

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-1-5-11>

УДК 681.518

## Оптимизация информационных потоков на основе сетевых моделей систем

Д. А. Конопацкий<sup>1)</sup>, докт. техн. наук, проф. А. А. Лобатый<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

**Реферат.** Учебный процесс представляет собой сложную социальную систему управления, элементы которой объединяются и взаимодействуют посредством информационных потоков. При этом информационные потоки могут быть различными по назначению и виду передаваемой информации. Статья посвящена обоснованию необходимости и путей оптимизации информационных потоков, существующих в учебном процессе. Приводится анализ задач, которые существуют при организации учебного процесса на примере высшего учебного заведения, роли современных информационных технологий, обеспечивающих обучение студентов. Данный анализ также характерен для учреждений не только высшего образования, но и дополнительного образования, когда слушатели одновременно работают, заняты семьей и обучаются в основном дистанционно. Представление учебного процесса с помощью сетевых моделей позволяет провести их формализацию в форме, удобной для оптимизации, в зависимости от поставленной задачи, соответствующей целевой функции и заданным ограничениям, учитывающим специфику каждой информационной модели учебного процесса. Рассмотрены сетевые модели организации учебного процесса, их особенности и формализация – представление в виде, удобном для моделирования и оптимизации. Проведен анализ различных видов информации, используемой в учебном процессе, методов ее количественной оценки. На основе моделей обоснованы задачи, которые существуют при оптимизации информационных потоков, и пути их решения с помощью математических методов оптимизации. Показана связь задач оптимизации информационных потоков образовательного процесса с близкими задачами применения информационных технологий в различных системах управления социальной и экономической областей.

**Ключевые слова:** учебный процесс, информационный поток, сетевая модель, граф, оптимизация, целевая функция

**Для цитирования:** Конопацкий, Д. А. Оптимизация информационных потоков на основе сетевых моделей систем / Д. А. Конопацкий, А. А. Лобатый // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 1. С. 5–11. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-1-5-11>

## Optimization of Information Flows Based on Network Models of Systems

D. A. Konopacki<sup>1)</sup>, A. A. Lobaty<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The educational process is a complex social management system, the elements of which are combined and interact through information flows. At the same time, information flows can differ in purpose and type of transmitted information. The article is devoted to the substantiation of the need and ways to optimize information flows existing in the educational process. An analysis of the tasks that exist in organizing the educational process is provided using the example of a higher educational institution, the role of modern information technologies that ensure student learning. The educational process is a complex social management system, the elements of which are combined and interact through information flows. At the same time, information flows can differ in purpose and type of transmitted information. The article is devoted to the substantiation

---

**Адрес для переписки**

Лобатый Александр Александрович  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 65/11,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 29 346-82-56  
lobaty@bntu.by

---

**Address for correspondence**

Lobaty Alexander A.  
Belarusian National Technical University  
65/11, Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 29 346-82-56  
lobaty@bntu.by

of the need and ways to optimize information flows existing in the educational process. An analysis of the tasks that exist in organizing the educational process is provided using the example of a higher educational institution, the role of modern information technologies that ensure student learning. This analysis is also typical not only for higher education institutions, but also for institutions of additional education for adults, during training in which students simultaneously work, are busy with family and study mainly remotely. Representation of the educational process using network models allows them to be formalized, presented in a form convenient for optimization, depending on the task, corresponding to the objective function and specified constraints that take into account the specifics of each information model of the educational process. Network models of organizing the educational process, their features and formalization - presentation in a form convenient for modeling and optimization are considered. An analysis of various types of information used in the educational process, methods for its quantitative assessment are carried out. On the basis of the models, the problems that exist in the optimization of information flows and ways of their solution based on the application of mathematical methods of optimization are substantiated. The connection of the problems pertaining to optimization of information flows of the educational process with similar problems of the application of information technologies in various systems of management in social and economic areas is shown.

**Keywords:** educational process, information flow, network model, graph, optimization, objective function

**For citation:** Konopacki D. A., Lobaty A. A. (2025) Optimization of Information Flows Based on Network Models of Systems. *Science and Technique*. 24 (1), 5–11. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-1-5-11> (in Russian)

## **Введение**

Интенсивное развитие информационных систем и технологий обусловило появление и внедрение информационных потоков в различных сферах человеческой деятельности, что привело к революционным преобразованиям в самих подходах к организации функционирования социальных, экономических и других систем управления. Не избежала этого влияния и сфера образования на всех этапах функционирования – от начальной школы до системы подготовки научных кадров высшей квалификации [1].

Предоставляя практически неограниченный доступ к различной информации в соответствующих областях знаний, в том числе учебной, тем не менее это приводит к появлению новых проблем, связанных с необходимостью выбора нужной информации, отсеивания ошибочной и бесполезной, которую нельзя использовать в учебном процессе.

Управление в сфере образования имеет свои особенности, обусловленные в первую очередь тем обстоятельством, что в процессе образовательного процесса происходит преобразование материальных и интеллектуальных ресурсов в знания и умения обучаемых. Специфика сферы образования обуславливает определенную специфику соответствующих категорий и законов [2]. С точки зрения информационных технологий, задачу обучения можно рассматривать как перевод системы в новое качественное состояние путем конечного числа количественных преобразований [3]. В высшем учебном заведении в общем случае можно выделить четыре большие узловые группы, между которыми происходит интенсивный обмен информацией: студенты, администрация, преподаватели, научные сотрудники [4].

В качестве основной информации, предназначенной для обучения, необходимо отметить программы курсов обучения, методические рекомендации к обучению, методические разработки и информационные документы по изучаемым темам. В последнее время все большее распространение получают учебные курсы, проводимые с использованием дистанционных технологий, которые могут как дублировать читаемые лекционные курсы, так и быть самостоятельными материалами для индивидуального обучения. Кроме того, для обеспечения учебного процесса необходимо иметь методические указания для выполнения контрольных работ, архив соответствующих программных средств и другие учебно-методические и информационные материалы.

## **Информационные потоки в образовании**

Управление информационными потоками в образовании представляет собой проблему, которая не может быть однозначно решена без учета социальных и экономических факторов, достижений в области развития и внедрения интенсивно развивающихся информационных систем и технологий [5]. Несмотря на то что многие теоретики и практики в области управления образованием перегружены так называемой «бумажной» работой, в реальности на основе научных принципов моделирования информационных потоков в образовании существуют реальные предпосылки организации и оптимизации данных информационных потоков с целью обеспечения нужной эффективности осуществления образовательного процесса в целом.

Особую актуальность оптимизация информационных потоков приобретает в системе до-

полнительного образования, поскольку, как правило, слушатели обучаются и приобретают новые знания, умения и навыки одновременно с трудовой деятельностью. При этом главное – не перегрузить обучающихся с учетом их занятости и усталости на основной работе. В связи с этим предоставляемая информация должна быть действительно актуальной, полезной и вызывать интерес у слушателей в рамках направлений их трудовой деятельности.

Информационные потоки учебного процесса включают в себя различные виды информации: числовую, текстовую, графическую и видеоинформацию. При этом она разделяется на техническую и смысловую информацию, передаваемую по линии связи и представляющую собой сообщения в форме знаков или сигналов в удобном для обработки компьютерами виде. Основы теории технической информации были разработаны еще в первой половине двадцатого столетия такими учеными, как Р. Фишер, Р. Хартли, Х. Найквист, К. Шеннон и другие [6]. В настоящее время теория представления, обработки использования технической информации достаточно развита и исследована [7].

Отдельно следует выделить так называемую смысловую (семантическую) информацию, представляющую собой знания, получаемые человеком из различных источников. Как показывает практика, в информационных потоках образовательных процессов значительно преобладает (до 90 процентов и более) текстовая информация, измеряемая количеством символов, содержащихся в том или ином документе.

Информационный объем текста складывается из информационных весов составляющих его символов. В цифровых компьютерных системах (кроме нейрокомпьютеров) информация представляется в двоичной форме, при которой один символ (ноль или единица) называется бит. Для удобства обработки текстовой информации введено понятие «достаточный алфавит» [8]. Он включает в себя 256 символов – все символы, которые есть на клавиатуре компьютера. Так как  $256 = 2^8$ , значит, вес символа 8 бит. Величина 8 бит называется байт и предназначена для измерения объемов количества информации. При этом 1024 байта = 1 Кб, 1024 Кб = 1 Мб, 1024 Мб = 1 Гб и так далее. В байтах удобно измерять информационный объем текста. Например, пусть книга содержит 15 страниц, на каждой странице 40 строк,

в каждой строке 60 символов, включая пробелы. Информационный объем текста данной книги определяется следующим образом:  $60 \times 40 \times 15 = 360000$  символов – 360000 байтов.  $360000/1024 = 351,56$  Кб,  $351,56/1024 = 0,34$  Мб. Таким образом, информационный объем текста данной книги составляет 0,34 Мб. Аналогично решается обратная задача определения объема текстового материала при заданном объеме количества информации.

Обмен информацией между участниками образовательного процесса удобно представлять в виде сетевых моделей, которые позволяют произвести формализацию (представление в удобном для проведения исследований виде) информационных потоков в виде ориентированных графов, вершины которых представляют участников образовательного процесса, а дуги (направленные ребра) – информационные потоки, имеющие определенные веса, количественно характеризующие объем передаваемой информации [9–11].

Среди сетевых моделей организации учебного процесса можно выделить схемы (сетевые модели) управления учебным процессом и модели сетевого обучения [11]. Оба вида сетевых моделей представляются в форме ориентированных графов с дугами, имеющими веса информационных потоков.

Одной из задач оптимизации графов (сетевых моделей) является сокращение промежуточных пунктов передачи информационных потоков, так как на каждом промежуточном пункте могут происходить задержка и искажение информации. Кроме того, может иметь место дублирование информационных потоков, что вносит дополнительные проблемы с их обработкой и доведением до потребителя информации (обучающегося). Пусть, например, сеть управления учебным процессом (модель сетевого обучения) представляет собой граф, представленный на рис. 1.

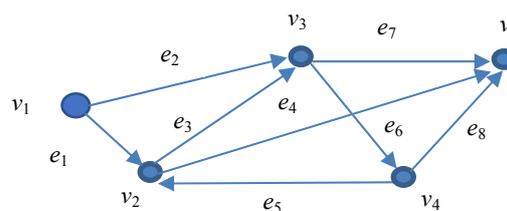


Рис. 1. Сеть управления учебным процессом

Fig. 1. Learning management network

Данный граф характеризуется двумя конечными множествами:  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_{nv}\}$  – множество вершин (узлов);  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_{ne}\}$  – то же ребер (дуг) графа. Здесь  $nv = 5$  и  $ne = 8$  – соответственно количество вершин и количество ребер графа системы.

На рис. 1 представлен один из возможных вариантов модели организации сетевого обучения (управления учебным процессом). Вершины графа (множество  $v$ ) в данном случае обозначают:  $v_1$  – образовательное сообщество (учреждение образования);  $v_2$  – преподаватель;  $v_3$  – обучающийся;  $v_4$  – оценка знаний;  $v_5$  – отчеты о проделанной работе.

Ребра графа (множество  $e$ ) обозначают:  $e_1$  – организация учебного процесса (управление, организационные документы: учебно-программная документация, учебные планы и программы);  $e_2$  – коммуникации (контент знаний);  $e_3$  – работа преподавателя с обучающимся;  $e_4$  – общая работа преподавателя;  $e_5$  – доработка учебных материалов преподавателя;  $e_6$  – отчетность обучающегося;  $e_7$  – результаты текущего контроля;  $e_8$  – успеваемость обучающегося.

При этом каждое ребро характеризует затраты (материальные или временные) на передачу соответствующей информации, узлы графа (рис. 1) – промежуточные пункты передачи учебной информации. Необходимо так спланировать прохождение информационных потоков, чтобы минимизировать затраты на их прохождение.

Решение данной задачи сводится к построению оптимального остовного дерева [12], содержащего все узлы сети и не имеющего циклов (совпадения начального и конечного узлов). Алгоритм определения оптимального остовного дерева подробно описан в работе [13].

На рис. 2 представлен один из вариантов остовного дерева графа, представленного на рис. 1.

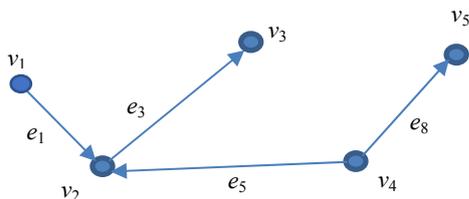


Рис. 2. Вариант остовного дерева

Fig. 2. Spanning tree variant

Преобразование графа сети управления учебным процессом (рис. 1) к остовному дере-

ву (рис. 2) позволяет в ряде случаев сократить количество информационных потоков при организации образовательного процесса.

Современные информационные системы обладают достаточными возможностями по обработке, хранению и передаче практически любой информации, используемой в образовательном процессе. Однако иногда могут иметь место случаи, когда передача информации между участниками образовательного процесса по объективным или субъективным причинам может нарушаться, прерываться или искажаться. Успешное прохождение информационного потока оценивается величиной вероятности от 0 до 1.

Если на ориентированном графе, изображающем прохождение информационного потока (рис. 1), каждое ребро оценить вероятностью успешного прохождения информационного потока, то задача оптимизации информационных потоков состоит в выборе такого маршрута, при котором вероятность прохождения необходимой информации будет максимальной. Величины этих вероятностей могут определяться экспериментально или путем экспертных оценок [14].

В качестве примера рассмотрим случай, когда в учебном заведении при организации образовательного процесса задействованы восемь участников. Вероятность успешного прохождения информационного потока между участниками может зависеть от многих факторов, в том числе профессиональной квалификации, накопленной усталости, дисциплинированности и исполнителей.

Оптимизация соответствующих информационных потоков позволяет определить как оптимальную схему взаимодействия между участниками, так и выбрать работников для выполнения поставленной задачи.

На рис. 3 в виде ориентированного графа представлен возможный вариант сетевой модели управления учебным процессом учреждения образования с вероятностями успешного прохождения информационного потока от одного участника процесса к другому.

Вершины графа (множество  $v$ ) здесь обозначают участников образовательного процесса:  $v_1$  – руководство учебного заведения (ректорат);  $v_2$  – учебный отдел (проректор по учебной работе);  $v_3$  – факультет (деканат);  $v_4$  – кафедра;  $v_5$  – преподаватель;  $v_6$  – методист;  $v_7$  – студент;  $v_8$  – заказчик выпускников (оценка качества образования).

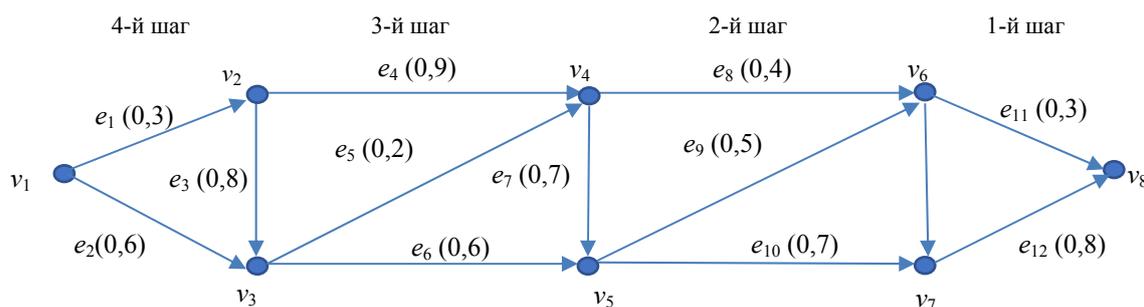


Рис. 3. Сетевая модель управления учебным процессом  
 Fig. 3. Network model of educational process management

Ребра графа (множество  $e$ ) обозначают действия участников образовательного процесса:  $e_1$  – нормативно-правовое обеспечение;  $e_2$  – организационные указания;  $e_3$  – методические указания;  $e_4$  – научно-методическое обеспечение;  $e_5$  – учебно-планирующая документация;  $e_6$  – кадровое обеспечение;  $e_7$  – психологическое обеспечение;  $e_8$  – материально-техническое обеспечение;  $e_9$  – аппаратно-техническое обеспечение;  $e_{10}$  – программное (информационное) обеспечение;  $e_{11}$  – финансово-экономическое обеспечение;  $e_{12}$  – диагностическое обеспечение (система обратной связи).

Вероятность успешного прохождения информационного потока в системе в целом определяется как произведение вероятностей передачи информации от одного участника к другому.

Задача успешного прохождения информационного потока может быть достаточно просто преобразована в задачу определения кратчайшего пути доставки необходимой информации путем замены вероятностей на логарифмы вероятностей [13]. Это означает, что если  $P_{1k} = P_1 \times P_2 \times P_3 \times \dots \times P_k$ , то  $\log P_{1k} = \log P_1 + \log P_2 + \log P_3 + \dots + \log P_k$ . Задаче максимизации величины  $\log P_{1k}$  соответствует задача минимизации величины  $-\log P_{1k}$ . Таким образом, для определения кратчайшего пути прохождения информации на рис. 3 необходимо заменить величины  $P_k$  на величины  $-\log P_k$ .

Таким образом, задача сводится к определению кратчайшего пути между пунктами маршрута. Такого рода задачи успешно решаются методом динамического программирования применительно к дискретной постановке [12–14].

В основу метода динамического программирования положен принцип оптимальности Беллмана, справедливый для дискретных и для непрерывных систем.

Принцип оптимальности Беллмана формулируется следующим образом: оптимальное управление обладает тем свойством, что каково бы ни было начальное состояние и управление до данного момента, последующее управление должно быть оптимальным при том состоянии, в которое пришла система в результате предыдущего этапа управления. Таким образом, оптимальное управление определяется состоянием системы в данный момент времени и поставленной целью и не зависит от состояний в предыдущие моменты времени. Сущность данного метода состоит в том, что дискретный процесс прохождения информационного потока на  $k$ -м ( $k + 1$ -м) шаге представляется рекуррентной формулой [15]

$$x(k + 1) = x(k) + f(x, u, k). \quad (1)$$

В нашем случае:  $x$  – вероятность успешного прохождения информационного потока;  $u$  – управление – выбор маршрута прохождения информационного потока.

Требуется определить последовательность оптимальных управлений  $u(0), \dots, u(N - 1)$  (маршрута), минимизирующую сумму (эквивалент функционала) следующего вида:

$$J_0 = \sum_{k=1}^{n-1} (-\log P_{1k}). \quad (2)$$

На основе принципа оптимальности, сформулированного выше, задача оптимизации функции многих переменных  $u(0, 1, \dots, N - 1)$  сводится к задаче последовательной минимизации

ции функции одной переменной – для нашего случая  $(-\log P_{1k})$ .

Например, в данной задаче (рис. 3) вероятность прохождения информационного потока по маршруту 1–2–4–6–8 составит  $0,3 \times 0,9 \times 0,4 \times 0,3 = 0,0324$ . Наиболее успешное прохождение информационного потока для данной задачи будет осуществляться по маршруту 1–3–5–7–8. При этом вероятность прохождения составит  $0,6 \times 0,6 \times 0,7 \times 0,8 = 0,2016$ . В данном примере задача динамического программирования решена в среде Mathcad.

В отдельных случаях при оптимизации информационных потоков в образовательном процессе могут возникать другие задачи: определение максимального потока, минимизация стоимости потока, определение временных графиков образовательного процесса.

В некоторых случаях могут использоваться технологии информационной логистики [16], методы которой получили большое развитие и широкое распространение. Перспективным направлением является технология хранения и передачи информации, которая обозначается термином «блокчейн». Однако при ее использовании необходимо учитывать ряд особенностей и ограничений.

## ВЫВОДЫ

1. Таким образом, учебный процесс представляет собой сложную социальную систему управления, элементы которой объединяются и взаимодействуют посредством информационных потоков. При этом информационные потоки могут быть различными по назначению и виду передаваемой информации.

2. В связи с практической неограниченностью доступа к информации необходимо управление образовательным процессом. Особенно актуально это для системы дополнительного образования, когда обучающиеся одновременно работают, заняты семьей и учатся (в основном дистанционно). При этом значительная часть учебного материала представляется в текстовой форме. Однако часть учебной информации может представляться в визуальной или другой форме, что необходимо учитывать при формировании информационных потоков.

3. Представление учебного процесса с помощью сетевых моделей позволяет провести их формализацию в форме, удобной для оптимизации, в зависимости от поставленной задачи, соответствующей целевой функции и заданным ограничениям, учитывающим специфику каждой информационной модели учебного процесса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Богуш, В. А. Информационные технологии в образовании / В. А. Богуш // Наука и инновации. 2015. № 11. С. 9–12.
2. Бровка, Г. М. Управление образовательными системами: курс лекций / Г. М. Бровка. Минск: БНТУ, 2003. 275 с.
3. Рыкова, Е. В. Компьютерные обучающие системы и информационные потоки / Е. В. Рыкова, В. Т. Рыков // Успехи современного естествознания. 2004. № 3. С. 87–88. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=12424> (дата обращения: 13.01.2024).
4. Юношев, А. В. Информационные потоки учебного заведения / А. В. Юношев // Научная сессия МИФИ-2005. М., 2005. Т. 12: Информатика и процессы управления. С. 19–20. URL: <https://studlib.ru/doc/685245/685245/informacionnyye-potoki-uchebnogo-zavedeniya> (дата обращения: 13.01.2024).
5. Информатика в управлении образованием: теоретические проблемы / П. А. Бояджиева, Е. Ю. Игнатьева, Н. А. Матвеева [и др.]; под ред. А. М. Осипова, П. А. Бояджиевой; Российский научный фонд [и др.]. Великий Новгород, 2018. 178 с.
6. Бекман, И. Н. Информатика: курс лекций / И. Н. Бекман. URL: <https://profbeckman.narod.ru/InformLekc.files/Inf01.pdf> (дата обращения: 13.01.2024).
7. Лидовский, В. В. Теория информации: учеб. пособие / В. В. Лидовский. М.: Компания Спутник+, 2004. 111 с.
8. Информационный объем текста и единицы измерения информации. URL: <https://studfile.net/preview/7131838/page/4/> (дата обращения: 13.01.2024).
9. Яковлева, Н. А. Сетевое обучение в современной педагогике / Н. А. Яковлева // Современная педагогика. 2016. № 12. URL: <https://pedagogika.snauka.ru/2016/12/6544> (дата обращения: 26.02.2023).
10. Попова, И. Н. Сетевое взаимодействие как ресурс развития общего и дополнительного образования / И. Н. Попова // Мир науки. 2016. Т. 4, № 6. URL: <http://mir-nauki.com/PDF/47PDMN616.pdf> (дата обращения: 13.01.2024).
11. Лобатый, А. А. Сетевые модели организации учебного процесса / А. А. Лобатый, Д. А. Конопацкий // Системный анализ и прикладная информатика. 2023. № 2. С. 65–69. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2023-2-65-69>.
12. Татт, У. Теория графов: пер. с англ. / У. Татт. М.: Мир, 1988. 424 с.
13. Таха, Х. А. Введение в исследование операций: пер. с англ. / Х. А. Таха. 7-е изд. М.: Изд. дом «Вильямс», 2005. 912 с.

14. Лобатый, А. А. Оптимизация структуры учебного процесса при заданных ограничениях / А. А. Лобатый, Д. А. Конопацкий // Системный анализ и прикладная информатика. 2023. № 4. С. 69–73. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2023-4-69-73>.
15. Методы классической и современной теории автоматического управления: в 5 т. / под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. Т. 4: Теория оптимизации систем автоматического управления. 744 с.
16. Медведев, В. А. Информационная логистика: учеб. / В. А. Медведев. М.; Вологда: Изд-во «Инфра-Инженерия», 2022. 472 с.
- Поступила 27.09.2024  
Подписана в печать 28.11.2024  
Опубликована онлайн 31.01.2025
- REFERENCES
1. Bogush V. A. (2015) Information Technologies in Education. *Nauka i Innovatsii = Science and Innovations*, (11), 9–12 (in Russian).
  2. Brovka G. M. (2003) *Management of Educational Systems*. Minsk, Belarusian National Technical University. 275 (in Russian).
  3. Rykova E. V., Rykov V. T. (2004) Computer Training Systems and Information Flows. *Uspekhi Sovremennogo Estestvoznaniya = Advances in Current Natural Sciences*, (3), 87–88. Available at: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=12424> (accessed 13 January 2024) (in Russian).
  4. Yunoshev A. V. (2005) Information Flows of the Educational Institution. *Nauchnaya Sessiya MIFI-2005. T. 12. Informatika i Protsessy Upravleniya* [Scientific session of Moscow Engineering Physics Institute [MEPhI] 2005. Vol. 12. Computer Science and Management Processes]. Moscow, 19–20. Available at: <https://studylib.ru/doc/685245/685245/informacionnye-potoki-uchebnogo-zavedeniya> (accessed 13 January 2024) (in Russian).
  5. Boyadzhieva P. A., Ignat'eva E. Yu., Matveeva N. A. [et al.] (2018) *Information in Education Management: Theoretical Problems*. Veliky Novgorod. 178 (in Russian).
  6. Beckman I. N. *Informatics: Course of Lectures*. Available at: <https://profbeckman.narod.ru/InformLec.files/Inf01.pdf> (accessed 13 January 2024) (in Russian).
  7. Lidovsky V. V. (2004) *Information Theory*. Moscow, Sputnik+ Company Publ. 111 (in Russian).
  8. *Information Volume of Text and Units of Information Measurement*. Available at: <https://studfile.net/preview/7131838/page:4/> (accessed 13 January 2024) (in Russian).
  9. Yakovleva N. A. (2016) Network Learning in Modern Pedagogy. *Sovremennaya Pedagogika = Modern Pedagogy*, (12). Available at: <https://pedagogika.snauka.ru/2016/12/6544> (accessed 26 February 2023).
  10. Popova I. N. (2016) Network Interaction as a Resource for the Development of General and Additional Education. *Mir Nauki = World of Science*, 4 (6). Available at: <http://mir-nauki.com/PDF/47PDMN616.pdf> (accessed 13 January 2024) (in Russian).
  11. Lobaty A. A., Konopacki D. A. (2023) Network models for organizing the learning process. *Sistemny Analiz i Prikladnaya Informatika = Systems Analysis and Applied Informatics Science*, (2), 65–69 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2023-2-65-69>.
  12. Tutte W. T. (1984) *Graph Theory*. Addison-Wesley Pub. Co. 333.
  13. Taha Hamdy A. (2003) *Operations Research: An Introduction*. New Jersey, Pearson Education Limited. 916.
  14. Lobaty A. A., Konopacki D. A. (2023) Optimization of the Structure of the Educational Process under Given Restrictions. *Sistemny Analiz i Prikladnaya Informatika = Systems Analysis and Applied Informatics Science*, (4), 69–73 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2023-4-69-73>.
  15. Pupkov K. A., Egupov N. D. (eds.) (2004) *Methods of Classical and Modern Theory of Automatic Control. Vol. 4. Theory of Optimization of Automatic Control Systems*. Moscow, Publishing House of Bauman Moscow State Technical University. 744 (in Russian).
  16. Medvedev V. A. (2022) *Information Logistics*. Moscow; Vologda, Infra-Inzheneriya Publ. 472 (in Russian).

Received: 27.09.2024

Accepted: 28.11.2024

Published online: 31.01.2025