

Принципы бережливого производства в лесопромышленном комплексе

Ю.И. Беленький^{1a}, В.А. Иванов^{2b}, В.А. Соколова^{1c}, Н.Г. Токарев^{1d}, А.Р. Безпалько^{3e}

¹Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Высшая школа технологий и энергетики, ул. Ивана Черных 4, Санкт-Петербург, Россия

²Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

³Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова, пер. Институтский 5, Санкт-Петербург, Россия

^a 2000zalom@gmail.com, ^b Ivanovva55@mail.ru, ^c sokolova_vika@inbox.ru, ^d tokarevn@me.com, ^e lespolitika@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-4170-3664>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-0707-972X>,

^c <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>, ^d <https://orcid.org/0009-0006-8449-1258>,

^e <https://orcid.org/0000-0001-7855-9793>

Статья поступила 16.04.2025, принята 06.05.2025

Целью исследования является повышение эффективности лесопромышленного производства на основе интеграции концептуальных принципов бережливого производства и системного анализа функциональной связности процессов потока, рассматриваемых как единые, глубоко интегрированные пространственно-временные структуры. Их качество характеризуется целевой функцией, оптимизация которой достигается путем максимизации или минимизации определенных параметров. Несмотря на значительные успехи в разработке математических методов и вычислительной техники, позволяющих решать сложные задачи оптимизации, в середине XX в. было установлено, что для дискретных систем в целом не существует универсального принципа оптимальности. В качестве альтернативного концептуального подхода к оптимизации производства предлагается использование принципов бережливого производства, где ключевым является стремление к максимальной эффективности за счет исключения всех видов потерь. Методология БП ориентирована на непрерывное повышение скорости процессов как основу совершенствования. Производство и динамику потока следует рассматривать как многоуровневые системы, состоящие из взаимодействующих в технологическом пространстве-времени элементов (процессов, потоков, операций и т. д.), объединенных в подсистемы различных уровней для достижения общей цели – оптимального функционирования. В связи с этим концепция бережливого производства должна быть дополнена системным подходом, основанным на принципах системного анализа, где все элементы взаимосвязаны и взаимозависимы. Системный подход позволяет оценить среднее функциональное время связности в сложных дискретных процессах и, следовательно, определить среднюю скорость потока: минимизация функционального времени связности процессов приводит к увеличению скорости потока. В лесозаготовительном производстве принципы бережливого производства применимы на всех этапах потока древесины: от заготовки леса до переработки и распределения продукции. В соответствии с концепцией бережливого производства, можно выделить следующие основные шаги для ее реализации: идентификация потерь, оптимизация планирования, автоматизация и модернизация оборудования, управление качеством, обеспечение экологической ответственности, обучение персонала, логистика и управление запасами, мониторинг и анализ данных. Эти шаги следует рассматривать как задачи, решение которых способствует оптимизации динамики потока.

Ключевые слова: лесной комплекс; стратегия; устойчивое развитие; бережливое производство; сбалансированная система показателей; оптимизация; система; время.

Principles of lean production in the timber industry

Yu.I. Belenky^{1a}, V.A. Ivanov^{2b}, V.A. Sokolova^{1c}, N.G. Tokarev^{1d}, A.R. Bezpalko^{3e}

¹St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Higher School of Technology and Energy; 4, Ivan Chernykh St., St. Petersburg, Russia

²Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

³St. Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov; 5, Institutsky Lane, St. Petersburg, Russia

^a 2000zalom@gmail.com, ^b Ivanovva55@mail.ru, ^c sokolova_vika@inbox.ru, ^d tokarevn@me.com, ^e lespolitika@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0002-4170-3664>, ^b <https://orcid.org/0000-0003-0707-972X>,

^c <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>, ^d <https://orcid.org/0009-0006-8449-1258>,

^e <https://orcid.org/0000-0001-7855-9793>

Received 16.04.2025, accepted 06.05.2025

The aim of the study is to increase the efficiency of timber production based on the integration of the conceptual principles of lean production and a systematic analysis of the functional connectivity of flow processes, considered as single, deeply integrated spatial and temporal structures. The quality of these structures is characterized by an objective function, the optimization of which is achieved by maximizing or minimizing certain parameters. Despite significant advances in the development of mathematical methods and computer technology that allow solving complex optimization problems, in the middle of the XX century it was found that there is no universal principle of optimality for discrete systems as a whole. As an alternative conceptual approach to optimizing production, it is proposed

to use the principles of lean production, where the key is to strive for maximum efficiency by eliminating all types of losses. The lean production methodology is focused on continuously increasing the speed of processes as a basis for improvement. Production and flow dynamics should be considered as multilevel systems consisting of elements interacting in technological space-time (processes, flows, operations, etc.) combined into subsystems of various levels to achieve a common goal – optimal functioning. In this regard, the lean production concept should be complemented by a systematic approach based on the principles of system analysis, where all elements are interrelated and interdependent. The systematic approach makes it possible to estimate the average functional connectivity time in complex discrete processes and, consequently, determine the average flow rate: minimizing the functional connectivity time of processes leads to an increase in flow rate. In logging, the principles of lean production are applicable at all stages of the timber flow: from logging to processing and product distribution. According to the lean production concept, the following main steps can be identified for its implementation: loss identification, planning optimization, automation and modernization of equipment, quality management, environmental responsibility, personnel training, logistics and inventory management, monitoring and data analysis. These steps should be considered as tasks, the solution of which helps to optimize the flow dynamics.

Keywords: forest complex, strategy, sustainable development, lean production, balanced scorecard, optimization, system, time.

Введение. Лесопромышленное производство может быть представлено как сложная динамическая система, характеризующаяся взаимосвязанными технологическими операциями, направленными на производство и перемещение древесины от мест произрастания до конечного потребителя [1–3]. Оптимизация данной системы достигается посредством максимизации или минимизации целевой функции, отражающей ключевые показатели эффективности. Системно-аналитический подход, применяемый для оптимизации, доказал свою эффективность в различных отраслях народного хозяйства [4, 5].

Развитие математических методов и вычислительной техники предоставило мощные инструменты для решения задач оптимизации в лесопромышленном производстве [6–11]. Принцип оптимизации заключается в достижении наилучших результатов при заданных условиях. Последние формируются на основе математического анализа задачи и определяются общей концепцией оптимальности производства [12, 13]. В контексте современной парадигмы развития производства, концепция оптимальности все больше интегрируется с принципами бережливого производства (БП), которое определяет общие принципы и цели оптимизации, направленные на минимизацию потерь [14].

С середины XX в. концептуальный подход к оптимальному производству все больше ориентируется на минимизацию потерь. В рамках БП выделяются следующие основные виды потерь [15–19]:

- перепроизводство: избыточное производство продукции, приводящее к проблемам с запасами и хранением;
- ожидания: простой оборудования и персонала, снижающие общую производительность;
- лишние запасы: избыточные запасы сырья, деталей и готовой продукции, увеличивающие затраты на хранение и замороживающие капитал;
- транспортировка: неоптимальная транспортировка материалов и продукции, увеличивающая риски повреждений и задержек;
- лишние движения: избыточные движения работников, не добавляющие ценности продукту;
- брак: производство дефектной продукции, приводящее к дополнительным затратам на переработку или утилизацию;
- ненужная обработка: излишние операции обработки продукта, не увеличивающие его ценность для потребителя;

– нереализованный потенциал работников: недостаточное использование знаний и опыта сотрудников для улучшения процессов.

Цели БП, направленные на оптимизацию, заключаются в устранении потерь [20]:

- производство ровно такого количества продукции, которое необходимо потребителю;
- достижение высокого качества продукции при нулевом браке;
- гарантия быстрой и безопасной доставки продукции заказчику;
- минимизация площади складских помещений;
- применение современных технологий;
- вовлечение каждого сотрудника в процесс создания ценности продукта.

Бережливые технологии представляют собой систему управления, ориентированную на максимизацию ценности для потребителя при минимизации потерь [21, 22]. Они представляют собой важный инструмент для оптимизации процессов, сокращения потерь и повышения производительности в целом. Основные принципы БП, обобщающие опыт исследования его эффективности, сводятся к следующему:

- определение ценности продукта с позиции потребителя;
- создание потока ценностей с анализом всех этапов процесса и максимальным сокращением потерь;
- организация движения потока для потребителя без задержек;
- вытягивание, т. е. поставка потребителю ровно такого количества продукции, которое ему нужно, и точно к указанному времени;
- совершенствование, постоянное сокращение ненужных действий;
- повышение качества за счет систематического улучшения процесса;
- устойчивое развитие как эффективное использование ресурсов при непрерывном снижении отходов;
- увеличение гибкости, т. е. быстрая адаптация к динамике рынка.

Для адекватного представления производства и динамики потока необходимо учитывать многоуровневую структуру системы, состоящую из взаимодействующих в технологическом пространстве-времени элементов (процессов, потоков, операций и др.), объединенных в подсистемы для достижения единой цели оптимального функционирования. В связи с этим концептуальная идеология БП должна включать системный подход

и интегрироваться с основными принципами системного анализа [23, 24]: абсолютный приоритет конечной цели; единство системы как целого и как совокупности частей (элементов); связность в функциональном пространстве-времени, когда любая часть рассматривается совместно со связями и окружением; приоритет функции над структурой при их совместном рассмотрении; развитие, учет изменяемости и накопления информации; неопределенность, учет неопределенностей и случайностей.

Методы исследования. Непрерывное повышение скорости и эффективности процессов в БП определяются формулой Литтла, которая показывает зависимость времени выполнения заказа от числа заказов в системе и скорости их выполнения:

$$T = \frac{W}{S}, \quad (1)$$

где W – среднее время выполнения заказа, S – средняя скорость выполнения заказа. Средняя скорость выполнения заказов является функциональным параметром, показывающим среднее число заказов в единицу времени, в общем случае переменным.

Оптимальная организация движения потоков заказа является важной составляющей эффективности процесса в целом. Расширение формулы (1) на среднюю скорость движения потока заказов, состоящего из дискретных многошаговых процессов, образующих функционально связанную во времени сложную систему, можно выполнить на основании анализа представлений теории групп.

Результаты исследования. В лесозаготовительном производстве концепция бережливости может быть применена во всех этапах потока древесины: заготовка леса, переработка и распределение продукции. Следуя идеологии БП, сформулируем основные шаги в ее реализации: потери, оптимизация планирования, автоматизация и модернизация оборудования, управление качеством, экологическая ответственность, обучение персонала, логистика и управление запасами, мониторинг и анализ данных. Они могут рассматриваться как задачи, решение которых приводит к оптимизации динамики потока.

1. Определение всех видов потерь. При заготовке древесины можно выделить следующие основные категории потерь:

- времени: задержки из-за неэффективного планирования работ, простоев техники, плохой координации между звеньями цепочки;
- материалов: неправильная обработка деревьев, порча древесины из-за некачественного оборудования или ошибок операторов;
- энергии: избыточное потребление топлива техникой, использование неоптимальных маршрутов;
- труда: дублирование задач, нерациональное распределение обязанностей между работниками;
- экологические: вырубка деревьев без учета экологических последствий, повреждение окружающей среды.

Примером решения данной задачи является использование таких методик, как картирование потока созда-

ния ценности (Value Stream Mapping) для анализа текущих процессов и выявления областей для улучшения.

2. Оптимизация планирования. Эффективное планирование представляет собой ключевой аспект БП. При заготовке древесины оно включает:

- анализ местности: использование геоинформационных систем (ГИС) для определения оптимальных участков вырубki, минимизации воздействия на экосистему и сокращения расстояний перевозки;
- сезонное планирование: учет погодных условий для минимизации простоев и повреждений оборудования;
- координация работы бригад: синхронизация действий между операторами техники, рабочими и транспортными службами.

Данная задача решается посредством применения программного обеспечения для моделирования логистики, что позволяет оптимизировать маршруты доставки древесины, снижая расход топлива и время на транспортировку.

3. Автоматизация и модернизация оборудования. Использование современной техники и технологий помогает сократить потери и повысить производительность состоит в применении:

- машин с высокой точностью: современные харвестеры и форвардеры позволяют минимизировать отходы древесины и сократить время обработки;
- телеметрии и мониторинга: установка датчиков на технике для контроля состояния оборудования, прогнозирования поломок и своевременного обслуживания;
- автономные системы: использование БПЛА для предварительной разведки территории и определения оптимальных маршрутов.

В ходе решения данной задачи автоматизированные системы управления позволяют операторам техники получать данные о состоянии деревьев в реальном времени, что улучшает точность вырубki.

4. Управление качеством. В БП уделяется особое внимание качеству продукции. В случае заготовки древесины это означает:

- контроль качества древесины: проверка состояния деревьев перед вырубкой, чтобы исключить использование больных или поврежденных стволов;
- минимизация дефектов: обучение операторов правильным методам обработки древесины для предотвращения трещин, сколов и других повреждений;
- сортировка древесины: разделение заготовленной древесины по категориям (строительство, мебель, бумага и др.) уже на этапе заготовки.

Пример решения: внедрение мобильных станций сортировки на месте заготовки позволяет сразу классифицировать древесину, что сокращает время на последующую обработку.

5. Экологическая ответственность. БП предполагает минимизацию экологического воздействия:

- выборочные рубки: вместо сплошной вырубki применять методы выборочной заготовки, которые сохраняют экосистему;
- восстановление лесов: посадка новых деревьев на вырубленных участках для компенсации ущерба;

– сокращение углеродного следа: использование энергоэффективной техники и альтернативных источников энергии.

Примером решения является применение биотоплива для техники или электрических машин, что снижает выбросы CO₂.

6. Обучение персонала. Один из принципов БП – это вовлечение сотрудников в совершенствование потока, что включает:

- обучение методам БП: персонал должен понимать, как выявлять потери и предлагать решения;
- создание культуры постоянных улучшений (Kaizen): поощрение сотрудников к предложениям по оптимизации процессов;
- работа в команде: укрепление взаимодействия между различными звеньями цепочки заготовки древесины.

Одним из примеров решения данной задачи являются регулярные тренинги для операторов техники по использованию современных технологий и методов работы.

7. Логистика и управление запасами. Эффективная логистика играет важную роль в минимизации потерь:

- оптимизация маршрутов: использование алгоритмов для расчета кратчайших и наиболее экономичных путей доставки;
- управление запасами: минимизация объемов накопленной древесины на складах для снижения затрат на хранение;
- синхронизация процессов: обеспечение бесперебойной работы всех этапов цепочки от вырубki до транспортировки.

Пример решения: внедрение системы «точно в срок» (Just-in-Time) позволяет доставлять древесину на перерабатывающие предприятия сразу после заготовки, избегая лишних складских затрат.

8. Мониторинг и анализ данных. Для успешной реализации БП важно постоянно отслеживать ключевые показатели эффективности (KPI):

- производительность: количество заготовленной древесины за единицу времени;
- затраты: расходы на топливо, технику, рабочую силу;
- качество: процент брака или поврежденной древесины;
- экологические показатели: уровень воздействия на окружающую среду.

Для решения данной задачи используются цифровые платформы для сбора и анализа данных в реальном времени, что позволяет быстро реагировать на изменения и корректировать процессы.

Непрерывное улучшение динамики потока непосредственно связано с анализом его средней скорости. При построении средней скорости движения многошагового потока имеют место следующие представления. Формулу (1) можно записать в виде

$$T = W \times F, \quad (2)$$

где $F = \frac{1}{S}$ – среднее время выполнения одного заказа – функциональный параметр в системе потока и в общем случае переменный. Формула (2) показывает, что уве-

личению скорости соответствует уменьшение функционального времени одного заказа.

Средняя скорость выполнения заказа и функциональное время выполнения одного заказа образуют мультипликативно двойственную по умножению группу на множестве положительных рациональных чисел:

$$S \times F = 1, \quad (3)$$

При построении скорости заказа в системе потока следует различать внешнее время, общее для всего потока, и внутреннее функциональное время связности его элементов в единую динамическую структуру.

Внешнее и внутреннее времена дополняют друг друга, неся различную информационную нагрузку по отношению к системе: первое необходимо для характеристики функциональных параметров процессов в единицу времени (физического), а второе характеризует функциональное время связности элементов потока в единую глубоко интегрируемую структуру.

При кибернетическом подходе поток заказа можно представить в виде «черного» ящика с некоторым числом входов и выходов, в качестве которых выступают скорости поступления и выполнения заказа.

По числу входов и выходов скорости заказа поток можно квалифицировать следующим образом (рис. 1–4). Схема связующего потока с одной входной и одной выходной скоростью показана на рис. 1.

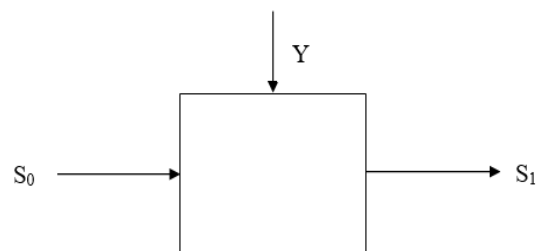


Рис. 1. Связующий поток с одним входом и одним выходом: Y – управление; S₀, S₁ – соответственно, скорости поступления и выполнения заказа

Функциональное время пребывания заказа в потоке равно

$$F_{01} = F_0 + F_1, \quad (4)$$

где

$$F_0 = \frac{1}{S_0}, \quad F_1 = \frac{1}{S_1}$$

и скорость заказа в связующем потоке определяется по формуле

$$S_{01} = \frac{1}{F_{01}}, \quad (5)$$

или

$$S_{01} = \frac{S_0 S_1}{S_0 + S_1},$$

среднее функциональное время заказа в потоке равно

$$F_c = \frac{1}{2} F_{01},$$

отклонение от которого показывает степень функциональной десинхронизации потока в целом.

На рис. 2 показана схема разделительного потока с одним входом и несколькими выходами заказа.

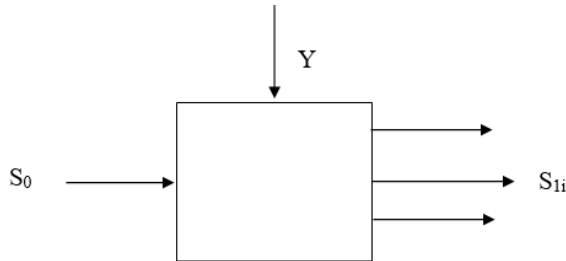


Рис. 2. Разделительный поток с одним входом и несколькими выходами: Y – управление, S_0 , S_{1i} – соответственно, входной и выходной заказы, $i = 1, 2, \dots, n$

Скорость разделительного потока определяется по формуле

$$S_{01} = \frac{1}{F_0 + F_1},$$

или

$$S_{01} = \frac{1}{\frac{1}{S_0} + \frac{n}{\sum_{i=1}^n S_{1ii}}}, \quad (6)$$

или

$$S_{01} = \frac{(S_0 \sum_{i=1}^n S_{1ii})}{(n S_0 + \sum_{i=1}^n S_{1ii})}.$$

На рис. 3 показана схема смесительного потока с несколькими входами и одним выходом.

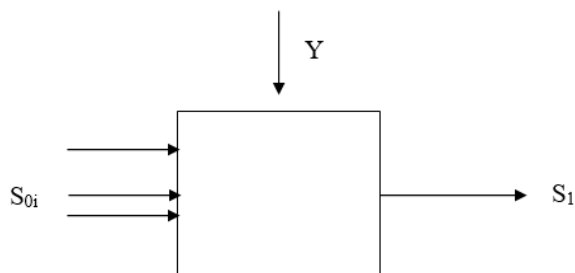


Рис. 3. Смесительный поток с несколькими входами и одним выходом: Y – управление, S_{0i} , S_1 – соответственно, входной и выходной заказы, $i = 1, 2, \dots, n$

Скорость смесительного потока определяется по формуле

$$S_{01} = \frac{1}{F_0 + F_1},$$

или

$$S_{01} = \frac{1}{\frac{1}{S_1} + \frac{n}{\sum_{i=1}^n S_{01i}}} \quad (7)$$

или

$$S_{01} = \frac{S_1 \sum_{i=1}^n S_{01i}}{n S_1 + \sum_{i=1}^n \frac{1}{S_{01i}}}.$$

На рис. 4 показана схема сложного потока с несколькими входами и несколькими выходами.

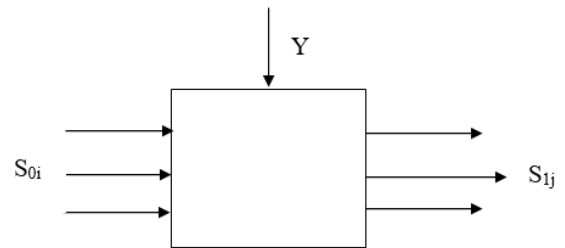


Рис. 4. Сложный поток с несколькими входами и несколькими выходами: Y – управление, S_{0i} , S_{1j} – соответственно, входные и выходные заказы, $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, k$

Скорость сложного потока определяется по формуле

$$S_{01} = \frac{1}{\left[\frac{n}{\sum_{i=1}^n S_{0i} + k \sum_{j=1}^k S_{1j}} \right]}, \quad j = 1, 2, \dots, k; \quad (8)$$

$$i = 1, 2, \dots, n.$$

или

$$S_{01} = \frac{\sum_{i=1}^n S_{0i} \sum_{j=1}^k S_{1j}}{k \sum_{i=1}^n S_{0i} + n \sum_{j=1}^k S_{1j}}.$$

На основании представленных четырех типов потоков формируются многоступенчатые функционально связанные процессы БП.

Заключение. Процесс постоянного улучшения, оптимизации и совершенствования является необходимым условием роста прибыли, снижения расходов и повышения удовлетворенности и доверия клиентов.

Концептуальный подход в БП ставит множество функционально связанных практических задач, решение которых способствует повышению эффективности лесной отрасли. В то же время оно может столкнуться с проблемами внедрения: сопротивление изменениям, необходимость обучения, инвестиции в технологии.

Наряду с основным концептуальным принципом оптимизации в БП, как минимальные потери и совершенствование, можно сформулировать дополняющий их принцип: минимальное функциональное время связности процессов, что приводит к максимальной скорости потока.

Литература

References

1. Андреев В.Н., Герасимов Ю.Ю. Принятие оптимальных решений: теория и применение в лесном комплексе. Йоэнсуу: Университет Йоэнсуу, 1999. 200 с.
2. Базаров С.М., Беленький Ю.И., Соловьев А.Н. Системно-синергетический анализ технологий лесозаготовительного производства. СПб: Изд-во Санкт-Петербург. гос. лесотехнич. ун-та, 2014. 96 с.
3. Беллман Р., Калаба Р. Динамическое программирование и современная теория управления. М.: Наука, 1969. 119 с.
4. Беленький Ю.И., Иванов В.А., Соколова В.А., Попова А.В. Системная связность многооперационных процессов в лесном комплексе // Системы. Методы. Технологии. 2024. № 4(64). С. 43–49.
5. Болтянский В.Г. Математические методы оптимального управления. М.: Наука, 1969. 408 с.
6. Вентцель Е.С. Элементы динамического программирования. М.: Наука, 1964. 176 с.
7. Вумек Дж.П., Джонс Д.Т. Бережливое производство: как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании. М.: Альпина Паблишер, 2011. 400 с.
8. Голоктеев К., Матвеев И. Управление производством: инструменты, которые работают. СПб.: Питер, 2008. 256 с.
9. Гуров С.В. Теория системного анализа и принятия решений. СПб.: Изд-во Санкт-Петербург. гос. лесотехнич. ун-та, 2008. 144 с.
10. Джордж Л.М. Бережливое производство + шесть сигм: комбинируя качество шести сигм со скоростью бережливого производства. М.: Альпина Паблишер, 2007. 288 с.
11. Думлер С.А. Управление производством и кибернетика. М.: Машиностроение, 1969. 420 с.
12. Емельянов А.А., Кукушкин А.А., Анфилов В.С. Системный анализ в управлении. М.: Финансы и статистика, 2007. 368 с.
13. Ивашинникова А.В., Нямцу А.М., Шуплецова В.Н. Бережливое производство в здравоохранении. М.: РИЦ Айвенкс, 2022. 180 с.
14. Лихвойнен А.В., Филиппович А.В., Юхимец В.И., Александрова В.С., Первухина Е.В. Бережливое производство: понятие, принципы, методы и опыт внедрения // Вестн. Алтайской академии экономики и права. 2021. № 9-2. С. 154–159.
15. Вэйдер М. Инструменты бережливого производства: мини-руководство по внедрению методик бережливого производства. М.: Альпина Бизнес Букс, 2007. 160 с.
16. Моисеев Н.Н. Математические методы системного анализа. М.: Наука, 1981. 487 с.
17. Оптнер С.Л. Системный анализ для решения проблем бизнеса и промышленности. М.: Концепт, 2006. 206 с.
18. Лянь-Цэнь Ф., Чу-Сен В. Дискретный принцип максимума. М.: Мир, 1967. 180 с.
19. Фролов В.П. Внедрение технологии бережливого производства в управление производством и организацию рабочих мест. М.: ЛитРес, 2021. 79 с.
20. Lasalle J.P. Time Optimal Control Systems // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 1959. Vol. 45 (4). P. 573–577. DOI: 10.1073/pnas.45.4.573
21. Mesjasz J. Towards a typology of systems approaches // System Research and Behavioral Science. 2007. Vol. 24, № 5. P. 523–536.
22. Skyttner L. General Systems Theory: Problems, Perspectives, Practice. Singapore: World Scientific, 2001. 472 p.
23. Taha H. Operations Research: An Introduction. New York: MacMillan Publishing Company, 1987. 849 p.
24. Womack J.P., Jones D.T. Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation. New York: Simon and Schuster, 2003. 400 p.
1. Andreev V.N., Gerasimov Y.Yu. Optimal Decision Making: Theory and Application in the Forest Sector. Joensuu: University of Joensuu, 1999. 200 p.
2. Bazarov S.M., Belenky Y.I., Solovyov A.N. System-Synergetic Analysis of Logging Technologies. St. Petersburg: St. Petersburg State Forest Technical University, 2014. 96 p.
3. Bellman R., Kalaba R. Dynamic Programming and Modern Control Theory. Moscow: Nauka, 1969. 119 p.
4. Belenky Y.I., Ivanov V.A., Sokolova V.A., Popova A.V. System Connectivity of Multi-Operational Processes in the Forest Sector // Systems. Methods. Technologies. 2024. № 4(64). P. 43–49.
5. Boltyansky V.G. Mathematical Methods of Optimal Control. Moscow: Nauka, 1969. 408 p.
6. Ventsel E.S. Elements of Dynamic Programming. Moscow: Nauka, 1964. 176 p.
7. Womack J.P., Jones D.T. Lean Production: How to Eliminate Waste and Prosper Your Company. Moscow: Alpina Publisher, 2011. 400 p.
8. Golokteev K., Matveev I. Production Management: Tools That Work. St. Petersburg: Piter, 2008. 256 p.
9. Gurov S.V. Theory of Systems Analysis and Decision Making. St. Petersburg: St. Petersburg State Forest Technical University, 2008. 144 p.
10. George L.M. Lean Six Sigma: Combining the Quality of Six Sigma with the Speed of Lean Production. Moscow: Alpina Publisher, 2007. 288 p.
11. Dumler S.A. Production Management and Cybernetics. Moscow: Machinery, 1969. 420 p.
12. Emelyanov A.A., Kukushkin A.A., Anfilov V.S. Systems Analysis in Management. Moscow: Finance and Statistics, 2007. 368 p.
13. Ivashinnikova A.V., Nyamtsu A.M., Shupletsova V.N. Lean Production in Healthcare. Moscow: RIC Aivenks, 2022. 180 p.
14. Likhvoynen A.V., Filippovich A.V., Yukhimets V.I., Alexandrova V.S., Pervukhina E.V. Lean Production: Concepts, Principles, Methods and Implementation Experience // Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law. 2021. № 9-2. P. 154–159.
15. Weider M. Lean Production Tools: A Mini-Guide for Implementing Lean Methodologies. Moscow: Alpina Business Books, 2007. 160 p.
16. Moiseev N.N. Mathematical Methods of Systems Analysis. Moscow: Nauka, 1981. 487 p.
17. Optner S.L. Systems Analysis for Solving Business and Industry Problems. Moscow: Koncept, 2006. 206 p.
18. Lian-Tsen F., Chu-Sen W. Discrete Maximum Principle. Moscow: Mir, 1967. 180 p.
19. Frolov V.P. Implementation of Lean Production Technologies in Production Management and Workplace Organization. Moscow: LitRes, 2021. 79 p.
20. Lasalle J.P. The Time Optimal Control Systems // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 1959. Vol. 45. P. 573–577. DOI: 10.1073/pnas.45.4.573
21. Mesjasz J. Towards a Typology of Systems Approaches // System Research and Behavioral Science. 2007. Vol. 24, № 5. P. 523–536.
22. Skyttner L. General Systems Theory: Problems, Perspective, Practice. Singapore: World Scientific, 2001. 472 p.
23. Taha H.A. Operations Research: An Introduction. New York: MacMillan Publishing Company, 1987. 849 p.
24. Womack J.P., Jones D.T. Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation. New York: Simon and Schuster, 2003. 400 p.