты показали, что значительную информацию о множествах частиц можно извлечь из перечисленных уравнений, а также из множества других кинетических уравнений, описывающих изменение состояния частиц в аппарате. Это можно показать, рассмотрев общую систему уравнений, включающих уравнения типа Максвелла и Больцмана и типа Власова, описывающих эволюцию функции распределения частиц по параметрам состояния.

Далее мы выписали новую общую систему уравнений типа Максвелла и Больцмана и типа Власова на эволюцию функции распределения частиц по их многим параметрам. Уравнения Больцмана и Власова являются частными случаями этой системы. С помощью подстановки локального максвелловского распределения в рассматриваемую систему уравнений типа Максвелла и Больцмана и типа Власова удалось перейти к сокращенному описанию состояния системы в виде функции распределения частиц по параметрам состояния в широком интервале интенсивности внешних воздействий. Удалось приблизиться к сравнению рассчитанных функций распределения с экспериментальными данными. Был реализован также подход к оптимизованному математическому обеспечению создания материалов нового поколения.

***. Подходы к описанию априорных моделей с использованием результатов решения краевых задач**

Краевые задачи в настоящей работе – это проблемы решения кинетического уравнения на эволюцию дискретной или континуальной функции распределения по многим параметрам с учётом определенных разных воздействий на неё в рассматриваемых аппаратах с учётом заданных граничных условий и процессов на их стенках.

На первом этапе рассматриваются четыре вида воздействий (модифицирований) на вещество в аппарате: термическое, механическое, химическое и разные виды облучения. На следующих стадиях рассматривается синергетический эффект, начиная с пар воздействий и продолжая их большим числом.

Всё это делается для создания имитатора с целью получения МНП.

В настоящей работе мы ограничимся рассмотрением первых трёх видов модифицирований.

Далее мы изучим кинетические уравнения агрегации.

Однако, можно, для простоты, рассмотреть зарождение, рост и распад первичных атомно-молекулярных агрегатов, что называют случаем Беккера–Дёринга. В этом случае удаётся найти равновесное решение, если частотные функции сделать независящими от времени [18].

Сначала можно охладить вещества до очень низких температур, что приведёт к распаду агрегатов. Следующий этап – это постепенное увеличение температуры. В этом случае сначала начнут стадийно образовываться и расти агрегаты: их функция распределения будет сдвигаться в сторону увеличения свойства числа составляющих агрегатов, а их формы будут принимать компактный вид. При сильном нагревании агрегаты средних размеров начнут распадаться, и произойдёт сдвиг функции распределения в сторону мелких частиц. При этом самые крупные агрегаты продолжат свой рост и слипание в одну большую компактную частицу. С помощью такого модифицирования можно получать МНП с заданными свойствами. В настоящей статье мы нагреваем систему частиц через стенки аппарата, а также допускаем увеличение температуры за счёт ввода потока молекул и атомов веществ непрерывно или за короткое время, и это уже химическое модифицирование. Возникает вопрос: как нужно нагревать, чтобы получить требуемый МНП. В настоящей работе мы строим априорную модель для ответа на этот вопрос.

Механическое воздействие можно осуществить, например, с помощью мешалки, что приводит к однородной по пространству функции распределения.

Далее мы выписываем уравнения общей химической кинетики, которые планируется использовать для разработки методов ускорения химических реакций в аппаратах, куда вводятся пары или растворы двух реагентов. Оказалось, что этими уравнениями и их обобщениями можно описать практически любой дискретный физический, химический и прочие кинетические процессы. В настоящей работе мы используем уравнения химической кинетики для описания эволюции функций распределения частиц, распределённых по массе и форме.

Настоящая работа в целом посвящена априорной модели описания кинетики агрегации в системе, где обеспечивается многопараметричная характеризация агрегатов.

Итак, в каждом случае требуется проанализировать, что будет, если варьировать параметры следующих задач: 1) процессы в покрытиях или на стенках аппаратов (в частности, и поэтому мы рассматриваем двумерные формы чвстиц); 2) кристаллизация в объёме (в аппарат вводится кратковременно или непрерывно поток вещества); 3) процессы эволюции частиц при их нагреве через стенки или за счёт ввода молекул или атомов веществ.

На примере некоторых веществ экспериментальные результаты уже получены даже с учётом влияния облучения самого электронного микроскопа, но ещё не опубликованы.

***. Некоторые результаты использования априорного математического обеспечения изучения процессов при превращении ИВ в МНП**

Проведено изучение аппарата с терморегулируемыми стенками, в который вводится множество атомов и молекул, используемых для получения МНП.

Рассматриваются процессы агрегации в объёме аппарата, обеспечивается гомогенное распределение агрегатов. Основной процесс в объёме аппарата – это явление парных столкновений частиц разного вида.

Учитывается, что объединение агрегатов обусловлено гравитационным и электромагнитным взаимодействием частиц, в результате которого происходит накопление частиц на стенках и на дне аппарата.

При описании этих явлений целесообразно рассмотреть следующие задачи:

1) Химическая реакция с образованием ИВ: вводятся два вещества – смесь паров реагентов.

В данной краевой задаче главным параметром являются скорость молекул реагентов и число электронов в молекуле. По скоростям мы производим интегрирование, т.е. переходим к сокращённому описанию, в результате которого коэффициенты уравнений становятся зависящими от температуры, которая определяется температурой стенок аппарата.

2) Агрегация с образованием агрегатов следующего поколения.

Если частицы находятся в газовой среде, то она считается непрерывной и происходит рост частиц МНП в непрерывной среде.

Главными параметрами здесь являются вектор скорости и масса каждого агрегата. По скоростям, как и в первой краевой задаче, мы производим интегрирование.

3) Рассмотрение множества частиц, поступивших на стенки – формирование покрытия.

В данной краевой задаче главным параметром является форма площади изображения частиц.

4) Кристаллизация – это когда вводятся молекулы одного вида и происходит охлаждение.

Главные параметры здесь такие же как и во второй краевой задаче.

5) О взаимодействии двух частиц МНП.

Эта задача обсуждалась, в частности, в [86, 87, 74]. Главные параметры здесь – координаты и скорости частиц.

Поиск решения этих задач изложен далее.

В настоящей работе предпринята попытка приблизить многопараметрическое описание от теоретического рассмотрения [98] к экспериментальным данным, в частности, полученным в лаборатории гетерогенных процессов кафедры радиохимии Химического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, в форме, используемой для их описания и анализа [18], [74], [83].

**1. Подходы к решению задач о процессах превращения исходного вещества в материалы**

Мы рассматриваем замкнутый реактор, в который введено фазообразующее вещество – смесь отдельных молекул (или атомов) одного вида и газноситель.

В работах Дж.К. Максвелла [77, 78], Л. Больцмана [79] и других исследователей статистического похода появляется функция распределения по скоростям и координатам и другим параметрам, зависящая от времени. Теперь возникает необходимость добавлять многопараметрическое описание. Это связано с тем, что оно стало доступным для экспериментального наблюдения. Проблема состоит в том, чтобы, проведя априорные эксперименты, написать уравнения на функции распределения по этим многим параметрам.

При столкновениях будут образовываться агрегаты разных поколений $k \in \mathsf{N}$, формируя иерархические структуры [67], [82]. $k = 0$ – это отдельные молекулы или атомы. Во-первых, процесс образования агломератов происходит стадийно. Сначала образуются первичные частицы ($k = 1$) или агрегаты первого поколения (случай Беккера–Дёринга [80]) за счёт присоединения отдельных молекул. Первичные частицы, объединяясь друг с другом и с отдельными молекулами, дают частицы второго поколения ($k = 2$) и т.д. Во-вторых, наблюдается, что образование всех стадий происходит самоподобно по параметру площади изображения частицы. Поэтому для простоты выписываемых уравнений при рассмотрении примеров рассматриваемых нами общих уравнений: кинетических моделей частиц, различающихся по площади изображения и другим параметрам (в частности, форме), мы ограничимся рассмотрением только первой стадии.

Чтобы создать структуру с требуемыми свойствами, нужно описать внешние и внутренние свойства каждой частицы. Внешние параметры состояния частицы характеризуют её вещественный и энергетический обмен с внешней для неё средой, а внутренние – перераспределение вещества и энергии внутри частицы [18, 67, 74, 82]. Состояние каждой молекулы характеризуется следующими внешними параметрами: массой, положением и скоростью её центра масс. Целесообразно также ввести понятие формы молекулы. Когда вводится форма, то на следующем этапе к внешним параметрам добавляется ориентация частицы и скорость её изменения, т.е. вращательный момент. В случае первичных частиц добавляются ещё следующие внешние параметры: параметры рельефа поверхности и объём, который может быть больше, чем сумма объёмов, входящих в рассматриваемый агрегат молекул (возможна пористость). В случае вторичных агрегатов добавляются следующие внутренние параметры: положения центра масс (относительно центра масс рассматриваемого вторичного агрегата) каждой из первичных частиц и остальных отдельных молекул, его составляющих, а также параметры, опре-

деляющие ориентацию и скорость её изменения для частиц, входящих в состав рассматриваемого вторичного агрегата.

Мы не будем включать во внешние свойства координаты и скорости частицы, т.к. они являются локальными свойствами участка системы.

Во внешние свойства входят величины и скорости их изменения. Некоторые параметры: например, масса и форма кластера не меняются со временем при взаимодействии частиц, не приводящем к изменению их числа. А есть параметры, которые меняются: например, скорость изменения ориентации тела в пространстве определяется моментом импульса.

Для определения параметров априорной модели нужно проводить набор экспериментов с одинаковыми начальными условиями в силу вариабельности процесса (см., например: [67]).

Граничные условия (§ 2 настоящей работы) следующие. Частицы взаимодействуют со стенками [86], [87], оказывая на них давление. К системе мы подводим только кинетическую энергию в виде задания температуры стенок и облучение.

Нужно знать силу, с которой взаимодействуют две молекулы. Поэтому нужно узнать потенциал взаимодействия двух частиц. Здесь возникает вопрос об энергии. Про кинетическую энергию всё известно: её можно измерить экспериментально и есть теоретические результаты. А потенциальную: гравитационную и электромагнитную, необходимо выявить, рассматривая её как потенциальную энергию взаимодействия со всеми остальными атомами. Гравитационную энергию нельзя не учитывать, когда мы рассматриваем реактор в земных условиях – происходит оседание частиц. А электромагнитную энергию надо принять неизвестной величиной, определяемой в апостериорной модели.

На молекулярном уровне меняется и внутренняя потенциальная энергия частицы (внутренний параметр), что означает изменение конфигурации электронных оболочек атомов, поскольку есть взаимодействие ядер атомов и электронов.

Отталкивание частиц близкодействующее, а притяжение дальнодействующее. В первую очередь, нас, интересует притяжение, которое возникает, в частности, тогда, когда молекулы представляют собой диполи, а в земных условиях нельзя не учитывать гравитацию. Именно притяжение обеспечивает столкновения частиц, которые могут привести либо к объединению частиц, либо к последующему их распаду. Поэтому для кинетического описания целесообразно рассмотреть уравнение типа Власова [84], [85], [88]. Итак, понадобится определять потенциал (или потенциальную энергию) притяжения. А энергия отталкивания возникает из-за того, что сталкивающиеся частицы (атомы, молекулы и т.д.) изменили свою форму, которая определяется конфигурацией электронных оболочек. Если учитывается форма, то надо

учитывать вращательный момент. Но при переходе к сокращённому описанию от многопараметрического зависимость от скорости и вращательного момента частицы исчезает. Остаётся только гидродинамическая скорость и вращательный момент всей системы. Связь двух частиц либо физическая, либо может возникнуть химическая связь. Однако, согласно возможностям эксперимента начинать рассмотрение надо не с атомного уровня, а с нано.

Первоначально образуются димеры. Простейший случай – это взаимодействие двух атомов (или молекул). Две сталкивающиеся частицы могут находиться в вакууме и облучаться фотонами. Это следующий вид воздействия на систему.

Второе приближение – это множество молекул, находящихся в реакторе. Мы рассматриваем раннюю стадию процесса, когда агрегатов мало. Затем объём сжимается и газ-носитель или раствор удаляется. И остаётся порошок: материал будет осаждаться на стенки. Это один из способов образования дисперсного вещества. Это рассмотрение удаётся свести к уравнению типа Фоккера–Планка [18], [67], [74], [82] (уравнению типа Эйнштейна–Колмогорова [81] или диффузному приближению).

Цель настоящей работы – наметить путь для создания априорной модели, направленной на получение материалов с наименьшими энергетическими затратами и с наибольшей экологической безопасностью.

В производстве материалов нового поколения в качестве основы моделирования используются аппараты большого объёма, в которые вводятся множество молекул ИВ. В этом аппарате целесообразно использовать уравнения, описывающие эволюцию функции распределения

$$F_k = F_k\left(t, \mathbf{Z}\right),\ k = -1,0,1,2,\ldots, K_M \tag{1.1}$$

частиц вида $k$ со свойствами $\mathbf{Z} \in \left[\mathbf{Z}_0(k), \mathbf{Z}_M(k)\right]$. Здесь $\mathbf{Z}_0(k)$ и $\mathbf{Z}_M(k)$ – соответственно минимально и максимально возможные значения свойств $\mathbf{Z}$ для частицы поколения $k$. $F_0$ – функция распределения отдельных атомов фазообразующего вещества. Индекс (-1) следует относить к функции распределения $F_{-1} = F_{-1}(t, \mathbf{r}, \mathbf{v})$ частиц среды.

Когда свойства частиц всех видов принимают дискретный набор значений, образующих некоторое множество $\mathsf{Z}$, функция распределения $F(\mathbf{Z})$ имеет вид суммы многомерных $\delta$-функций Дирака: $F(\mathbf{Z}) = \sum_{\mathbf{i} \in Z} N(\mathbf{i}) \cdot \delta(\mathbf{i} - \mathbf{Z})$.

Вектор свойств частиц **V** каждого вида $k$ без включения в него положения **r** и скорости **v** частицы обозначим вектором $\mathbf{W} = (m, v, s, \mathbf{y})$, а диапазон изменения свойства **W** определим следующим образом: $\mathbf{W} \in \left[\mathbf{W}_0(k), \mathbf{W}_M(k)\right]$.

Рассмотрим систему уравнений типа Максвелла, Больцмана, Власова описывающих эволюцию функций распределения по свойствам частиц:

$$\frac{\partial F_k}{\partial t}+\left(\mathbf{v},\frac{\partial F_k}{\partial \mathbf{r}}\right)+\sum_{j=0}^{K_M}\left(\mathbf{f}_k\left[F_j\right](t,\mathbf{W},\mathbf{r}),\frac{\partial F_k}{\partial \mathbf{v}}\right)=\Omega(t,k,\mathbf{Z})\equiv$$

$$\equiv\frac{1}{\varepsilon}I\left[F_{-1},F_k(\mathbf{W})\right]+\sum_{j=0}^{K_M}\sum_{\mathbf{c}=\mathbf{W}_0(j)}^{\mathbf{W}_M(j)}I\left[F_j(\mathbf{c}),F_k(\mathbf{W})\right]+$$

$$+\sum_{j=0}^{k-1}\sum_{\mathbf{c}=\mathbf{W}_0(j)}^{\mathbf{W}_M(j)}\sum_{\mathbf{W}-\mathbf{c}}J_{(k,\mathbf{W})}^{(j,\mathbf{c}),(k,\mathbf{W}-\mathbf{c})}\left[F_j(\mathbf{c}),F_k(\mathbf{W}-\mathbf{c})\right]-\sum_{j=0}^{K_M}\sum_{\mathbf{c}=\mathbf{W}_0(j)}^{\mathbf{W}_M(j)}\sum_{\mathbf{W}+\mathbf{c}}J_{\mathbf{W}+\mathbf{c}}^{(j,\mathbf{c}),(k,\mathbf{W})}\left[F_j(\mathbf{c}),F_k(\mathbf{W})\right]- \quad (1.2)$$

$$-\frac{1}{2}\sum_{\mathbf{c}=\mathbf{W}_0(k)}^{\mathbf{W}_M(k)}\sum_{\mathbf{W}-\tilde{\mathbf{n}}\,\mathbf{c}}J_{\mathbf{W}-\tilde{\mathbf{n}}\,\mathbf{c}}^{(k,\mathbf{W})}\left[F_{-1},F_k(\mathbf{W})\right]+\sum_{j=k}^{K_M}\sum_{\mathbf{c}=\mathbf{W}_0(j)}^{\mathbf{W}_M(j)}\sum_{\mathbf{W}+\mathbf{c}}J_{(k,\mathbf{W}),\mathbf{c}}^{(j,\mathbf{W}+\mathbf{c})}\left[F_{-1},F_j(\mathbf{W}+\mathbf{c})\right]+$$

$$+\frac{1}{2}\sum_{\mathbf{W}=\mathbf{X}_0(j)}^{\mathbf{W}_M(j)}\sum_{\mathbf{X}-\mathbf{c}}J_{(k,\mathbf{W})}^{(k-1,\mathbf{c}),(k-1,\mathbf{W}-\mathbf{c})}\left[F_{k-1}(\mathbf{c}),F_{k-1}(\mathbf{W}-\mathbf{c})\right],\ k=0,1,2,\ldots,K_M.$$

При выписывании системы уравнений (1.2) используется аналогия с работой [95], где подробно выписаны интегралы упругих и неупругих столкновений: $I$ и $J$. Уравнения (1.2) учитывают дискретный характер изменения свойств $\mathbf{W}\in\left[\mathbf{W}_0(k),\mathbf{W}_M(k)\right]$ частиц. В случае целесообразности непрерывного описания процессов, суммы в уравнениях (1.2) и последующих аналогичных уравнениях можно заменить интегралами, моделируя дискретные распределения континуальным аналогом.

Для системы (1.2) с учётом граничных условий должен выполняться выполняется закон изменения числа молекул фазообразующего вещества в аппарате $N_0^{all}(t)$: $\sum_{k=0}^{K_M}\sum_{\mathbf{W}_k=\mathbf{W}_0(k)}^{\mathbf{W}_M(k)}\int\frac{m_k}{m_0}F_k(t,\mathbf{Z}_k)d\mathbf{r}_k d\mathbf{v}_k=N_0^{all}(t)$. Если $N_0^{all}(t)=const$, т.е. мы имеем закрытый аппарат, то выполняется закон сохранения числа молекул фазообразующего вещества.

В (1.2) интеграл столкновений Больцмана $I\left[F_j,F_k\right]$ отвечает упругим столкновениям частиц фазообразующего вещества с частицами континуальной среды (первое слагаемое), а также между собой (второе слагаемое). Это классические интегралы столкновений, которые есть операторы, действующие на функции распределения только как функции скорости [78, 79, 88, 89, 95].

Остальные члены в правой части (1.2) описывают неупругие процессы: приход частиц в состояние **W** за счет объединения частиц поколения *k* со свойствами $\mathbf{W}-\mathbf{c}$ с частицами вида $j<k$ со свойствами **c** (третье слагаемое), уход из состояния **W** в любые другие состояния за счет объединения частиц поколения *j* со свойствами **c** с частицами вида *k* со свойствами **W** (четвёртое слагаемое), уход из состояния **W** в любые другие состояния за счет фрагментации частиц поколения *k* со свойствами **W** на частицы со свойствами $\mathbf{W}-\mathbf{c}$ и **c** (пятое слагаемое), приход частиц вида *k* в состояние **W** за счет фрагментации частиц поколения $j\geq k$ со свойствами $\mathbf{W}+\mathbf{c}$ на частицы вида *k* со свойствами **W** и на частицы со свойствами **c** (шестое сла-

гаемое), объединение частиц поколения $k-1$, в результате которого получается частицы вида $k$ со свойствами $\mathbf{W}$.

Здесь положим, что свойства $\mathbf{W}$ частиц являются аддитивной величиной: при объединении частиц со свойствами $\mathbf{a}$ и $\mathbf{b}$ получается частица со свойствами $\mathbf{a}+\mathbf{b}$, а при столкновении частицы фазообразующего вещества со свойством $\mathbf{a}$ с частицей среды получаются частицы фазообразующего вещества со свойствами $\mathbf{a}-\mathbf{b}$ и $\mathbf{b}$. Сумма $\mathbf{a}+\mathbf{b}$ может и не быть традиционным сложением чисел и векторов. Заметим, что результат объединения или распада даёт не единственный набор свойств, а их множество. Для числа молекул, составляющих частицу, имеет место единственность результата сложения. Но уже для форм частиц мы имеем неединственность результата их объединения или фрагментации. Это учтено в (1.2), когда мы суммируем по возможным значениям $\mathbf{W}-\mathbf{c}$ $(\sum_{\mathbf{W}-\mathbf{c}}\dots)$ и $\mathbf{W}+\mathbf{c}$ $(\sum_{\mathbf{W}+\mathbf{c}}\cdots)$ в слагаемых, описывающих неупругие столкновения, в правой части (1.2).

Отметим, что если власовский член (третье слагаемое в левой части) положить равным нулю, а в правой взять нулевыми слагаемые неупругих столкновений, то мы получим многопараметрическое уравнение Больцмана.

Итак, мы получили систему уравнений типа Больцмана с власовским членом: (1.2).

Если правую часть в (1.2) положить равной нулю, то мы получим уравнение Власова по свойствам частиц:

$$\frac{\partial F_k}{\partial t}+\left(\mathbf{v},\frac{\partial F_k}{\partial \mathbf{r}}\right)+\sum_{j=0}^{K_M}\left(\mathbf{f}_{kj}\left[F_j\right](t,\mathbf{W},\mathbf{r}),\frac{\partial F_k}{\partial \mathbf{v}}\right)=0\,.$$

Как и в уравнении Власова, в (1.2) $\mathbf{f}_{kj}$ есть сила, делённая на массу агрегата вида $k$, действующая на агрегат поколения $k$ со стороны агрегатов поколения $j$. Уравнение Власова было введено для описания плазмы [84], [85] (и называется теперь уравнением Власова–Максвелла [88]), а уравнения такого типа оказались приспособленными для описания любых дальнодействий [90–94].

Здесь сила сама есть функционал от функции распределения. Такой вид зависимости называется самосогласованным полем. Простейший вид зависимости силы (делённой на массу) $\mathbf{f}$ от функции распределения $F(t,\mathbf{r},\mathbf{v})$ соответствует парному потенциалу взаимодействия $K(\mathbf{r},\mathbf{q})\equiv K(\mathbf{r}-\mathbf{q})=K(\mathbf{q}-\mathbf{r})=K(|\mathbf{r}-\mathbf{q}|)$:

$$\mathbf{f}[F](t,\mathbf{r})=-\left(\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}}U[F]\right)(t,\mathbf{r})=-\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}}\int K(|\mathbf{r}-\mathbf{q}|)F(t,\mathbf{q},\mathbf{v})d\mathbf{v}d\mathbf{q} \qquad (1.3)$$

в случае уравнения Власова

$$\frac{\partial F}{\partial t}+\left(\mathbf{v},\frac{\partial F}{\partial \mathbf{r}}\right)+\left(\mathbf{f}[F],\frac{\partial F}{\partial \mathbf{v}}\right)=0$$

на функцию распределения $F=F(t,\mathbf{r},\mathbf{v})$.

В нашем случае также реализуется дальнодействующее притяжение частиц. Поэтому аналогом (1.3) будет следующее выражение для силы (делённой на массу):

$$\mathbf{f}_{kj}\left[F_j\right](t,\mathbf{W},\mathbf{r}) = -\left(\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} U_{kj}\left[F_j\right]\right)(t,\mathbf{W},\mathbf{r}) = -\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \sum_{\mathbf{Y}=\mathbf{W}_0(j)}^{\mathbf{W}_M(j)} \int K_{kj}\left(|\mathbf{r}-\mathbf{q}|,\mathbf{W},\mathbf{Y}\right) F_j(t,\mathbf{Y},\mathbf{q},\mathbf{v}) d\mathbf{v} d\mathbf{q} \,. \quad (1.4)$$

Если (1.4) подставить в (1.2), то мы имеем обобщённое уравнение Больцмана по свойствам частиц с власовским членом в левой части уравнения:

$$\frac{\partial F_k}{\partial t} + \left(\mathbf{v}, \frac{\partial F_k}{\partial \mathbf{r}}\right) - \sum_{j=0}^{K_M} \left( \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \sum_{\mathbf{Y}=\mathbf{W}_0(j)}^{\mathbf{W}_M(j)} \int K_{kj}\left(|\mathbf{r}-\mathbf{q}|,\mathbf{W},\mathbf{Y}\right) F_j(t,\mathbf{Y},\mathbf{q},\mathbf{v}) d\mathbf{v} d\mathbf{q}, \frac{\partial F_k}{\partial \mathbf{v}} \right) = \Omega(t,k,\mathbf{Z}). \quad (1.5)$$

Большой параметр $1/\varepsilon >> 1$, стоящий перед первым членом в правой части (1.2) означает, что частота упругих столкновений с частицами среды наибольшая среди всех остальных частот. Упругие столкновения с частицами среды служат механизмом, поддерживающим термодинамическое равновесие в системе. Тогда функции распределения стремятся к максвелловским по переменной $\mathbf{v}$. Подставим локальное максвелловское распределение:

$$F_k(t,\mathbf{Z}) = N_k(t,\mathbf{W},\mathbf{r}) \left( \frac{m_k(n)}{2\pi k T(t,\mathbf{r})} \right)^{3/2} \exp\left( - \frac{m_k(n)(\mathbf{v}-\overline{\mathbf{v}}(t,\mathbf{r}))^2}{2kT(t,\mathbf{r})} \right), \quad (1.6)$$

в (1.5). Здесь $\overline{\mathbf{v}}(t,\mathbf{r})$ – гидродинамическая (или средняя) скорость. Тогда по аналогии с [95], интегрируя обе части уравнения (1.5) по $\mathbf{v}$, получаем:

$$\frac{\partial N_k(t,\mathbf{W},\mathbf{r})}{\partial t} + div_{\mathbf{r}}\left(\overline{\mathbf{v}} N_k\right) =$$

$$= \sum_{j=0}^{k-1} \left( \sum_{\mathbf{c}=\mathbf{W}_0(j)}^{\mathbf{W}_M(j)} \sum_{\mathbf{W}-\mathbf{c}} \alpha_{k,j}(\mathbf{W}-\mathbf{c},\mathbf{c}) N_j(\mathbf{c}) N_k(\mathbf{W}-\mathbf{c}) - \sum_{\mathbf{c}=\mathbf{W}_0(j)}^{\mathbf{W}_M(j)} \sum_{\mathbf{W}+\mathbf{c}} \alpha_{k,j}(\mathbf{W},\mathbf{c}) N_j(\mathbf{c}) N_k(\mathbf{W}) \right) - \quad (1.7)$$

$$- \sum_{j=0}^{k-1} \left( \sum_{\mathbf{c}=\mathbf{W}_0(j)}^{\mathbf{W}_M(j)} \sum_{\mathbf{W}-\mathbf{c}} \beta_{k,j}(\mathbf{W}-\mathbf{c},\mathbf{c}) N_0 N_k(\mathbf{W}) - \sum_{\mathbf{c}=\mathbf{W}_0(j)}^{\mathbf{W}_M(j)} \sum_{\mathbf{W}+\mathbf{c}} \beta_{k,j}(\mathbf{W},\mathbf{c}) N_0 N_k(\mathbf{W}+\mathbf{c}) \right) + \Omega_k(t,\mathbf{W},\mathbf{r}),$$

$$k = 1,2,\ldots,K_M,$$

для $\mathbf{W} \in \left[\mathbf{W}_0(k), \mathbf{W}_M(k)\right]$. В (1.7) $N_k(t,\mathbf{W},\mathbf{r})$ – концентрация частиц поколения *k*, обладающих набором свойств **W** в точке пространства **r**, $\alpha_{k,j}(\mathbf{W},\mathbf{c})$ – частотная функция (сечение) объединения частицы поколения *k*, обладающей набором свойств **W**, с частицей вида $j < k$, обладающей набором свойств **c**, с образованием частицы поколения *k*, $\beta_{k,j}(\mathbf{W}-\mathbf{c},\mathbf{c})$ – частота распада частицы вида *k* со свойствами **W**, обладающей набором свойств **W**, на частицу того же поколения, обладающей набором свойств $\mathbf{W}-\mathbf{c}$, и на частицу вида *j*, обладающей набором свойств **c**. $\Omega_k(t,\mathbf{W},\mathbf{r})$ в (1.7) означает, что число частиц вида *k* может также меняться в результате объединения двух частиц поколения $k-1$ или процесса, обратного данному, для $k < K$ вследствие объединения частицы вида *k* с частицами поколения большего либо равного *k* и вследствие отпада частицы вида *k* от частиц поколения, большего либо

равного $k$. Можно выписать громоздкое уравнение и для $k=0$, но оно эквивалентно с учётом (1.7) локальному закону сохранения числа всех молекул фазообразующего вещества:

$$\frac{\partial N_0^{all}(t,\mathbf{r})}{\partial t} + div_{\mathbf{r}}\left(\bar{\mathbf{v}} N_0^{all}\right) = S_0(t,\mathbf{r}), \qquad (1.8)$$

где $N_0^{all}(t,\mathbf{r}) = \sum_{k=0}^{K_M} \sum_{\mathbf{W}_k=\mathbf{W}_0(k)}^{\mathbf{W}_M(k)} \frac{m_k(n)}{m_0} N_k(t,\mathbf{W}_k,\mathbf{r})$, $S_0(t,\mathbf{r})$ – интенсивность поступления молекул фазообразующего вещества в систему в точке $\mathbf{r}$ в момент времени $t$. С учётом граничных условий выполняется закон сохранения (или изменения) числа всех молекул фазообразующего вещества в системе $N_0^{all}(t)$:

$$\sum_{k=0}^{K_M} \sum_{\mathbf{W}_k=\mathbf{W}_0(k)}^{\mathbf{W}_M(k)} \int \frac{m_k(n)}{m_0} N_k(t,\mathbf{W}_k,\mathbf{r}) d\mathbf{r} = N_0^{all}(t).$$

Система (1.7) ведёт себя так же, как если бы не было власовского члена (третьего слагаемого в левой части) в (1.2). Так получается из-за того, что в этом случае все дальнодействующие притяжения уравновешенны.

Если уравнение для $k=0$ сложить со всеми уравнениями (1.7), суммируя по свойствам $\mathbf{W} \in [\mathbf{W}_0(k), \mathbf{W}_M(k)]$ агрегата поколения $k$ и по всем видам агрегатов с весами $m_k(n)$, то получим уравнение на эволюцию плотности всех частиц фазообразующего вещества: (1.8), умноженное на $m_0$. Если мы подставим локальное максвелловское распределение в (1.5), умножим на импульс $\mathbf{p}_k = m_k(n)\mathbf{v}$, проинтегрируем по импульсам и просуммируем по свойствам $\mathbf{W} \in [\mathbf{W}_0(k), \mathbf{W}_M(k)]$ агрегата поколения $k$ и по всем видам агрегатов, то получим закон сохранения импульса. Аналогично, при умножении на $\frac{m_k(n)\mathbf{v}^2}{2}$, имеем уравнение баланса энергии. Перечисленные уравнения вместе с уравнениями (1.7) дают систему гидродинамических уравнений Эйлера, описывающую систему агрегатов различных поколений, обладающих свойствами $\mathbf{W}$, с учётом дальнодействующего притяжения этих частиц (учтённого во власовском члене) и с учётом возможности их объединения и распада.

Итак, мы выписали новую общую систему уравнений типа Максвелла, Больцмана и Власова эволюции функции распределения частиц по их многим параметрам. Уравнения Больцмана и Власова являются частными случаями этой системы. С помощью подстановки локального максвелловского распределения в рассматриваемую систему уравнений типа Максвелла, Больцмана и Власова мы перешли к сокращённому описанию, как это сделано независимо в работах [95] и [96]: функции распределения теперь не зависят от скоростей частиц.

**2. Граничные условия на стенках реактора**

Рассмотренные в § 1 уравнения локальные. Их нужно дополнить граничными условиями.

Обычно рассматриваются следующие типы взаимодействия газа со стенками (с телом): зеркальное и диффузное отражения, а также сорбция [86]. Динамика упругого столкновения двух тел изучалась ещё Максвеллом [87].

В нашем рассмотрении функции распределения частиц максвелловские. Представляется целесообразным рассмотреть диффузное отражение.

Функция распределения падающего на стенку потока $F_k^-(t,\mathbf{Z})$ агрегатов вида $k$ со свойствами $\mathbf{Z}$ имеет вид:

$$F_k^-(t,\mathbf{W},\mathbf{r},\mathbf{v}) = N_k^-(t,\mathbf{W},\mathbf{r})\left(\frac{m_k(n)}{2\pi kT(t,\mathbf{r})}\right)^{3/2}\exp\left(-\frac{m_k(n)(\mathbf{v}-\mathbf{v}_W(t,\mathbf{r}))^2}{2kT(t,\mathbf{r})}\right)\theta((\mathbf{v}-\mathbf{v}_W(t,\mathbf{r}),\mathbf{n})),$$

где $\theta$ – функция Хэвисайда, $\mathbf{n}$ – внешняя нормаль в точке поверхности стенки, $\mathbf{v}_W(t,\mathbf{r})$ – скорость стенки. Функция распределения отлетающего от стенки потока является максвелловской функцией распределения с температурой стенки $T_W(t,\mathbf{r})$ [78]:

$$F_k^+(t,\mathbf{W},\mathbf{r},\mathbf{v}) = N_k^+(t,\mathbf{W},\mathbf{r})\left(\frac{m_k(n)}{2\pi kT_W(t,\mathbf{r})}\right)^{3/2}\exp\left(-\frac{m_k(n)(\mathbf{v}-\mathbf{v}_W(t,\mathbf{r}))^2}{2kT_W(t,\mathbf{r})}\right)\theta(-(\mathbf{v}-\mathbf{v}_W(t,\mathbf{r}),\mathbf{n})).$$

Для функции распределения всех частиц поколения $k$ на стенке имеем:

$$F_k^-(t,\mathbf{W},\mathbf{r},\mathbf{v}) + F_k^+(t,\mathbf{W},\mathbf{r},\mathbf{v}) = F_k(t,\mathbf{W},\mathbf{r},\mathbf{v}). \qquad (2.1)$$

Проинтегрировав обе части этого выражений по $\mathbf{v}$, получаем, что значения концентраций $N_k(t,\mathbf{W},\mathbf{r})$, $N_k^-(t,\mathbf{W},\mathbf{r})$ и $N_k^+(t,\mathbf{W},\mathbf{r})$ связаны соотношением баланса числа частиц:

$$N_k^-(t,\mathbf{W},\mathbf{r}) + N_k^+(t,\mathbf{W},\mathbf{r}) = N_k(t,\mathbf{W},\mathbf{r}), \qquad (2.2)$$

Для скорости сорбции частиц вида $k$ со свойствами $\mathbf{W}$ в точке $\mathbf{r}$ на стенке: $v_k(t,\mathbf{W},\mathbf{r})$, имеем соотношение:

$$\int(\mathbf{v}-\mathbf{v}_W(t,\mathbf{r}),\mathbf{n})F_k^-(t,\mathbf{Z})d\mathbf{v} + \int(\mathbf{v}-\mathbf{v}_W(t,\mathbf{r}),\mathbf{n})F_k^+(t,\mathbf{Z})d\mathbf{v} = v_k(t,\mathbf{W},\mathbf{r})N_k^-(t,\mathbf{W},\mathbf{r}),$$

или

$$N_k^-(t,\mathbf{W},\mathbf{r})\sqrt{\frac{2kT(t,\mathbf{r})}{\pi m_k(n)}} - N_k^+(t,\mathbf{W},\mathbf{r})\sqrt{\frac{2kT(t,\mathbf{r})}{\pi m_k(n)}} = v_k(t,\mathbf{W},\mathbf{r})N_k^-(t,\mathbf{W},\mathbf{r}). \qquad (2.3)$$

Для давления на стенку $P_k\left(m(n)_k, N_k^-(t,\mathbf{W},\mathbf{r}), N_k^+(t,\mathbf{W},\mathbf{r}), T(t,\mathbf{r}), T_W(t,\mathbf{r})\right)$ частиц поколения $k$ со свойствами $\mathbf{W}$ в точке $\mathbf{r}$ имеем выражение:

$$m_k(n)\int(\mathbf{v}-\mathbf{v}_W(t,\mathbf{r}),\mathbf{n})^2F_k^-(t,\mathbf{Z})d\mathbf{v} + m_k(n)\int(\mathbf{v}-\mathbf{v}_W(t,\mathbf{r}),\mathbf{n})^2F_k^+(t,\mathbf{Z})d\mathbf{v} = P_k$$

или

$$N_k^-(t,\mathbf{W},\mathbf{r})\left(\frac{kT(t,\mathbf{r})}{2}\right) + N_k^+(t,\mathbf{W},\mathbf{r})\left(\frac{kT_W(t,\mathbf{r})}{2}\right) = P_k. \qquad (2.4)$$

Давление $P_k\left(m_k(n), N_k^-(t,\mathbf{W},\mathbf{r}), N_k^+(t,\mathbf{W},\mathbf{r}), T(t,\mathbf{r}), T_W(t,\mathbf{r})\right)$ можно считать зависящим от $N_k(t,\mathbf{W},\mathbf{r})$ и $v_k(t,\mathbf{W},\mathbf{r})$ и не зависящим от $N_k^-(t,\mathbf{W},\mathbf{r})$ и $N_k^+(t,\mathbf{W},\mathbf{r})$, поскольку значения этих величин выражаются через $N_k(t,\mathbf{W},\mathbf{r})$ и $v_k(t,\mathbf{W},\mathbf{r})$ согласно соотношениям (2.2) и (2.3). Тогда $P_k$ определяется из (2.4).

Итак, для системы уравнений типа Эйлера, полученной в предыдущем параграфе из системы уравнений типа Максвелла, Больцмана и Власова, мы выписали пространственные граничные условия на стенках реактора. Эти условия являются новыми, т.к. содержат в себе возможность частичной (или полной) сорбции фазообразующего вещества.

**3. Подстановка в виде $\delta$-функций Дирака и динамика множества тел**

Целесообразно рассмотреть бесстолкновительный случай системы уравнений (1.5), т.е. при $\Omega(t,k,\mathbf{Z})\equiv 0$:

$$\frac{\partial F_k}{\partial t}+\left(\mathbf{v},\frac{\partial F_k}{\partial \mathbf{r}}\right)-\sum_{j=0}^{K_M}\left(\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}}\sum_{\mathbf{Y}=\mathbf{W}_0(j)}^{\mathbf{W}_M(j)}\int K_{jk}\left(|\mathbf{r}-\mathbf{q}|,\mathbf{W},\mathbf{Y}\right)F_j(t,\mathbf{Y},\mathbf{q},\mathbf{v})d\mathbf{v}d\mathbf{q},\frac{\partial F_k}{\partial \mathbf{v}}\right)=0\cdot \quad (3.1)$$

Сделаем подстановку в виде суммы $\delta$-функций Дирака:

$$F_k(t,\mathbf{Z})=\sum_{i=1}^{M_k}\delta\left(\mathbf{Z}-\mathbf{Z}_{k,i}(t)\right)\cdot \quad (3.2)$$

Здесь $M_k$ – число частиц вида $k$, $\mathbf{Z}_{k,i}(t)$ – функции времени: свойства $i$-ой частицы вида $k$.

Уже Власову было известно, что такая подстановка является точным решением, когда координаты и скорости удовлетворяют системе уравнений движения множества (в нашем случае $\sum_{i=0}^{K_M}M_k$) тел [85, 88].

Подставляя (3.2) в (3.1), аналогично, как в [88], получаем динамику множества всех частиц фазообразующего вещества:

$$\begin{cases} d\mathbf{R}_{k,i}/dt=\mathbf{V}_{k,i}, \\ d\mathbf{V}_{k,i}/dt=\sum_{j=0}^{K_M}\sum_{p=1}^{M_j}\frac{\partial}{\partial \mathbf{R}_{k,i}}\left(K_{kj}\left(|\mathbf{R}_{k,i}-\mathbf{R}_{j,p}|,\mathbf{W}_{k,i},\mathbf{Y}_{j,p}\right)\right), \\ d\mathbf{W}_{k,i}/dt=\mathbf{0}. \end{cases}$$

Здесь $\mathbf{R}_{k,i}$, $\mathbf{V}_{k,i}$, $\mathbf{W}_{k,i}$ и $\mathbf{Y}_{j,p}$ – функции времени: соответственно координата, скорость, все свойства, не включающие в себя координату и скорость, $i$-ой частицы вида $k$ и $p$-ой частицы вида $j$.

Можно рассмотреть аналогичную подстановку, если сумму (3.2) заменить на интеграл, как это сделано в [88] для случая уравнения Власова.

Итак, уравнение типа Власова (3.1) допускает подстановку (3.2) и содержит в себе движение системы тел с любым числом частиц. Это показывает фундаментальность и уравнения Власова, и рассматриваемых нами уравнений типа Власова с многопараметрическим описанием частиц.

**4. Вывод уравнения Власова из принципа наименьшего действия**

Рассмотрим систему уравнений типа Власова:

$$\frac{\partial F_k}{\partial t}+\left(\mathbf{v},\frac{\partial F_k}{\partial \mathbf{r}}\right)+\left(\mathbf{f}_k\left[F_j\right](t,\mathbf{W},\mathbf{r}),\frac{\partial F_k}{\partial \mathbf{v}}\right)=0, \tag{4.1}$$

$$\mathbf{f}_k\left[F_j\right](t,\mathbf{W},\mathbf{r})=-\left(\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}}U_k\left[F_j\right]\right)(t,\mathbf{W},\mathbf{r})=-\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}}\sum_{j=0}^{K_M}\int K_{\not k}\left(|\mathbf{r}-\mathbf{q}|,\mathbf{W},\mathbf{Y}\right)F_j(t,\mathbf{Y},\mathbf{q},\mathbf{v})d\mathbf{Y}d\mathbf{v}d\mathbf{q}\cdot \tag{4.2}$$

Приходится рассматривать парные потенциалы взаимодействия агрегатов каждого иерархического уровня с каждым другим видом частиц, т.к. взаимодействие одних иерархических уровней могут отличаться от взаимодействия частиц других типов.

Рассмотрим вывод системы уравнений (4.1), (4.2) из принципа наименьшего действия, которое имеет вид:

$$\begin{aligned} S=&\sum_{k=0}^{K_M}\int F_k(t,\mathbf{Z}_k)\left[\frac{\mathbf{v}_k^{\,2}}{2}-U_k(t,\mathbf{W}_k,\mathbf{r}_k)\right]d\mathbf{Z}_k dt+\\ &+\sum_{k=0}^{K_M}\sum_{j=0}^{K_M}\int K_{kj}\left(|\mathbf{r}_k-\mathbf{r}_j|,\mathbf{W}_k,\mathbf{W}_j\right)F_k(t,\mathbf{Z}_k)F_j(t,\mathbf{Z}_j)d\mathbf{Z}_k d\mathbf{Z}_j dt. \end{aligned} \tag{4.3}$$

Варьируя (4.3) по $F_k(t,\mathbf{Z}_k)$ как функцию аргументов $\mathbf{Z}_k$, по которым проводится интегрирование, и $k$, по которому осуществляется суммирование, имеем:

$$\frac{\mathbf{v}_k^{\,2}}{2}-U_k(t,\mathbf{W}_k,\mathbf{r}_k)+\sum_{j=0}^{K_M}\int K_{\not k}\left(|\mathbf{r}_k-\mathbf{r}_j|,\mathbf{W}_k,\mathbf{W}_j\right)F_j(t,\mathbf{Z}_j)d\mathbf{Z}_j=0\cdot$$

Продифференцировав по $\mathbf{r}$, получаем (4.2).

Рассмотрим одну частицу, которую мы обозначим индексом $i$, её вид через $k$. Действие для неё следует при выборе

$$F_{k,i}(t,\mathbf{Z})=\delta\left(\mathbf{r}-\mathbf{r}_{k,i}(t)\right)\times\delta\left(\mathbf{v}-\mathbf{v}_{k,i}(t)\right)\times\delta\left(\mathbf{W}-\mathbf{W}_{k,i}(t)\right), \tag{4.4}$$

Рассмотрим для такой функции распределения первое слагаемое в (4.3), получаем стандартное действие:

$$\int\left[\frac{\mathbf{v}_{k,i}^{\,2}}{2}-U_k(t,\mathbf{W}_{k,i},\mathbf{r}_{k,i})\right]dt\,.$$

Подстановка во второе слагаемое даёт ноль. Поскольку в силу того, что в одной точке не могут находиться две частицы, без ограничения общности, можем считать, что $K_{kk}\left(0,\mathbf{W}_{k,i},\mathbf{W}_{k,i}\right)=0$.

Варьируем как обычно в механике и получаем уравнение Ньютона: $\frac{d\mathbf{v}_{k,i}}{dt}=-\sum_{j=0}^{K_M}\frac{\partial U_{kj}}{\partial \mathbf{r}_{k,i}}$. Переходим к уравнению Лиувилля для соответствующей системы обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{d\mathbf{r}_{k,i}}{dt}=\mathbf{v}_{k,i},\ \frac{d\mathbf{v}_{k,i}}{dt}=-\sum_{j=1}^{K_M}\frac{\partial U_{kj}}{\partial \mathbf{r}_{k,i}}\cdot$$

Тогда

$$\frac{\partial F_k}{\partial t}+\left(\mathbf{v}_k,\frac{\partial F_k}{\partial \mathbf{r}_k}\right)-\left(\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}_k}U_k\left[F_j\right](t,\mathbf{W}_k,\mathbf{r}_k),\frac{\partial F_k}{\partial \mathbf{v}_k}\right)=0\,. \tag{4.5}$$

Итак, мы вывели систему уравнений Власова из принципа наименьшего действия.

**5. Уравнение типа Фоккера–Планка для описания процессов агрегации**

Свойство $\mathbf{W}\in\left[\mathbf{W}_0(k),\mathbf{W}_M(k)\right]$ принимает дискретные значения, но можно рассмотреть и континуальную модель. Простая континуальная аналогия (1.7) имеет вид:

$$\begin{gathered}\frac{\partial \psi_k(t,\mathbf{W},\mathbf{r})}{\partial t}+div_{\mathbf{r}}\left(\overline{\mathbf{v}}\psi_k\right)=\\ =\sum_{j=0}^{k-1}\left(\sum_{\mathbf{c}=\mathbf{W}_0(j)}^{\mathbf{W}_M(j)}\sum_{\mathbf{W}-\mathbf{c}}\alpha_{k,j}(\mathbf{W}-\mathbf{c},\mathbf{c})N_j(\mathbf{c})\psi_k(\mathbf{W}-\mathbf{c})-\sum_{\mathbf{c}=\mathbf{W}_0(j)}^{\mathbf{W}_M(j)}\sum_{\mathbf{W}+\mathbf{c}}\alpha_{k,j}(\mathbf{W},\mathbf{c})N_j(\mathbf{c})\psi_k(\mathbf{W})\right)-\\ -\sum_{j=0}^{k-1}\left(\sum_{\mathbf{c}=\mathbf{W}_0(j)}^{\mathbf{W}_M(j)}\sum_{\mathbf{W}-\mathbf{c}}\beta_{k,j}(\mathbf{W}-\mathbf{c},\mathbf{c})N_0\psi_k(\mathbf{W})-\sum_{\mathbf{c}=\mathbf{W}_0(j)}^{\mathbf{W}_M(j)}\sum_{\mathbf{W}+\mathbf{c}}\beta_{k,j}(\mathbf{W},\mathbf{c})N_0\psi_k(\mathbf{W}+\mathbf{c})\right)+\Omega_k(t,\mathbf{W},\mathbf{r}),\\ k=1,2,\ldots,K_M,\end{gathered} \tag{5.1}$$

для $\mathbf{W}\in\left[\mathbf{W}_0(k),\mathbf{W}_M(k)\right]$.

Уравнения (5.1) обосновываются тем, что подстановка суммы $\delta$-функций Дирака: $\psi_k(t,\mathbf{W},\mathbf{r})=\sum_{\mathbf{d}=\mathbf{W}_0(k)}^{\mathbf{W}_M(k)}N_k(t,\mathbf{d},\mathbf{r})\cdot\delta(\mathbf{d}-\mathbf{W})$, даёт (1.7). Действительно, подставляя в (5.1) сумму $\delta$-функций и интегрируя для каждого дискретного значения $\mathbf{W}\in\left[\mathbf{W}_0(k),\mathbf{W}_M(k)\right]$ обе части полученного уравнения на интервале, содержащем только одно данное значение **W**, мы получим (1.7) для этого **W**. Эта подстановка объясняет нам, что собой изначально представляют собой уравнения (1.7) для дискретных значений свойств **W**: дискретная функция распределения – это есть просто сумма $\delta$-функций.

Разложим приращения функций в правой части уравнения (5.1) в ряды Тейлора по свойствам **W** и рассмотрим только два первых члена разложения. Мы можем пренебречь остальными членами, если свойства частиц поколений меньше, чем *k* достаточно малы по сравнению со свойствами агрегатов вида *k*. Тогда мы получаем уравнения типа Фоккера–Планка на функции $\psi_k(t,\mathbf{W},\mathbf{r})$, которые имеют вид:

$$\begin{gathered}\frac{\partial \psi_k}{\partial t}+div_{\mathbf{r}}\left(\overline{\mathbf{v}}\psi_k\right)=-div_{\mathbf{W}}\mathbf{J}^k(t,\mathbf{W},\mathbf{r})+\Omega_k(t,\mathbf{W},\mathbf{r})=\\ =-\sum_p\frac{\partial}{\partial W_p}\left(G_p^k(t,\mathbf{W},\mathbf{r})\psi_k\right)+\sum_{p,s}\frac{\partial}{\partial W_p}\frac{\partial}{\partial W_s}\left(D_p^k(t,\mathbf{W},\mathbf{r})\psi_k\right)+\Omega_k(t,\mathbf{W},\mathbf{r}),\end{gathered} \tag{5.2}$$

где

$$J_p^k(t,\mathbf{W},\mathbf{r}) = G_p^k(t,\mathbf{W},\mathbf{r})\psi_k - \sum_s \frac{\partial}{\partial W_s}\left(D_{ps}^k(t,\mathbf{W},\mathbf{r})\psi_k\right),$$

$$G_p^k(t,\mathbf{W},\mathbf{r}) = \sum_{j=0}^{k-1}\left(\sum_{\mathbf{c}=\mathbf{W}_0(j)}^{\mathbf{W}_M(j)} c_p \cdot \left(\sum_{\mathbf{W}+\mathbf{c}} \alpha_{k,j}(\mathbf{W},\mathbf{c})N_j(\mathbf{c}) - \sum_{\mathbf{W}-\mathbf{c}} \beta_{k,j}(\mathbf{W}-\mathbf{c},\mathbf{c})N_0\right)\right), \quad (5.3)$$

$$D_{ps}^k(t,\mathbf{W},\mathbf{r}) = \frac{1}{2}\sum_{j=0}^{k-1}\left(\sum_{\mathbf{c}=\mathbf{W}_0(j)}^{\mathbf{W}_M(j)} c_p c_s \cdot \left(\sum_{\mathbf{W}+\mathbf{c}} \alpha_{k,j}(\mathbf{W},\mathbf{c})N_j(\mathbf{c}) + \sum_{\mathbf{W}-\mathbf{c}} \beta_{k,j}(\mathbf{W}-\mathbf{c},\mathbf{c})N_0\right)\right). \quad (5.4)$$

Континуальное уравнение (5.2) не применимо при малых и больших значениях свойств частиц. Поэтому целесообразно рассматривать гибридную систему: дискретную при малых и больших значениях свойств частиц и континуальную (5.2) для интервала свойств между ними. В качестве граничных условий для (5.2) для адекватного описания (в частности, для выполнения закона сохранения числа молекул фазообразующего вещества) необходимо брать равенство потоков в пространстве свойств континуальной и дискретных функций распределения.

В (5.3), (5.4) получилась линейная зависимость коэффициентов уравнения типа Фоккера–Планка (5.2) от $N_0$ и $N_j(\mathbf{c})$, $j < k$. Так получилось из-за того, что мы предполагали в (1.2) парность взаимодействия частиц, что, вообще говоря, верно только для разреженных газов.

Итак, от рассматриваемой системы уравнений мы перешли к уравнению типа Фоккера–Планка (5.2) с источником или стоком $\Omega_k(t,\mathbf{W},\mathbf{r})$.

Отметим, что в [18], [74] мы изучали возможность определения коэффициентов уравнения типа Фоккера–Планка по функциям распределения для случая, когда в качестве свойств рассматривался только один параметр – число молекул *n*, составляющих частицу.

В следующем параграфе мы рассмотрим пример уравнений (1.7), когда рассматриваются только следующие свойства: число молекул *n*, составляющих частицу, и форма частиц, и осуществим переход к уравнению типа Фоккера – Планка (5.2). Для простоты мы ограничимся стадией образования первичных агрегатов за счёт присоединения и отрыва отдельных молекул (случай Беккера–Дёринга [80]).

**6. Система уравнений физико-химической кинетики для частиц, различающихся по массе и форме, и переход к уравнению типа Фоккера–Планка**

Основной параметр определяется количеством молекул (атомов), составляющих частицу [80, 82, 83, 97]. Следующий параметр, который надо учитывать – это форма частиц [98].

В настоящем параграфе мы ограничимся рассмотрением функции распределения только по внешним свойствам, которые минимизируем до набора из величин $(n,\mathbf{I})$, где n – число одинаковых молекул, составляющих кла-

стер, $\mathbf{l} = (l_1, l_2, \ldots, l_L)$ – форма. Как минимум, рассматриваются два параметра формы: $L = 2$. Выпишем для этого случая кинетическую систему уравнений, описывающую эволюцию функции распределения частиц, находящихся в растворе или газе-носителе.

Поскольку мы можем наблюдать только площадь изображения частиц, то рассмотрим параметры формы, описывающие её: например, $l_1$ – это длина, а $l_2$ – это ширина изображения частицы. А вместо *n* надо рассматривать параметр площади изображения частицы *s*. Для простоты мы рассматриваем случай $n \sim s$, который реализуется для частиц, являющихся пластинами.

Впервые уравнения для общего случая объединения частиц без учёта распада и агрегирования были выписаны Смолуховским в 1917 году [45]. Там рассматривался только основной параметр *n*. В настоящем параграфе мы ограничимся кинетическим описанием стадии роста первичных частиц, различающихся по параметру *n* и форме, за счёт присоединения и отрыва отдельных молекул. Для случая единственного параметра *n* данная задача описывается системой уравнений Беккера–Дёринга [80].

Сначала рассмотрим обобщение рассмотренных нами уравнений – систему уравнений физико-химической кинетики. А затем проиллюстрируем её уравнениями настоящего параграфа.

Пусть есть смесь из Y химически (или физически) взаимодействующих веществ с пространственно однородными концентрациями. Обозначим через $N_i(t)$ концентрацию *i*-го вещества ($i = 1,2,\ldots,\mathrm{Y}$) в момент времени *t*.

В общем виде уравнения для физико-химических кинетических процессов (реакций) записываются в виде [88, 98, 97, 99, 100, 101]:

$$\frac{dN_i}{dt} = \frac{1}{2}\sum_{(\boldsymbol{\alpha},\boldsymbol{\beta})\in\mathfrak{I}} (\beta_i - \alpha_i)\left(K_{\boldsymbol{\beta}}^{\boldsymbol{\alpha}}\mathbf{N}^{\boldsymbol{\alpha}} - K_{\boldsymbol{\alpha}}^{\boldsymbol{\beta}}\mathbf{N}^{\boldsymbol{\beta}}\right),\ i = 1,2,\ldots,\mathrm{Y}. \qquad (6.1)$$

Здесь через $\mathbf{N}^{\boldsymbol{\alpha}}$ обозначено произведение $\mathbf{N}^{\boldsymbol{\alpha}} = N_1^{\alpha_1} N_2^{\alpha_2} \cdot \ldots \cdot N_{\mathrm{Y}}^{\alpha_{\mathrm{Y}}}$, суммирование ведется по некоторому конечному множеству $\mathfrak{I}$ мультииндексов $(\boldsymbol{\alpha},\boldsymbol{\beta})$, $\boldsymbol{\alpha} = (\alpha_1, \alpha_2, \ldots, \alpha_{\mathrm{Y}})$ и $\boldsymbol{\beta} = (\beta_1, \beta_2, \ldots, \beta_{\mathrm{Y}})$ – векторы с целочисленными неотрицательными компонентами. $(\boldsymbol{\alpha},\boldsymbol{\beta})$ соответствует элементарной реакции (процессу)

$$\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \ldots + \alpha_{\mathrm{Y}} S_{\mathrm{Y}} \overset{K_{\boldsymbol{\beta}}^{\boldsymbol{\alpha}}}{\rightarrow} \beta_1 S_1 + \beta_2 S_2 + \ldots + \beta_{\mathrm{Y}} S_{\mathrm{Y}},\ (\boldsymbol{\alpha},\boldsymbol{\beta}) \in \mathfrak{I}, \qquad (6.2)$$

$S_i$ – химические символы реагирующих веществ (или элементарных состояний системы), $K_{\boldsymbol{\beta}}^{\boldsymbol{\alpha}} \geq 0$ – коэффициенты скоростей процессов или реакций (константы реакций). Коэффициенты $\alpha_i$, $\beta_i$ называются стехиометрическими коэффициентами. Без ограничения общности можно считать множество $\mathfrak{I}$ симметричным относительно перестановок $\boldsymbol{\alpha}$ и $\boldsymbol{\beta}$. При этом некоторым парам $(\boldsymbol{\alpha},\boldsymbol{\beta})$ могут соответствовать нулевые коэффициенты ско-

ростей реакций: $K_{\beta}^{\alpha} = 0$, при том, что возможно $K_{\alpha}^{\beta} > 0$ (допускается необратимость реакций).

Система уравнений (1.7) принадлежит множеству систем уравнений физико-химической кинетики, если вместо производных по координатам в левой части уравнений написать их разностные аналоги.

Будем представлять изображения молекул (атомов) в виде прямоугольников, которые объединяются одинаковыми рёбрами. Для простоты изложения ограничимся случаем моделирования исходных частиц квадратами. Для каждого кластера определим размеры минимального прямоугольника, в который изображение частицы помещается так, что рёбра квадратов, его составляющих, параллельны соответствующим граням этого прямоугольника. Такие прямоугольники будем характеризовать длиной и шириной, т.е. числами $l_1$, $l_2$ определяющими вектор $l \in \mathbf{N}^2$, причем перестановки пар чисел $(l_1, l_2)$ считаем неразличимыми векторами.

Пусть частица характеризуется площадью изображения *s* и формой $(l_1, l_2)$. Тогда

$$s \le l_1 \cdot l_2 . \tag{6.3}$$

Условие (6.3) означает, что частица с площадью изображения *s*, помещается в прямоугольник со сторонами $l_1$ и $l_2$ : равенство достигается, когда прямоугольник совпадает с изображением частицы. Величину $l_1 \cdot l_2 - s$ целесообразно назвать пористостью частицы. Оценка снизу для *s* имеет вид:

$$l_1 + l_2 \le s . \tag{6.4}$$

(6.4) доказывается методом математической индукции по *s*: равенство получается при рассмотрении цепочек из *s* молекул, и при увеличении *s* на единицу $l_1 + l_2$ может увеличиться, но не более, чем на единицу. Итак, для цепочек значение $l_1 + l_2$ максимально и достигается равенство в (6.4).

Мы получили, что только для чисел *s* и пар чисел $(l_1, l_2)$, удовлетворяющих условиям (5.3) и (6.4), существует прямоугольник со сторонами $l_1$ и $l_2$, определяющий форму способом, как указано выше, некоторой частицы с площадью изображения *s*.

В [98] рассмотрены трёхмерные агрегаты из исходных частиц. Двумерные агрегаты также актуальны, поскольку представляет интерес и рост кластеров на поверхности, и рост пленок. В трёхмерном случае вместо квадратов мы имеем кубы, которые соединяются друг с другом так, что у них совпадают грани.

В одномерном же случае получаем, что $n \sim s = l_1$, что возвращает нас к системе уравнений Беккера–Дёринга.

Будем рассматривать квадраты, определяющие молекулу, с длиной ребра, равной единице. Для каждого $s \in \mathbf{N}$ определим конечное множество $\mathbf{J}(s)$ как множество всех векторов $\mathbf{l} \in \mathbf{N}^2$, удовлетворяющих условиям (6.3)

и (6.4). Итак, форма описывается парой $(s,\mathbf{l})$, где $s \in \mathbb{N}$, $\mathbf{l} \in \mathcal{J}(s) \subset \mathbb{N}^2$. Множество всех таких пар обозначим через $\mathsf{G}$.

Рассмотрим эволюцию концентраций кластеров, имеющих форму $(s,\mathbf{l})$: $N(s,\mathbf{l},t)$, $t \in [0,+\infty)$.

Нам надо записать систему уравнений физико-химической кинетики со всеми взаимодействиями вида:

$$(s,\mathbf{l})+(1,(1,1)) \leftrightarrow (s+1,\mathbf{l}+\mathbf{e}_i), \tag{6.5}$$

где $s \in \mathbb{N}$, $i = 0,1,2$, $\mathbf{e}_0 = (0,0)$ – нулевой вектор, $\mathbf{e}_j$ ($j = 1,2$) – вектора с единицей на $j$-м месте и нулями на остальных. Здесь вектора $\mathbf{l} \in \mathbb{N}^2$ таковы, что $(s,\mathbf{l}) \in (s,\mathcal{J}(s)) \subset \mathsf{G}$ и $(s+1,\mathbf{l}+\mathbf{e}_i) \in (s+1,\mathcal{J}(s+1)) \subset \mathsf{G}$, а в любом из остальных случаев коэффициенты скоростей прямой и обратной реакции будем считать равными нулю. Мы учтём это при выписывании уравнений. Если $i = 0$, то $\mathbf{l}$ не меняется, но $s$ увеличивается на единицу во всех трёх случаях: $i = 0,1,2$. Отметим, что константы реакции также равны нулю при $s = l_1 \cdot l_2$ для $i = 0$: $(l_1 \cdot l_2 + 1,\mathbf{l}) \notin (l_1 \cdot l_2 + 1, \mathcal{J}(l_1 \cdot l_2 + 1))$, но мы для простоты не будем специально выделять этот случай при выписывании системы уравнений.

Для краткости введем обозначение для числа отдельных исходных частиц: $N_1(t) \equiv N(1,(1,1),t)$.

Форма не меняется со временем при дальнодействующем взаимодействии частиц. Кроме того, мы рассматриваем пространственно однородный случай. Тогда пространственно однородная версия системы уравнений (1.7), записанная в форме уравнений физико-химической кинетики (6.1) с реакциями (6.5), имеет вид:

$$\begin{aligned}\frac{dN_1(t)}{dt} = &-2\sum_{i=1}^{2}\left(K_{(2,(1,1)+\mathbf{e}_i)}^{(1,(1,1))(1,(1,1))} N_1{}^2(t) - K_{(1,(1,1))(1,(1,1))}^{(2,(1,1)+\mathbf{e}_i)} N(2,(1,1)+\mathbf{e}_i,t)\right) - \\ &-\sum_{s=2}^{+\infty}\sum_{\mathbf{l}\in\mathcal{J}(s)}\sum_{i=0}^{2}\left(K_{(s+1,\mathbf{l}+\mathbf{e}_i)}^{(1,(1,1))(s,\mathbf{l})} N_1(t) N(s,\mathbf{l},t) - K_{(1,(1,1))(s,\mathbf{l})}^{(s+1,\mathbf{l}+\mathbf{e}_i)} N(s+1,\mathbf{l}+\mathbf{e}_i,t)\right),\end{aligned} \tag{6.6}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial N(s,\mathbf{l},t)}{\partial t} = &\sum_{i=0}^{2}\left[\left(K_{(s,\mathbf{l})}^{(1,(1,1))(s-1,\mathbf{l}-\mathbf{e}_i)} N_1(t) N(s-1,\mathbf{l}-\mathbf{e}_i,t) - K_{(1,(1,1))(s-1,\mathbf{l}-\mathbf{e}_i)}^{(s,\mathbf{l})} N(s,\mathbf{l},t)\right) - \right. \\ &\left. -\left(K_{(s+1,\mathbf{l}+\mathbf{e}_i)}^{(1,(1,1))(s,\mathbf{l})} N_1(t) N(s,\mathbf{l},t) - K_{(1,(1,1))(s,\mathbf{l})}^{(s+1,\mathbf{l}+\mathbf{e}_i)} N(s+1,\mathbf{l}+\mathbf{e}_i,t)\right)\right], \; s = 2,3,\ldots, \mathbf{l} \in \mathcal{J}(s).\end{aligned} \tag{6.7}$$

Таким образом, здесь $K_{(s+1,\mathbf{l}+\mathbf{e}_i)}^{(1,(1,1))(s,\mathbf{l})}$ – сечение (частотная функция, коэффициент скорости реакции) такого объединения исходной частицы $(1,(1,1))$ с формой $(s,\mathbf{l})$, при котором $\mathbf{l}$ увеличивается на $\mathbf{e}_i$, и получается форма $(n+1,\mathbf{l}+\mathbf{e}_i)$, $K_{(1,(1,1))(s-1,\mathbf{l}-\mathbf{e}_i)}^{(s,\mathbf{l})}$ – частота распада формы $(s,\mathbf{l})$ на исходную частицу и форму $(s-1,\mathbf{l}-\mathbf{e}_i)$.

Если для каждого $s \in \mathbb{N}$ и любых $\mathbf{l},\mathbf{h} \in \mathcal{J}(s)$ не различать формы $(s,\mathbf{l})$ и $(s,\mathbf{h})$, то система (6.6), (6.7) становится системой уравнений Беккера–Дёринга. Но наша задача именно различать агрегаты из исходных частиц не только по массе, но и по форме.

Отметим, что (6.6) можно заменить законом сохранения числа всех молекул фазообразующего вещества $N_{all}$:

$$\sum_{s=1}^{+\infty}\sum_{\mathbf{l}\in\mathbf{J}(s)}\left(s\cdot N(s,\mathbf{l},t)\right)=N_{all}=const\cdot \tag{6.8}$$

(6.6) получается из (6.8) дифференцированием по времени с учётом (6.7).

Система (6.6), (6.7) является двумерным аналогом системы (9), (10) из [98]. А здесь мы рассмотрим переход от этих уравнений к уравнению типа Фоккера–Планка.

Если мы рассматриваем эволюцию функции распределения частиц по формам в потоке молекул (атомов) постоянной концентрации $N_1$, то вместо (6.6) мы имеем соотношение: $N_1(t)=const$.

Изучим возможность перехода к непрерывному описанию. Мы хотим сделать число исходных частиц и параметры формы непрерывными величинами. Поскольку $s\in\mathbf{N}$, $\mathbf{l}\in\mathbf{N}^2$, то сетка в дискретном трёхмерном пространстве равномерна и её ячейка – это куб с длиной ребра, равной единице. И поэтому непрерывная функция распределения, соответствующая дискретному распределению $\{N(s,\mathbf{l},t):(s,\mathbf{l})\in\mathbf{G}\}$, имеет вид:

$$f(x,\mathbf{y},t)=\sum_{s}\sum_{\mathbf{l}\in\mathbf{J}(s)}N(s,\mathbf{l},t)\cdot\delta\left((s,\mathbf{l})-(x,\mathbf{y})\right),$$

где $\mathbf{y}=(y_1,y_2)$, и $\delta$-функция Дирака берется от трёхмерного вектора. Тогда (6.6) перепишется в виде:

$$\begin{aligned}\frac{\partial f(x,\mathbf{y},t)}{\partial t}=\sum_{i=0}^{2}\big[&\alpha(x-1,\mathbf{y}-\mathbf{e}_i,i)N_1 f(x-1,\mathbf{y}-\mathbf{e}_i,t)-\alpha(x,\mathbf{y},i)N_1 f(x,\mathbf{y},t)+\\&+\beta(x+1,\mathbf{y}+\mathbf{e}_i,i)f(x+1,\mathbf{y}+\mathbf{e}_i,t)-\beta(x,\mathbf{y},i)f(x,\mathbf{y},t)\big].\end{aligned} \tag{6.9}$$

Для простоты записи мы переобозначили здесь коэффициенты уравнения: $\alpha(s,\mathbf{l},i)=K^{(1,(1,1))(s,\mathbf{l})}_{(s+1,\mathbf{l}+\mathbf{e}_i)}$, $\beta(s,\mathbf{l},i)=K^{(s,l)}_{(1,(1,1))(s-1,\mathbf{l}-\mathbf{e}_i)}$. Из (6.9) можно получить уравнение типа Фоккера–Планка–Эйнштейна–Колмогорова (диффузное приближение) [19, 81], разложив приращения в ряд Тейлора и ограничившись производными до второго порядка включительно:

$$\begin{aligned}\frac{\partial f(x,\mathbf{y},t)}{\partial t}=-div_{(x,\mathbf{y})}\mathbf{J}[N_1,f](x,\mathbf{y},t)=&\sum_{i=0}^{2}\frac{\partial}{\partial x}\left(\left[\beta(x,\mathbf{y},i)-\alpha(x,\mathbf{y},i)N_1(t)\right]f(x,\mathbf{y},t)\right)+\\&+\sum_{i=1}^{2}\frac{\partial}{\partial y_i}\left(\left[\beta(x,\mathbf{y},i)-\alpha(x,\mathbf{y},i)N_1(t)\right]f(x,\mathbf{y},t)\right)+\\&+\frac{1}{2}\sum_{i=0}^{2}\frac{\partial^2}{\partial x^2}\left(\left[\beta(x,\mathbf{y},i)+\alpha(x,\mathbf{y},i)N_1(t)\right]f(x,\mathbf{y},t)\right)+\\&+\sum_{i=1}^{2}\frac{\partial^2}{\partial x\partial y_i}\left(\left[\beta(x,\mathbf{y},i)+\alpha(x,\mathbf{y},i)N_1(t)\right]f(x,\mathbf{y},t)\right)+\\&+\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{2}\frac{\partial^2}{\partial y_i^{\,2}}\left(\left[\beta(x,\mathbf{y},i)+\alpha(x,\mathbf{y},i)N_1(t)\right]f(x,\mathbf{y},t)\right).\end{aligned} \tag{6.10}$$

Итак, мы получили континуальный аналог (6.10) исходной дискретной системы (6.7). Здесь поток континуальной функции распределения определяется следующим соотношением:

$$-\mathbf{J}\left[N_1(t), f(x,\mathbf{y},t)\right](x,\mathbf{y},t) =$$

$$= \begin{pmatrix} \sum_{i=0}^{2}\left(\left[\beta(x,\mathbf{y},i)-\alpha(x,\mathbf{y},i)N_1\right]f\right)+\frac{1}{2}\sum_{i=0}^{2}\left(\frac{\partial}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial y_i}\right)\left(\left[\beta(x,\mathbf{y},i)+\alpha(x,\mathbf{y},i)N_1\right]f\right) \\ \left[\beta(x,\mathbf{y},1)-\alpha(x,\mathbf{y},1)N_1\right]f+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial}{\partial y_1}+\frac{\partial}{\partial x}\right)\left(\left[\beta(x,\mathbf{y},1)+\alpha(x,\mathbf{y},1)N_1\right]f\right) \\ \left[\beta(x,\mathbf{y},2)-\alpha(x,\mathbf{y},2)N_1\right]f+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial}{\partial y_2}+\frac{\partial}{\partial x}\right)\left(\left[\beta(x,\mathbf{y},2)+\alpha(x,\mathbf{y},2)N_1\right]f\right) \end{pmatrix}.$$

Континуальный аналог (6.6) имеет вид:

$$\frac{dN_1(t)}{dt} = -2\sum_{i=1}^{2}\int_{\mathbf{J}(2)}\left(\alpha(1,(1,1),i)N_1^{\,2}(t)-\beta(2,\mathbf{y},i)f(2,\mathbf{y},t)\right)d\mathbf{y} - \qquad (6.11)$$

$$-\int_{2}^{+\infty}dx\int_{\mathbf{J}(x)}J_1\left[N_1,f\right](x,\mathbf{y},t)d\mathbf{y},$$

где $\mathbf{J}(x)$ – континуальный аналог дискретного множества $\mathbf{J}(s)$. А для закона сохранения числа всех молекул фазообразующего вещества получаем аналог (6.8):

$$N_{all} = N_1 + \int_{2}^{+\infty}dx\int_{\mathbf{J}(x)}xf(x,\mathbf{y},t)d\mathbf{y}\cdot \qquad (6.12)$$

Уравнение (6.10) дополняется граничными условиями [82 (стр. 152)], которые представляют собой равенство потоков дискретной и непрерывной функций распределения при $x=2$, $\mathbf{y}\in\mathbf{J}(2)$: $J_1\left[N_1,f\right](x,\mathbf{y},t)\big|_{x=2}=0$, $J_{i+1}\left[N_1,f\right](x,\mathbf{y},t)\big|_{x=2}=2\left(\alpha(1,(1,1),i)N_1^{\,2}(t)-\beta(2,\mathbf{y},i)f(2,\mathbf{y}t)\right)\delta\left(\mathbf{y}-\left((1,1)+\mathbf{e}_i\right)\right)$ при $\mathbf{y}\in\mathbf{J}(2)$, $i=1,2$, и равенства нулю функции распределения при $x>2$ на границе области $\mathsf{G}$. Также мы должны задать граничное условие при $x\to+\infty$ таким, чтобы интеграл (6.12) сходился и его можно было продифференцировать по параметру $t$ [102 (стр. 628), 103 (стр. 269)]:

$$\lim_{x\to\infty}\left(x^{\lambda}\max_{t\in[0,T]}\left(\int_{\mathbf{J}(x)}\frac{\partial J_1\left[N_1,f\right]}{\partial x}(x,\mathbf{y},t)d\mathbf{y}\right)\right)=0,$$

$$\lim_{x\to\infty}\left(x^{\lambda}\max_{t\in[0,T]}\left(\int_{\mathbf{J}(x)}\frac{\partial J_2\left[N_1,f\right]}{\partial y_1}(x,\mathbf{y},t)d\mathbf{y}\right)\right)=0,$$

$$\lim_{x\to+\infty}\left(x^{\lambda}\max_{t\in[0,T]}\left(\int_{J(x)}\frac{\partial J_3[N_1,f]}{\partial y_3}(x,\mathbf{y},t)d\mathbf{y}\right)\right)=0$$

для любого интервала времени $[0,T]$ и некоторого $\lambda>2$. Кроме того, потребуем, чтобы $\int_2^{+\infty}dx\int_{J(x)}xf(x,\mathbf{y},0)d\mathbf{y}$ сходился. В силу выписанных условий, продифференцированный интеграл сходится равномерно. После чего производится интегрирование по частям при выполнении условия:

$$\lim_{x\to+\infty}\left(\int_{J(x)}xJ_1[N_1,f](x,\mathbf{y},t)d\mathbf{y}\right)=0,$$

и получается (6.11).

Даже рассмотренная простая модель с реакциями (6.5) и уравнением типа Фоккера–Планка оказалась очень громоздкой: непонятно как выбирать значения частотных функций. Рассмотрим самую простую модель, которая оказывается применимой для описания роста пластин, имеющих прямоугольную форму. Снова ограничимся стадией первичного роста, т.е. без учёта агрегирования. Если образуются только прямоугольники (или параллелограммы), то это означает, что форма в направлении перпендикулярном ребру изменится на единицу, когда к данному ребру прямоугольника присоединится количество молекул равное длине ребра, т.е. при присоединении одной молекулы к некоторому ребру форма в направлении перпендикулярном ребру меняется на величину обратную длине данного ребра (которая является натуральным числом). Обозначим теперь через $\mathsf{G}$ множество пар чисел $\left(l_1+\frac{k(l_1)}{l_1},l_2+\frac{k(l_2)}{l_2}\right)$, где $\mathbf{l}\in\mathsf{N}^2$, $k(l_i)=0,1,\ldots,l_i-1$ для $i=1,2$. Выпишем уравнение на функцию распределения $N(l_1,l_2,t)$, где теперь $\mathbf{l}\in\mathsf{G}$, которая связана с функцией распределения по площади частиц: $\widetilde{N}(s,t)$, соотношением $\widetilde{N}(s,t)=\sum_{l_1l_2=s}N(l_1,l_2,t)$:

$$\begin{aligned}\frac{dN_1(t)}{dt}=&-2\sum_{i=1}^{2}\left(\alpha((1,1),i){N_1}^2(t)-\beta((1,1)+\mathbf{e}_i,i)N((1,1)+\mathbf{e}_i,t)\right)-\\&-\sum_{\mathbf{l}\in\mathsf{G}}\left\{\left(\alpha(\mathbf{l},1)N_1(t)N(\mathbf{l},t)-\beta\left(\mathbf{l}+\frac{\mathbf{e}_1}{[l_1]},1\right)N\left(\mathbf{l}+\frac{\mathbf{e}_1}{[l_1]},t\right)\right)+\right.\\&\left.\left(\alpha(\mathbf{l},2)N_1(t)N(\mathbf{l},t)-\beta\left(\mathbf{l}+\frac{\mathbf{e}_2}{[l_2]},2\right)N\left(\mathbf{l}+\frac{\mathbf{e}_2}{[l_2]},t\right)\right)\right\}\end{aligned}\qquad(6.13)$$

$$\frac{\partial N(\mathbf{l},t)}{\partial t}=\Bigg[\Bigg(\alpha\Big(\mathbf{l}-\frac{\mathbf{e}_1}{\theta(l_1)},1\Big)N_1(t)N\Big(\mathbf{l}-\frac{\mathbf{e}_1}{\theta(l_1)},t\Big)-\beta(\mathbf{l},1)N(\mathbf{l},t)\Bigg)-$$
$$-\Bigg(\alpha(\mathbf{l},1)N_1(t)N(\mathbf{l},t)-\beta\Big(\mathbf{l}+\frac{\mathbf{e}_1}{[l_1]},1\Big)N\Big(\mathbf{l}+\frac{\mathbf{e}_1}{[l_1]},t\Big)\Bigg)\Bigg]+ \qquad (6.14)$$
$$+\Bigg[\Bigg(\alpha\Big(\mathbf{l}-\frac{\mathbf{e}_2}{\theta(l_2)},2\Big)N_1(t)N\Big(\mathbf{l}-\frac{\mathbf{e}_2}{\theta(l_2)},t\Big)-\beta(\mathbf{l},2)N(\mathbf{l},t)\Bigg)-$$
$$-\Bigg(\alpha(\mathbf{l},2)N_1(t)N(\mathbf{l},t)-\beta\Big(\mathbf{l}+\frac{\mathbf{e}_2}{[l_2]},2\Big)N\Big(\mathbf{l}+\frac{\mathbf{e}_2}{[l_2]},t\Big)\Bigg)\Bigg],\mathbf{l}\in\mathsf{G}\setminus(1,1).$$

где $[x]$ обозначает целую часть числа $x$, а $\theta[x]$ – целая часть при нецелых $x$ и $x-1$ при целых. Здесь второй аргумент в коэффициентах уравнений равен единице, если изменяется значение $l_1$, и равен двум, если изменяется значение $l_2$. (6.13) можно заменить законом сохранения числа всех молекул фазообразующего вещества $N_{all}$:

$$\sum_{\mathbf{l}\in\mathsf{G}}\big(l_1\cdot l_2\cdot N(s,\mathbf{l},t)\big)=N_{all}=const\cdot \qquad (6.15)$$

Выполнение условий *H*-теоремы, которую впервые рассмотрел Больцман в 1872 году [79], обеспечивает существование и устойчивость стационарного решения системы уравнений. Для уравнений физико-химической кинетики *H*-теорема рассматривалась [81], [88], [99], [100]. В работе [98] обсуждалось выполнение в случае Беккера – Дёринга условия детального баланса для самой подробной кинетической модели эволюции частиц, распределённых по массе и форме. Условие детального баланса является достаточным условием *H*-теоремы. Для уравнений физико-химической кинетики (6.1) – это есть требование существования вектора $\xi$ с положительными компонентами такого, что для всех процессов $(\boldsymbol{\alpha},\boldsymbol{\beta})\in\mathfrak{I}$ выполняются соотношения:

$$K_{\boldsymbol{\beta}}^{\boldsymbol{\alpha}}\boldsymbol{\xi}^{\boldsymbol{\alpha}}-K_{\boldsymbol{\alpha}}^{\boldsymbol{\beta}}\boldsymbol{\xi}^{\boldsymbol{\beta}},$$

которые означают, что скорость прямой реакции равна скорости обратного процесса.

Для (6.13), (6.14) условие детального баланса имеет вид:

$$\alpha(\mathbf{l},i)\xi_1\xi(\mathbf{l})=\beta\Big(\mathbf{l}+\frac{\mathbf{e}_i}{[l_i]},2\Big)\xi\Big(\mathbf{l}+\frac{\mathbf{e}_i}{[l_i]}\Big) \qquad (6.16)$$

для $i=1,2$ и для всех $\mathbf{l}\in\mathsf{G}$.

Пусть форма $Y$ получается из формы $X$ присоединением отдельной молекулы в рамках рассматриваемой модели. Тогда (6.16) перепишется в виде:

$$\alpha(X,Y)\xi_1\xi(X)=\beta(Y,X)\xi(Y). \qquad (6.17)$$

Условие детального баланса будет выполняться, если справедливы всевозможные получаемые из (6.17) соотношения следующего вида:

$$\frac{\alpha(X_1,X_2)}{\beta(X_2,X_1)}\frac{\alpha(X_2,X_3)}{\beta(X_3,X_2)}\cdots\frac{\alpha(X_{r-1},X_r)}{\beta(X_r,X_{r-1})}=\frac{\alpha(X_1,X^2)}{\beta(X^2,X_1)}\frac{\alpha(X^2,X^3)}{\beta(X^3,X^2)}\cdots\frac{\alpha(X^{r-1},X_r)}{\beta(X_r,X^{r-1})}, \quad (6.18)$$

где следующие формы получаются последовательно друг из друга: $X_1\to X_2\to X_3\to\ldots\to X_{r-1}\to X_r$ и $X_1\to X^2\to X^3\to\ldots\to X^{r-1}\to X_r$, где $X_i\neq X^i$ для всех $i=2,3,\ldots,r-1$.

Пусть частотные функции рассчитываются так, как это принято для газов: сечение объединения формы с исходной частицей моделируется с помощью теории активных соударений [98]. А при рассмотрении распада приходится обращаться к теории активированного комплекса [98]: исходные частицы отлетают от агрегатов не из-за того, что их выбивают частицы окружающей среды непосредственным столкновением, а из-за того что весь агрегат находится в возбужденном состоянии за счет столкновений с частицами среды и испускает те исходные частицы своей поверхности, энергия которых оказывается больше энергии активации этого процесса – энергии связи с остальными частицами агрегата.

Согласно теории активных соударений считается, что в реакцию вступают только те исходные частицы, для которых кинетическая энергия относительного движения вдоль линии центров сталкивающихся частиц больше энергии активации $E_1$. И поэтому при вычислении константы скорости объединения формы *X* с исходной частицей, в результате которого получается форма *Y*: $\alpha(X,Y)$, мы получим величину числа столкновений отдельных молекул единичной концентрации с некоторой частью площади $\sigma$ частицы формы *X*, умноженную на некоторую функцию от $E_1/(k_BT)$, где $k_B$ – постоянная Больцмана. Эта функция имеет вид

$$g(E_1/(k_BT))\exp(-E_1/(k_BT)),$$

где *g* – некоторая функция: $g(0)=1$, а существенная зависимость от $E_1/(k_BT)$ содержится во втором сомножителе. При этом число всех столкновений частицы с формой *X* с отдельными молекулами единичной концентрации равно $\sigma\langle|u|\rangle$, где $\langle|u|\rangle\equiv\left(\frac{8k_BT}{\pi\mu}\right)^{1/2}$ – среднее от модуля относительной скорости исходных частиц и агрегатов, $\mu=\mu(n)\equiv m\frac{n}{n+1}$ – их приведенная масса. Поэтому имеем:

$$\alpha(X,Y)=C_Y^{(1)X}A(n)\exp(-E_1(n)/(k_BT)), \quad (6.19)$$

где $C_Y^{(1)X}$ – число способов получить форму *Y* из формы *X*. Энергии активации $E_1$ может зависеть от массы агрегата: $E_1=E_1(n)$, но считаем, что $E_1$ не зависит от формы. $A(n)\equiv\sigma\langle|u|\rangle g(E_1/(k_BT))$ зависит от *n*, даже если $E_1(n)=const$, поскольку $\langle|u|\rangle$ зависит от $\mu=\mu(n)$.

Если предположить, что энергия активации отрыва равна разности потенциальных энергий формы $X$ и $Y$: $E_X - E_Y$, то получаем, что

$$\beta(Y,X) = C^Y_{(1)X} B \exp\left[-\frac{E_X - E_Y}{k_B T}\right], \tag{6.20}$$

где $C^Y_{(1)X}$ – число способов получить форму $X$ из формы $Y$, $B \equiv \chi \frac{k_B T}{h} = const$, где $h$ – постоянная Планка, $\chi$ – поправочный коэффициент.

Настоящая модель позволяет предположить, что

$$C^{(1)X}_Y = C^Y_{(1)X}. \tag{6.21}$$

Кроме того в (6.20) мы предположили, что энергия активации отрыва $E_X - E_Y$ не зависит от того, какая из $C^Y_{(1)X}$ молекул отрывается. Это соответствует тому, что у присоединившейся к форме $X$ молекулы энергия связи является минимальной в образовавшейся форме $Y$ и равна $E_X - E_Y$, таких вариантов присоединения $C^{(1)X}_Y$, и мы пренебрегаем вероятностью отрыва молекул, не являющихся ими, т.е. $C^Y_{(1)X} = C^{(1)X}_Y$. Условие (6.21) является спецификой настоящей модели: оно не выполнялось в работе [98], которая подсказывает образ действия при доказательстве выполнения условия детального баланса в общей ситуации.

Условия (6.19), (6.20), (6.21) обеспечивают выполнения условий (6.18), и значит, справедливо условие детального баланса. Зависимость от формы частиц находится под знаком экспоненты, и для доказательства (6.18) достаточно воспользоваться её свойством: $\exp(a)\exp(b) = \exp(a+b)$. Существенным здесь является условие для сечения столкновений: $\sigma = const$.

Если же вместо соотношений (6.21) мы имеем, что сечения объединения кластера с отдельной исходной частицей пропорционально длине ребра кластера, с которым она сталкивается, то условие детального баланса (6.18) не выполняется и вопрос об $H$-теореме [98], а значит, и о сходимости системы кинетических уравнений к устойчивому стационарному решению остаётся открытым даже в случае Беккера–Дёринга, т.е. когда пренебрегается агрегированием агломератов из исходных частиц.

Действительно, рассмотрим два различных варианта образования некоторого кластера, как это было при рассмотрении соотношений (6.18). Пусть, например, из исходной частицы вырастает квадрат с длинной ребра $L$. Пусть в первом варианте его образования сначала вырастает прямолинейная цепочка длины $L$, а потом рассматриваемым нами послойным ростом из неё образуется квадрат. При нарастании одной цепочки длины $L$ присоединяется $L$ молекул с сечением пропорциональным $L$, а всего таких цепочек нарастает $(L-1)$. Поэтому произведение сечений объединений в (6.18) пропорционально $(L-1)L^2$. И пусть во втором варианте образования квадрата с длиной ребра $L$ из исходной частицы поочерёдно нарастают грани на один слой, т.е. на

единицу. При нарастании грани длины $k$ на единицу требуется присоединить $k$ исходных частиц, а в рассматриваемой модели сечения таких объединений пропорциональны $k$. И таких граней две: должна нарасти и длина, и ширина кластера. Поэтому произведение сечений объединения при нарастании двух таких граней равно $k^4$, а тогда при образовании квадрата с диной ребра $L$ это произведение равно факториалу $(L-1)$ в четвёртой степени: $((L-1)!)^4$ . Числа $(L-1)L^2$ и $((L-1)!)^4$ имеют разный порядок роста, а значит, соотношение вида (6.18) не выполняется.

Итак, выполнение условия детального баланса даже в случае Беккера–Дёринга зависит от моделей констант реакций объединения и распада.

Вернемся к рассмотрению диффузных приближений.

Из (6.14), как и раньше, получаем:

$$\frac{\partial f(\mathbf{y},t)}{\partial t} = -div_{\mathbf{y}}\mathbf{J}[N_1,f](\mathbf{y},t) =$$
$$= \frac{1}{y_1}\frac{\partial}{\partial y_1}([\beta(\mathbf{y},1)-\alpha(\mathbf{y},1)N_1(t)]f(\mathbf{y},t)) + \frac{1}{y_2}\frac{\partial}{\partial y_2}([\beta(\mathbf{y},2)-\alpha(\mathbf{y},2)N_1(t)]f(\mathbf{y},t)) + \tag{6.22}$$
$$+\frac{1}{2}\frac{1}{y_1^2}\frac{\partial^2}{\partial y_1^2}\frac{\partial}{\partial y_1}([\beta(\mathbf{y},1)+\alpha(\mathbf{y},1)N_1(t)]f(\mathbf{y},t)) + \frac{1}{2}\frac{1}{y_2^2}\frac{\partial^2}{\partial y_2^2}([\beta(\mathbf{y},2)+\alpha(\mathbf{y},2)N_1(t)]f(\mathbf{y},t)).$$

Введя обозначения $G_i(\mathbf{y},t)=[\alpha(\mathbf{y},i)N_1(t)-\beta(\mathbf{y},i)]$, $D_i(\mathbf{y},t)=\frac{1}{2}[\beta(\mathbf{y},i)+\alpha(\mathbf{y},i)N_1(t)]$, где $i=1,2$, имеем:

$$\frac{\partial f(\mathbf{y},t)}{\partial t} = -div_{\mathbf{y}}\mathbf{J}[N_1,f](\mathbf{y},t) = -\frac{1}{y_1}\frac{\partial}{\partial y_1}(G_1(\mathbf{y},t)f(\mathbf{y},t)) - \frac{1}{y_2}\frac{\partial}{\partial y_2}(G_2(\mathbf{y},t)f(\mathbf{y},t)) + \tag{6.23}$$
$$+\frac{1}{y_1^2}\frac{\partial^2}{\partial y_1^2}(D_1(\mathbf{y},t)f(\mathbf{y},t)) + \frac{1}{y_2^2}\frac{\partial^2}{\partial y_2^2}(D_2(\mathbf{y},t)f(\mathbf{y},t)).$$

В (6.22) и (6.23) компоненты вектора потока функции распределения в пространстве свойства “форма” $\mathbf{J}[N_1,f](\mathbf{y},t)$ определяются соотношениями:

$$J_1[N_1,f](\mathbf{y},t) = \frac{1}{y_1}(G_1(\mathbf{y},t)f(\mathbf{y},t)) - \frac{1}{y_1^2}\frac{\partial}{\partial y_1}(D_1(\mathbf{y},t)f(\mathbf{y},t))',$$

$$J_2[N_1,f](\mathbf{y},t) = \frac{1}{y_2}(G_2(\mathbf{y},t)f(\mathbf{y},t)) - \frac{1}{y_2^2}\frac{\partial}{\partial y_2}(D_2(\mathbf{y},t)f(\mathbf{y},t))\cdot$$

Здесь мы пренебрегли производными от коэффициентов при частных производных и занесли их под знаки дифференцирования.

Задачу (6.23) можно рассмотреть в положительной области $\Omega$ с границей $\partial\Omega = \{0,[2,+\infty)\}\cup\{[0,1],2\}\cup\{1,[1,2]\}\cup\{[1,2],1\}\cup\{2,[0,1]\}\cup\{[2,+\infty),0\}$ (рисунок 1).

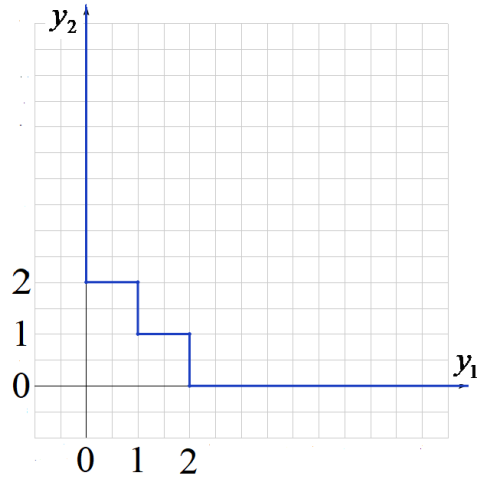



***Рисунок 1.*** *Граница области* $\Omega$*:*
$\partial\Omega = \{0,[2,+\infty)\} \cup \{[0,1],2\} \cup \{1,[1,2]\} \cup \{[1,2],1\} \cup \{2,[0,1]\} \cup \{[2,+\infty),0\}$.

Уравнение (6.23) дополняется аналогом (6.15) – законом сохранения числа всех молекул фазообразующего вещества:

$$N_{all} = N_1 + \int_{\Omega} y_1 y_2 f((y_1, y_2), t) dy_1 dy_2 , \tag{6.24}$$

и граничными условиями:

$$J_i[N_1, f](\mathbf{y}, t)\big|_{(y_1,y_2)\in\partial\Omega} = \\ = 2\left[\alpha((1,1), i) N_1^{\,2}(t) - \beta((1,1)+\mathbf{e}_i, i) f((1,1)+\mathbf{e}_i, t)\right] \delta(\mathbf{y} - ((1,1)+\mathbf{e}_i)), i = 1,2, \tag{6.25}$$

$$\lim_{y_1 y_2 \to +\infty} \left( (y_1 y_2)^{\lambda} \max_{t\in[0,T]} \left( \frac{\partial J_1[N_1, f]}{\partial y_1}(x, \mathbf{y}, t) \right) \right) = 0, \\ \lim_{y_1 y_2 \to +\infty} \left( (y_1 y_2)^{\lambda} \max_{t\in[0,T]} \left( \frac{\partial J_2[N_1, f]}{\partial y_2}(x, \mathbf{y}, t) \right) \right) = 0 \tag{6.26}$$

для любого интервала времени $[0,T]$ и некоторого $\lambda > 2$,

$$\lim_{y_1 \to +\infty} \left( \int_{l_0}^{+\infty} y_1 y_2 J_1[N_1, f](x, \mathbf{y}, t) dy_2 \right) = 0, \ \lim_{y_2 \to +\infty} \left( \int_{l_0}^{+\infty} y_1 y_2 J_2[N_1, f](x, \mathbf{y}, t) dy_1 \right) = 0 . \tag{6.27}$$

Граничные условия (6.26) вместе с условием существования интеграла $\int_{\Omega} y_1 y_2 f((y_1, y_2), 0) dy_1 dy_2$ являются достаточными для сходимости (6.24) и его дифференцирования по параметру $t$ [102 (стр. 628), 103 (стр. 269)]: условие (6.26) обеспечивает равномерную сходимость продифференцированного

интеграла, а условие (6.27) достаточно для дальнейшего интегрирования по частям и получения из (6.24) следующего уравнения на эволюцию $N_1$:

$$\frac{dN_1(t)}{dt} = -2\sum_{i=1}^{2}\left[\alpha((1,1),i)N_1{}^2(t) - \beta((1,1)+\mathbf{e}_i,i)f((1,1)+\mathbf{e}_i,t)\right] - \\ - \int_{\Omega} y_2 J_1[N_1,f](\mathbf{y},t)d\mathbf{y} - \int_{\Omega} y_1 J_2[N_1,f](\mathbf{y},t)d\mathbf{y}.$$

Однако эксперимент показывает наличие минимального размера частиц, меньше которого у частиц не наблюдается. Частиц с обоими размерами меньше, чем $l_0$ не наблюдается. Как показывает эксперимент, при $l_1 \geq l_0$ минимальный размер $l_0$ для переменной $l_1$ есть неубывающая функция $l_2$, и, соответственно, при $l_2 \geq l_0$ минимальный размер $l_0$ для переменной $l_2$ есть неубывающая функция $l_1$. Для простоты описания будем считать эту функцию постоянной. Тогда задача (6.23) решается в области $\Omega = \{(y_1,y_2): (y_1 \geq l_0) \wedge (y_2 \geq l_0)\}$, определяемой минимальным размером частиц. В этом случае вместо граничного условия (6.25) целесообразно взять следующее свойство равенства потоков функции распределения:

$$J_1[N_1,f](\mathbf{y},t)\big|_{(y_1,y_2)\in\partial\Omega} = J_2[N_1,f](\mathbf{y},t)\big|_{(y_1,y_2)\in\partial\Omega} = \\ = \frac{1}{2}l_0{}^2\left[\alpha((1,1))N_1{}^{l_0^2}(t) - \beta((l_0,l_0))f((l_0,l_0),t)\right]\delta(\mathbf{y}-(l_0,l_0)) \equiv F(t)\delta(\mathbf{y}-(l_0,l_0)). \tag{6.28}$$

Здесь $\alpha((1,1))$, $\beta((l_0,l_0))$ – частотные функции объединения и распада частицы $(l_0,l_0)$ на $l_0{}^2$ отдельных молекул.

Мы рассматриваем случай, когда число параметров формы равно двум. Аналогично, рассматривается постановка задачи, когда число параметров формы больше двух. А рассматриваемый нами случай частиц, являющихся прямоугольниками, отличает простота связи площади изображения частицы с параметрами формы: $s = y_1 \cdot y_2$.

Сделаем замену переменных такую, чтобы одной из переменных была бы площадь изображения частицы. В качестве второй переменной можно было бы выбрать периметр, но якобиан такого отображения равен нулю при $y_1 = y_2$, а граничные условия при $y_1 = y_2$ неизвестны. Поэтому осуществим переход к переменным $s = y_1 \cdot y_2$, $y_2$ (якобиан этой замены переменных равен $y_2$):

$$\frac{\partial\varphi(s,y_2,t)}{\partial t} = -\frac{y_2^2}{s}\frac{\partial}{\partial s}(g_1\varphi) - \frac{1}{y_2}\frac{\partial}{\partial y_2}(g_2\varphi) - \frac{s}{y_2^2}\frac{\partial}{\partial s}(g_2\varphi) + \\ + \frac{y_2^4}{s^2}\frac{\partial^2}{\partial s^2}(d_1\varphi) + \frac{1}{y_2^2}\frac{\partial^2}{\partial y_2^2}(d_2\varphi) + 2\frac{s}{y_2^3}\frac{\partial^2}{\partial y_2\partial s}(d_2\varphi) + \frac{s^2}{y_2^4}\frac{\partial^2}{\partial s^2}(d_2\varphi), \tag{6.29}$$

где $\varphi(s,y_2,t) \equiv f(\mathbf{y},t)/y_2$, $g_i(s,y_2,t) \equiv G_i(\mathbf{y},t)$ и $d_i(s,y_2,t) \equiv D_i(\mathbf{y},t)$ для $i = 1,2$. Граничные условия для (6.29) получаются из (6.25), (6.26), (6.27).

Уравнение (6.29) является уравнением типа Фоккера–Планка. Интересно было бы получить сокращённое описание: переход от (6.29) к уравнению на полуинтегральную функцию распределения $\varphi_s(s,t) \equiv \int_{l_0}^{+\infty} \varphi(s, y_2, t) dy_2$ и сравнить его с уравнением типа Фоккера–Планка на функцию распределения только по площади изображения частицы.

Итак, мы перешли к уравнению типа Фоккера–Планка для общей рассматриваемой системы (§ 5), а также в конкретных простейших примерах рассматриваемых уравнений, когда рост первичных агрегатов, которые, как и исходные частицы (молекулы, атомы, одинаковые наночастицы), различаются по форме (§ 6). Вообще говоря, при малых и больших значениях свойств уравнение типа Фоккера–Планка не применимо, и поэтому требуется прежнее дискретное описание. Итак, получились новые гибридные системы уравнений, в которых есть и континуальная, и дискретная части по свойствам частиц. Теперь возникает задача определения коэффициентов этих уравнений на основе сравнения функций распределения, получаемых в эксперименте, с решениями уравнения типа Фоккера–Планка, как это сделано в [18], [74] для случая, когда параметром являлось только число молекул, составляющих частицы. Здесь работает морфологическая память, понятие которой обсуждалось и в настоящей работе. Оно, просто говоря, состоит в том, что по результатам измерений функций распределения мы определяем, как шли процессы.

**Заключение**

В настоящее время проблему оптимизованного математического обеспечения создания МНП интенсивно исследуют. Разработаны методы исследования, которые существенно приближают решение этой проблемы. Приближено создание общей априорной математической модели превращения исходных веществ в МНП, учитывающей не только общие законы сохранения, но и взаимодействие атомов электромагнитными и гравитационными силами. Доказана возможность использования созданного математического обеспечения при разработке методик компьютерного поиска оптимальной технологии МНП. Проведена оценка объема информации о материалах, которые необходимо накопить для оптимизованного математического обеспечения изучения процессов, приводящих к превращению исходных веществ в материалы нового поколения.

**Благодарности**

Авторы выражают благодарности Козловской Э.Д., Кулюхину С.А., Рудину В.Н., Батищевой Я.Г. за помощь в обсуждении проблемы.

**Список литературы**

*1. Бенедек П., Ласло А. Научные основы химической технологии. Изд-во «Химия». Ленинградское отделение. 1970. 376 с.*

*2. Мелихов И.В. Стратегия и тактика поиска оптимальных технологий новых материалов // Теор. основы хим. технологий. 2011. Т. 45. № 6. С. 611–614.*

*3. Волошин В.П., Наберухин Ю.И. Описание вращательных движений молекул в компьютерных моделях воды с помощью кватернионов // РЭНСИТ. 2020. Т. 12. № 1. С. 69–80.*

*4. Старостин Е.Е., Колмаков А.Г. Мультифрактальное описание топографической структуры покрытий, полученных термическим напылением в вакууме // Физика и химия обработки материалов. 1998. № 5. С. 38–47.*

*5. Melikhov I.V., Kelebeev A.S., Bacic S. Electron Microscopic study of Nucleation and Growth of Highly Dispersed Solid Phase // J. Colloid Interface Sci. 1986. V. 112. № 1. P. 54–65.*

*6. Chen Q., Saltiel C., Manickavasagam S., Schadler L.S., Siegel R.W., Yang H. Aggregation behavior of single-walled carbon nanotubes in dilute aqueous suspension // J. Colloid Interface Sci. 2004. V. 280. P.91–97.*

*7. Заболотный В.Т. Ионное перемешивание в твердых телах. М. МГИЭМ(ТУ). 1997.*

*8. Безносюк С.А., Важенин С.В., Жуковский М.С., Жуковская Т.М., Маслова О.А. Законы и закономерности движения частиц в наномире // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2007. № 4. С. 35–41.*

*9. Акишин А.И., Бондаренко Г.Г., Быков Д.В., Василенко О.И., Гришин В.К., Жирихин А.Н., Заболотный В.Т., Иванов Л.И., Ишханов Б.С., Майоров В.С., Новиков Л.С., Симонов В.П., Тихонов А.Н., Черкасов А.С., Шведунов В.И. Физика воздействия концентрированных потоков энергии на материалы. М. Изд-во УНЦДО. 2004.*

*10. Суздалев И.П. Нанотехнология: Физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. М. КомКнига. 2006.*

*11. Almjasheva O.V., Gusarov V.V. Metastable clusters and aggregative nucleation mechanism // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. 2014. V. 5. № 3. P. 405–416.*

*12. Ford I.J. Nucleation Theorems. The statistical mechanism of molecular cluster // Phys. Rev. E. 1997. V. 56. № 5. P. 5615–5629.*

*13. Малышев В.А., Пирогов С.А. Обратимость и необратимость в стохастической химической кинетике // Успехи матем. наук. 2008. Т. 63. № 1. С. 1045–1054.*

*14. Yukio Saito. Statistical Physics of Crystal Growth. World Scientific. 1996. P. 179.*

*15. Poate J.M., Foti G., Jacobson D.C. Surface Modification and Alloying by Laser, Ion and Electron Beams. N.Y.: Plenum Press. 1983.*

*16. Керн Р. «Рост кристалла и адсорбция» в кн. Рост кристаллов. Т.8. М.: «Наука». 1968. С. 5–29.*

*17. Паташинский А.З., Покровский В.Л. Флуктуационная теория фазовых переходов. М.: Наука. 1982.*

*18. Adzhiev S.Z., Melikhov I.V., Vedenyapin V.V. Approaches to determining the Kinetics for the formation of a nano-dispersed Substance from the experimental distribution functions of its nanoparticle properties // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. 2019. V. 10. № 5. P. 549–563.*

*19. Кляцкин В.И. Динамика стохастических систем: Курс лекций. М. Физматлит. 2002.*

*20. Мелихов И.В., Симонов Е.Ф. Проблема создания функциональных материалов нового поколения // Вестник МИФИ. 2012. Т. 1. № 2. С. 162–166.*

*21. Melikhov I.V., Vukovic Z., Bacic S. Lazić S. Study of dispersed solid-phase ontogenesis hierarchical structure. // J. Chem. Soc. Faraday Trans. 1985. V. 81. № 5. P. 1275–1282.*

*22. Tirrell D.A. (Ed.) Hierarchical structures in Biology as a Guide for New Materials Technology. Washington: Nat. Acad. Press. 1994.*

*23. Безносюк С.А., Покаев А.И., Жуковский М.С., Жуковская Т.М., Фомина Л.В. Многоуровневое строение и физико-химические информационные свойства вещества. Томск: Изд-во НТП. 2005. 264 с.*

*24. Бакай А.С. Поликластерные аморфные тела. М.: Энергоатомиздат. 1987. 193 с.*

*25. Колобов Ю.Р. Диффузионно-контролируемые процессы на границах зерен и пластичность металлических поликристаллов. Новосибирск. Изд-во «Наука СО РАН». 1998. 185 с.*

*26. Хунджа А.С. Введение в структурную физику сплавов с эффектами памяти формы. М.: Изд-во МГУ. 1991. 77 с.*

*27. Мелихов И.В., Михеев Н.Б., Кулюхин С.А., Козловская Э.Д. Морфологическая память дисперсных твердых фаз // Коллоидный журнал. 2001. Т. 63. № 6. С. 808–815.*

*28. Brailovski V., Prokoshkin S., Terriault P., Trochu F. Shape Memory Alloys Fundamentals. Modeling and Application. Montreal: ETS Publ. 2003. 851 с.*

*29. Баринов С.М., Комлев В.С. Биокерамика на основе фосфатов кальция. М.: 2005.*

*30. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах: От диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации. М.: Мир. 1973. 279 с.*

*31. Макушок Е.М. Самоорганизация деформационных процессов. Минск.: Наука и техника. 1991. 272 с.*

*32. Алфимов М.В., Кадушников Р.М., Штуркин Н.А., Алиевский В.М., Лебедев-Степанов П.В. Имитационное моделирование процессов самоорганизации наночастиц // Российские нанотехнологии. 2006. Т. 1. № 1. С.127–133.*

*33. Иевлев В.М., Трусов Л.И., Холмянский В.А. Структурные превращения в тонких пленках. М.: Металлургия. 1988. 320 с.*

*34. Колмаков А.Г., Баринов С. М., Алымов М.И. Основы технологий и применение наноматериалов. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2012. 208 с.*

*35. Колмаков А.Г., Алымов М.И. Особенности свойств наноматериалов и основные направления их использования // Перспективные материалы. 2006. № 5. С. 5–13.*

*36. Teter M.P., Payne M.C., Allan D.C. Solution of Schrodinger's equation for large systems // Phys. Rev. B. V. 40. P. 12255.*

*37. Hafner J. Atomic-scale computational materials science // Acta mater. 2000. V. 48. P. 71–92.*

*38. Plimpton S. Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics // J. Comp. Phys. 1995. V. 117. P. 1–19.*

*39. Rapaport D.C. The art of molecular dynamics simulation. Cambridge: Univ. Press. 2004.*

*40. Гельчинский Б.Р., Мирзоев А.А., Воронцов А.Г. Вычислительные методы микроскопической теории металлических расплавов и нанокластеров. М.: Физматлит. 2011. 200 с.*

*41. Борисенко Н.И., Борисенко О.Н., Лисин П.А., Сербин В.В., Сербина Е.В. Моделирование при разработке твердосплавных композиций. Сб. трудов конференции «Нанотехнологии – производству». 28–30 ноября 2007. М.: Концерн «Наноиндустрия». 2007. С. 320–329.*

*42. Фольмер М. Кинетика образования новой фазы. М.: Наука. 1986. 208 с.*

*43. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Наука. 1987.*

*44. Sonntag H. Coagulation Kinetic. Coagulation and Flocculation. NY.: Marcel Dekker. 1993. P. 57–99.*

*45. Смолуховский М. Опыт математической теории кинетики коагуляции коллоидных растворов. // Коагуляция коллоидов. Сборник статей. Ред. А.И. Рабинович, П.С. Васильев. ОНТИ. 1936. С. 7–39. Пер. с нем: Smoluchowski M. Versuch einer mathematischen Theorie der Koagulationskinetik kolloider Losungen // Z. Phys. Chem. 1917. V. 92. P. 129–168.*

*46. Волощук В.М. Кинетическая теория коагуляции. Л. Гидрометеоиздат. 1984.*

*47. Vicsek T. Fractal Growth Phenomena. World Scientific. Singapore. 1989.*

*48. Villain J. Continuum models of crystal growth from atomic beams with and without desorption // J. Phys. I. 1991. V. 1. № 1. P. 19–42.*

*49. Voss R.F. Multiparticle fractal aggregation // J. Stat. Phys. 1984. V. 36 P. 861–872.*

*50. Jana S.C., Jain S. Dispersion of nanofillers in high performance polymers using reactive solvents as processing aids // Polymer. 2001. № 42. P. 6897–6905.*

*51. Зайцев А.А., Курбаткина В.В., Левашов Е.А. Особенности влияния нанодисперсных добавок на процесс спекания и свойства порошковых кобальтовых сплавов // Известия вузов. Цветная металлургия. 2008. № 2. С.210–220.*

*52. Полубояров В.А., Коротаева З.А., Андрюшкова О.В. Получение ультрамикрогетерогенных частиц путем механической обработки // Неорганические материалы. 2001. Т. 37. № 5. С. 592–595.*

*53. Фришберг И.В., Кватер Л.И., Кузьмин Б.П., Грибовский С.В. Газофазный метод получения порошков. М.: Наука. 1978. 223 с.*

*54. Свиридов В.В., Воробьева Т.Н., Гаевская Т.В., Степанова Л.И. Химическое осаждение металлов из водных растворов. Минск: Изд-во «Университетское». 1987. 270 с.*

*55. Сурик А.Л. Плазмохимические процессы и аппараты. М.: Химия. 1989. 304 с.*

*56. Букаемский А.А., Тарасова Л.С., Федорова Е.Н. Исследование особенностей фазового состава и стабильности ультрадисперсного $Al_2O_3$ взрывного синтеза // Издательство вузов. Цветная металлургия. 2000. № 5. С. 60–61.*

*57. Иевлев В.М., Тураева Т.Л., Латышев А.Н., Синельников А.А., Селиванов В.Н. Влияние фотонного облучения на процесс рекристаллизации тонких металлических пленок // Физика металлов и металловедение. 2007. Т. 103. № 1. С. 61–66.*

*58. Савотченко С.Е., Юрова О.В. Математическое моделирование движения фронта рекристаллизации в поликристаллах, индуцированного диффузионными потоками примеси // Вестник МГТУ. Серия «Физматмоделирование». 2006. Т. 2. № 8. С. 119–121.*

*59. Радиоактивные индикаторы в химии. Основы метода. Под ред. Лукьянова В.Б. 3 изд. М.: Высшая школа. 1985. 287 с.*

*60. Полак Э. Численные методы оптимизации. Единый подход. М. Наука. 1983. 376 с.*

*61. Stewart J.J.P. Optimization of Parameters for Semiempirical Methods // J. Comp. Aided Mol. Dezing. 1990. № 4. P. 1–10.*

*62. Шабанова Н.А., Попов В.В., Саркисов П.Д. Химия и технология нанодисперсных оксидов. М.: Академкнига. 2006.*

*63. Белащенко Д.К. Компьютерное моделирование жидких и аморфных веществ. Научное издание. М.: МИСиС. 2005. 408 с.*

*64. Колмаков А.Г. Использование положений системного подхода при изучении структуры, особенностей пластической деформации и разрушения металлических материалов // Металлы. 2004. № 4. С. 98–107.*

*65. Chriken J., Goodisman J. Application of fractals and Kinetic equation in modelling claster and ultrafine particle size distributions // Nano- structured materials. 1995. V. 5. № 2. P. 225–231.*

*66. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure // Acta mater. 2000. V. 48. P. 1–29.*

*67. Мелихов И.В. Физико-химическая эволюция твердого вещества. М.: Бином. 2010.*

*68. Бейдер Р. Атомы в молекулах. Квантовая теория. М.: Мир. 2001.*

*69. Ceperley D.M., Mitas M. Quantum Monte Carlo methods in Chemistry // Adv. Chem. Phys. 1996. V. 93. P. 1–38.*

*70. Ivanov S.V., Gladyshev A.D., Kamanin A.V., Kolmakov A.G., Kryzhanovskaya N.V., Musikhin Yu. G., Baranov E.E., Petrov V.N., Sedova I.V., Shmidt N.M.,, Titkov A.N. Surface control of cooperative phenomena in nanostructured materials with quantum duts // Phys. Stat. Sol. (C). 2005. V. 2. № 6. P. 1912–1916.*

*71. Carr J. Asymptotic behavior of solutions to the coagulation-fragmentation equation. I. The strong fragmentation case // Proc. Royal Soc. Edin. Sect. A. 1992. V. 121. P. 231–244.*

*72. Uhaha M., Saito Y. Fractal-to-compact transition and velocity selection in aggregation from lattice gas // J. Phys. Soc. Jpn. 1988. V. 57. № 10. P. 3285–3288.*

*73. Amar M.Ben, Brener E. Theory of pattern selection in three-dimensional nonaxisymmetric dendritic growth // Phys. Rev. Lett. 1993. V. 71. P. 589–592.*

*74. Аджиев С.З., Веденяпин В.В., Мелихов И.В. Кинетические модели агрегации, приводящей к морфологической памяти образовавшихся структур // ЖВМ и МФ. 2022. Т. 62. № 2. С. 255–269; англ. пер.: Adzhiev S.Z., Vedenyapin V.V., Melikhov I.V. Kinetic Aggregation Models Leading to Morphological Memory of Formed Structures // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2022. V. 62. № 2. P. 254–268.*

*75. Куни Ф.М., Русанов А.И. Статистическая теория агрегативного равновесия // Теоретическая и математическая физика. 1970. Т. 2. № 2, С. 265–285. Kuni F.M., Rusanov A.I. Statistical theory of aggregative equilibrium // Theoretical and Mathematical Physic. 1970. V. 2. № 2. P.192–206.*

*76. Drexler K.E. Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, Computation. N.Y.: Willey. 1995.*

*77. Максвелл Дж.К. О динамической теории газов // Труды по кинетической теории. Пер. с англ. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2011.*

*С. 174–231; пер. с англ.: Maxwell J.C. On the Dynamical Theory of Gases // Scientific Papers of James Clerk Maxwell. 1891. V. 2. P. 26–78.*

*78. Максвелл Дж.К. О напряжениях в разреженных газах, возникающих вследствие неоднородностей температуры // Труды по кинетической теории. Пер. с англ. М.: Бином. Лаборатория знаний. 2011. С. 266–299, пер. с англ.: Maxwell J.C. On Stresses in Rarified Gases Arising from Inequalities of Temperature // Scientific Papers of James Clerk Maxwell. 1891. V. 2, P. 681–712.*

*79. Больцман Л. Дальнейшие исследования теплового равновесия между молекулами газа // Избранные труды. М.: Наука. 1984. С. 125–189. Пер. с нем.: Boltzmann L. Weitere Studien uber das Warmegleichgewicht unter Gasmolekülen // Wien. Ber. 1872. V. 66. P. 275–370; Wissenschaftliche Abhandlungen, V. 1. Barth, Leipzig. 1909. P. 316–402.*

*80. Becker R., Doring W. Kinetische Behandlung der Keimbildung in ubersattingten Dampfer // Ann. Phys. 1935. V. 24. P. 719–752.*

*81. Колмогоров А.Н. Об аналитических методах в теории вероятностей // УМН. 1938. В. 5. 5–41.*

*82. Мелихов И.В. Эволюционный подход к созданию наноструктур // Наносистемы: физика, химия, математика. 2010. V.1. № 1. С. 148–155.*

*83. Мелихов И.В., Рудин В.Н., Козловская Э.Д., Аджиев С.З., Алексеева О.В. Морфологическая память полимеров и возможности её использования при разработке технологий новых материалов // Теоретические основы химической технологии. 2016. Т. 50. № 3. С. 268–268.*

*84. Власов А.А. О вибрационных свойствах электронного газа // ЖЭТФ. 1938. Т. 8. № 3. С. 291–318.*

*85. Власов А.А. Статистические функции распределения. М.: Наука. 1966.*

*86. Батищева Я.Г. О движении тела в газе, реагирующим с его поверхностью // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. № 18. 2003.*

*87. Максвелл Дж.К. Пояснения к динамической теории газов // Труды по кинетической теории. М.: Бином. Лаборатория знаний. 2011. С. 121–158. Пер. с англ.: Maxwell J.C. Illustration of the Dynamical Theory of Gases // Scientific Papers of James Clerk Maxwell. 1890. V. 1. P. 377–409.*

*88. Веденяпин В.В. Кинетические уравнения Больцмана и Власова. М.: Физматлит. 2001.*

*89. Силин В.П. Введение в кинетическую теорию газов. М.: Наука. 1971.*

*90. Веденяпин В.В., Негматов М.А. О выводе и классификации уравнений типа Власова и МГД. Тождество Лагранжа и форма Годунова // Теоретическая и математическая физика. 2012. Т. 170. № 3. С. 468–480.*

*91. Веденяпин В.В., Негматов М.А., Фимин Н.Н. Уравнения типа Власова и Лиувилля, их микроскопические, энергетические и гидродинамические следствия // Изв. РАН. Сер.матем. 2017. Т. 81. № 3. С. 45–82.*

*92. Веденяпин В.В., Негматов М.А. О выводе и классификации уравнений типа Власова и магнитной гидродинамики. Тождество Лагранжа, форма Годунова и критическая масса // СМФН. 2013. Т. 47. С. 5–17.*

*93. Vedenyapin V., Sinitsyn A., Dulov E. Kinetic Boltzmann, Vlasov and Related Equations. Elsevier Insights. 2011.*

*94. Веденяпин В.В., Негматов М.А. О топологии стационарных решений гидродинамических и вихревых следствий уравнения Власова и метод Гамильтона–Якоби // Докл. РАН. 2013. Т. 449. № 5 С. 521–526; англ. пер.: Vedenyapin V.V., Negmatov M.A. On the topology of steady-state solutions of hydrodynamic and vortex consequences of the Vlasov equation and the Hamilton–Jacobi method // Dokl. Math. 2013. V. 87. № 2. P. 240–244.*

*95. Аджиев С.З., Веденяпин В.В., Волков Ю.А., Мелихов И.В. Обобщенные уравнения типа Больцмана для агрегации в газе // ЖВМ и МФ. 2017. Т. 57 № 12. С. 2065–2078; англ. пер.: Adzhiev S.Z., Vedenyapin V.V., Volkov Yu.A., Melikhov I.V. Generalized Boltzmann-Type Equations for Aggregation in Gases // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2017. V. 57. № 12. P. 2017–2029.*

*96. Brilliantov N.V., Formella A., Pöschel T. Increasing temperature of cooling granular gases // Nature Communications. 2018. V. 9. 797.*

*97. Вольперт А.И., Худяев С.И. Анализ в классах разрывных функций и уравнения математической физики. М.: Наука. 1975.*

*98. Adzhiev S., Batishcheva J., Igor Melikhov I. and Vedenyapin V. Kinetic Equations for Particle Clusters Differing in Shape and the H-theorem // Physics. 2019. V. 1. № 2. P. 229–252.*

*99. Батищева Я.Г., Веденяпин В.В. II-й закон термодинамики для химической кинетики // Матем. моделирование. 2005. Т. 17. № 8. С. 106–110.*

*100. Веденяпин В.В. Аджиев С.З. Энтропия по Больцману и Пуанкаре // Успехи математических наук. 2014. Т. 69. № 6. С. 45–80.*

*101. Гасников А.В., Гасникова Е.В. Об энтропийно-подобных функционалах, возникающих в стохастической химической кинетике при концентрации инвариантной меры и в качестве функций Ляпунова динамики квазисредних // Математические заметки. 2013. Т. 94. № 6. С. 819–827.*

*102. Тер-Крикоров А.М., Шабунин М.И. Курс математического анализа. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2001.*

*103. Кудрявцев Л.Д. Краткий курс математического анализа. Т. 2. Дифференциальное и интегральное исчисление функций многих переменных. Гармонический анализ. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2005.*

**DOI** 10.34660/INF.2025.81.44.191

# ДОПОЛНЕНИЯ К МЕХАНИЗМУ ОБРАЗОВАНИЯ ВРАЩЕНИЯ ПЛАНЕТЫ ЗЕМЛЯ ВОКРУГ СВОЕЙ ОСИ

**Белашов Алексей Николаевич**
*физик-теоретик*
*ORCID ID: 0000-0002-4821-8004*

***Аннотация.*** *Статья посвящена дополнению к механизму образования вращения планеты Земля вокруг своей оси включающая новую теорию образования планет Солнечной системы, основанной на прежних и современных научных открытиях. Данная теория учитывает не только механические характеристики, но и многочисленные физические данные строения нашей планеты. В предыдущих публикациях не учитывались силы перемещения магмы внутри промежуточного слоя имеющего среднюю линию между турбулентным и ламинарным слоем, обладающие разной плотностью и перемещающиеся в разных направлениях с разной скоростью, которые создают на нашей планете ускорение свободного падения тел в пространстве. Новая теория включает субстанцию космического пространства, образовавшуюся из «эфира» исходящего от поверхности Солнца, ускорения свободного падения Солнца, механизма перемещения Солнца в пространстве Вселенной и механизма перемещения планет Солнечной системы по эллиптической орбите. Данная гипотеза подтверждает математическую взаимосвязь изменения расстояния от поверхности нашей звезды до поверхности планет Солнечной системы. Созданная теория основана на гипотезе образования планет Солнечной системы выдвинутой французским учёным, натуралистом, биологом, математиком и естествоиспытателем Жорж-Луи Бюффоном. Эта гипотеза в настоящее время подкреплена современными математическими доказательствами и новыми научными открытиями.*

***Ключевые слова:*** *образование планеты Земля, механизм вращения планеты Земля вокруг своей оси, новая теория образования планет Солнечной системы, космический эфир, субстанция космического пространства, астрономия, астрофизика.*

Человечество с древних времён пыталось изучить мир, который нас окружает. Людей всегда интересовало внутреннее устройство и возникновение Земли, Солнечной системы и нашей Вселенной. Именно эти вопросы волновали целеустремлённых людей не одно столетие. До наших дней дошли многие легенды и предсказания различных народов мира и многочисленные космологические теории образования планет Солнечной системы. Однако мы выделим только самые популярные научные гипотезы.

Немецкий учёный Эммануил Кант считал, что Солнце и все планеты были образованы из холодного пылевого облака. Это облако вращалось, постепенно пылинки сгущались, соединялись – так образовалось Солнце и другие планеты.

Французский учёный и астроном Пьер Лаплас предложил свою гипотезу о появлении Солнечной системы. Он считал, что Солнце и планеты образованы из гигантского раскалённого газового облака. Оно постепенно остывало, сжималось и дало начало Солнцу и планетам.

Советский математик, географ, геофизик, астроном Отто Юльевич Шмидт в 1944 году выдвинул свою гипотезу о происхождении планет Солнечной системы. Он полагал, что миллиарды лет назад вокруг Солнца вращалось гигантское газово-пылевое облако, это облако было холодным. Со временем облако уплощалось, образовались сгустки. Эти сгустки стали вращаться по орбитам, постепенно из них сформировались планеты.

Необходимо особо подчеркнуть, что гипотезы Канта, Лапласа и Шмидта во многом схожи, и они легли в основу современной теории о происхождении Солнечной системы и нашей планеты Земля.

Современные учёные предполагают, что Солнечная система, то есть Солнце и планеты, возникли одновременно из гигантского холодного газово-пылевого облака. Это облако межзвездного газа и пыли вращалось. Постепенно в нём стали образовываться сгустки. Центральный, самый крупный сгусток, дал начало звезде – Солнцу. Внутри Солнца стали происходить ядерные процессы, и из-за этого оно разогрелось. Остальные сгустки положили начало планетам.

Из сказанного видно, что представления учёных о возникновении нашей Солнечной системы и Земли складывались постепенно. На сегодняшний день остаётся очень много спорных, невыясненных вопросов, которые предстоит решить современной науке.

Я считаю, что более правдоподобной является гипотеза Жоржа Бюффона и гипотеза Джеймс Хопвуд Джина. Данные гипотезы поддаются логическому осмыслению и которые можно доказать по третьему закону Ньютона и новым законам физики.

Английский учёный Джеймс Хопвуд Джинс в начале нашего столетия предположил, что в далёком прошлом мимо Солнца на очень близком рас-

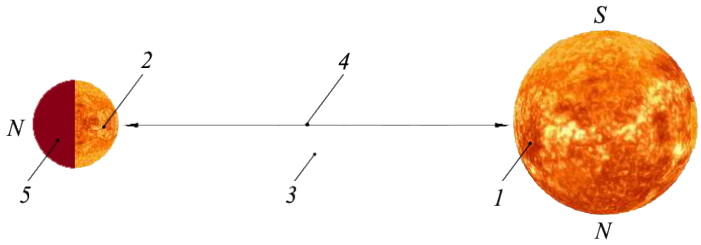
стоянии пролетала некая звезда, которая своим гравитационным воздействием вырвала с поверхности нашего светила часть вещества. Это вещество, разбившись, в дальнейшем на части, образовало планеты.

Французский учёный, натуралист, биолог, математик и естествоиспытатель Жорж-Луи Леклерк граф де Бюффон предположил, что наша Земля была образована в результате катастрофы. Некогда в Солнце врезалась огромная комета, в результате чего разлетелись многочисленные брызги. Впоследствии эти брызги стали остывать, где из самых крупных частиц образовались планеты, в том числе и планета Земля.

Причём даже в нынешнее время астрономы Парижской обсерватории и Института астрофизики Андалусии обнаружили самую большую комету. Диаметр кометы 2014 UN271 оказался равен 140 километрам.

Не будем абстрагироваться на данной космической катастрофе прошедшей несколько миллиардов лет назад, а произведём системный анализ и математически докажем механизм образования планеты Земля из однородного раскалённого материального тела расположенного в космическом пространстве, образования у него магнитного поля и начало вращения его вокруг своей оси.

На фиг. 1 расположено Солнце 1 и раскалённое однородное материальное тело в начальной стадии формирующейся планеты Земля 2 находящейся в космическом пространстве 3 на расстоянии 4, где средняя температура в открытом космическом пространстве составляет –270°С. При разнице температур между нагретой стороной 2 и остывающей стороной 5 однородного материального тела формирующейся планеты Земля появляются сильные термоэлектрические токи между остывшей оболочкой и раскалённой частью материального тела. Термоэлектрические токи от раскалённой части материального тела проходят к остывающей стороне по окружности сферы и создают магнитное поле, которое формирует северный полюс на остывающей стороне 5 формирующейся планете Земля.

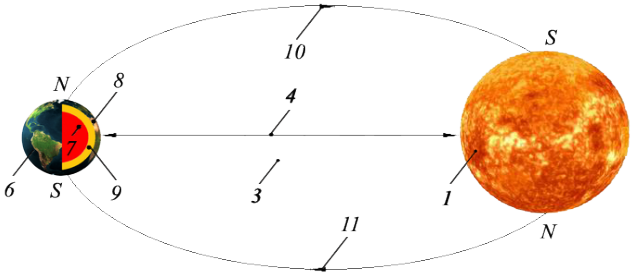



***Фигура 1.***

Существование термоэлектрических явлений было открыто немецким физиком Томасом Иоганном Зеебеком в 1821 году и в настоящее время широко используются в промышленности и приборостроении для измерения термоэлектродвижущей силы в разнородных проводниках при помощи термопар.

После полного остывания однородного материального тела 2 находящегося в космическом пространстве 3 возникает сформировавшаяся планета Земля 6 имеющая ядро 7 и литосферу 8. Между литосферой 8 и ядром 7 расположен промежуточный слой Белашова 9, внутри которого находится естественный механизм вращения планеты Земля 6.

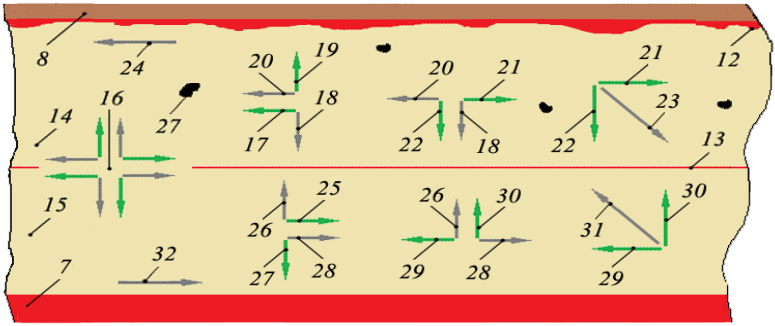
На фиг. 2 показан северный полюс, сформировавшейся планеты Земля 6, который при помощи магнитных силовых линий 10 и магнитных силовых линий 11 магнитного поля Солнца 1 и магнитного поля планеты Земля 6 ориентируются в пространстве и замыкаются. При этом необходимо помнить, что все силовые линии магнитного поля всегда замкнуты, поскольку магнитное поле является полем вихревого типа.




***Фигура 2.***

Между литосферой 8 и ядром 7 расположен промежуточный слой Белашова 9, внутри которого находится естественный механизм вращения планеты Земля 6 взаимодействующий с поверхностью Мохоровичича 12 которая, как правило, повторяет рельеф местности. На фиг.3 изображена поверхность Мохоровичича, которая открыта в 1909 году хорватским геофизиком и сейсмологом Андрией Мохоровичичем заметившего, что сейсмограмма неглубоких землетрясений имеет более двух акустических сигналов: прямой и преломлённый сигнал который является границей раздела слоёв различного химического состава. Это открытие хорватского учёного совместно с открытием естественного механизма вращения планеты Земля находящегося в промежуточном слое Белашова 9, внутри которого находится естественный механизм вращения планеты Земля 6, сильно влияет на процессы, происходящие внутри и на поверхности нашей планеты. В дополне-

нии к этому естественный автономный механизм вращения планеты Земля создаёт ускорение свободного падения тел в пространстве на нашей планете. Промежуточный слой 9 разделён средней линией 13 на турбулентный слой 14 и ламинарный слой 15. Основными компонентами промежуточного слоя 9 преобладает кремний, алюминий, магний, железо, сероводород, хлор, водород, фтор и другие химические соединений называемой магмой. Взвешенные частицы магмы из греческого слова означает «густая мазь» постоянно находится в беспорядочном движении 16, которое называется броуновским. Броуновское движение, которое никогда не прекращается, было открыто британским учёным Робертом Броуном в 1827 году.




***Фигура 3.***

Работу автономного механизма вращения планеты Земля можно элементарно доказать по уже известным и давно проверенным правилам утверждённым в физике. Для примера возьмём любую точку материального тела для измерения электромагнитной индукции находящуюся внутри турбулентного слоя 14 вблизи поверхности Махоровичича так как там самое большое магнитное поле. Мы знаем, что согласно броуновскому движению данная точка химического соединения, содержащая токопроводящие элементы может перемещаться в любом направлении. Однако согласно правилу правой руки химические соединения магмы содержащей токопроводящие атомы алюминия и железа при перемещении их в магнитном поле в направлении 17 создают электрический ток в направлении 18, а при перемещении токопроводящих атомов в направлении 19 создают электрический ток в направлении 20.

Правило правой руки для тока в проводнике, движущемся в магнитном поле, выглядит так: если ладонь правой руки расположить так, чтобы в неё входили силовые линии магнитного поля, а отогнутый большой палец направить по движению проводника, то четыре вытянутых пальца укажут направление индукционного тока.

Далее согласно правилу левой руки если магнитные силовые линии входят в ладонь, а четыре пальца указывают направление движения тока 18, то отставленный большой палец покажет направление действующей на проводник силы Ампера 21, а движение тока 20 покажет направление действующей силы 22. Действующая сила 21 и действующая сила 22 создают результирующую силу 23, которая действует на литосферу 8 и заставляет её вращать в направлении 24, против часовой стрелки.

Правило левой руки для проводника с током выглядит так: если левую руку расположить так, чтобы линии магнитной индукции входили в ладонь перпендикулярно ей, а четыре пальца указывали направление тока, то отставленный большой палец покажет направление действующей на проводник силы Ампера.

При этом необходимо особо подчеркнуть, что литосфера 8 с турбулентным слоем 14 промежуточного слоя Белашова 9 двигаются с большой скоростью. Внутри турбулентного слоя находятся разной величины обломки литосферы 27 отколовшиеся от поверхности Мохоровичича, которые сильно влияют на процессы, происходящие на поверхности нашей планеты:

- механизм образования землетрясений на планете Земля,
- механизм вулканической деятельности на планете Земля,
- механизм образования геопатогенных зон на планете Земля,
- механизм образования цунами на планете Земля,
- механизм образования торнадо на планете Земля.

Дальше возьмём любую точку материального тела для измерения электромагнитной индукции находящуюся внутри ламинарного слоя 15 вблизи поверхности ядра 7. Мы знаем, что согласно броуновскому движению данная точка химического соединения, содержащая токопроводящие элементы может перемещаться в любом направлении 16. Однако согласно правилу правой руки химические соединения магмы содержащей токопроводящие атомы алюминия и железа при перемещении их в магнитном поле в направлении 25 создают электрический ток в направлении 26, а при перемещении токопроводящих атомов в направлении 27 создают электрический ток в направлении 28.

Согласно правилу левой руки если магнитные силовые линии входят в ладонь, а четыре пальца указывают направление движения тока 26, то отставленный большой палец покажет направление действующей на проводник силы Ампера 29, а движение тока 28 покажет направление действующей силы 30. Действующая сила 29 и действующая сила 30 создают результирующую силу 31, которая действует на ядро 7 и заставляет его вращаться в направлении 32 по часовой стрелке.

Однако необходимо особо подчеркнуть, для того чтобы эти условия взаимодействия между литосферой 8 и ядром 7 нашей планеты соблюда-

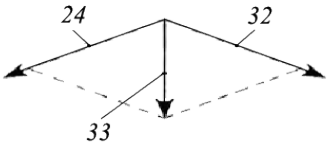
лись необходимо научному сообществу пересмотреть внутреннее устройство планеты Земля (в чём я сильно сомневаюсь), так как масса литосферы должна в какой-то мере соответствовать массе ядра. При этом необходимо помнить, что литосфера нашей планеты в основном была сформирована из остывшей субстанции космического пространства, которое излучает наше Солнце в виде «эфира» и тогда созданная теория, основанная на гипотезе образования планет Солнечной системы выдвинутой французским учёным, натуралистом, биологом, математиком и естествоиспытателем Жорж-Луи Бюффоном будет математически подтверждена.

В заявке на изобретение № 2005129781/06 (033405) от 28 сентября 2005 года и заявке на изобретение № 2005140396/06 (033405) от 26 декабря 2005 года были подробно изложены механизмы образования планет Солнечной системы в космическом пространстве из раскалённых материальных тел, отделившихся от поверхности Солнца. Все открытые механизмы образования планет Солнечной системы подчинены законам природы и дают возможность узнать и по-новому взглянуть на существование неизвестных нам раньше свойств и явлений материального мира, которые включают:

- механизм образования и получения термоэлектричества, в сфере материального тела находящегося в пространстве,
- механизм образования и получения магнитного поля в сфере материального тела находящегося в пространстве,
- механизм образования магнитных полюсов в сфере материального тела находящегося в пространстве,
- механизм запуска и начала вращения магнитной системы в сфере материального тела находящегося в пространстве, против часовой стрелки, на примере планеты Земля,
- механизм размещения планет Солнечной системы, имеющих магнитное поле, в одной плоскости космического пространства,
- механизм автономного вращения магнитной системы в сфере материального тела находящегося в пространстве, против часовой стрелки, на примере планеты Земля,
- механизм запуска и начала вращения магнитной системы в сфере материального тела находящегося в пространстве, по часовой стрелке, на примере планеты Венера,
- механизм автономного вращения магнитной системы в сфере материального тела находящегося в пространстве, по часовой стрелке, на примере планеты Венера,
- механизм образования сил тяготения, взаимодействия и противодействия,
- механизм образования вулканической деятельности на планете Земля,
- механизм образования геопатогенных зон на планете Земля,

- механизм образования цунами и торнадо на планете Земля,
- механизм образования землетрясений на планете Земля и так далее…

Необходимо особо подчеркнуть, что механизм образования ускорения свободного падения тел в пространстве на любой планете Солнечной системы состоит из силы образующейся от вращения внешней оболочки в одном направлении и вращения ядра в обратном направлении как на планете Земля. При этом внутренняя оболочка может быть неподвижна как на Солнце и тогда сила ускорения свободного падения тел в пространстве будет направлена под углом к внешней оболочке или наоборот как на Луне где внешняя оболочка неподвижна, а внутренняя её часть находится в постоянном движении.




***Фигура 4.***

На фиг.4 изображён механизм образования ускорения свободного падения тел в пространстве на планете Земля 33, который состоит из вращения литосферы 8 в направлении 24 и ядра 7 в направлении 32.

Однако необходимо особо подчеркнуть, что помимо создаваемого ускорения свободного падения тел в пространстве на планете Земля на любое материальное тело находящегося на поверхности нашей планеты действует масса воздушного столба.

Причём при удалении средства измерения от поверхности нашей планеты вверх ускорение свободного падения тел в пространстве убывает, но если средство измерения перемещают вглубь нашей планеты, то ускорение свободного падения тел в пространстве возрастает. Ускорение свободного падения тел в пространстве на планете Земля, которое образовалось из горячего материального тела доказано на конкретном законе, который был изложен в научно-аналитическом журнале «Научный обозреватель» № 1 (25) за 2013 год страницы 68-73. Издательство «Инфинити» город Уфа.

Закон определяющий ускорение свободного падения тел в пространстве А.Н.Белашова был сформулирован так:

Модуль ускорения свободного падения тел в пространстве равен квадрату сумме вектора скорости вращения внешней оболочки материального тела в одном направлении и вектора скорости вращения внутренней части материального тела в обратном направлении, по средней линии промежуточного слоя разделённого на разность между радиусом внешней оболочкой материального тела и радиусом внутренней части материального тела, по средней

линии промежуточного слоя плюс сумма или разница измерения расстояния вверх или вниз от поверхности внешней оболочки материального тела.

$$g = \frac{(Vэк + Vпс)^2}{Rэ - Rпс + h} = \frac{(м/с + м/с)^2}{м} = \frac{м^2}{м \cdot с^2} = \frac{м}{с^2}$$

где:

V эк - скорость вращения внешней оболочки материального тела по окружности экватора против часовой стрелки, м/с

V пс - скорость вращения внутренней части материального тела по средней линии промежуточного слоя, м/с

h - высота или глубина измерения от уровня моря на экваторе до поверхности внешней оболочки материального тела, м

R пс - радиус внутренней части материального тела, м

g - модуль ускорения свободного падения тел в пространстве, м/с²

R э - радиус внешней оболочкой материального тела, м.

Например, по закону ускорения свободного падения тел в пространстве, определим модуль ускорения свободного падения тел на экваторе планеты Земля.

$$g = \frac{(Vэк + Vпс)^2}{Rэ - Rпс + h} = \frac{(м/с + м/с)^2}{м} = \frac{м^2}{м \cdot с^2} = \frac{м}{с^2}$$

$$g = \frac{(465{,}103305311273274 + 458{,}740927542699182)^2}{6378160 - 6290910 + 0 = 87250\,м} = 9{,}782099330401660751774656 8\ м/с^2$$

где:

g - модуль ускорения свободного падения, м/с²

h - высота над уровнем моря на экваторе = 0, м

R э - радиус внешней части материального тела = 6378160 м

R пс - радиус внутренней части материального тела до средней линии промежуточного слоя = 6290910 м

V эк – скорость вращения внешней оболочки материального тела по окружности экватора против часовой стрелки = 465,1033053112732844768788246 0188 м/с

V пс - скорость вращения внутренней части материального тела по средней линии промежуточного слоя = 458,740927542699182530454200972 72 м/с

Необходимо подчеркнуть, что при удалении от поверхности Земли материального тела, пропорционально уменьшается модуль ускорения свободного падения тел в пространстве, а при приближении материального тела к средней линии промежуточного слоя Белашова, пропорционально увеличивается модуль ускорения свободного падения тел в пространстве.

Например, по закону ускорения свободного падения тел в пространстве, определим модуль ускорения свободного падения тел на высоте 1000 м от поверхности уровня моря на экваторе планеты Земля.

$$g = \frac{(Vэк + Vпс)^2}{Rэ - Rпс + h} = \frac{(м/с + м/с)^2}{м} = \frac{м^2}{м \cdot с^2} = \frac{м}{с^2}$$

$$g = \frac{(465{,}103305311273274 + 458{,}740927542699182)^2}{6378160 - 6290910 + 1000 = 88250\ м} = 9{,}671254012210140516627068 6\ м/с^2$$

где:
g - модуль ускорения свободного падения, м/с²
R э - радиус внешней части материального тела = 6378160 м
h - высота над уровнем моря на экваторе = 1000 м
V эк - скорость вращения внешней оболочки материального тела по окружности экватора против часовой стрелки = 465,1033053112732844768788246 0188 м/с
V пс - скорость вращения внутренней части материального тела по средней линии промежуточного слоя = 458,7409275426991825304542009727 2 м/с
R пс - радиус внутренней части материального тела до средней линии промежуточного слоя = 6290910 м.

Например, по закону ускорения свободного падения тел в пространстве, определим модуль ускорения свободного падения тел на глубине 1000 м от поверхности земной коры на экваторе планеты Земля.

$$g = \frac{(Vэк + Vпс)^2}{Rэ - Rпс - h} = \frac{(м/с + м/с)^2}{м} = \frac{м^2}{м \cdot с^2} = \frac{м}{с^2}$$

$$g = \frac{(465{,}103305311273274 + 458{,}740927542699182)^2}{6378160 - 6290910 - 1000 = 86250\ м} = 9{,}895514974812114789476391 9\ м/с^2$$

где:
h - в глубине шахты на экваторе = 1000 м
g - модуль ускорения свободного падения, м/с²
R э - радиус внешней части материального тела = 6378160 м
V эк - скорость вращения внешней оболочки материального тела по окружности экватора против часовой стрелки = 465,1033053112732844768788246 0188 м/с
V пс - скорость вращения внутренней части материального тела по средней линии промежуточного слоя = 458,7409275426991825304542009727 2 м/с
R пс - радиус внутренней части материального тела до средней линии промежуточного слоя = 6290910 м.

В процессе развития науки мы узнали, что материя субстанции космического пространства обладает своей массой, плотностью и энергией, которая не равномерно распределена по Солнечной системе удерживая все космические тела на своих орбитах при помощи небольшого ускорения свободного падения исходящего от внешней оболочки нашей звезды. Субстанция космического пространства Солнечной системы тесно взаимодействует с новым законом тяготения одного материального тела, находящегося в пространстве Солнечной системы к центральной звезде Солнцу, новым законом тяготения между двумя материальными телами, находящихся в пространстве Солнечной системы и новым законом ускорения свободного падения тел в пространстве. При изменении положения одного материального тела расположенного в пространстве по отношении к другому материальному телу будет меняться не только сила тяготения этого материального тела, но и его энергия. При изменении активности материального тела расположенного в пространстве будет пропорционально меняться расстояние от поверхности Солнца до поверхности любой планеты Солнечной системы. Это доказательство можно подтвердить по константе обратной скорости света, так как она тесно связана с ускорением свободного падения тел в пространстве, которое зависит от активности материального тела расположенного в пространстве, времени и расстояния от поверхности Солнца до поверхности любой планеты Солнечной системы. Константа обратной скорости света была популярно изложена в научно-аналитическом журнале «Научный обозреватель», № 1-25 за 2013 год страница 64. Издательство «Инфинити» город Уфа.

В космическом пространстве Солнце в процессе термоядерного синтеза выделяет большое количество света, тепла, радиоактивного излучения, космической пыли и радионуклидов, относящихся к группе атомов обладающих свойством радиоактивности, с определенным массовым числом, атомным номером и энергетическим статусом, которые в итоге и составляют состав субстанции космического пространства Солнечной системы. Как уже стало известно, субстанция космического пространства Солнечной системы имеет свой состав, свою массу, плотность и свою энергию в единстве форм её движения как носитель этого явления.

Причём необходимо подчеркнуть, что даже в Солнечной системе субстанция космического пространства неоднородна, а изменяется в зависимости от удаления от поверхности Солнца и тем более она различна в других системах нашей Вселенной, поэтому обозначение её эфиром (как в старых теориях физики) не актуально.

По новым законам физики нам стало известно, что планеты в Солнечной системе удерживаются на своих орбитах при помощи субстанции космического пространства Солнечной системы и небольшого ускорения свободного

падения тел в пространстве вокруг Солнца. Вращаются планеты Солнечной системы вокруг нашей звезды при помощи сил гравитационного тяготения, сил космического противодействия и сил космического взаимодействия которые были популярно изложены в журнале актуальной научной информации «Аспирант и соискатель» № 1 за 2019 год страница 65. Издательство «Спутник +» город Москва.

Новая физическая величина, определяющая субстанцию космического пространства, была популярно изложена в научно-практическом журнале «Высшая школа» № 18 за 2017 год страница 27. Издательство «Инфинити» город Уфа.

Математические доказательства существования космического эфира или субстанции космического пространства были популярно изложены в информационно-аналитическом журнале «Актуальные проблемы современной науки» № 1 за 2021 год страница 33. Издательство «Спутник +» город Москва.

Новая физическая величина, определяющая ускорение свободного падения тел в пространстве Солнечной системы была популярно изложена в научно-практическом журнале «Высшая школа» № 19 за 2017 год страница 33. Издательство «Инфинити» город Уфа.

Новый закон определения расстояния от поверхности Солнца до поверхности планет Солнечной системы был популярно изложен в научно-практическом журнале «Высшая школа» № 17 за 2018 год страница 49. Издательство «Инфинити» город Уфа.

В настоящее время «эфир» или субстанция космического пространства = 0,3126005345650193429716951029 32 кг/м$^3$, а новая физическая величина определяющая ускорение свободного падения тел в пространстве Солнечной системы = 0,000836759790836120401337792642140 48 м/с$^2$.

Необходимо особо подчеркнуть, что ускорение свободного падения тел в пространстве по всему диаметру поверхности Солнца нестабильное и подвержено флуктуациям и меняющееся в зависимости от количества протуберанцев их расположением, их мощностью и влияет на перемещение планет Солнечной системы по синусоиде.

Мне трудно себе представить, что ускорение свободного падения вокруг Солнца = 0,000836759790836120401337792642140 48 м/с$^2$ может сильно влиять на силы гравитационного тяготения и расположение планет Солнечной системы на своих орбитах.

Планеты Солнечной системы удерживаются на своих орбитах по новому закону определения расстояния от поверхности Солнца до поверхности планет Солнечной системы, был открыт А.Н. Белашовым и популярно изложен в научно-практическом журнале «Высшая школа» № 17 за 2018 год страница 49. Издательство «Инфинити» город Уфа и сформулирован так:

Расстояние от поверхности Солнца до поверхности планет Солнечной системы прямо пропорционально ускорению свободного падения тел в пространстве измеряемого материального тела на диаметр измеряемого материального тела и обратно пропорционально ускорению свободного падения тел вокруг Солнца.

$$L_и = \frac{g_и \cdot D_и}{g_c} = \frac{м}{c^2} \cdot \frac{c^2}{м} \cdot \frac{м}{} = м$$

где:

L и - расстояние от поверхности Солнца до поверхности исследуемой планеты, м

g и - ускорение свободного падения тел в пространстве на исследуемой планете Солнечной системы, м/с²

g с - ускорение свободного падения тел вокруг Солнца, м/с²

D и - диаметр исследуемой планеты, м.

Зная диаметр измеряемой планеты Солнечной системы и расстояние от поверхности Солнца до поверхности измеряемой планеты Солнечной системы можно определить модуль ускорения свободного падения тел в пространстве на данной планете.

Например, по новому закону определим модуль ускорения свободного падения тел в пространстве на планете Земля, которая находится на среднем расстоянии от поверхности Солнца.

$$g_з = \frac{L \cdot g_c}{D_з} = \frac{м}{} \cdot \frac{м}{c^2} \cdot \frac{}{м} = \frac{м}{c^2}$$

$$g_з = \frac{149500000000{,}000\ м \cdot 0{,}000836759790836\ м/с^2}{12756200\ м} = 9{,}80665000000\ м/с^2$$

где:

g з - ускорение свободного падения тел в пространстве на планете Земля, м/с²

g с - ускорение свободного падения тел в пространстве вокруг Солнца
= 0,000836759790836120401337792642 14 м/с²

L - среднее расстояние от поверхности Солнца до поверхности планеты Земля = 149500000000 м

D з – диаметр планеты Земля = 12756200 м.

Существуют и другие новые законы физики, новые константы и новые математические формулы открытые физиком-теоретиком Белашовым А.Н. по которым можно доказать это явление природы, но проще всего это можно сделать на основании уже давно известного всему миру третьего закона Ньютона.

Основываясь на известных характеристиках планеты Земля, определим площадь круга планеты Земля по её экваториальному радиусу.

$$S = П \cdot r^2$$

$$S = 3,14159265358979323846264338327 \cdot 6378100 \text{ м}^2 = 127800490577636,2284075591238 \text{ м}^2$$

где:

S - площадь круга планеты Земля по её экваториальному радиусу, м

П - отношение длины к её окружности = 3,14159265358979323846264338327

r - средний экваториальный радиус планеты Земля = 6378100 м.

Зная площадь круга планеты Земля, по её экваториальному радиусу и среднее расстояние от поверхности планеты Земля до поверхности Солнца, определим объём цилиндра с космической субстанцией.

$$V = П \cdot r^2 \cdot h$$

$$V = 3,14159265358979323 \cdot 6378100 \text{ м}^2 \cdot 149500000000 \text{ м} = 191061733413566161469300 89,016221 \text{ м}^3$$

где:

V - объём цилиндра с космической субстанцией, м³

h - высота цилиндра с космической субстанцией = 149500000000 м

П - отношение длины к её окружности = 3,14159265358979323846264338327

r - средний экваториальный радиус планеты Земля = 6378100 м.

Мысленно представим цилиндр имеющий диаметр планеты Земля от поверхности Солнца до поверхности планеты Земля. Внутри этого цилиндра расположена масса субстанции космического пространства, которая взаимодействует с массой планеты Земля.

Определим массу субстанции космического пространства, которая должна быть равна массе планеты Земля.

$$m = V \cdot p$$

$$191061733413566161469300 89 \text{ м}^3 \cdot 0,312600534565019342971695 1 \text{ кг/м}^3 = 597260000000000000000000,000778 \text{ кг}$$

где:

m - масса субстанции космического пространства, кг

V - объём цилиндра с космической субстанцией = 191061733413566161469 30089,016221 м³

p - плотность субстанции космического пространства = 0,312600534565019342971695 1029 кг/м³.

На основании третьего закона Ньютона сила действия одной среды состоящей из субстанции космического пространства действует на другую среду, состоящую из силы тяготения планеты Земля находящиеся в пространстве Солнечной системы должны быть равны по величине и противоположны по направлению.

$$F_{тс} = - F_{тсо}$$

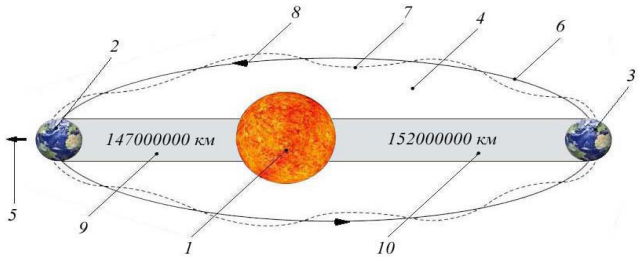
$$5{,}9726 \times 10^{24}\,Н = - 5{,}9722 \times 10^{24}\,Н$$

где:

$F_{тс}$ - сила субстанции космического пространства = $5{,}9726 \times 10^{24}$ Н

$F_{тсо}$ - сила тяготения планеты Земля к поверхности Солнца = $5{,}9722 \times 10^{24}$ Н.

Перемещение всех планет Солнечной системы происходит по эллиптической орбите, но необходимо особо подчеркнуть, что ускорение свободного падения тел в пространстве по всему диаметру поверхности Солнца нестабильное и подвержено флуктуациям, меняющееся в зависимости от количества протуберанцев их расположением и их мощностью и влияет на перемещение планет Солнечной системы по синусоиде. Механизм перемещения планет Солнечной системы в виде синусоиды по эллиптической орбите популярно изложен в журнале актуальной научной информации «Аспирант и соискатель» № 3 (136) за 2023 год страницы 19-25. Издательство «Спутник +», город Москва.




***Фигура 4.***

На фиг.4 изображено Солнце 1 и планета Земля, находящаяся в перигелии 2 и афелии 3 перемещающаяся в субстанции космического пространства Солнечной системы 4 в направлении 5 по эллиптической орбите 6 в виде синусоиды 7.

Перемещение планет Солнечной системы по эллиптической орбите 6 против часовой стрелки 8 в направлении 5 основано на принципе различной плотности субстанции космического пространства перед поверхностью Солнца 9 и за поверхностью Солнца 10 изменяющего силы гравитационного тяготения, силы космического взаимодействия и силы космического противодействия вокруг нашей звезды.

Расстояние от поверхности Солнца до поверхности планеты Земля находящейся в перигелии = 147000000 км и расстояние от поверхности Солнца до поверхности планеты Земля находящейся в афелии =152000000 км силь-

но влияет на плотность субстанции космического пространства силу космического взаимодействия и силу космического противодействия. Субстанция космического пространства Солнечной системы 4 перемещающегося в направлении 5 в промежутке 9 уплотнена, а в промежутке 10 субстанция космического пространства разряжена.

Перемещение планеты Земля в субстанции космического пространства Солнечной системы 4 происходит по новому закону определения расстояния от поверхности Солнца до поверхности планет Солнечной системы.

Зная расстояние между поверхностью Солнца и поверхностью планеты Земля, находящейся в перигелии или афелии можно рассчитать ускорение свободного падения тел в пространстве перед поверхностью Солнца 1 и за его поверхностью и как оно меняется при удалении планеты Земля от поверхности Солнца.

Новый закон определения расстояния от поверхности Солнца до поверхности планет Солнечной системы был открыт и популярно изложен в научно-практическом журнале «Высшая школа» № 17 за 2018 год страница 49. Издательство «Инфинити» город Уфа и сформулирован так:

Расстояние от поверхности Солнца до поверхности планет Солнечной системы прямо пропорционально ускорению свободного падения тел в пространстве измеряемого материального тела на диаметр измеряемого материального тела и обратно пропорционально ускорению свободного падения тел вокруг Солнца.

$$L_и = \frac{g_и \cdot D_и}{g_c} = \frac{м}{с^2} \cdot \frac{с^2}{м} \cdot \frac{м}{} = м$$

где:

L и - расстояние от поверхности Солнца до поверхности исследуемой планеты, м

g и - ускорение свободного падения тел в пространстве на исследуемой планете Солнечной системы, м/с²

g с - ускорение свободного падения тел вокруг Солнца, м/с²

D и - диаметр исследуемой планеты, м.

Зная диаметр измеряемой планеты Солнечной системы и расстояние от поверхности Солнца до поверхности измеряемой планеты Солнечной системы можно определить модуль ускорения свободного падения тел в пространстве на данной планете.

Например, по новому закону определим модуль ускорения свободного падения тел в пространстве на планете Земля, которая находится на среднем расстоянии от поверхности Солнца.

$$g_з = \frac{L \cdot g_c}{D_з} = \frac{м}{} \cdot \frac{м}{с^2} \cdot \frac{}{м} = \frac{м}{с^2}$$

$$g_з = \frac{149500000000{,}000\ м \cdot 0{,}000836759790836\ м/с^2}{12756200\ м} = 9{,}80665000000\ м/с^2$$

где:

g з - ускорение свободного падения тел в пространстве на планете Земля, м/с²

g с - ускорение свободного падения тел в пространстве вокруг Солнца = 0,000836759790836120401337792642 14 м/с²

L - среднее расстояние от поверхности Солнца до поверхности планеты Земля = 149500000000 м

D з – диаметр планеты Земля = 12756200 м.

Необходимо особо подчеркнуть, что при возникновении разряжения 10 субстанции космического пространства 4 между поверхностью Солнца и поверхностью планеты Земля находящейся в афелии 3 будет менять не только ускорение свободного падения тел в пространстве вокруг Солнца 1 но и плотность субстанции космического пространства находящаяся за поверхностью Солнца, которое постоянно перемещается в пространстве в направлении 5.

Необходимо отметить, что в основном все научные теории были основаны на том, что первичным после большого взрыва появлялось гравитационное поле, действующее в равной степени на все материальные тела, расположенные в пространстве. Данное утверждение ошибочно и противоречит логическому мышлению. Если говорить о большом взрыве, который расширяет материальные тела в космическом пространстве, то гравитационное поле должно наоборот сдерживать это расширение и действовать по принципу сжатия и удержания материальных тел на своих орбитах. В добавление к этому утверждению научное сообщество ввело «гравитационную постоянную» которая по современным данным равна:

$$G = 6{,}6720 \cdot 10^{-11}\ Н \cdot м^2/кг^2$$

Однако в мире нет, и не может существовать «гравитационной постоянной», из-за не прекращающего изменения свойств, планет и галактик нашей Вселенной. Необходимо знать, что сила тяготения в Солнечной (или другой) системе будет сильно отличаться от силы тяготения в галактике, и тем более, от силы тяготения во Вселенной. В применяемой в настоящее время «гравитационной постоянной» не существует прямой зависимости между активными и пассивными материальными телами. Здесь также нет прямой связи между расположением материальных тел в системе (например, Солнечной), галактике или во Вселенной.

После глубокого анализа современного закона Всемирного тяготения можно сделать вывод, что в любой движущейся системе не может быть ничего постоянного. Что касается опытов английского учёного Генри Кавендиша использовавшего крутильные весы в земных условиях для определения сил тяготения между двумя материальными телами, то это явление природы нельзя трактовать как способ определения «гравитационной постоянной» в земных условиях и тем больше внутри всей нашей Вселенной.

Необходимо особо подчеркнуть, что формула силы тяготения между двумя материальными телами, находящиеся в пространстве самим Исааком Ньютоном была трактована так: «*Частица, находящаяся вне сферической поверхности, притягивается к центру сферы с силою, обратно пропорциональной квадрату её расстояния до центра сферы*». В современном законе Всемирного тяготения нет ключевого слова Исаака Ньютона - «сфера».

Универсальный закон тяготения между двумя материальными телами расположенные в пространстве А.Н. Белашова больше приближен к величайшему открытию учёного, астронома, математика и мыслителя Исаака Ньютона.

Универсальный закон тяготения между двумя материальными телами расположенные в пространстве А.Н. Белашова выглядит так.

$$F_{\text{тс}} = \frac{[(m_1 \cdot g_1) + (m_2 \cdot g_2)] \cdot L_{м^2}}{L_{c1} \cdot L_{c2}} = \frac{H \cdot м^2}{м^2} = H$$

Закон тяготения между двумя материальными телами расположенные в пространстве Исаака Ньютона выглядит так.

$$F = \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

В дополнении к этому утверждению была выдвинута «Новая теория многогранной зависимости», которая была сформулирована в результате всестороннего научно-аналитического метода исследования описания заявки на изобретение № 2005129781 от 28 сентября 2005 года и описания заявки на изобретение № 2012142735 от 09 октября 2012 года.

Открыт закон определения энергии внутри разнообразных пространств нашей Вселенной позволяющий вычислить запасённую энергию любого материального тела на нашей планете, например определённый объём какой-либо марки древесины, угля, нефти, газа и так далее... Новый закон полностью опровергает утверждение о сохранении энергии в пространстве нашей Вселенной. Смотрите информационно-аналитический журнал «Актуальные проблемы современной науки», № 4 (127) за 2022 год страницы 30-36. Издательство «Спутник +», город Москва.

Открыт закон определения скорости движения света в пространстве нашей Вселенной отображающий большую зависимость движения скорости

света проходящего в пространстве от мощности источника излучения света, диаметра светового потока и расстояния от источника излучения света до конечной цели. В новом законе учтены потери светового потока проходящего сквозь субстанцию пространства и ускорение свободного падения тел в пространстве той среды, где движется источник света. Новый закон полностью опровергает утверждение о постоянстве скорости света. Смотрите журнал актуальной научной информации «Аспирант и соискатель», № 5 (138) за 2023 год страницы 16-23. Издательство «Спутник +», город Москва.

В заключении можно сказать, что наш материальный мир очень многообразен и все процессы, совершаемые в нём от случайно сложившихся обстоятельств, которые происходят во времени, в разной мере, влияют один на другой, поэтому выдвигается новая теория многогранной зависимости. В этом мире всё переплетено, и одно явление природы в разной мере находится в зависимости к другому. Более активные материальные тела доминируют над менее активными материальными телами, поэтому не может быть независимых и постоянных констант, законов или физических величин. Например, новый закон гравитационного тяготения и космического взаимодействия между двумя материальными телами, которые расположены в пространстве Солнечной или другой системы тесно связан с новым законом гравитационного тяготения одного материального тела находящегося в пространстве Солнечной системы к центральной звезде Солнцу. В тоже время законы гравитационного тяготения и космического взаимодействия находятся в постоянной зависимости от нового закона активности материального тела расположенного в пространстве и нового закона ускорения свободного падения тел в пространстве. А перечисленные законы тесно связаны с новым законом энергии между двумя материальными телами, которые находятся в пространстве Солнечной системы и новым законом энергии одного материального тела, находящегося в пространстве Солнечной системы, к центральной звезде Солнцу и многим другим...

**Библиографический список**

*1. А.Н. Белашов «Магнитное поле Солнца его вращение и образование вокруг него ускорения свободного падения тел в пространстве». Информационно-аналитический журнал «Актуальные проблемы современной науки», № 6 (129) за 2022 год страницы 13-19. Издательство «Спутник +», город Москва. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-39976 ISSN 1680-2721*

*2. А.Н. Белашов «Открыт механизм вращения планет Солнечной системы вокруг Солнца». Журнал актуальной научной информации «Аспирант и соискатель», № 6 (133) за 2022 год страницы 12-22. Издательство*

*«Спутник +», город Москва. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-39976 ISSN 1608-9014.*

*3. А.Н. Белашов «Открыты новые параметры планеты Земля». Журнал актуальной научной информации «Аспирант и соискатель», № 6 (108) за 2018 год страницы 47-57. Издательство «Спутник +», город Москва. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-39976 ISSN 1608-9014.*

*4. А.Н. Белашов «Открыт механизм образования и внутреннего устройства Луны». Информационно-аналитический журнал «Актуальные проблемы современной науки», № 1 (104) за 2019 год страницы 59-68. Издательство «Спутник +», город Москва. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-39976 ISSN 1680-2721.*

*5. А.Н. Белашов «Эволюционное развитие планет Солнечной системы». Международный научно-исследовательский журнал, № 7-14 за 2013 год часть 1 страница 14. Типография «Импекс», город Екатеринбург.*

*6. А.Н. Белашов «Открыт механизм образования гравитационных сил и новый закон ускорения свободного падения тел в пространстве». Научно-методический журнал «Проблемы современной науки и образования», № 3-17 за 2013 год страница 7. Типография «ПресСто», город Иваново.*

*7. А.Н. Белашов «Открыты новые законы энергии материальных тел расположенных в пространстве Солнечной системы». Научно-методический журнал «Проблемы современной науки и образования», № 3-17 за 2013 год страница 13. Типография «ПресСто», город Иваново.*

*8. А.Н. Белашов «Открыт механизм образования планет Солнечной системы». Научно-аналитический журнал «Научная перспектива», № 9-43 за 2013 год страница 45. Издательство «Инфинити», город Уфа.*

*9. А.Н. Белашов «Объяснение законов движения и взаимной зависимости планет Солнечной системы». Научно-практический журнал «Журнал научных и прикладных исследований», № 11 за 2015 год страница 139. Издательство «Инфинити», город Уфа.*

*10. А.Н. Белашов «Открыта новая физическая величина определяющая субстанцию космического пространства». Научно-практический журнал «Высшая школа», № 18 за 2017 год стр. 27. Издательство «Инфинити», город Уфа.*

*11. А.Н. Белашов «Открыта новая физическая величина определяющая ускорение свободного падения тел в пространстве Солнечной системы». Научно-практический журнал «Высшая школа», № 19 за 2017 год страница 33. Издательство «Инфинити», город Уфа.*

*12. А.Н. Белашов «Открыт механизм гравитационного тяготения планет Солнечной системы». Научно-практический журнал «Высшая школа», № 12 за 2018 год страница 5. Издательство «Инфинити», город Уфа.*

*13. А.Н. Белашов «Открыты законы энергии планет Солнечной системы». Научно-практический журнал «Высшая школа», № 14 за 2018 год страница 88. Издательство «Инфинити», город Уфа.*

*14. А.Н. Белашов «Открыт новый закон сил гравитационного тяготения». Информационно-аналитический журнал «Актуальные проблемы современной науки», № 4 за 2018 год стр. 144. Издательство «Спутник +», город Москва.*

*15. А.Н. Белашов «Открыт новый закон определения расстояния от поверхности Солнца до поверхности планет Солнечной системы». Научно-практический журнал «Высшая школа», № 17 за 2018 год страница 49. Издательство «Инфинити», город Уфа.*

*16. А.Н. Белашов «Открыты механизмы образования сил гравитационного тяготения, сил космического противодействия и сил космического взаимодействия». Журнал актуальной научной информации «Аспирант и соискатель», № 1 за 2019 год страница 65. Издательство «Спутник +», город Москва.*

*17. А.Н. Белашов «Дополнения к опровержению закона всемирного тяготения Ньютона». Информационно-аналитический журнал «Актуальные проблемы современной науки», № 2 за 2019 год страница 106. Издательство «Спутник +», город Москва.*

*18. А.Н. Белашов «Математические доказательства существования космического эфира или субстанции космического пространства». Информационно-аналитический журнал «Актуальные проблемы современной науки», № 1 за 2021 год страница 33. Издательство «Спутник +», город Москва.*

*19. А.Н. Белашов «Открыта константа субстанции космического пространства». Научно-практический журнал «Высшая школа», № 17 за 2017 год страница 39. Издательство «Инфинити», город Уфа.*

*20. А.Н. Белашов «Опровержение закона сохранения энергии». «Международный научно-исследовательский журнал» № 9 часть 1 за 2013 год. Типография «Импекс», город Екатеринбург.*

*21. А.Н. Белашов «Открыт механизм образования гравитационных сил и новый закон ускорения свободного падения тел в пространстве». «Международный научно-исследовательский журнал» № 2 за 2013 год. Типография «Импекс», город Екатеринбург.*

*22. А.Н. Белашов «Открыт новый закон тяготения между двумя материальными телами находящиеся в пространстве Солнечной (или другой) системы». «Международный научно-исследовательский журнал» № 4 часть 1 за 2013 год. Типография «Импекс», город Екатеринбург.*

*23. А.Н. Белашов «Устройство вращения магнитных систем». Описание заявки на изобретение № 2005129781 от 28 сентября 2005 года.*

*24. А.Н. Белашов «Устройство вращения магнитных систем Белашова в сфере материального тела расположенного в пространстве». Описание заявки на изобретение № 2005140396 от 26 декабря 2005 года.*

*25. А.Н. Белашов «Новая теория многогранной зависимости», которая была сформулирована в результате всестороннего научно-аналитического метода исследования описания заявки на изобретение № 2005129781 от 28 сентября 2005 года и описания заявки на изобретение № 2012142735 от 09 октября 2012 года URL:http://www.belashov.info/LAWS/theory.htm*

**DOI** 10.34660/INF.2025.45.86.192

# ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИСХОДОВ ИШЕМИЧЕСКОГО ИНСУЛЬТА МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

**Ихсанова Гузель Ришатовна**
*магистрант*
*Казанский (Приволжский) федеральный университет*

***Аннотация.*** *Рассматривается возможность применения нейронных сетей и логистической регрессии для оценки долгосрочных исходов ишемического инсульта с использованием шкалы Рэнкина. Используются современные методы прогнозирования, проведен их сравнительный анализ. Представлены результаты численных экспериментов, основанных на клинических данных, включающих демографические и медицинские параметры. Подчеркивается значимость интеграции искусственного интеллекта в клиническую практику для улучшения прогнозирования и персонализации лечения пациентов с ишемическим инсультом.*

***Ключевые слова:*** *ишемический инсульт, прогнозирование, долгосрочный исход, точность прогноза, нейронные сеты, логистическая регрессия, шкала Рэнкина.*

**Введение.** В современном мире высоких технологий прогнозирование исходов ишемического инсульта является важной задачей. Хороший долгосрочный прогноз помогает определить правильное лечение, реабилитацию и уход за пациентами, пережившими инсульт, правильно оценить потребности в медицинских ресурсах.

В имеющихся исследованиях по данной теме чаще всего используют изображения МРТ для прогноза исходов заболевания [1] и выделяют влияние какого-либо показателя на него [2,3]. Однако результат прогнозирования должен опираться на множество различных факторов, таких, как возраст, пол пациента, сопутствующие заболевания, генетические предрасположенности, степень тяжести инсульта и другие. Современные методы анализа данных и машинного обучения открывают новые возможности для более точного прогноза исходов заболевания [4], они позволяют учитывать сложные взаимодействия между различными переменными и создавать индивидуализированные модели прогнозирования, учитывающие уникальные характеристики каждого пациента.

Данное исследование посвящено построению наиболее точной математической модели для определения благоприятных и неблагоприятных исходов ишемического инсульта на основе значений модифицированной шкалы Рэнкина и выявлению наиболее значимых исходных данных (показателей пациента).

**Методы прогнозирования**. В качестве методов построения математической модели были выбраны такие методы машинного обучения, как логистическая регрессия и нейронные сети. Модель строилась на основе данных пациента (возраст, пол, наличие сахарного диабета и сердечно-сосудистых заболеваний, индекс массы тела, модифицированная шкала Рэнкина (mRS) и др.). Исходная выборка была предварительно обработана для более точного результата прогнозирования (очистка и анализ данных, кодирование категориальных переменных, разделение данных на обучающую и тестовую выборки 80/20).

Прогноз осуществлялся по шкале Рэнкина, представленной в таблице с исходными данными. Этот показатель говорит о степени инвалидности пациента через 90 дней после ишемического инсульта. Это 7-уровневая шкала, которая варьируется от отсутствия симптомов до смерти. В связи с малым количеством данных и их несбалансированностью было принято решение преобразовать баллы по шкале Рэнкина в бинарный вид: 0-2 балла (возможно легкое нарушение обычной жизнедеятельности) – это благоприятный исход (1), 3-6 (достаточное нарушение обычного ритма жизни человека) – неблагоприятный исход (0). Шкала учитывает такие факторы пациента, как степень ограничения жизнедеятельности, выполнение бытовых действий, возможность возврата на прежнее место работы, возможность оставаться дома одному, самостоятельное передвижение и т.д.

Для проведения численных экспериментов была разработана компьютерная программа с использованием библиотек языка Python. Было выбрано 2 набора данных. в первом – 262 записи о пациентах, показатели которых соответствовали анализу крови, взятому в первые 24 часа после госпитализации [5], во втором – 1678 записей из 6 итальянских центров реабилитации [6]. В ходе анализа данные были обработаны, то есть удалены записи с пропущенными значениями, некоторые данные (например, пол) были преобразованы в категориальные переменные. В обоих таблицах показатель шкалы Рэнкина был преобразован в 0 и 1 для осуществления дальнейшего прогноза по ней. Для экспериментов из первого набора данных использовалась 261 запись (1 запись была некорректной), из второго – 1564 записи (114 записей были некорректными).

**Моделирование с использованием нейронных сетей**. При реализации модели с нейронными сетями было использовано 2 скрытых слоя (54 нейрона на первом слое для первого набора данных и 13 – для второго набора дан-

ных) и 1 выходной слой нейронов. Модель является последовательной, т.е. слои добавляются последовательно, и выход одного слоя становится входом для следующего слоя. В выходном слое применяется сигмоидная функция активации

$$y = \sigma((W^3 f(W^2 f(W^1 x + b^1) + b^2) + b^3)), \quad (1)$$

так как в модель предназначена для бинарной классификации ($x$ – входные данные; $y$ – прогноз модели; $W$ – матрица весов каждого слоя; $f$ – функция активации Relu; $b$ – вектор смещений слоя; $\sigma$ – сигмоидная функция активации).

**Моделирование с использованием логистической регрессии**. Этот статистический метод использовался для предсказания вероятности принадлежности объекта к определенному классу (0 или 1 в данном случае). Использовалась линейная комбинация входных признаков для предсказания

$$P(y = 1 \mid X) = \sigma(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_n x_n), \quad (2)$$

$X$ – вектор признаков; $\sigma$ – сигмоидная функция; $\beta_0$ – свободный член; $\beta_1 \ldots \beta_n$ – коэффициенты, которые определяют вклад каждой независимой переменной.

**Результаты**. Точность предсказаний для первого набора данных достигла достаточно хорошего значения, учитывая его малый объем: для логистической регрессии – 90,5%, для нейронных сетей – 92,4%. Были построены матрицы ошибок для каждого из методов прогнозирования (рисунок 1) и график точности для нейронных сетей (рисунок 2). По матрицам ошибок видно, что метод логистической регрессии ошибочно предсказал неблагоприятный результат (0) 3 раза, благоприятный (1) – 2 раза. Тогда, как нейронные сети предсказали неблагоприятный исход ошибочно 1 раз, благоприятный – 3 раза. Не смотря на высокую точность нейронных сетей, логистическая регрессия является более подходящим методом для такого объема данных, так как лучше ошибочно предсказать неблагоприятный исход, чем ошибочно – благоприятный.

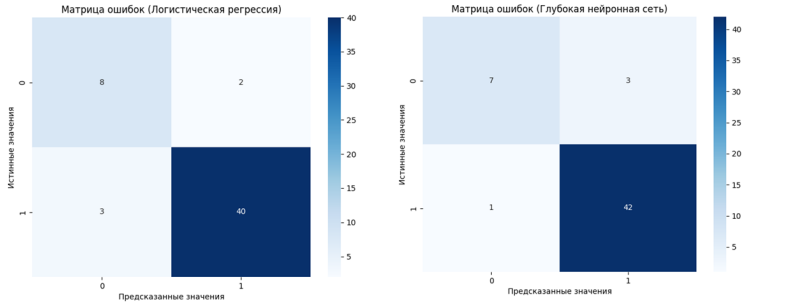



***Рисунок 1.*** *Матрицы ошибок (261 запись)*

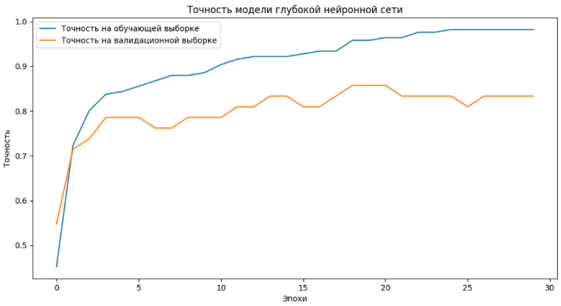



***Рисунок 2.*** *Точность прогнозирования нейронной сети (261 запись)*

Для второго набора данных размера 1564 точность получилась немного ниже: для логистической регрессии – 77,6%, для нейронных сетей – 76,7%. Были построены матрицы ошибок для каждого из методов прогнозирования (рисунок 3) и график точности для нейронных сетей (рисунок 4). Такое понижение уровня точности в прогнозе связано с меньшим количеством показателей пациента во второй выборке. Логистическая регрессия здесь лидирует по процентному соотношению точности прогнозирования исходов заболевания, что подтверждает использование данного метода на небольших данных.

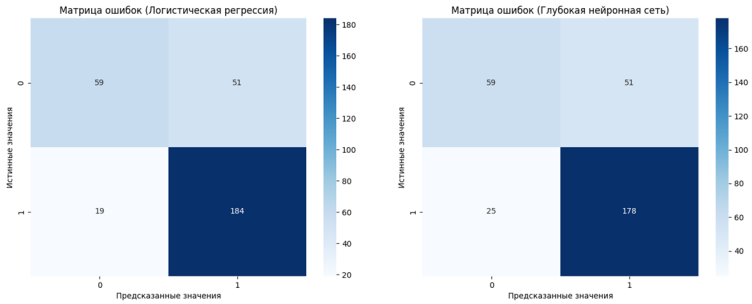



***Рисунок 3.*** *Матрицы ошибок (1564 записи)*

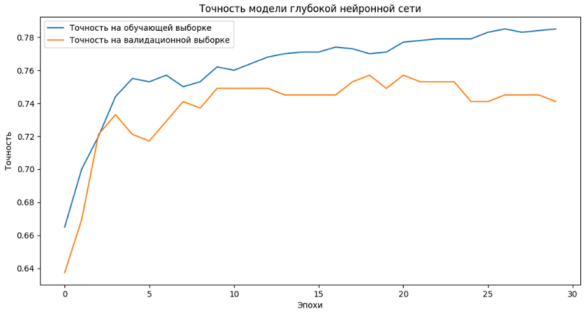



***Рисунок 4.*** *Точность прогнозирования нейронной сети (261 запись)*

В ходе исследования были выявлены наиболее значимые показатели пациента, которые могут влиять на исход заболевания (рисунок 5-6). Здесь самым сильным фактором (для двух наборов данных) оказалась шкала Национального института здоровья для оценки инсульта (National Institutes of Health Stroke Scale), которая используется для количественной оценки неврологического статуса пациента после инсульта. Наименее слабым фактором влияния на исход заболевания в данном случае оказался показатель уровня глюкозы в крови натощак для первого набора данных, для второго – наличие аритмии сердца у пациента.

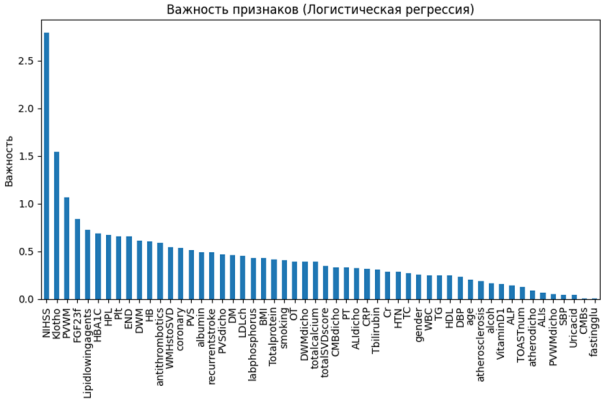



***Рисунок 5.*** *Влияние показателей на прогноз (261 запись, 54 показателя)*

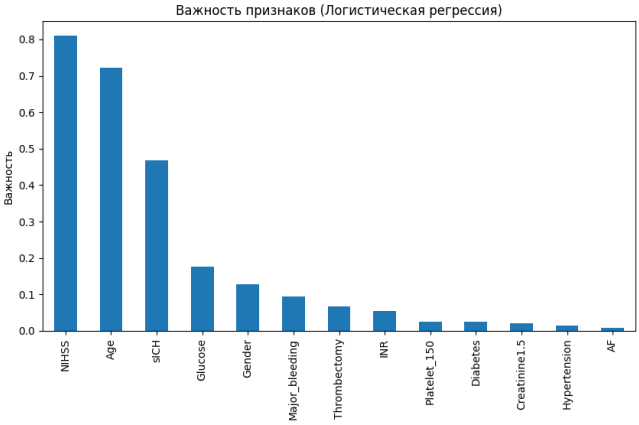



***Рисунок 6.*** *Влияние показателей на прогноз (1564 записи, 13 показателей)*

**Заключение.** В статье рассмотрена возможность применения нейронных сетей и логистической регрессии для оценки долгосрочных исходов ишемического инсульта с использованием шкалы Рэнкина. Проведен сравнительный анализ указанных методов. Представлены результаты численных экспериментов, выявлены наиболее значимые параметры, влияющие на результат прогноза для двух наборов данных. Подтверждена эффективность применения методов машинного обучения в прогнозировании долгосрочных исходов ишемического инсульта. В ходе работы выявлена проблема малого количества табличных данных в открытом доступе для проведения такого рода исследований.

## Литература

*1. Miaomiao Yang, Lisha Tang , Zhiping Hu, Xiangqi Tang pplication of Neuroimaging for the Prediction of Hemorrhagic Transformation after Intravenous Thrombolysis in Acute Ischemic Stroke // Cerebrovasc Dis. - 2023. - Vol.52(1). - P. 1-10. doi: 10.1159/000524749.*

*2. Гулиева М.Ш., Багманян С.Д., Чуканова А.С., Чуканова Е.И. Роль биомаркеров крови в прогнозировании исхода течения ишемического инсульта // Consilium Medicum. - 2020. - Т. 22. - №9. - С. 28-32. doi: 10.26442 /20751753.2020.9.200284.*

*3. Gang Fang, Zhennan Huang, Zhongrui Wang Predicting Ischemic Stroke Outcome Using Deep Learning Approaches // Frontiers in genetics. - 2021. - Vol.12. - P. 827522. doi: 10.3389/fgene.2021.827522.*

*4. Кадырова И.А., Миндубаева Ф.А., Гржибовский А.М. Систематический обзор методов прогнозирования исхода мозгового инсульта // Экология человека. - 2015. - Т. 22. - №10. - С. 55-64. doi: 10.17816/humeco16983.*

*5. Plasma Klotho concentrations predict functional outcome at three months after acute ischemic stroke patients – URL: https://data.mendeley.com/datasets/6r35w3tk3v/1 (дата обращения 2025-03-28).*

*6. Dataset from "Fibrinogen depletion coagulopathy predicts major bleeding after thrombolysis for ischemic stroke: a multicentre study", Romoli & Vandelli et al., Stroke 2022 – URL: https://zenodo.org/records/6907296 (дата обращения 2025-03-29).*

**DOI** 10.34660/INF.2025.99.30.193

# К ПРОБЛЕМЕ МОНУМЕНТАЛЬНЫХ СТРОЕНИЙ СРЕДНЕВЕКОВОГО АЗЕРБАЙДЖАНА (КОФЕЙНИ)

**Аменздаде Райха**
*доктор архитектуры, профессор, заведующая отделом*
*Институт архитектуры и искусства, национальная академия наук Азербайджана,*
*Баку, Азербайджан*

***Абстракт.*** *В статье автором предпринята попытка сфокусироваться на малоизвестном (вовсе неизвестном) типе строений в средневековом зодчестве Азербайджана - кофейнях (gəhvəxana), имевших место в городах Азербайджана, о которых имеется вполне достоверная, но крайне скупая информация. Важно, что в источниках-- мемуаристов, современниках исторических событий содержатся сведения, подтверждающие строительство кофеен на рубеже XVI-XVII вв., и, позже - в Нахчыване, Гяндже, Шамахы, Табризе и в др. городах, их функциональное и содержательное назначение.*

***Ключевые слова:*** *Азербайджан, зодчество, композиция кофе, кофейни.*

***Abstract.*** *In the article, the author made an attempt to obtain information about a little-known (completely unknown) type of construction in medieval architecture - Azerbaijan coffee houses (gəhvəxana), built in the cities of Azerbaijan, about the availability of reliable information in the memoirs of Western European tourists.*

*It is important that in the sources of memoirists, contemporaries, events occur that reveal events in Nakhchivan, Ganja, Shamakhi, Tabriz and other cities, their functional and meaningful purpose.*

***Keywords:*** *Azerbaijan architecture, composition coffee, coffee houses.*

Гипотезы о первоначальном появлении кофе охватывают в основном Йемен (северо-запад Аравии) или Эфиопию- (северо-восток Африки), исключая вопрос пальмы первенства его распространения [2,с.177]. Источники поднимают немаловажные проблемы о путях, которые были активны в транспортировке и дистрибуции кофе, об энтузиастах его распространения, импортировавших кофейных зерна в страну (страны); неизменными остаются вопросы его количества, а также коммерческая сеть, все возраставшая со

временем. За исключением чая, кофе был единственным напитком, весьма распространенным вдали от места своего появления и дальнейшего производства. Особого внимания заслуживает вопрос о времени, а также маршрутах, которыми кофе доставлялось в государство Сефевидов.

На XVII в., падает появление кофеен в Сефевидском государстве. Этому предшествовал долгий и сложный маршрут «путешествия» кофейных зерен: по суше (aper va terre) и морскими путями. Именно в великолепном XVII в. в Сефевидском государстве появились, и, в первую очередь в столичных центрах городов монументальные строения, где наряду с титульными возводились малоизвестные (неизвестные) ранее типы зданий и сооружений. Источники дают хоть и отрывистую, но крайне важную информацию о кофейнях, об использовании кофе в разных стратах общества. Другим, не менее важным источником являются гравюры, дающие достоверную визуальную информацию о них.

А. Олеарий, сообщающий о существовании кофеен в столице Сефевидского государства, пишет, что в них пьют главным образом «черную воду», которую они называют «cahwa«». Жан-Батист Тавернье, Ж.Шарден и др. сообщают, что кофейни были сконцентрированы вдоль северной стороны мейдана Нахше Джахан, ведущей к Кейсарие (базар золотых изделий).

Уже в 1590г. центр империи Сефевидов перемещается в Исфахан, который становится блистательной столицей Шах Аббаса 1 [2 с. 181]. Xiyaban-i Caharbag (Чахарбаг) главная парадная улица--аллея (4 км длины, 47 м ширины), протянувшаяся в южном направлении города - от ворот средневековых стен города до гигантского имперского парка, известного как Аббасабад упоминается в хрониках как «продолговатый сад с 4-мя рядами чинар, с прудами и цветниками, монументальными воротами-павильонами в садах всевозможных форм и функций» [2,с.181]. Общественный характер Чахарбага был подчеркнут наличием здесь кофеен, а также приюта (убежищ) ханегах) суфийских обителей в его северной части, растянутой между Dowlatgate и мостом Аллахверди хана [2,с.181 ]. По сведениям Пьетро делла Валле, Дон Гарсиа, Чичерина, Ф. Котова многократные визиты Шах Аббаса1 в кофейни Исфахана увеличивали их доход. Собственно. строительство кофеен в Сефевидском государстве практиковалось начиная с периода Шах Аббаса1 до времени правления Шах Султан Хусейна (1694-1722). В целях воссоздания оригинального вида Xiyaban-i Caharbag следует, естественно прибегнуть не только к нарративам, но и к скетчам, и, здесь зарисовки Энгельберта Кемпфера уточняют и подтверждают более раннее наличие на этом участке кофейни (кофеен). Включение кофейни в строившееся позднее медресе отмечается записями в «Вакфнаме»--своде ценнейших документов [2,с.181,183,184]. О кофейнях, построенных во многих городах Азербайджана и Ирана (Шамахы, Нахчыван, Гянджа, Табриз, Казвин, Исфахан, Кашан,

Шираз) .отмечается в источниках. Э. Челеби упоминает кофейню в Шамахе [1,с,22], в другом нарративе (1570г.,на нем. яз., репринт 1971 г.) указано, что Табриз город, где больше, чем где- нибудь в Иране используется кофе, и, через который его переправляют в Эрзурум [1,с.17]. Источники западноевропейских и восточных авторов, оставили разнообразную информацию о кофейнях, их объемно--пространственной композиции., декоративном убранстве [1,с.22,23]. Ж. Шарден отмечает наличие кофеен в Нахчыване; он пишет «….в Нахчыване приблизительно две тысячи домов, пять караван-сараев, имеются бани, рынки, большие заведения, где собираются курить и пить кофе» [6}.

Ж. Шарден, который пробыл в Иране более четырех лет. дает наиболее яркое и детальное описание кофеен «Эти строения (кофейни, Р.А.) имеют специфические пространственно развитые формы, (они) занимают наиболее прекрасные места в городах, где горожане ищут развлечений. Некоторые из них, особенно те, что в больших городах имеют водоемы в центре. На платформах (ярусах) расположены комнаты, которые имеют 3 фута высоты и примерно от 3 до 4 футов ширины, более или менее согласуясь с размерами здания из каменной или кирпичной кладки или …в которых посетители сидят в восточной манере (скрестив ноги, Р.А.) В кофейнях сидячие места устраивались полукругом, напоминающим амфитеатральное, что упоминается у Tavernier [1,.с.25]. Они (кофейни, Р.А.) открывались ранним утром, а вечером были переполнены». Водоемы в центре помещения (на 1-м этаже-Р.А) имели прямоугольную форму, а вода в них лилась непрерывным потоком, что отмечается у Ж. Шардена, Ф.Котова, Don Garcia и др. [1, ,с.21, 23].

Русский купец Ф. Котов, который побывал в Иране в 1623 г. отмечает, что верхние части кофеен были раскрашены «золотыми» красками.. Ф.Котов много пишет об интерьерах кофеен, которые, «…имели деревянные решетки, через которые гызылбаши наблюдали за играми чоуган (скачки, поло, Р А.) на Мейдане, и, за что они не платили» [1,с21] .Стеклянные лампы прикрепленные к проволоке на крыше были заполнены нефтью или маслом, по ночам они зажигались [1,с.21]. В самом деле интерьеры покрывались монументальными росписями, майоликовые панно, изображающие всевозможные сюжеты покрывали отдельные части экстерьеров. В своем развитии “живопись кофеен” получает со временем все большее распространение [5, с.26]. Уже через полстолетия J.Fryer описывает кофейни по вечерам: «Ночью здесь изобилие освещенных ламп из стекла -в ряд, (они) обвивают перекрытие (кофейни) веревками или проволокой» [1,с.21]. Многочисленные скетчи Энг.Кемпфера , а также комментарии к ним важны и необходимы для изучения средневекового зодческого искусства Азербайджана и Ирана, в том числе «Meydan-i Shah in Isfahan and the dawlatkhana», «Khiyaban-i Chaharbagh in Isfahan», «Plan of royal garden in Gazvin», «Plan of Gazvin»- Эти

и др. увидевшие свет гравюры и нарративы открыли малоизученные и вовсе неизвестные страницы в исследовании средневекового зодческого искусства Азербайджана. Ж.Шарден, а позже G. Careri свидетельствуют о наличии «cabarets a cafe» в Сефевидском государстве [1,с.17]. Дж. Белл писал «Мы оказались, — на приеме, превосходящем пышностью прием первого министра и даже прием шаха. Мы вошли, и почти сразу нам подали множество разнообразных сладостей и все те фрукты, которые здесь произрастают. Попеременно носили кофе и шербет…»[4,с.256]..Э.Кемпфер, бывший подолгу на Абшероне, в Баку, а позже в Исфахане и в др.городах. указывает на то, что кофе здесь используют довольно широко, начиная с шахского двора , где он приобрел значимую роль. В частности, во дворце шаха для приготовления кофе был qahvehchi- bashi (главный мастер ответственный за кофе). Он отмечает, что здесь (во дворце) была специализированная кухня, здесь же были складские помещения для его хранения и обжарки [1с.18]. В Сефевидской хронике «Dasture shahriyaran» повествуется, в частности о прибытии Могольского принца Акбара в 1696г. в Мешхед, на пиршественном банкете было подано 150 разнообразных блюд, завершаясь десертом --подачей кофе, розовой воды и сладостей [1, с.19]. Рафаэль дю Ман, Джон Фрайер (1677) отмечают, что кофе был неизменно востребован для угощения гостей, кроме «coho», был чай, розовый шербет и прочие лакомства [1,с. 5,6]

Кофейни были частью государственной программы застройки Чахарбага, элитного променада одной из центральных аллей Исфахана (1596-1602) Она делилась на три аллеи с посаженными в восемь рядов платанами и тополями и живой изгородью из кустов жасмина. Аллеи опускались к югу ступенями. Вдоль нее тянулись мощенные цветными плитками украшенные резным мрамором и оживленные фонтанами пруды»[3,с.171]. С возникновением проблемы первоначальных строений, в целях воссоздания оригинального вида этой части Чахарбага следует, естественно прибегнуть к скетчам и нарративам, и, здесь зарисовки Энг. Кемпфера уточняют и подтверждают более раннее наличие на этом участке кофейни (кофеен). Включение кофейни в композицию строившегося позже медресе подтверждается записями в «Вакфнаме», где упомянуто, что «учреждение …построено на земле комплекса… купленного для медресе» (arcah va ayan) На официальных банкетах и приемах устраиваемых правителем кофе был излюбленным напитком. **К. Шпильман сопровождавший посольство Дж.** Гинесуса в Исфахан (1652.) также отзывается о кофе, как о «широко употребляемом напитке», и, отмечает приемы в высоких официальных кругах, где как правило предлагалось кофе [1,с.19].

Сегодня Чахарбаг сохранил немного следов первоначальных элементов Чахарбага, в том числе павильонов-ворот, кофеен и др. хотя в действительности основные строения все еще сохранились, в том числе медресе, мечеть,

а также каналы, водоемы и пруды, лестницы и фонтаны, величественные чинары [2,с.188]. Комментируя зарисовки упомянутого медресе Корнелиус де Бруин пишет, что «два других строения» уже возведены, указывая в том числе на кофейни, где он бывал не единожды, «чтобы покурить» (кальян, Р.А.) Известно, что в записях мемуаров Jean-Baptiste Tavernier и др. путешественников кофейни были сосредоточены вдоль северной стороны площади в направлении Гейсарийе [1, с.20,21]. Южная часть Чахарбага была определена между мостом Аллахверди хана и садом Хизар Джариб; она примыкала ко дворцу комплекса (Довлатхана).

Кофейни имели большой рост в Исфахане, по сообщению Мухаммеда Бади к концу. столетия их количество дошло до 10. Несколько кофеен было локализовано ок. “Dubarah gate” (Ворота Дубаре), вдоль проспекта Chehar Bagh [1, с.22]. Ж.Шарден отмечает место Tahtegah в Исфахане «среди наиболее злачных мест в городе». Здесь, говорит он «боьшое число кофеен,… которые всегда были сценой для…толпы пьющих, дискутировавших или просто религиозных людей, находящихся близ мавзолея Харун Вилаят, близ «Kuxne Meydan», в Исфахане [1, с..22].

**В нач. XVIII в. кофейни строились и в знаменитых садах Исфахана, где Шах зачастую проводил время. Социальные функции кофеен характерны непосредственным общением горожан, с богатыми традициями устного народного творчества,рассказами народных сказителей и декламацией поэтов имевших морализованный характер( [5,с.24,25].**

**Публика пила кофе и курила табак, присутствовавшие обменивались** политическими и светскими новостями, имели место религиозные дискуссии. Молла и суфии (дервиши по Шардену) проповедовали, стоя в центре кофейни или дискутировали о тщетности земной жизни. Кофе в Иране было известно и в сельской местности. Эта информация касается караван– сараев, где путешественникам предлагали кофе и чай, как скажем в караван-сарае Майар, который находится в 40 км от Исфахана, Кофе подавалось и в хамамах.

**Литература**

*1. Rudi Matthee. Coffee in Safavid Iran. Commerce and Consumption. Jesho, V. XXXVII, No. 1 (1994)*

*2. Farshid Emami. Coffee houses, urban spaces and the formation of public sphere in Safavid Isfahan. Muqarnas. V.33, 2016*

*3. Всеобщая история архитектуры. Т.8, М., 1969*

*4. Кондратьев С.В. Въезд в Исфахан русского посольства и дипломатические приемы в Сефевидском государстве (по воспоминаниям Джона Белла). «Научный диалог»№12, 2020 Джон Белл в составе посольства*

*Артемия Петровича Волынского по-сетил Персию в 1716—1718 годах, оставил содержательные сведения о дворе шаха Султан Хусейна (1694—1722)*

*5.Тельман Ибрагимов. Живопись Каджарского периода. Баку, 2013*

*6. apsnyteka.org/>Жан Шарднг*

**DOI** 10.34660/INF.2025.91.10.194
**УДК** 72.03:693.22

# ИСТОРИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС НАИМЕНОВАНИЯ УЛИЦ И ПЛОЩАДЕЙ В КВАРТАЛАХ ОКОЛО ОСОБНЯКА СУББОТИНА-ШИХОБАЛОВА

**Сорокин Игорь Сергеевич**
*магистрант*
*Самарский государственный технический университет*

***Аннотация.*** *В научной статье разбираются изменения наименования улиц и площадей в контексте исторического процесса в кварталах Самарского района г. Самара около памятника архитектуры федерального значения особняка Субботина-Шихобалова в период с 1886 по 2025г.*

***Ключевые слова:*** *улица, квартал, площадь, исторический процесс.*

***Abstract.*** *This scientific article examines the changes in the names of streets and squares in the context of the historical process in the quarters of the Samara region near the architectural monument of federal significance, the Subbotin-Shikhobalov mansion in the period from 1886 to 2025.*

***Keywords:*** *street, block, square, historical process.*

Наиболее ранними в историческом центре Самары являются кварталы Самарского района в близи к Хлебной площади. Для того, чтобы лучше понять и восстановить историю Самарского района и его кварталов на слиянии рек Самара и Волга, обратимся к архивным картам, планам и схемам города. Центром притяжения и главным архитектурным памятником этого района является особняк Субботина-Шихобалова.

Особняк Субботина-Шихобалова, или Дом Губернатора, был построен в 1878-1881 годах по конкурсному проекту архитектора Виктора Александровича Шретера в стиле неоренессанс, является памятником культурного наследия федерального значения. Объект находится по адресу г. Самара, Ул. Алексея Толстого, дом №3.

Семейство владельцев амбаров Субботиных разорилось, и в 1899 году после самоубийства (по данным Г. Алексушина после естественной смерти) хозяина особняк перешёл в собственность А. Н. Шихобалова. Семья Субботиных не могла пережить разорения и продала особняк. Шихобалов

провел реконструкцию дома и сдал его в аренду под резиденцию самарских губернаторов, которые селились здесь с 1906 по 1910 годы. Именно поэтому здание до сих пор упоминается в литературе как «Дом губернатора»[1]. Местоположение этого памятника архитектуры показано на Рис. 3 черной заливкой.

Пространственная граница исследования охватывает территорию кварталов, улиц и площадей вокруг особняка, и поэтому временные границы исследования начинаются с момента завершённого строительства особняка в 1881 г.

Ближайший, сохранившийся и дошедший до нашего времени план города Самара, относящийся к периоду конца XIX века, датируется 1886 г. Это «План города Самары с указанием полной сети водопроводных труб» по проекту инженера Н.П. Зимина [2]. На этом плане нанесены названия улиц, форма исторических кварталов, а также названия площадей и других важных строений, формирующих исторический облик Самарского района конца XIX века. (Рис. 1)

В 1917 г. в Царской России происходит революция. Страна меняет своё название: 30 декабря 1922 года был образован СССР. После этого исторического события название многих городов и улиц в СССР меняются. Город Самара стал называться Куйбышев, а также многие улицы и площади обретают новые имена. Проследить за этими переменами можно по архивному документу «Схема новой номерации угловых домов и новых наименований улиц в г. Куйбышеве» датируемой 1936 г. (Рис. 2).

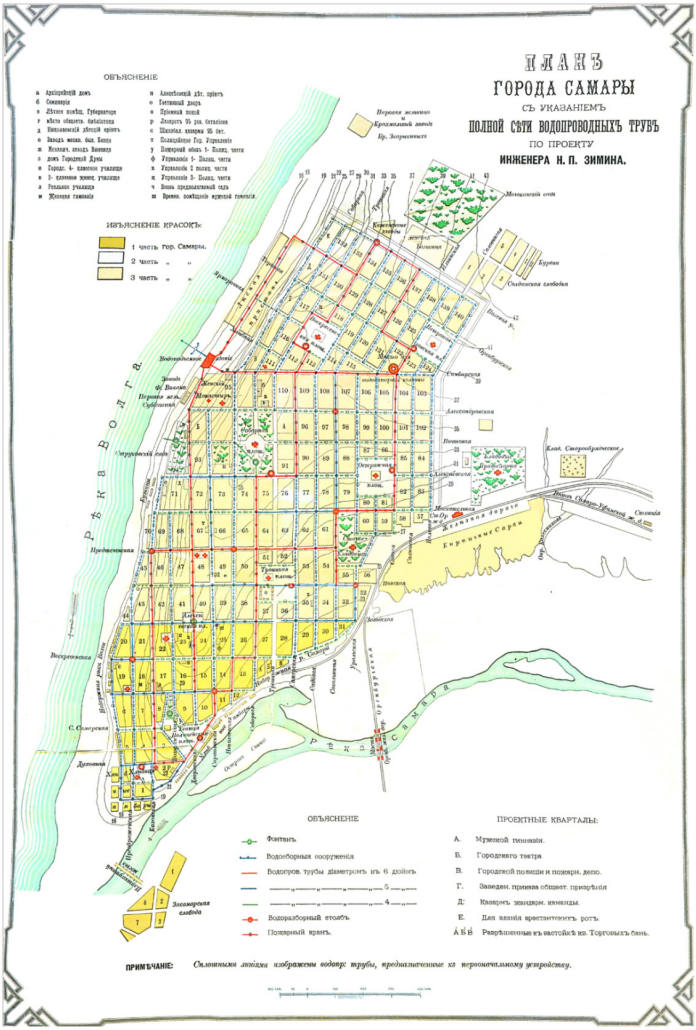



***Рисунок 1.*** *«План города Самары с указанием полной сети водопроводных труб» по проекту инженера Н.П. Зимина 1886 г. [2].*




***Рисунок 2.*** *«Схема новой номерации угловых домов и новых наименований улиц в г. Куйбышеве» 1936 г. [3].*

Сопоставление архивных планов и схем с современной картой города Самара было проведено с помощью аналитических схем-карт, выполненных с указанием границ кварталов, названий площадей, улиц и ключевых архитектурных строений. (Рис. 3)




***Рисунок 3.*** *«Аналитические схемы-карты с названием улиц и площадей, а также исторических границ кварталов» составил Сорокин И.С. [6].*

Рассмотрим подробнее исторический процесс изменения в названиях улиц и площадей, а также границ исторических кварталов.

На плане города Самара 1886 г. рядом с Особняком Субботина-Шихобалова расположены две площади – Хлебная и Полицейская. По схеме 1936 г. можно определить, что Хлебная площадь объединяется со вторым кварталом и застраивается корпусами завода, а Полицейская площадь переименовывается в Милицейскую. В настоящее время большая часть корпусов завода снесена, а Милицейская площадь переименована в Хлебную (Рис. 3).

К ключевым строениям можно отнести церковные сооружения храмов, присутствующих на плане 1886 г. Это Собор во имя Казанской иконы божьей матери и Спасо-Преображенский мужской монастырь, которые были снесены в 1930-е годы. В настоящее время на Хлебной площади построена Смоленская церковь. Так же на плане города 1886 г. присутствуют хлебные амбары, которые будут снесены в советское время. В настоящее время, на этой территории, вдоль берега реки Самары находятся элеваторы [4].

Анализируя названия улиц и изменения в конфигурации городских кварталов, в результате сноса храмов и монастырей, можно прийти к выводам:

- Казанская улица (1886 г.), называлась в честь Собора во имя Казанской иконы божьей матери, затем была переименована в ул. Оборонную (1936 г.) из-за появления оборонного завода, а после приобрела название ул. Алексея Толстого, в честь знаменитого советского писателя.
- Ул. Духовная (1886 г.) так же была названа в честь храмов, затем переименована в ул. Коммунальная (1936 г.) из-за появления заводских корпусов, а после приобрела название ул. Кутякова (1996 - 2025 г.) в честь военачальника времён Гражданской войны.
- Ул. Преображенская (1886 г.) имела название от монастыря, была переименована в ул. Водников (1936 г.) и сохранила название до настоящего времени.
- Ул. С. Самарская (1886 г.) была переименована в ул. Крупской (1936 -2025 г.) и сохранила название до настоящего времени.
- Ул. Вознесенская (1886 г.) была переименована в ул. Степана Разина (1936 г.) и сохранила название до настоящего времени.
- Ул. Карбюраторная (1936 г.) появляется в советское время, приобретая название от Карбюраторного завода [4]. В настоящее время это ул. Засекина (2010 г.), названная в честь основателя города Самара князя Григория Осиповича Засекина, который построил первую самарскую крепость на месте этой улицы и квартала [5].

**Вывод.** Исторический процесс появления и сноса различных зданий и сооружений влияет на название улиц и формирование городских кварталов. Сопоставив карты и схемы между собой, можно увидеть взаимосвязь

исторического процесса с наименованием улиц и площадей города. А также предложить архитектурные и градостроительные решения, основываясь на исторических и архивных материалах.

**Библиографический список**

*1. Статья «Особняк Субботиных-Шихобаловых. Интерьеры» 30 ноября 2012 г. https://samara-arch.livejournal.com/66292.html*

*2. «План города Самары с указанием полной сети водопроводных труб» по проекту инженера Н.П. Зимина 1886 г. http://www.etomesto.ru*

*3. «Схема новой номерации угловых домов и новых наименований улицв г. Куйбышеве» 1936 г. http://www.etomesto.ru*

*4. Синельник А.К. Градостроительная история Самарского края. – Издательство НВФ «Сенсоры. Модули. Системы», 2000 г, – 190 с., (24) л. ил.*

*5. Гурьянов Е. Ф. Древние вехи Самары. – Куйбышевское книжное издательство, 1979 г, – 80 с, с иллюстрациями.*

*6. https://yandex.ru/maps*

# ЗАМЕТКИ

# ЗАМЕТКИ

# ЗАМЕТКИ

# ЗАМЕТКИ

Научное издание

# Высшая школа: научные исследования

Материалы Межвузовского международного конгресса
(г. Москва, Конгресс 1 мая 2025 г.)

Редактор А.А. Силиверстова
Корректор А.И. Николаева

Подписано в печать 01.05.2025 г. Формат 60x84/16.
Усл. печ.л. 32,4. Тираж 500 экз.

Отпечатано в редакционно-издательском центре
издательства Инфинити