

Научная статья

УДК 621: 658.511

Вестник МГТУ «Станкин». 2025. № 1 (72). С. 73–82.

Vestnik MSUT “Stankin”. 2025. No. 1 (72). P. 73–82.

А.С. Краско, А.В. Кислова ✉

РГУ МИРЭА

✉ Автор для корреспонденции

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ТИПА «КОРПУС» ЗА СЧЕТ НОВОГО ПОДХОДА К ПЛАНИРОВКЕ ОБОРУДОВАНИЯ ГИБКИХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ УЧАСТКОВ И ОПТИМИЗАЦИИ РАСПОЛОЖЕНИЯ СТОЯНОК ТРАНСПОРТНО-РАЗГРУЗОЧНЫХ СРЕДСТВ

### Аннотация

В данной работе приведено исследование влияния места стоянки транспортно-загрузочного средства на суммарную длительность транспортных операций в условиях гибких автоматизированных участков при кассетном виде обслуживания.

На основании аналитического определения количества основного технологического оборудования, а также транспортно-загрузочных устройств была разработана планировка оборудования гибкого автоматизированного участка механической обработки деталей типа «корпус». На основании полученного гибкого автоматизированного участка и разработанных технологических процессов механической обработки деталей типа «корпус» была построена имитационная модель (дискретно-событийная модель с применением агентного метода) функционирования гибкого автоматизированного участка в программной среде AnyLogic 8 Personal Learning Edition 8.9.2.

В результате имитационного моделирования функционирования гибкого автоматизированного участка механической обработки деталей типа «корпус» в программной среде AnyLogic 8 Personal Learning Edition 8.9.2 были получены зависимости суммарной длительности транспортных операций от места стоянки транспортно-загрузочного средства. Было определено рациональное место стоянки транспортно-загрузочного средства, что обеспечило сокращение времени выполнения транспортных операций на 57,2 минуты.

На основании представленных результатов были получены аналитические зависимости, позволяющие определить оптимальное место стоянки транспортно-загрузочного средства без применения имитационного моделирования, что позволяет сократить затраты времени на принятие проектно-технологических решений в процессе проектирования гибких автоматизированных участков.

На основании проведенного исследования предложена методика аналитического определения оптимального места стоянки транспортно-загрузочного средства по критерию минимальных затрат времени на транспортные операции. В рассматриваемом примере было достигнуто сокращение времени выполнения транспортных операций еще на 41,5 минуты.

На основании разработанной методики предложен подход к определению оптимальной планировки оборудования участка по критерию минимального суммарного времени транспортных операций.

**Ключевые слова:** имитационное моделирование, гибкие автоматизированные участки, ГПС, транспортные операции, планировка оборудования, изделие.

**Для цитирования:** Краско А.С. Кислова А.В. Методы и средства повышения производительности механической обработки деталей типа «корпус» за счет нового подхода к планировке оборудования гибких автоматизированных участков и оптимизации расположения стоянок транспортно-разгрузочных средств // Вестник МГТУ «Станкин». – 2025. – № 1 (72). – С. 73–82.

*A.S. Krasko, A.V. Kislova* ✉

MIREA – Russian Technological University

✉ Corresponding author

## METHODS AND MEANS OF INCREASING THE PRODUCTIVITY OF MACHINING PARTS OF THE “BODY” TYPE DUE TO A NEW APPROACH TO THE LAYOUT OF EQUIPMENT FOR FLEXIBLE AUTOMATED SECTIONS AND OPTIMIZING THE LOCATION OF PARKING FACILITIES

### Abstract

This paper presents a study of the influence of the parking location of a transport and loading facility on the total duration of transport operations in flexible automated areas with a cassette type of service.

Based on the analytical determination of the number of main technological equipment, as well as transport and loading devices, the equipment layout of a flexible automated section for machining parts of the “body” type was developed. Based on the obtained flexible automated section and the developed technological processes of mechanical processing of body-type parts, a simulation model (discrete event model using the agent method) of the functioning of a flexible automated section in the AnyLogic 8 Personal Learning Edition 8.9.2 software environment was built.

As a result of simulation modeling of the functioning of a flexible automated section for machining parts of the “body” type in the AnyLogic 8 Personal Learning Edition 8.9.2 software environment, the dependencies of the total duration of transport operations on the parking location of the transport and loading facility were obtained. A rational parking location for the transport and loading facility was determined, which reduced the time required to perform transport operations by 57.2 minutes.

Based on the presented results, analytical dependencies were obtained that make it possible to determine the optimal parking location of a transport and loading facility without using simulation modeling, which reduces the time spent on making design and technological decisions in the process of designing flexible automated sites.

Based on the conducted research, a methodology is proposed for the analytical determination of the optimal parking location of a transport and loading facility according to the criterion of minimum time spent on transport operations. In the example under consideration, a reduction in the execution time of transport operations was achieved by another 41.5 minutes.

Based on the developed methodology, an approach is proposed to determine the optimal layout of the site equipment according to the criterion of the minimum total time of transport operations.

**Keywords:** simulation modeling, flexible automated sites, GPS, transport operations, equipment layout, product

**For citation:** Krasko A.S., Kislova A.V. Methods and means of increasing the productivity of machining parts of the “body” type due to a new approach to the layout of equipment for flexible automated sections and optimizing the location of parking facilities. *Vestnik MSUT “Stankin”*. 2025. No 1 (72). P. 73–82. (In Russian)

### Введение

Одной из основных тенденцией развития современного машиностроительного производства является повышение производительности выпуска готовых изделий путем создания и внедрения гибких автоматизированных участков (ГАУ), характеризующихся способностью оперативно перенастраиваться на выпуск новой продукции [1]. Организующим и объединяющим элементом ГАУ выступает автоматизированная транспортно-склад-

ская система (АТСС), параметры которой оказывают решающее влияние на технико-экономические показатели функционирования всего ГАУ [1-5].

Важным условием уменьшения объёмов незавершённого производства, сокращения технологических циклов, а, следовательно, и повышения производительности выпуска изделий является сокращение времени транспортирования изделий, на которое значительное влияние оказывает выбор места стоянки транспортно-загрузочного средства (ТЗС) [6-10].

Необходимая информация для оценки влияния работы АТСС на длительность производственного цикла изделий может быть получена в результате анализа потоков материалов для фиксированных значений параметров ГАУ и заданного распределения деталей по транспортным партиям. При этом обязательно должны рассматриваться динамические закономерности работы проектируемой системы, взаимосвязи её подсистем, процессов обработки и возможности их транспортировки [7]. Все эти вопросы сложны для полного описания и исследования с использованием аналитических методов проектирования. В связи с этим основным инструментом проектирования таких сложных систем, как АТСС ГАУ является имитационное моделирование [8-10].

Для моделирования работы АТСС ГАУ использовались детерминированная, динамическая, дискретно-событийная модель. Построение такой модели представляется возможным в программной среде AnyLogic.

### Моделирование алгоритма функционирования ГАУ в среде AnyLogic

С целью определения оптимального расположения места стоянки ТЗС было выполнено имитационное моделирование функционирования ГАУ механической обработки деталей типа «Крышка аксиально-плунжерного насоса». Входными данными для моделирования являются: чертеж детали с указанием размеров всех исполнений, маршрутные технологические процессы изготовления деталей с указанием трудоёмкости обработки для каждой операции, планировка участка, объёмы выпуска деталей ( $N_T = 36$  деталей каждого исполнения).

Для изготовления указанных деталей применяются семь групп оборудования: обрабатывающий центр с ЧПУ модели CLX-450 TC; промывочное

оборудование: конвейерная моечная машина АПУ 1000 КТ 1000x1000x5800; оборудование для контроля и маркирования: контрольно-измерительная машина 3Д AZIMUTH и лазерный маркер Wattsan UV TT; оборудование для термической обработки: порталная печь; оборудование для нанесения гальванических покрытий: автоматическая гальваническая линия.

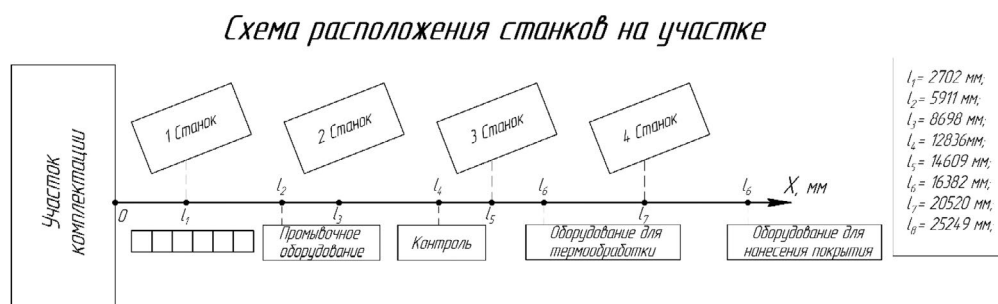
Общее количество станков составляет 8 единиц оборудования, средний коэффициент загрузки 0,873. Станки обслуживаются одним промышленным роботом (ПР), который перемещается по рельсам со скоростью 60 м/мин. Графическая модель ГАУ представлена на *рисунке 1*, на котором также указаны варианты расположения мест стоянки ПР.

В программной среде AnyLogic для моделирования станков используются точечные узлы, и для моделирования порталных машин промывки и оборудования термообработки используется конвейер, чтобы учесть перемещения кассет с деталями в ходе обработки [4].

Заготовки деталей «Крышка 1», «Крышка 2» и «Крышка 3», транспортируются в кассетах в количестве: 6 шт, 4 шт и 2 шт соответственно (*рис. 2*). Для обработки деталей каждого из исполнений используется 6 кассет для изделий «Крышка 1», 9 кассет для изделий «Крышка 2» и 18 кассет для изделий «Крышка 3».

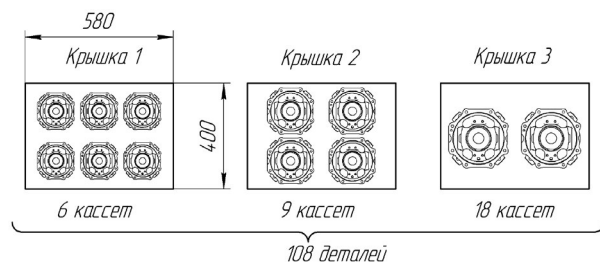
Для промывки детали поступают на мойку в кассетах.

В начале смены ПР заполняет склад, поочерёдно забирая кассеты с заготовками с участка комплектации. После загрузки склада ПР транспортирует кассеты к станкам по ходу технологического процесса. Когда кассета завершает свой производственный цикл, ПР перемещает кассету с готовыми деталями на склад. По окончании обработки всех кассет, загруженных на склад, ПР разгружает склад, перемещая кассеты на участок комплектации.



**Рис. 1.** Графическая модель ГАУ со схемой расположения мест стоянки ТЗС

Разработана авторами на основании аналитического определения числа основного технологического оборудования, приведенного в источнике [5]



**Рис. 2. Расположение деталей в кассете**

*Разработано авторами на основании габаритных размеров заготовок и кассеты*

Исходя из указанного алгоритма функционирования ГАУ разработана дискретно-событийная модель в среде AnyLogic, представленная на рисунке 3.

Моделирование процесса начинается с участка комплектации. Заготовки на участке комплектации устанавливаются в кассеты. Для моделирования работы участка комплектации воспользуемся блоком **Source**, с его помощью создаются кассеты, с установленными заготовками, в указанном месте, в данном случае в ранее созданном прямоугольном узле участка комплектации.

После того как кассеты с заготовками созданы блоком **Source**, ПР забирает их поочередно и загружает на склад с заготовками, который представлен в виде стеллажа. Блок, позволяющий провести моделирование данного процесса – **rackStore** [11, 12].

Далее размещаем блок **Delay**, задающий задержку перед следующим действием. Он необходим для проверки корректности выполнения предыдущей операции перед началом следующей, а также для корректной работы программы.

Далее для определения производственного цикла обработки кассет необходимо ввести блок **timeMeasureStart**, который выступает началом отсчёта времени обработки деталей [4].

Так как на ГАУ механической обработке подвергается три вида деталей, установленных соответственно в три вида кассет, то необходимо провести

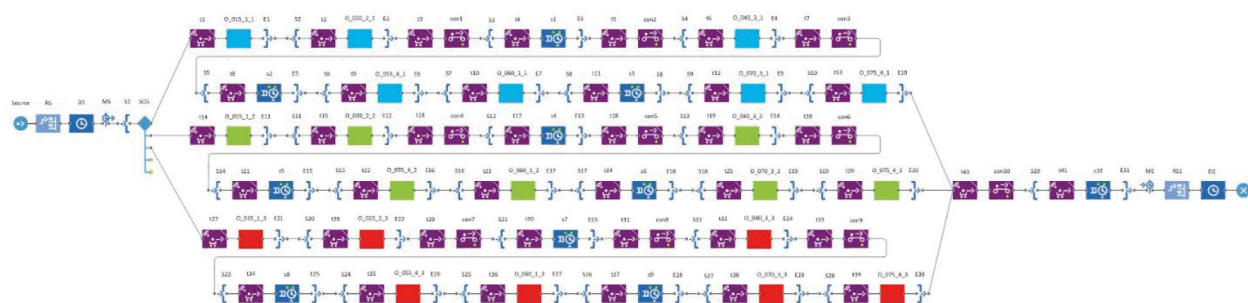
моделирование пути каждой из видов кассет. Для этого в логическую цепочку необходимо добавить блок **SelectOutput5** [6].

Моделирование технологического процесса обработки осуществлялось с помощью использования блоков **MoveByTransporter**, которые имитируют передвижение ТЗС [13]. Так как в кассете первого типа находится 6 деталей, то проведём моделирование, согласно которому ПР перемещает кассету с заготовками на станок, устанавливает первую деталь из кассеты, после чего отправляется на место стоянки ожидать окончания обработки первой детали из кассеты. По окончании обработки, ТЗС перемещается к станку и задерживается там на время, необходимое для снятия обработанной заготовки и установки следующей.

Для моделирования обработки на станке используется блок **Service**. В его свойствах указывается набор ресурсов, с помощью которых выполняется операция, их количество, а также указывается время задержки, которое будет соответствовать времени обработки детали на данном станке.

Для моделирования обработки деталей на портальных машинах, где детали поступают на операцию в кассетах и производится обработка деталей также в кассетах, использован блок **Convey**, для которого необходимо задать начальный конвейер, смещение от начала, конечный конвейер и конечное смещение. Время обработки детали на конвейере регламентируется скоростью движения конвейера в свойствах самого конвейера [14].

Также для моделирования необходимо использовать элементы **RestrictedAreaStart** и **RestrictedAreaEnd**. Первый указывает на то, что после этого элемента в логике процесса может находиться заданное число агентов. Данный элемент работает в паре со вторым, при этом второй должен иметь в паре только один элемент **RestrictedAreaStart** [15].



**Рис. 3. Дискретно-событийная модель функционирования ГАУ**

*Разработана авторами на основании предложенного алгоритма функционирования ГАУ и методики, приведенной в источнике [4]*

Далее для определения производственного цикла обработки необходимо вынести блок **timeMeasureEnd**, который выступает окончанием отсчёта времени обработки деталей.

По завершении технологического процесса ТЗС загружает кассеты с обработанными деталями обратно на стеллаж (аналогично **rackStore**), после чего моделирование заканчивается блоком **Delay** с временем задержки 1 год с последующим блоком **sink**, который уничтожает агенты [15–17].

### Анализ полученных результатов и разработка рекомендаций по выбору места стоянки ТЗС

В процессе выполнения имитационного эксперимента исследовалась зависимость суммарного времени выполнения транспортных операций от места стоянки ТЗС.

Место стоянки ТЗС представлен как определённый участок, находящийся на транспортном пути, предназначенный для размещения ТЗС в пределах отведённой площади, в том случае, если ТЗС не занято (т.е. не выполняет функцию транспортирования).

Для проведения эксперимента установлены восемь вариантов мест стоянки ТЗС, находящихся на минимальном расстоянии от каждого из оборудования. Введём систему координат ОХ, за начало которой примем точку отсчёта на границе участка комплектации (см. рис. 1).

Имитационный эксперимент повторялся восемь раз с изменением места стоянки ТЗС. По результатам моделирования были получены данные для

тельности обработки всех деталей, пройденного пути ТЗС и времени обработки каждой кассеты с заготовками.

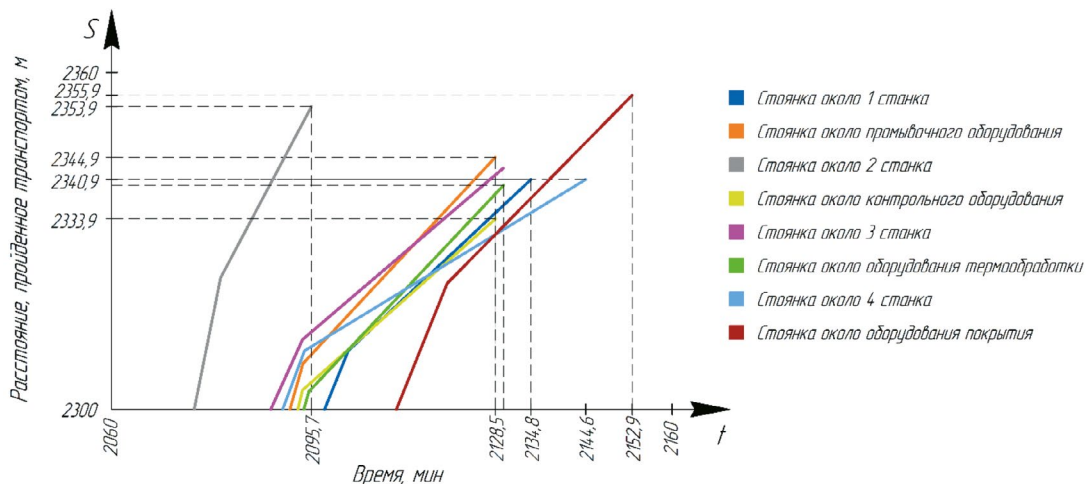
Для выявления зависимости расположения места стоянки ТЗС от длительности производственного цикла согласно результатам имитационного моделирования, был получен график зависимости времени от расстояния, пройденного ТЗС (рис. 4).

Из графика на рисунке 4 видно, что при расположении места стоянки ТЗС у оборудования нанесения покрытия производственный цикл изготовления изделий принимает наибольшее значение. В то же время, при расположении места стоянки около 2-го станка даёт наилучшие результаты по трудоёмкости изготовления всей партии деталей.

По результатам моделирования составим список мест стоянки ТЗС по трудоёмкости изготовления деталей от меньшего значения к большему:

1. Стоянка около 2 станка – 2095,653 мин;
2. Стоянка около промывочного оборудования – 2128,476 мин;
3. Стоянка около контрольного оборудования – 2128,503 мин;
4. Стоянка около 3 станка – 2129,85 мин;
5. Стоянка около оборудования термообработки – 2129,92 мин;
6. Стоянка около 1 станка – 2134,814 мин;
7. Стоянка около 4 станка – 2144,575 мин;
8. Стоянка около оборудования покрытия – 2152,858 мин.

Так как имитационное моделирование занимает значительное время при проектировании ГАУ, следует получить аналитическое решение задачи опре-



**Рис. 4.** Расстояние, пройденное ТЗС в зависимости от выбранного места стоянки  
Графики построены на основе данных, полученных в результате имитационных экспериментов  
в AnyLogic 8 Personal Learning Edition 8.9.2

деления оптимального места стоянки ТЗС на основании результатов проведенного моделирования.

При работе ТЗС в ГАУ наибольшей загруженностью обладают места стоянки рядом с тем оборудованием, заявки на которые поступают чаще остальных. Поэтому целесообразно ввести коэффициент интенсивности поступления заявок на  $i$ -е рабочее место. Интенсивность поступления заявок зависит от числа заявок, выдаваемых оборудованием, а также от среднего штучного времени обработки заготовки на данном оборудовании:

$$k_i = \frac{n_i}{T_{шт.сп.i}}, \quad (1)$$

где  $n_i$  – число заявок для  $i$ -го рабочего места;  $T_{шт.сп.i}$  – среднее штучное время обработки заготовки на  $i$ -ом рабочем месте.

Для определения числа заявок, поступающих на транспортировку, определены следующие зависимости:

- при обработке заготовок по одной штучке:

$$n = c \cdot \sum (n_{кас.j} \cdot (n_{дет.j} + 1)), \quad (2)$$

где  $n_{дет.j}$  – число деталей в  $j$ -й кассете;  $n_{кас.j}$  – число кассет  $j$ -го типа;  $c$  – количество операций в ТП, выполняемых на станке;

- при параллельной обработке всех деталей в кассете (промывка):

$$n = 2n_{кас} \cdot c, \quad (3)$$

где  $n_{кас}$  – число кассет;  $c$  – количество операций в ТП, выполняемых на станке.

Расчет коэффициентов интенсивности поступления заявок представлен в виде *таблицы 1*.

Оборудование с наибольшим коэффициентом интенсивности поступления заявок будет чаще остальных вызывать ТЗС, поэтому целесообразней располагать место стоянки транспорта рядом с ним. Но так как мы рассматриваем работу всего участка, то необходимо учитывать коэффициент интенсивности каждого из станков, таким образом, необходимо определить место стоянки, которое будет являться суперпозицией для всего оборудования.

Тогда для определения оптимального места расположения стоянки ТЗС используем следующую формулу:

$$P = \sum k_i \cdot (|l_i - l_{см}|) \rightarrow \min, \quad (4)$$

где  $P$  – коэффициент транспортной загруженности;  $k_i$  – коэффициент интенсивности поступления заявок от  $i$ -ого рабочего места;  $l_i$  – расстояние от начала отсчета до  $i$ -ого рабочего места;  $l_{см}$  – расстояние от начала отсчета до места стоянки.

Результаты расчета коэффициента транспортной загруженности представлены в *таблице 2*.

Исходя из данных, представленных в *таблице 2*, можно сделать вывод о том, что результаты аналитического расчета совпадают с результатами имитационного эксперимента. Следовательно, представленный критерий определения места стоянки ТЗС справедлив для поиска оптимального места расположения с целью минимизации производственного цикла изготовления изделий.

Таблица 1

Коэффициенты интенсивности поступления заявок

Оборудование	$T_{шт.сп.}$ , мин	$N_j$ , шт.	$n_{кас}$ , шт.	$c$ , шт.	$n$ , заявок	$k$
1 станок	6,35	108	33	2	282	1,23
Промывочное оборудование	1,76	108	33	3	198	3,13
2 Станок	12,93	108	33	1	141	0,30
Контрольное оборудование	3,87	108	33	3	198	1,42
3 Станок	6,12	108	33	2	282	1,28
Оборудование для термообработки	12,50	108	33	1	66	0,15
4 Станок	6,18	108	33	2	282	1,27
Оборудование для покрытия	12,50	108	33	1	66	0,15

Таблица составлена на основе данных, полученных в результате имитационных экспериментов в AnyLogic 8 Personal Learning Edition 8.9.2

Таблица 2

## Результаты расчета коэффициент транспортной загруженности

Оборудование	1 Станок	Промывочное оборудование	2 Станок	Контрольное оборудование	3 Станок	Оборудование термообработки	4 Станок	Оборудование покрытия	P
<i>k</i>	1,23	3,13	0,30	1,42	1,28	0,15	1,27	0,15	-
Расстояние до									
1 станка, м	0	3,21	5,99	10,13	11,91	13,68	17,82	22,55	69,42
промывочного оборудования, м	3,21	0	2,78	6,93	8,69	10,47	14,61	19,34	48,69
2 станка, м	5,99	2,79	0	4,14	5,91	7,68	11,82	16,55	48,11
контрольного оборудования, м	10,13	6,93	4,14	0	1,77	3,55	7,68	12,41	49,75
3 станка, м	11,91	8,69	5,91	1,77	0	1,77	5,91	10,64	55,50
оборудования термообработки, м	13,68	10,47	7,68	3,55	1,77	0	4,14	8,87	65,79
4 станка, м	17,818	14,61	11,82	7,68	5,91	4,14	0	4,73	91,01
оборудования покрытия, м	22,55	19,34	16,55	12,41	10,64	8,87	4,73	0	131,84

Таблица составлена на основе данных, полученных в результате имитационных экспериментов в AnyLogic 8 Personal Learning Edition 8.9.2

Исходя из полученных выводов, можно составить алгоритм действий для определения оптимального места расположения стоянки ТЗС для ГАУ при кассетном виде обслуживания (рис. 5).

### Оптимизация планировки ГАУ с учетом коэффициента транспортной загруженности

В том случае, если выбор оптимального места стоянки ТЗС производится на этапе разработки компоновочно-планировочных решений ГАУ, то возможно определить расположение оборудования с целью повышения производительности выпуска готовых изделий за счёт сокращения времени на транспортировку.

Так как место стоянки ТЗС необходимо выбирать рядом с тем оборудованием, которое обладает наибольшим коэффициентом интенсивности поступления заявок на транспортировку, то место стоянки будет находиться рядом с промывочным оборудованием ( $k = 3,125$ ). Далее с правой и с левой стороны целесообразно расположить оборудование, коэффициенты интенсивности поступления заявок, на которые будет меньше, чем на промывочное оборудование, но больше, чем на все остальные рабочие места. Таким образом рядом с промывочным оборудованием располагается контрольное оборудование ( $k = 1,422$ ) и 3-й станок ( $k = 1,281$ ).

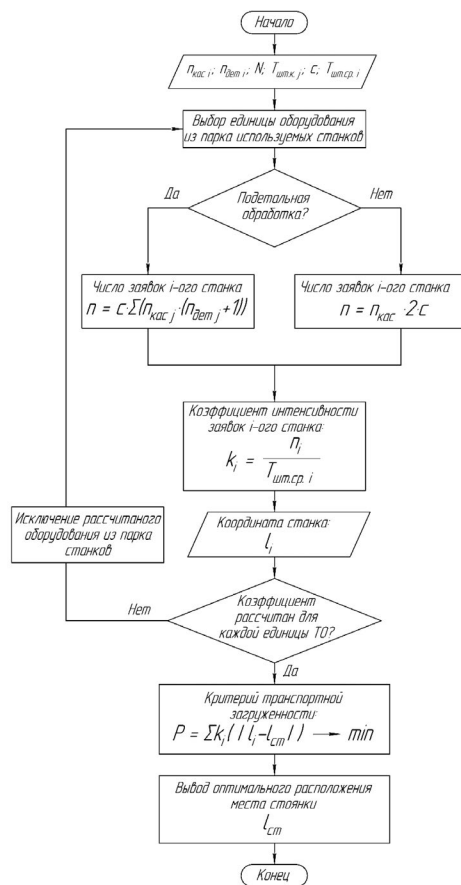
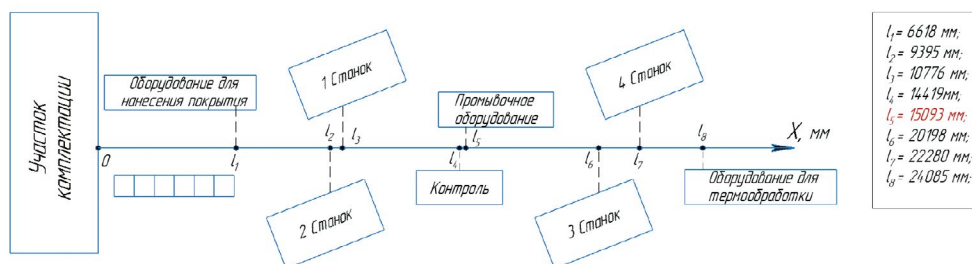


Рис. 5. Алгоритм определения оптимального расположения места стоянки ТЗС

Алгоритм составлен авторами на основе данных, полученных в результате формализации методики определения оптимального расположения места стоянки ТЗС



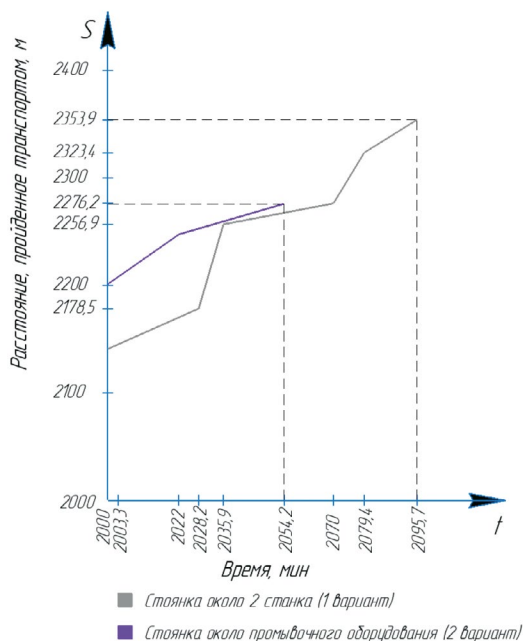
**Рис. 6. Оптимизированная планировка расположения оборудования на участке**  
Планировка разработана на основе данных, полученных в результате имитационных экспериментов в AnyLogic 8 Personal Learning Edition 8.9.2

По описанному принципу изменим планировку оборудования, представленную на рисунке 1 (рис. 6). Для измененной планировки определим коэффициент транспортной загрузки:

$$P = 0,147 \cdot (|6618 - 15093|) + 0,303 (|9395 - 15093|) + 1,234 (|10776 - 15093|) + \\ + 1,422 \cdot (|14419 - 15093|) + 3,125 \cdot (|15093 - 15093|) + 1,281 \cdot (|20198 - 15093|) + \\ + 1,269 \cdot (|22280 - 15093|) + 0,147 \cdot (|24085 - 15093|) = 26239,56 \frac{\text{ММ} \times \text{ШТ}}{\text{МИН}}$$

Для сравнения результатов до и после проведения перепланировки было проведено имитационное моделирование и построены графики, представленные на рисунке 7.

Как видно из полученных данных, измененная планировка оборудования позволяет сократить время на транспортировку изделий на 41,5 минут за весь период моделирования.



**Рис. 7. Графики суммарного перемещения ТЗС в зависимости от места стоянки**

Графики построены на основе данных, полученных в результате имитационных экспериментов в AnyLogic 8 Personal Learning Edition 8.9.2

## Заключение

Полученная методика определения оптимального места стоянки ТЗС позволяет получить проектное решение ГАУ с минимальным суммарным временем выполнения транспортных операций, что повышает производительность выпуска готовых изделий. В частности, при оптимизации расположения оборудования на рассматриваемом участке было достигнуто сокращение времени транспортных операций на 41,5 минут.

Помимо этого, применение методики позволяет избежать значительных потерь времени на имитационное моделирование функционирования ГАУ.

Использование коэффициента транспортной загрузки позволяет решить задачу оптимизации планировки рабочих места, в частности, технологического оборудования по критерию минимальной суммарной мощности грузопотоков на ГАУ.

## Библиографический список

1. Карпов Ю.Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 8 [Текст]: учебник / Ю.Г. Карпов. – Санкт-Петербург, 2017. – 400 с.
2. Киселева М. В. Имитационное моделирование систем в среде AnyLogic: учебное пособие. – Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2009. – 88 с.
3. Олейникова С.А. Моделирование: учебное пособие / С.А. Олейникова; ФГБОУ «Воронежский



государственный технический университет». – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2020. – 127 с.

4. Ковалев А.А., Краско А.С., Зуев В.В. Имитационное моделирование работы технологического комплекса в программной среде AnyLogic: Учебное пособие / А.А. Ковалев, А.С. Краско, В.В. Зуев. – М.: Издательство «Спутник+», 2021. – 157 с.

5. Шишмарёв В. Ю. Организация и планирование автоматизированных производств: учебник для среднего профессионального образования / В.Ю. Шишмарёв. – 2-е изд. – М.: Юрайт, 2025. – 318 с.

6. Koulinas, G.K., Paraschos, P.D. & Koulouriotis, D.E. A machine-learning framework for explainable knowledge mining and production, maintenance, and quality control optimization in flexible circular manufacturing systems. *Flex Serv Manuf J* 36, 737–759 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10696-024-09537-x>

7. Боев В.Д. Компьютерное моделирование систем: учебное пособие для среднего профессионального образования. – М.: Юрайт, 2019. – 253.

8. Албагачиев А.Ю., Краско А.С. Модель загрузки транспортно-загрузочного средства гибкой производственной системы // Проблемы машиностроения и надёжности машин. – 2019. – № 4. – с.77-88.

9. Филин М.А., Краско А.С. Определение оптимальных параметров обслуживания заготовок при имитационном моделировании автоматизированных технологических комплексов // Главный механик. 2022. – Том 19. – № 5. – С. 321–331.

10. Евтюхина В.В. Организационные резервы сокращения длительности производственного цикла на основе реализации принципов «Бережливого производства» на отечественных предприятиях // ЭКОНОМИНФО. – 2008. – № 9.

11. Антонова И.И. Бережливое производство: системный подход к его внедрению на предприятиях Республики Татарстан / И.И. Антонова; Институт экономики, управления и права (г. Казань). – Казань: Познание (Институт ЭУП), 2013. – 176 с. Хватов Б.Н. Гибкие производственные системы. Расчёт и проектирование // Издательство ТГТУ, 2007.

12. Fang W., Huang Jx., Peng Tx. et al. Machine learning-based performance predictions for steels considering manufacturing process parameters: a review. *J. Iron Steel Res. Int.* 31, 1555–1581 (2024). <https://doi.org/10.1007/s42243-024-01179-5>

13. Андык В.С. Автоматизированные системы управления технологическими процессами на ТЭС: учебник для среднего профессионального образования / В. С. Андык. – М.: Юрайт, 2025. – 407 с.

14. Клочков Ю.П. Организация бережливого производства на предприятиях машиностроения: диссертация кандидата экономических наук: 08.00.05. – Ижевск, 2012. – 179 с.

15. Бородин И.Ф. Автоматизация технологических процессов и системы автоматического управления: учебник для среднего профессионального образования / И. Ф. Бородин, С. А. Андреев. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Юрайт, 2025. – 377 с.

16. Soufi Z., Mestiri S., David P. et al. A material handling system modeling framework: a data-driven approach for the generation of discrete-event simulation models. *Flex Serv Manuf J* (2024). <https://doi.org/10.1007/s10696-024-09535-z>

17. Рачков М.Ю. Автоматизация производства: учебник для среднего профессионального образования / М. Ю. Рачков. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Юрайт, 2025. – 182 с.

## References

1. Karpov Yu.G. Simulation modeling of systems. Introduction to modeling with AnyLogic 8 [Text]: textbook / Yu.G. Karpov. – St. Petersburg, 2017. – 400 p.

2. Kiseleva M. V. Simulation modeling of systems in the AnyLogic environment: a textbook. – Yekaterinburg: UGTU – UPI, 2009. – 88 p.

3. Oleynikova S.A. Modeling: a textbook / S.A. Oleynikova; Voronezh State Technical University. – Voronezh: VSTU Publishing House, 2020. – 127 p.

4. Kovalev A.A., Krasko A.S., Zuev V.V. Simulation modeling of the technological complex in the AnyLogic software environment: Textbook/ A.A. Kovalev, A.S. Krasko, V.V. Zuev. – М.: Sputnik+ Publishing House, 2021. – 157 p.

5. Shishmarev, V. Y. Organization and planning of automated production facilities: a textbook for secondary vocational education / V. Y. Shishmarev. – 2nd ed. – Moscow: Yurait Publishing House, 2025. – 318 p.

6. Koulinas, G.K., Paraschos, P.D. & Koulouriotis, D.E. A machine learning framework for explainable knowledge mining and production, maintenance, and quality control optimization in flexible circular manufacturing systems. *Flex Serv Manuf J* 36, 737–759 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10696-024-09537-x>

7. Boev V.D. Computer modeling of systems: a textbook for secondary vocational education. – М.: Yurait Publishing House, 2019. – 253.

8. Albagachiev A.Yu., Krasko A.S. Loading model of a transport and loading means of a flexible production system. *Problems of mechanical engineering and machine reliability*. 2019. No.4. P. 77–88.

9. Filin M.A., Krasko A.S. Determination of optimal parameters for the maintenance of workpieces in the simulation of automated technological complexes. *Chief Mechanic*. Vol. 19. No. 5. 2022, p. 321–331.
10. Evtyukhina V.V. Organizational reserves for reducing the duration of the production cycle based on the implementation of the principles of “Lean production” at domestic enterprises. *ECONOMINFO*. No. 9. 2008.
11. Antonova I.I. Lean production: a systematic approach to its implementation at enterprises of the Republic of Tatarstan / I I. Antonova; scientific ed. V.A. Smirnov; Institute of Economics, Management and Law (Kazan). Kazan: Cognition (EUP Institute), 2013. 176 p. Khvatov B.N. Flexible production systems. Calculation and design// TSTU Publishing House, 2007.
12. Fang, W., Huang, Jx., Peng, Tx. et al. Machine learning-based performance predictions for steels considering manufacturing process parameters: a review. *J. Iron Steel Res. Int.* 31, 1555–1581 (2024). <https://doi.org/10.1007/s42243-024-01179-5>
13. Andyk, V.S. Automated process control systems at thermal power plants: a textbook for secondary vocational education / V.S. Andyk. Moscow: Yurait Publishing House, 2025. 407 p.
14. Klochkov Yu.P. Organization of lean production at machine-building enterprises: dissertation of Candidate of Economic Sciences: 08.00.05. Izhevsk, 2012, 179 p.
15. Borodin I.F. Automation of technological processes and automatic control systems: a textbook for secondary vocational education / I.F. Borodin, S.A. Andreev. 2nd ed., ispr. and add. Moscow: Yurait Publishing House, 2025. 377 p.
16. Soufi Z., Mestiri S., David P. et al. A material handling system modeling framework: a data-driven approach for the generation of discrete-event simulation models. *Flex Serv Manuf J* (2024). <https://doi.org/10.1007/s10696-024-09535-z>
17. Rachkov M. Y. Automation of production: textbook for secondary vocational education / M.Y. Rachkov. 2nd ed., ispr. and add. Moscow: Yurait Publishing House, 2025. 182 p..

#### Информация об авторах

**Краско Александр Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры цифровых и аддитивных технологий, РТУ МИРЭА  
krasko\_as@mail.ru

**Кислова Анастасия Владимировна** – преподаватель кафедры цифровых и аддитивных технологий, РТУ МИРЭА  
kislova@mirea.ru

#### Information about the authors

**Krasko Alexander Sergeevich** – cand. Sc. of Engineering, associate professor at the department of “Digital and Additive Technologies”, MIREA – Russian Technological University  
krasko\_as@mail.ru

**Kislova Anastasia Vladimirovna** – lecturer at the department of “Digital and Additive Technologies”, MIREA – Russian Technological University  
kislova@mirea.ru

Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации и заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors made equivalent contributions to the publication and declare no conflict of interest.