

## Моделирование работы научно-исследовательской организации на основе теории массового обслуживания

*Н.А. Семькина*

*МИРЭА — Российский технологический университет, Москва,  
Тверской государственный университет*

**Аннотация:** В статье представлена математическая модель, формализующая процесс управления научной деятельностью организации. В основе модели лежат инструменты теории массового обслуживания. При построении используется принцип гибели - размножения. Для частного случая приводится граф состояний и соответствующая система дифференциальных уравнений Колмогорова. Интенсивность входного и выходного потоков рассматриваются как нестационарные потоки, зависящие от времени. Модель позволяет рассматривать различные структуры и схемы взаимодействия научных подразделений и различные сценарии постановки научных задач и интенсивности их решения работниками организации. Для построенной модели разработан программный комплекс по принятию решения для оптимального управления научной деятельностью подразделения. В статье представлен один из результатов экспериментального и модельного исследования влияния мотивационной составляющей и уровня компетентности сотрудников.

**Ключевые слова:** научная деятельность, математическая модель, система массового обслуживания, принцип гибели-размножения, граф состояний, система дифференциальных уравнений.

### Введение

Современные авторы активно используют теорию массового обслуживания для планирования и оптимизации процессов функционирования в различных областях. Так как модели и методы теории обслуживания дают возможность найти наилучшие пути управления и модернизации действующих организаций в различных сферах. Например, в работах [1, 2] теория массового обслуживания применяется для оптимизации работы управленческих структур промышленных предприятий. Кроме этого системы массового обслуживания (СМО) позволяют достаточно легко построить и реализовать программное обеспечение для анализа и исследования зависимостей между числом каналов обслуживания, потоком заявок и их характеристиками с использованием массовых программных средств [3, 4]. При этом только небольшая часть исследований посвящена

формализации различных процессов в производстве научных знаний, например, в работах [5, 6]. Для принятия решений в процессе управления научной деятельностью организации модели еще получены не были.

В данной статье, используем приемы из теорий массового обслуживания, как инструмент исследования процесса управления научной организацией уровня научно-исследовательского института (НИИ).

### **Описание системы управления НИИ**

НИИ представляют собой сложную динамическую систему, которая характеризуется следующими свойствами: единый управляющий центр; последовательное вертикальное расположение структурных подразделений; строго вертикальные связи, выражаемые в информационном взаимодействии; зависимость результатов и управляющих действий подразделений верхнего уровня от фактического исполнения нижними уровнями своих функций. В этом случае система управления НИИ представляет собой многоуровневую древовидную иерархическую структуру, в которой существует единственная входная вершина – корень ориентированного дерева.

Для совершенствования процесса управления научной деятельностью организации построим математическую модель на базе открытой сети массового обслуживания  $W$  (СеМО), состоящей из конечного числа СМО  $W_m$ .

Каждая СМО представляет собой  $n$  - канальную систему массового обслуживания, на вход которой поступает неординарный поток заявок. В качестве каналов обслуживания выступают научные подразделения (например, отделы, службы и лаборатории). Под потоком заявок будем понимать поток научных задач, распределяемые Центром Управления НИИ (ЦУ НИИ). Для данного примера характерно, что по окончании обслуживания (решении задач) результаты в полном объеме возвращаются в ЦУ НИИ.

---

В данном исследовании считаем, что распределение научных задач не связано между различными исполнителями. Поэтому режим работы какого-либо обслуживающего канала не влияет на функционирование других каналов сети.

Множество вершин  $W$  дерева можно естественно разбить на конечное число непересекающихся подмножеств  $W_m$ . Каждое подмножество  $W_m$  соответствует одной СМО [7]. В орграфе существует входная вершина  $x_0$ , из которой можно провести единственный путь от корня дерева до любой его вершины (рис. 1).

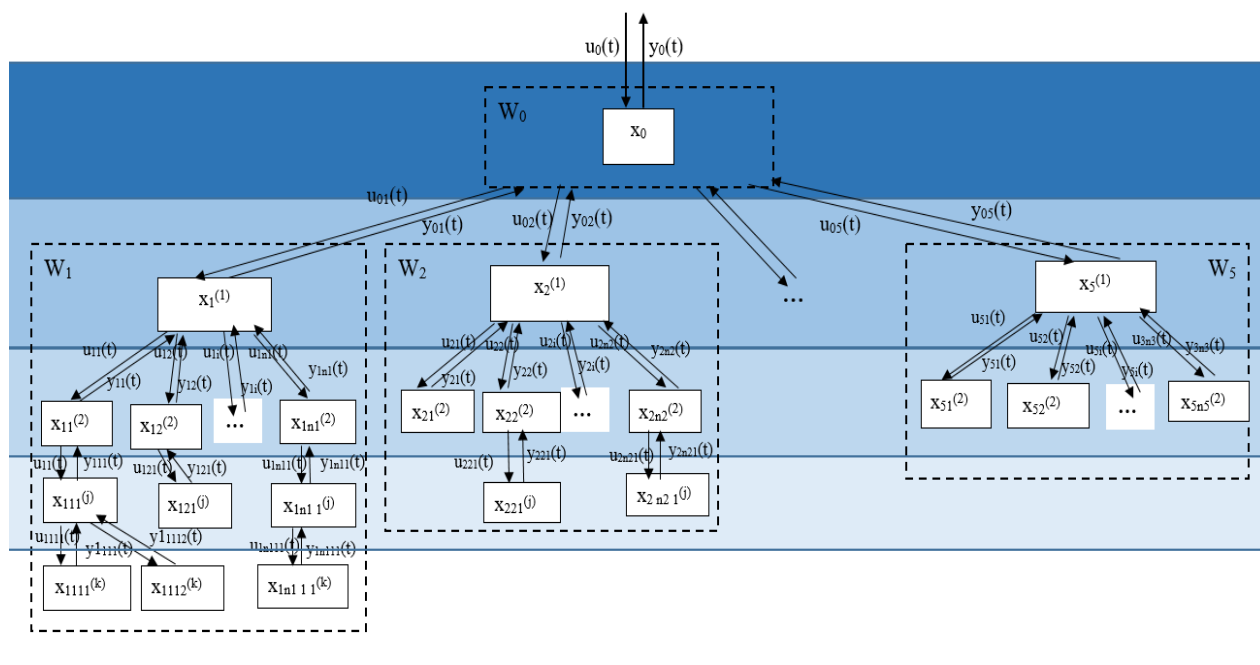


Рис. 1. – Схема иерархического взаимодействия научных подразделений

Для схемы были использованы следующие обозначения:

$x_{ij}^{(h)}$  – вершина графа, характеризующее  $j$ -ое научный отдел в  $i$ -ом подразделении на  $h$ -ом уровне подчинения;

$u_{ij}(t)$  – функция интенсивности входного потока заданий, который характеризует интенсивность постановок задач от  $i$ -го руководящего подразделения для  $j$ -го исполнителя (центр, управление, отдел, лаборатория) в момент времени  $t$ ;

$y_{ij}(t)$  – функция интенсивности выполненного специалистами потока, который соответствует интенсивности представления результатов решения научных задач  $i$ -му руководящему исполнителю от  $j$ -го исполнителя в момент времени  $t$ .

Данная система является СМО со сборкой и разборкой заявок [7,8]. И характеризуются следующим принципом функционирования.

Из вершины выходит несколько ребер, это означает, что происходит разборка на несколько частей (подзадач) научной проблемы, поступившей в эту вершину (подразделение). По окончании обслуживания заявки (решении задач) результаты в полном объеме возвращаются в вершину, характеризующую распределяющее руководящее подразделение. Задача считается решенной и покидает СМО, если все фрагменты снова объединяться в этой вершине, образуя единую исходную заявку [7,8].

Так как существует единственный путь от корня дерева до любой его вершины, то все состояния системы можно представить в виде цепочки, в которой каждое из состояний (кроме крайних) связано с предыдущим и последующим, а крайние состояния – только с соседним. В этом случае путь продвижения научной задачи можно рассмотреть, как модель «гибели и размножения» [7,8].

Пусть граф СМО состоит из пяти состояний  $x^{(h)}$ , которые характеризуют подразделение на различных уровнях подчинения научной организации. Граф этого процесса представлен на рис. 2, на котором для дальнейшего исследования модели упрощены обозначения для легкости восприятия.

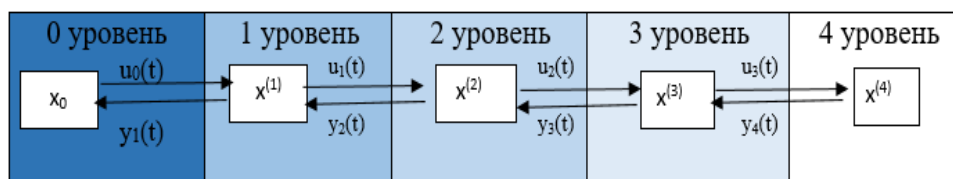


Рис. 2. – Граф состояний системы

На рис. 2 введены обозначения:  $u_h(t)$  – функция интенсивности входного потока научных заданий (поток «размножения»),  $y_h(t)$  – функция интенсивности решения специалистами научных задач (поток «гибели»).

Для построения модели используем систему дифференциальных уравнений Колмогорова.

$$\begin{aligned}\frac{dp_0}{dt} &= y_1(t)p_1(t) - u_0(t)p_0(t), \\ \frac{dp_h}{dt} &= -(y_h(t) + u_h(t))p_h(t) + u_{h-1}(t)p_{h-1}(t) + y_{h+1}(t)p_{h+1}(t), \\ h &= 1, \dots, k-1, \\ \frac{dp_k}{dt} &= u_{k-1}(t)p_{k-1}(t) - y_k(t)p_k(t),\end{aligned}\tag{1}$$

где  $p_h(t)$  – вероятность, характеризующая среднюю загрузку системы (выполнение заданий) и ее изменение с течением времени.

При начальных условиях

$$p_h(0) = p_{h0}, h = 0, 1, \dots, 4, \sum p_{h0} = 1.\tag{2}$$

Модель СМО «гибели – размножения» позволяет рассмотреть различные сценарии и постановки научных задач и интенсивности их решения работниками организации. Для этого интенсивность входного и выходного потоков рассматривают как нестационарные потоки  $u_h(t)$  и  $y_h(t)$ , зависящие от времени.

При этом с помощью функция постановки задачи  $u_h(t)$  можно учесть и дополнительные характеристики. Например, цикличность или сезонность определенных видов заданий (тригонометрические функции), или увеличение со временем количества задач, требующих решения (различные возрастающие функции) и т.д.

Аналогично, функция интенсивности решения поставленных задач  $y_h(t)$  позволяет учитывать различные характеристики процесса. Например, увеличение скорости решения, за счет «взаимопомощи» между каналами

(сотрудниками организации) (линейная функция), или снижение со временем скорости решения научной проблемы из-за различных причин (показательная функция), или увеличение производительность сотрудников за счет повышения их профессионализма и т.д.

### Исследование построенной модели

Были рассмотрены различные виды функций постановки задачи и функций интенсивности решения поставленных задач. Разработан комплекс программ численного анализа сетей массового обслуживания, который применен для численных исследований [9, 10]. Ниже приведем один из вариантов исследования.

Рассмотрим ситуацию, когда непосредственное решение задач и/или реализация научного проекта происходит в подразделении на четвертом уровне  $x^{(4)}$ . На других уровнях происходит передача и слияние готовых решений. Поэтому функции интенсивности выходного потока на разных уровнях будут иметь разный вид.

Пусть функция непосредственных исполнителей  $y_4(t)$  будет учитывать профессиональную квалификацию  $W$  и мотивацию  $M$  сотрудников и определяться формулой

$$y_h(t) = K * A^\alpha B^\beta,$$

где  $K$  – технологический (масштабирующий) коэффициент,  $\alpha$  – коэффициент эластичности по профессионализму,  $\beta$  – коэффициент эластичности по мотивации, с обязательным выполнением условия:  $\alpha + \beta = 1$ .

$$A = Q(1 - e^{-Wt}), \quad B = \begin{cases} Mt, & 0 \leq t \leq t_1, \\ Mt_1, & t_1 \leq t \leq t_2, \\ Mt_1 e^{-(t-t_2)}, & t_2 \leq t \leq T. \end{cases}$$

Здесь  $Q$  – коэффициент производительности работников, который является отражением его навыков и знаний, и строиться с учетом уровня профессионализма  $W$ . Варианты построения параметров  $Q$ ,  $M$  можно найти в

[11]. Формулу для вычисления параметра  $W$  приведена в Стандарте обеспечения эффективного функционирования системы управления кадровым составом государственной службы в государственном органе. Предположим, что  $\alpha = \beta = 0,5$ .

Рассмотрим в виде констант остальные функции  $y_h(t)$ , соответствующие интенсивности передаче готового решения выше на следующий уровень подчинения:  $y_3(t) = y_2(t) = y_1(t) = \text{const}$ . В общем виде функции  $y_h(t)$  могут учитывать запаздывание, связанное с выполнением правил внутреннего распорядка и/или общего объема документооборота. Интенсивность входного потока постоянна и  $u_h(t) = \text{const}$ ,  $h = 0, \dots, 4$ .

Результат вычислительного эксперимента представлен в виде графиков функций вероятностей  $p_h(t)$ , которые характеризуют среднюю загрузку системы и ее изменение с течением времени. Заметим, что при решении задачи рассматривалась одинаково высокая мотивационная составляющая в обоих экспериментах.

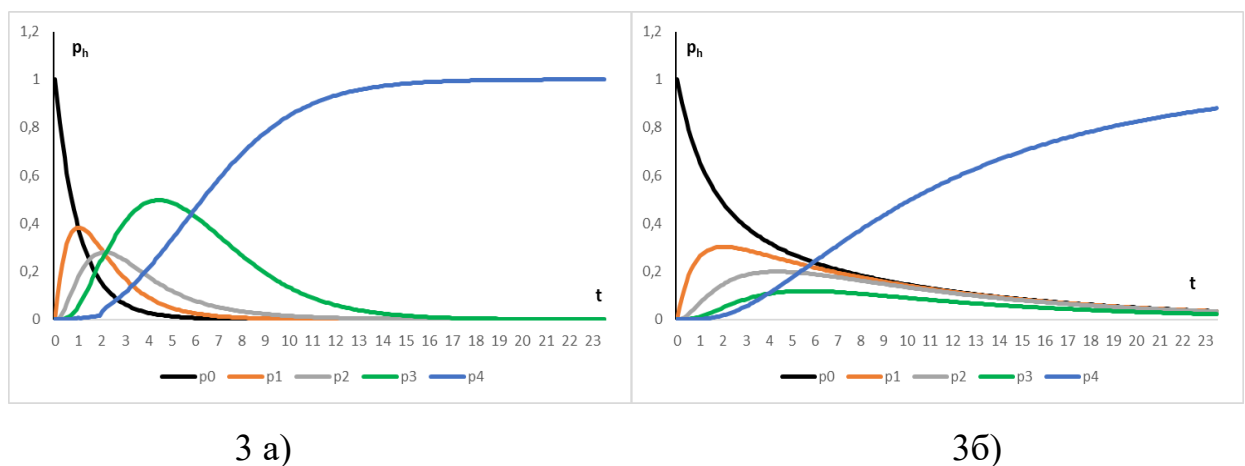


Рис. 3. – а) Графики функций состояния системы при высоком уровне профессионализма исполнителей. б) Графики функций состояния системы при низком уровне профессионализма исполнителей

На конец рассматриваемого периода при высокой мотивации и высоком уровне профессионализма средняя загрузка подразделения

непосредственных исполнителей  $p_4(t)$  составляет 99 %. А при низком профессионализме, но высокой мотивации к концу отчетного периода средняя загрузка подразделения на четвертом уровне достигает только 88%.

Важно заметить, что построенная математическая модель является универсальной и позволяет применять для различных организаций, занимающихся научно-исследовательской деятельностью.

### **Заключение**

В статье рассмотрена математическая модель планирования с помощью СМО, с учетом кадрового потенциала, мотивации и профессионального уровня сотрудников. Представленные результаты экспериментального исследования показали возможность анализа и предсказания текущего и конечного состояния системы, характеризующей работу научной организации, при известных начальных параметрах как самой системы, так и характеристик работников подразделений.

Полученные результаты являются новыми, позволяют существенно расширить круг решаемых задач в теории массового обслуживания и могут быть использованы в задачах анализа и оптимизации работы научно-исследовательской организации.

### **Литература**

1. Rece L., Vlas S., Ciuiu D., Neculoiu G., Mocanu S., Modrea A. Queueing Theory-Based Mathematical Models Applied to Enterprise Organization and Industrial Production Optimization // Mathematics 2022, 10, 2520. URL: [academia.edu/99262220/](https://academia.edu/99262220/).
2. Барсегян Н.В., Шинкевич А.И. Оптимизация организационной структуры управления предприятием с применением теории массового обслуживания // Современные наукоемкие технологии. 2020. № 9. С. 9-15. URL: [top-technologies.ru/ru/article/view?id=38206](https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=38206).

3. Neculoiu G., Mocanu S., Modrea A. Queueing Theory-Based Mathematical Models Applied to Enterprise Organization and Industrial Production Optimization // Mathematics 2022, 10, 2520. URL: doi.org/10.3390/math10142520.

4. Царькова Е.Г. Математическая модель оптимизации работы ведомственного сегмента платформы обратной связи // Инженерный вестник Дона. 2023. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/8309.

5. Бурлов В. Г., Грачев М. И. Оценивание эффективности принятия управленческих решений в социально-экономических системах на примере учебного заведения высшего образования // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. №2. URL: cyberleninka.ru/article/n/otsenivanie-effektivnosti-prinyatiya-upravlencheskih-resheniy-v-sotsialno-ekonomicheskikh-sistemah-na-primere-uchebnogo-zavedeniya.

6. Попова О.Б., Попов Б.К., Карандей В.Ю., Афанасьев В.Л. К задаче разработки методологии оценки времени выполнения поискового исследования // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 11-1. С. 88-96. URL: top-technologies.ru/ru/article/view?id=37771.

7. Гузев, М. А. Прикладные задачи системного анализа: монография / М.А. Гузев, Г.Ш. Цициашвили, М.А. Осипова. Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2021. – 90 с.

8. Осипов О. А., Тананко И. Е. Сети массового обслуживания произвольной топологии с делением и слиянием требований: случай бесконечноприборных систем обслуживания // Вестник Тверского государственного университета. 2017. № 4. С. 43-58.

9. Зацепилин А. В., Горшков В. А., Семькина Н. А. Программный модуль по оценки мотивационной составляющей научной деятельности подразделения. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2024610082. Дата регистрации: 09.01.2024. Заявка № 2023688955 от

20.12.2023. Опубликовано: 10.01.2024. Бюл. № 01. URL:  
[elibrary.ru/download/elibrary\\_59915812\\_52976815.PDF](http://elibrary.ru/download/elibrary_59915812_52976815.PDF).

10. Зацепилин А. В., Горшков В. А., Семькина Н. А., А.В. Лосева. Модель планирования научной деятельности на основе системы массового обслуживания. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2024681929. Дата регистрации: 16.09.2024. Заявка № 2024680541 от 05.09.2024. Опубликовано: 16.09.2024. Бюл. № 09. URL:  
[elibrary.ru/download/elibrary\\_69650348\\_86658151.PDF](http://elibrary.ru/download/elibrary_69650348_86658151.PDF).

11. Барсегян П. Элементы математической теории деятельности людских систем (Часть 3: Поведенческие траектории и моделирование недовольства и протестов людей). URL: [iarex.ru/articles/53498.html](http://iarex.ru/articles/53498.html).

### References

1. Rece L., Vlase S., Ciuiu D., Neculoiu G., Mocanu S., Modrea A. Queueing Theory-Based Mathematical Models Applied to Enterprise Organization and Industrial Production Optimization. Mathematics. 2022, 10, 2520. URL: [academia.edu/99262220/](http://academia.edu/99262220/).

2. Barseghyan N.V., Shinkevich A.I. Sovremennye naukoemkie tehnologii. № 9, pp. 9-15. 2020.

3. Neculoiu G., Mocanu S., Modrea A. Queueing Theory-Based Mathematical Models Applied to Enterprise Organization and Industrial Production Optimization. Mathematics 2022, 10, 2520. URL: [doi.org/10.3390/math10142520](https://doi.org/10.3390/math10142520).

4. Tsarkova E.G. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/8309](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/8309).

5. Burlov V. G., Grachev M. I. T-Comm: Telekommunikacii i transport, 2020. №2, pp. 32—38.

6. Popova O.B., Popov B.K., Karandej V.Ju., Afanas'ev V.L. Sovremennye naukoemkie tehnologii, 2019. № 11-1, pp. 88-96. URL: [top-technologies.ru/ru/article/view?id=37771](http://top-technologies.ru/ru/article/view?id=37771).
7. Guzev M. A., G.Sh. Tsitsiashvili, M.A. Osipova. Prikladnye zadachi sistemnogo analiza [Applied problems of system analysis]. Vladivostok: FEFU, 2021.
8. Osipov O. A., Tananko I. E. Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta, 2017. № 4, pp. 43—58.
9. Semykina N. A., Zatsepilin A.V., Gorshkov A.V. Programmnyj modul' po ocenke motivacionnoj sostavljajushhej nauchnoj dejatel'nosti podrazdelenija [The program module for evaluating the motivational component of the scientific activity of the department], Svidetel'stvo o registracii programmy dlya EVM № 2024610082. Data registracii: 09.01.2024. Zayavka № 2023688955 ot 20.12.2023. Opublikovana: 10.01.2024. Byul. № 01. URL: [elibrary.ru/download/elibrary\\_59915812\\_52976815.PDF](http://elibrary.ru/download/elibrary_59915812_52976815.PDF).
10. Semykina N. A., Zatsepilin A.V., Gorshkov A.V. Model' planirovaniya nauchnoj dejatel'nosti na osnove sistemy massovogo obsluzhivaniya [A model for planning scientific activities based on a queuing system], Svidetel'stvo o registracii programmy dlya EVM № 2024681929. Data registracii: 16.09.2024. Zayavka № 2024680541 ot 05.09.2024. Opublikovana: 16.09.2024. Byul. № 09. URL: [elibrary.ru/download/elibrary\\_69650348\\_86658151.PDF](http://elibrary.ru/download/elibrary_69650348_86658151.PDF).
11. Barseghyan P. Jelementy matematicheskoy teorii dejatel'nosti ljudskih sistem. [Elements of the mathematical theory of human systems activity]. URL: [iarex.ru/articles/53498.html](http://iarex.ru/articles/53498.html).

**Дата поступления: 27.05.2025**

**Дата публикации: 25.07.2025**