

УДК 004.67

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СОРТИРОВЩИКА ПРОБ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ЛОГИСТИКИ КЛИНИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ

А. И. Баранчиков, д.т.н., профессор кафедры ЭВМ РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0003-4133-7489, e-mail: alexib@inbox.ru

Д. Р. Батраков, аспирант кафедры ЭВМ РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0009-0002-1472-6075, e-mail: danilbatrakov@outlook.com

Рассматривается задача построения имитационной модели лабораторного автоматического сортировщика проб. Целью работы является построение математической модели автоматического сортировщика проб клинической лаборатории, позволяющей воспроизводить профиль загрузки, анализировать и оптимизировать процессы сортировки, оценивать производительность различных стратегий сортировки. Для построения модели и генерации входного потока за основу использованы ретроспективные данные за шесть недель с учётом сезонности. Конфигурации оборудования и приоритеты задаются из внешних файлов конфигурации. Проведён сценарный анализ конфигураций (9 сценариев) с оценкой TAT, пропускной способности и доли необработанных проб. Практическая значимость данной работы – это инструмент для выбора конфигураций и уменьшения логистических ошибок.

Ключевые слова: математическое моделирование, клиническая лаборатория, имитационное моделирование, оптимизация ресурсов.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-93-184-199

Введение

Сегодня автоматизация в клинических лабораториях играет ключевую роль в организации бизнес-процессов получения результатов анализов. В условиях роста количества поступающих биологических образцов и требования к сокращению времени обработки биоматериалов одной из ключевых задач становится оптимизация внутри лабораторной логистики. Как правило, при анализе бизнес-процессов современных лабораторий именно на этапе сортировки появляется так называемое «бутылочное горлышко».

Так как одним из наиболее ресурсоемких и критичных по времени этапов лабораторного процесса является начальное распределение проб по направлениям анализа, на практике это автоматизируется с помощью автоматических сортировщиков – специализированных технических систем, предназначенных для приема, идентификации, классификации и маршрутизации проб в соответствии с заданными правилами, на основе отделения, приоритета, срочности, типа анализа, типа пробирки (или иной тары) и других факторов.

Использование автоматических сортировщиков позволило:

- сократить рутинные операции медицинского персонала;
- уменьшить расходы на производство одного анализа;
- минимизировать логистические ошибки маршрутизации образцов в лаборатории;
- повысить пропускную способность лаборатории;
- упростить возможность масштабируемости лаборатории;
- сократить время производства анализов.

Сравнительный анализ ручной и автоматизированной сортировки проб в лаборатории

Согласно исследованию 2015 года [1] внедрение автоматической системы сортировки в лаборатории в течение 12 месяцев показало значительное сокращение времени обработки проб (Turnaround Time, TAT) для рутинных анализов, включая также иммунологические и

коагулологические отделы лаборатории. Автоматические системы способны обрабатывать до 2000 пробирок в час, значительно превышая возможность ручной обработки.

В процессе ручной обработки образцов согласно исследованию [2] время сортировки одной пробы составляет, в среднем, 42 секунды, после успешного внедрения автоматизированной сортировки это время снижается до 17 секунд. Стоит отметить, что ручная сортировка не требует значительных первоначальных вложений, зато требует постоянных расходов на оплату человеко-часов квалифицированного персонала, что в условиях постоянно растущей ценности человеческого труда может быть фатально для компании при достаточно больших объемах.

В исследовании [3] говорится, что автоматизированные системы сортировки обеспечивают значительное уменьшение количества ошибок сортировки, связанных с влиянием человеческого фактора, обеспечивая надежную стандартизацию процесса.

Сравнительный обзор функциональных возможностей автоматизированных систем

На сегодняшний день существует большое количество автоматических систем сортировки проб. Выбор конкретной системы всегда зависит от потребности лаборатории, так, например, в некоторых случаях техническая возможность подключения автоматизированного трэка может быть выгоднее значительно большей скорости работы. В таблице 1 представлен небольшой сравнительный обзор некоторых популярных автоматизированных систем сортировки проб.

Таблица 1 – Сравнительный обзор некоторых популярных систем сортировки проб
Table 1 – Comparative analysis of several popular sample sorting systems

Модель сортировщика	Скорость сортировки проб/час	Ключевые особенности
Beckman Coulter AutoMate 2500	до 1 200	Автоматическая загрузка, сортировка STAT-проб, измерение объёма через этикетку, аликвотирование, рекеппинг, динамически конфигурируемые ячейки (до 24), интеграция с LIS [4]
Sarstedt High Speed Sorter (HSS)	до 1 200	Прием образцов без предварительной укладки, barcode, декеппинг/рекеппинг, сортировка в racks, интеграция с транспортом (Tempus1800®) [5]
Micronic Tube Handler HT500 / HT700	HT500: ~250 HT700: ~550	Автоматическое раскладывание проб из racks, поддержка ANSI/SLAS-формата, USB-picklist, 1D/2D считывание, интеграция с LIMS, компактный footprint [6]
ASP SortPro Tube Sorter	до 3 600	AI-обнаружение (TubeIdent), приоритетные области до 17 целевых бакетов, непрерывная работа даже при удалённом бакете, компактность и энергоэффективность [7]

Технико-экономическое обоснование

В условиях, когда количество ежедневно обрабатываемых проб лабораторией исчисляется тысячами, а иногда и десятками тысяч, автоматизация становится не просто желанием, а вынужденной мерой для поддержания стабильного времени и качества производств результатов проб. Грамотный подбор оборудования и точное понимание аспектов его настройки играют главенствующую роль в этом процессе.

Задача моделирования и анализа работы медицинского оборудования, в частности лабораторных сортировщиков, с целью оценки их производительности, выявления узких мест, разработки и оценки стратегии использования алгоритмов сортировки является крайне важной для повышения эффективности и оптимизации работы любой современной лаборатории. Несмотря на активное развитие аналитических систем, процессы сортировки зачастую остаются плохо формализованными, что снижает общую производительность данных систем [8]. Математическое моделирование и построение агентских имитационных моделей является эффективным и относительно дешевым инструментом проверки различных сценариев и гипотез.

Анализ существующих научных и технических публикаций показывает, что большинство исследований в области математического моделирования лабораторий сосредоточены либо на аналитических приборах и их загрузке [9-13], либо на оптимизации маршрутов доставки проб, тогда как моделирование логики сортировки как самостоятельной функциональной подсистемы рассматривается крайне ограниченно [14, 15]. Как правило, в работах используются упрощенные схемы логистики и сортировки, без учета реального распределения тестов, срочности, приоритетности, ограничений емкости физических носителей сортировки (стойки, кассеты, ячейки кассет), что зачастую является крайне критичными моментами при моделировании высоконагруженных потоков [2].

Кроме того, исследование [16] показывает, что отсутствие продуманной интеллектуальной логистики сортировки приводит к существенному дисбалансу нагрузки на аналитические блоки лаборатории, в некоторых случаях это приводит к увеличению доли ручной обработки образцов.

В рамках данной работы создана математическая модель сортировщика проб как составной части общей имитационной модели клинической лаборатории. Разработка модели включает в себя:

- анализ потока проб и выявление коэффициентов распределения проб по отделам лаборатории, срочность, распределение количества тестов по биоматериалам и т. д.;
- модель разрабатывается на основе реальных данных полученных из лаборатории за период 6 недель, из которых 2 недели зимнего периода, 2 недели весеннего периода и 2 недели летнего периода;
- спецификации и ограничения, предоставленные поставщиками лабораторного оборудования.

Представленная модель предлагает:

- динамическую логику сортировки с учетом приоритетности, срочности (cito), текущего состояния загрузки ячеек;
- учет реального физического ограничения конфигураций оборудования, включая геометрию носителей пробирок (task-структуры).

Практическая значимость модели подтверждается тем, что ее использование позволяет:

- выявить узкие места при проектировании лаборатории или анализе существующей;
- оценить эффективность различных алгоритмов сортировки проб без вмешательства в реальные процессы;
- предоставить инженерам и лаборантам наглядный инструмент для тестирования гипотез улучшения работы.

Данная работа не только восполняет выявленный пробел в существующих исследованиях, но и носит практически ориентированный прикладной характер, способствуя развитию инструментов математического моделирования лабораторных комплексов.

Обобщенная схема работы исследуемой лаборатории

Изучение и описание бизнес-процессов лаборатории является важным и неотъемлемым этапом формирования математической модели.

Бизнес-процессы различных лабораторий похожи, ключевым этапом в работе лабораторий является сортировка проб.

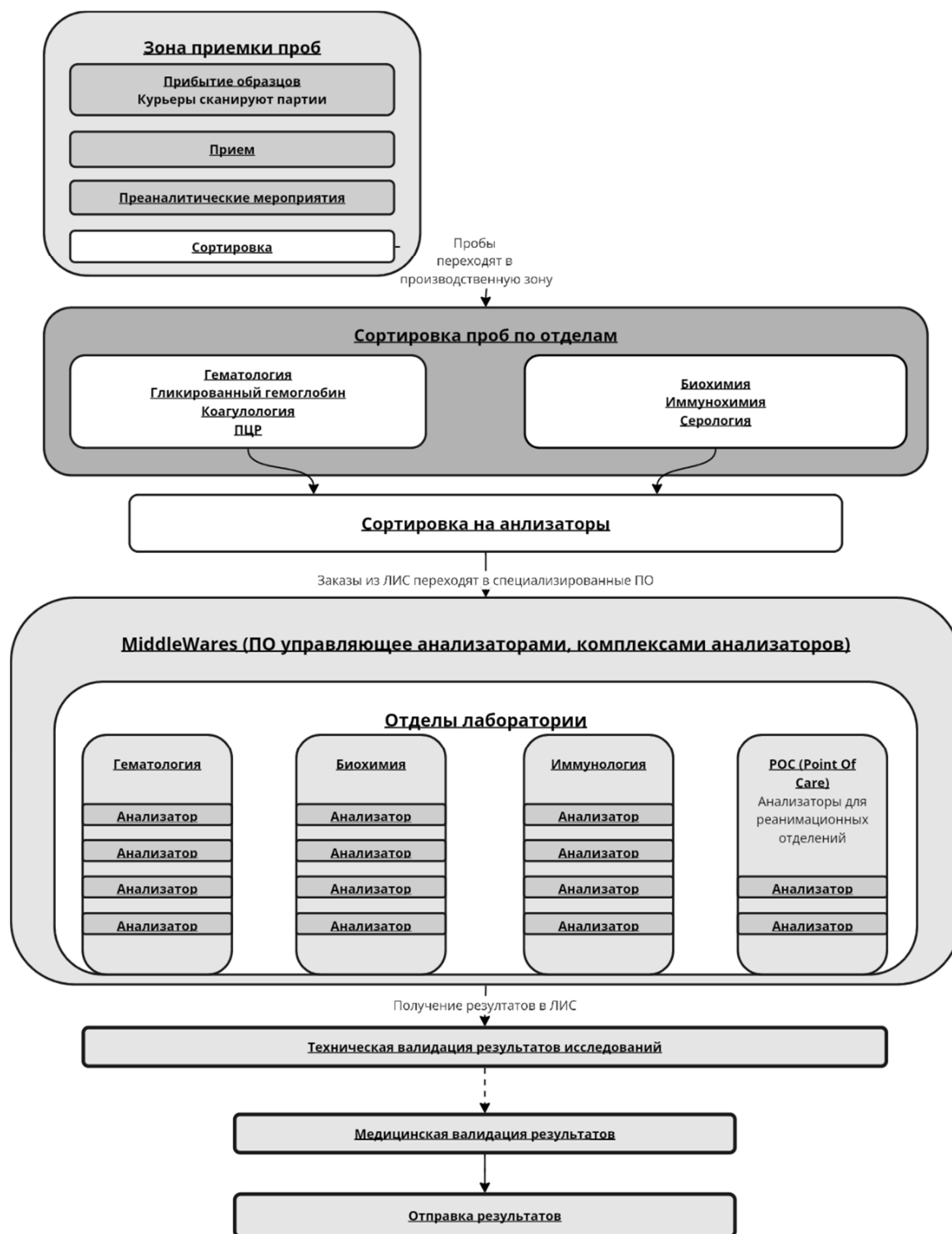


Рисунок 1 – Схема работы исследуемой лаборатории
Figure 1 – Scheme of work of the laboratory under study

Описание математической модели

Модель лаборатории представлена в виде дискретно-событийной имитации таких процессов, как приём, сортировка, анализ, повторная сортировка, архивирование проб. Основные сущности: проба (sample), сортировщик (sorter), носитель (rack) и анализатор (analyzer).

Параметры математической модели представлены как:

– $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ – множество проб, поступающих в лабораторию за моделируемый период;

- $D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ – множество отделений/групп тестов;
- $T(s) \subseteq D$ – множество отделений, для выполнения тестов по пробе s ;
- $p_{cito}(s) \in \{0, 1\}$ – индикатор срочности;
- $R = \{r_1, r_2, \dots, r_k\}$ – множество гаск-носителей, каждый с ёмкостью $C(r)$ (число ячеек);
- $t_{arrival}(s)$ – время поступления пробы s в зону приёмки;
- $t_{sort}(s)$ – время помещения пробы в носитель;
- $t_{ready}(s)$ – время завершения всех анализов по пробе;
- $\Delta t_{TAT}(s) = t_{ready}(s) - t_{arrival}(s)$ – TAT (turnaround time) для пробы.

Сортировщик выбирает ячейку в соответствии с принадлежностью пробы к отделению и признаку срочности:

$$r(s) = \begin{cases} r \in R^{cito}_d \Rightarrow p_{cito}(s) = 1, d \in T(s) \\ r \in R^{notcito}_d \Rightarrow p_{cito}(s) = 0, d \in T(s), \\ R_{error} \end{cases}$$

где, $R^{cito}_d \subset R$ – ячейки для срочных проб; $R^{notcito}_d \subset R$ – ячейки для отделений d ; R_{error} – ячейки для проб, не входящих ни в одну группу, либо для тех проб, для которых не хватило места в данной итерации работы сортировщика проб.

Разработка алгоритма генерации искусственного потока проб

Время поступления проб в лабораторию является важным нюансом и напрямую влияет на время их выполнения, так как во многих случаях могут понадобиться процедуры пробоподготовки (преаналитические мероприятия), например центрифугирование для выделения сыворотки из цельной крови. График поступления проб напрямую зависит от работы пунктов забора крови и регламентируется администрацией лаборатории [20, 21]. Зависимость количества поступающих проб в час, можно проиллюстрировать следующим графиком (рисунок 2):

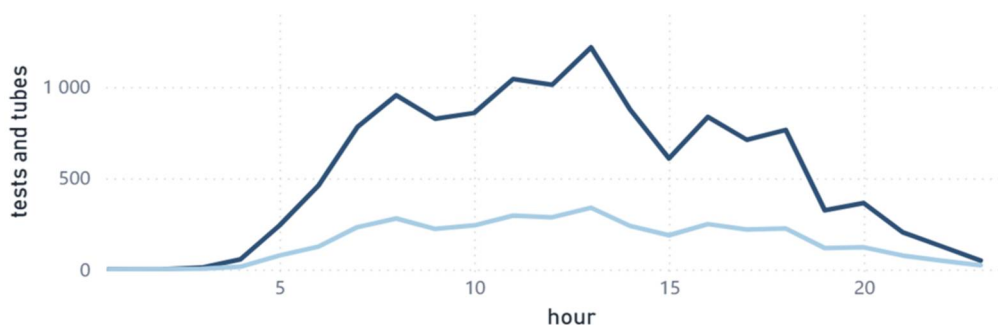


Рисунок 2 – Среднее количество поступающих проб в зависимости от рабочего времени (Arrival curve)

Figure 2 – Average samples number by arrival hour (Arrival curve)

Для работы симуляции использовался искусственно созданный набор данных, так как этот подход имеет большую гибкость и лучшую масштабируемость. Набор искусственных проб создавался на основании распределения биоматериалов, отделов, тестов в исходных, ретроспективных данных лаборатории. Для генерации данных использовался следующий алгоритм (рисунок 3). Он генерирует искусственный поток проб, максимально приближенный к потоку проб, с которым лаборатория сталкивается в реальной жизни, так как весовые коэффициенты распределения рассчитываются исходя из ретроспективного анализа данных лаборатории. Такой подход является основополагающим для любой математической модели, нацеленной на получение практически применимого результата.

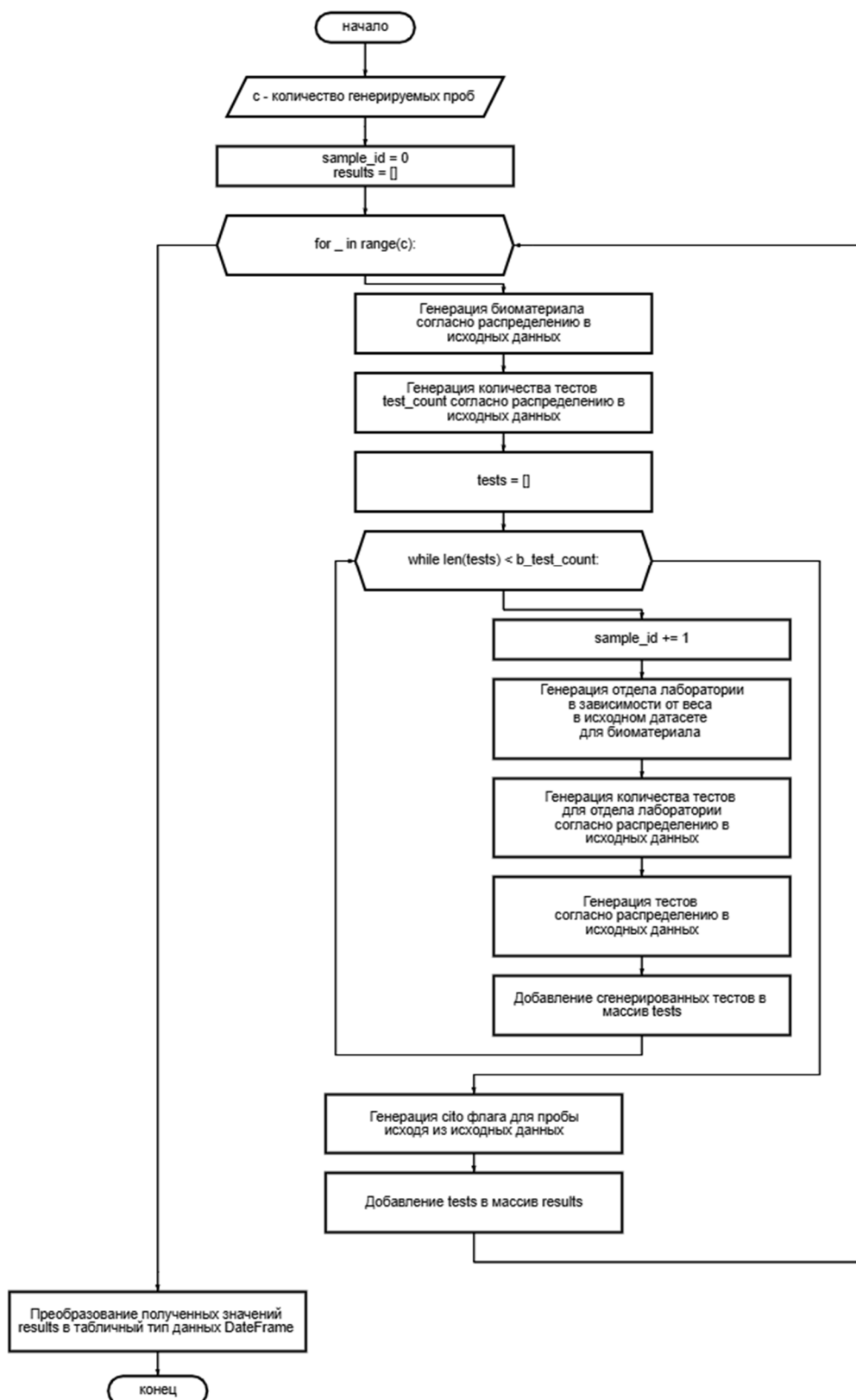


Рисунок 3 – Алгоритм генерации проб для симуляции
Figure 3 – Sample generation algorithm for simulation

Коэффициент распределения проб различных классов к общему количеству поступающих проб рассчитывается индивидуально для каждой лаборатории, помогает определить общую специализацию лаборатории, а также необходим для генерации искусственного датасета. В

данной работе рассчитываются коэффициенты распределения по типам биоматериала, типам тестов.

$$P(T_i \in C_j) = N(T_i C_j) / N(C_j),$$

где $P(T_i \in C_j)$ – вероятность того, что тест T_i принадлежит классу C_j ; $N(T_i C_j)$ – количество случаев, когда тест T_i наблюдался в классе C_j ; $N(C_j)$ – общее количество тестов, принадлежащих классу C_j .

Коэффициент распределения среднего количества срочных (Cito) проб к общему количеству поступаемых проб рассчитывается по следующей формуле:

$$P_{\text{cito}} = N(T_{\text{cito}}) / N,$$

где P_{cito} – вероятность того, что тест T_i принадлежит классу срочных проб; $N(T_{\text{cito}})$ – количество случаев, когда тест является срочным; N – общее количество тестов.

Коэффициенты распределения проб по отделам лаборатории представлены таблицей 2:

Таблица 2 – Коэффициенты распределения проб по отделам лаборатории

Table 2 – Sample distribution coefficients among laboratory departments

department	probability
Biochemistry	0.31330286121334444
ESR	0.05439273418022082
Electrophoresis	0.20277217143535559
Hematology	0.19659859907396415
Hemostasis	0.022586964264513832
Immunochemistry	0.19279354149352962
Immunohematology	0.01332066959515612
Microbiology	0.00423245874391547

Так как для генерации искусственного набора данных использовались данные за 6 недель, взятых в различные сезоны года (весна, лето, осень), коэффициенты распределения являются максимально усредненными для различных сезонностей и описывают общий поток проб лаборатории наиболее точно и полно.

Так как каждый сезон представлен в наборе данных 2-недельным непрерывным фрагментом потока проб, то практически исключается факт непопадания каких-либо значимых специфичных моментов работы лаборатории.

При анализе сгенерированных данных не было выявлено таких критичных моментов, как:

- попадание дубликатов тестов в одну пробу;
- несоответствие коэффициента среднего количества тестов на пробу в сгенерированном наборе и в реальном, а также несоответствие данного коэффициента при анализе по каждому из отделов лаборатории отдельно.

Разработка алгоритма сортировки проб

В качестве допущения при разработке симуляции сортировщика проб было принято, что персонал лаборатории подходит к сортировщику проб для загрузки и выгрузки проб раз в 15 минут (на практике это значение не является константой, однако при проектировании лабо-

раторий принято рассчитывать именно такой временной интервал взаимодействия с сортировщиком) [22].

При построении симуляции было решено записывать ход работы симуляции в табличную структуру *LabFlow*, имитирующую работу лабораторной информационной системы в реальной жизни.

На рисунке 4 приведен фрагмент листинга, описывающий структуру класса и ключевые методы.

```
class Sorter:
    def __init__(self, env, idx:str, speed=20,
                 input_drawers=input_,
                 output_drawers=output_,
                 sorter_priority=department_priority):
        self.env = env
        self.idx = idx
        self.priority = sorter_priority
        self.error = False
        self.input_df = input_drawers
        self.output_df = output_drawers
        self.speed = 1 / speed
        self.work = False
        self.process = env.process(self.run())

    def run(self):

    def sleep(self):

    def unload(self):

    def load(self, samples_ids):

    def sort(self):
```

Рисунок 4 – Листинг: структура класса, имитирующего алгоритм сортировки проб
Figure 4 – Listing: structure of the class simulating sample sorting algorithm

Конструктор класса *Sorter* инициализирует модель с указанием среды имитации *env*, атрибут *idx* служит уникальным идентификатором сортировщика в лаборатории, *priority* – объект типа *dict*, получаемый из конфигурационного файла, отвечающий за приоритезацию сортировки проб по отделам, флаг *error* – флаг, отвечающий за прекращение работы сортировщика в случае возникновения какой-либо ошибки.

Например, если закончилось место в выходном держателе проб, *input_df*, *output_df* – входные и выходные стойки проб (зоны загрузки и отгрузки проб) в реальной жизни называются *rack*, служат держателями для плашек с пробами и задаются конфигурационными файлами, *speed* – время задержки при сортировке каждой пробы, следует отметить, что скорость работы сортировщиков измеряется в пробах в минуту, флаг *work* – служит обозначением того, что сортировщик находится в работе, атрибут *process* регистрирует основной цикл жизнедеятельности агента в среде SimPy.

Инициализация сорта происходит путём считывания конфигураций входного и выходного Drawer (стойки) из Excel файла. Конфигурации представляют собой таблицы следующего вида:

- *drawer* – уникальный номер стойки, в которую помещаются держатели пробирок (обычно сортировщики проб содержат от 3 до 4 таких стоек);
- *rack_type* – тип держателей пробирок (как правило, пробирки для гематологии и биохимии, например, отличаются из-за различных типов биоматериалов);
- *department* – данное поле является актуальным для выходного набора данных, так как определяет отделение, куда должны отправиться пробы после сортировки;
- *rack_id* – уникальный в каждой стойке номер держателя пробирок (обычно по 4 держателя в каждой стойке);
- *cito* – указатель на срочность выполнения проб для всего держателя проб;
- *is_free* – маркер свободности ячейки для одной пробы;
- *y, x* – «координаты» расположения пробы в держателе.
- *sample_id* – уникальный номер каждой пробы.

Также в процессе инициализации сортировщика проб используется конфигурация приоритетности отделений, в текущей работе использовалась такая последовательность, отсортированная по уменьшению:

- 1) *hematology*;
- 2) *biochemistry*;
- 3) *immunohematology*;
- 4) *immunochemistry*;
- 5) *electrophoresis*;
- 6) *hemostasis*;
- 7) *microbiology*.

Если проба не принадлежит ни одному из отделений лаборатории, например в случае ошибки регистрации или какой-то ошибки получения информации о пробе из лабораторной информационной системы, ей присваивается отделение «Error».

Метод *Sorter.run* работает в «вечном» цикле и отвечает за общую работу сортировщика проб, прерывается по окончании времени, заложенного при инициализации симуляции.

Метод *Sorter.load* отвечает за загрузку несортированных проб во входные стойки *df_input*.

Метод *Sorter.unload* отвечает за отгрузку отсортированных проб из выходных стоек сортировщика *df_output*.

Метод *Sorter.sleep* отвечает за временную задержку, имитирующую время простоя оборудования в реальной жизни.

Метод *Sorter.sort* – основной алгоритм сортировки проб в отличие от вышеуказанных сервисных методов обеспечивающих общую работу симуляции.

Приведенный метод (рисунок 4) представляет собой алгоритм поведения реального сортировщика проб и является ключевым моментом данной работы. Алгоритм является универсальным для входных и производственных сортировщиков.

В процессе метод определяет для проб из входной зоны *df_input* наиболее приоритетный отдел согласно конфигурации и записывает *sample_id* в первую доступную ячейку выходной стойки *df_output*, соответствующую данному отделу.

Разработка алгоритма была основана на данных конфигурационных файлов, полученных из исследуемой лаборатории, а также на обобщении практического опыта специалистов, занимавшихся настройкой сортировочного оборудования.

При отсутствии корректного определения отдела для конкретной пробы она направляется в специально выделенную категорию «Error» для последующего анализа. Если же для распределения не остаётся свободных ячеек, соответствующих отделу и срочности, сортировщик приостанавливает свою работу, присваивая флагу *error* значение *True*.

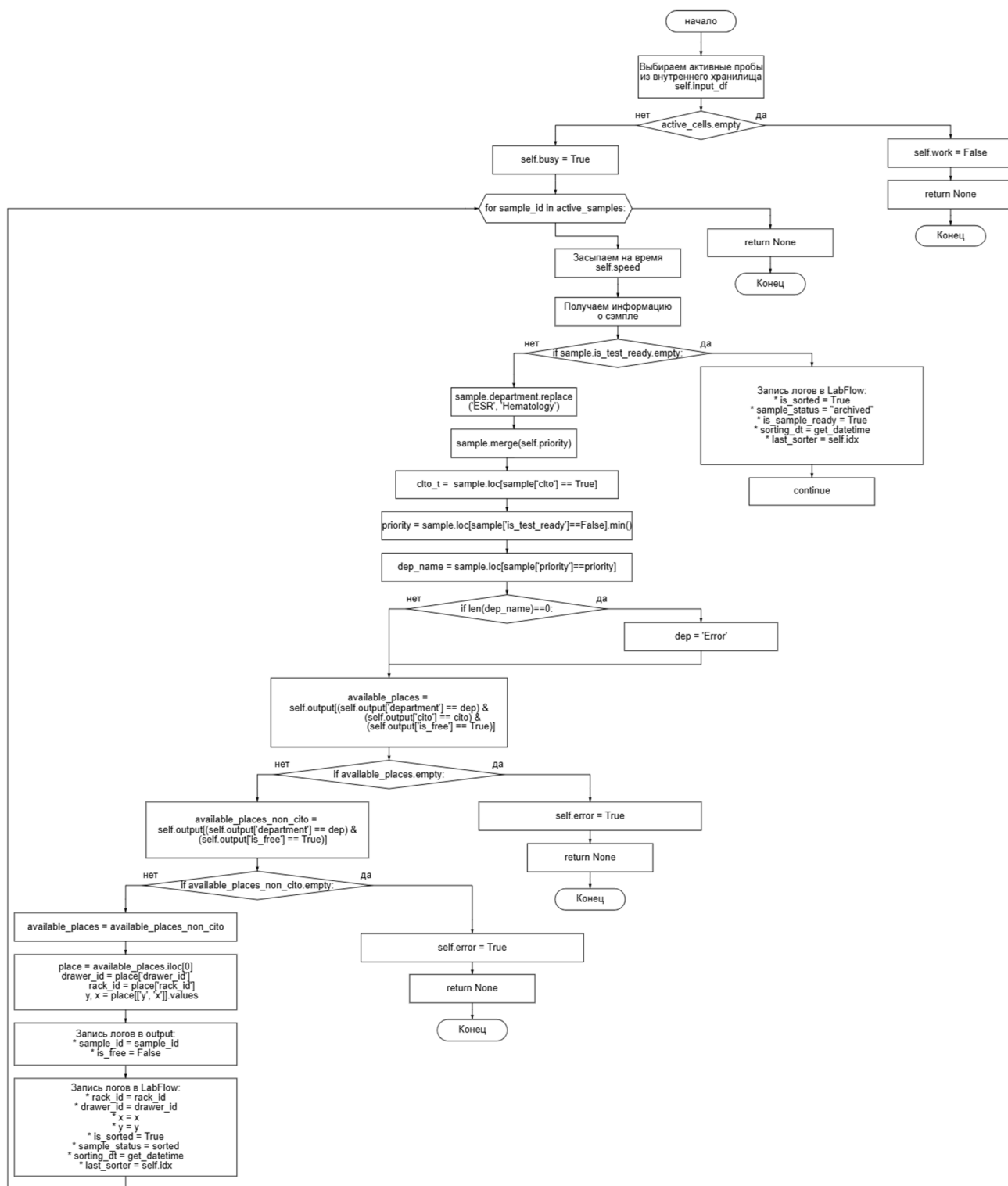


Рисунок 4 – Алгоритм работы симуляции сортировщика проб Sorter.sort
Figure 4 – Sample sorter simulation algorithm Sorter.sort

Экспериментальная часть

В ходе экспериментов конфигурации распределения проб в выходной зоне исследовались по следующим сценариям.

1. Если держателей проб для одного отделения больше одного, то один держатель отводится под срочные пробы, остальные – под не срочные.

2. Первая строка (первые 8 ячеек) каждого держателя отводится под срочные пробы, остальные – под не срочные.

3. Если держателей больше одного, то половина первого держателя отводится под срочные пробы, в иных случаях – только первая строка (первые 8 ячеек).

Было 3 группы сценариев со следующим распределением тестов (таблица 3).

Таблица 3 – Распределение количества ячеек для проб по отделам по сценариям работы сортировщика проб

Table 3 – Distribution of the number of sample cells by departments according to sample sorter operating scenarios

Отделение Цито	Сцена- рий_1	Сцена- рий_2	Сцена- рий_3	Сцена- рий_4	Сцена- рий_5	Сцена- рий_6	Сцена- рий_7	Сцена- рий_8	Сцена- рий_9
Biochemistry _False	80	96	104	80	96	104	80	96	104
Hematology _True	40	16	32	40	16	32	40	16	32
Hematology _False	40	64	48	40	64	48	40	64	48
Immunohema- tology_False	40	32	32	40	32	32	40	32	32
Biochemistry _True	40	24	16	40	24	16	40	24	16
Immunochemis- try_True	40	16	16	40	16	16	40	16	16
Immunochemis- try_False	40	64	64	40	64	64	24	48	48
Electrophoresis _False	40	32	32	64	48	48	80	64	64
Hemostasis _False	40	32	32	40	32	32	40	32	32
Microbiology _False	40	32	32	16	16	16	16	16	16
Errors _False	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Immunohema- tology_True	0	8	8	0	8	8	0	8	8
Electropho- resis_True	0	8	8	0	16	16	0	16	16
Hemostasis _True	0	8	8	0	8	8	0	8	8
Microbiology _True	0	8	8	0	0	0	0	0	0

На основании данных сценариев работы автоматического сортировщика проб было проведено 9 сравнительных испытаний. Далее представлены графики распределения времени от момента сортировки до момента получения результата по каждому тесту в пробе.

На графиках (рисунок 5) видно, как различные конфигурации сортировщика проб влияют на такой важный для лаборатории показатель, как время от момента сортировки до момента получения результатов. Чем больше пик распределения смещается влево, тем общий показатель скорости работы лаборатории лучше.

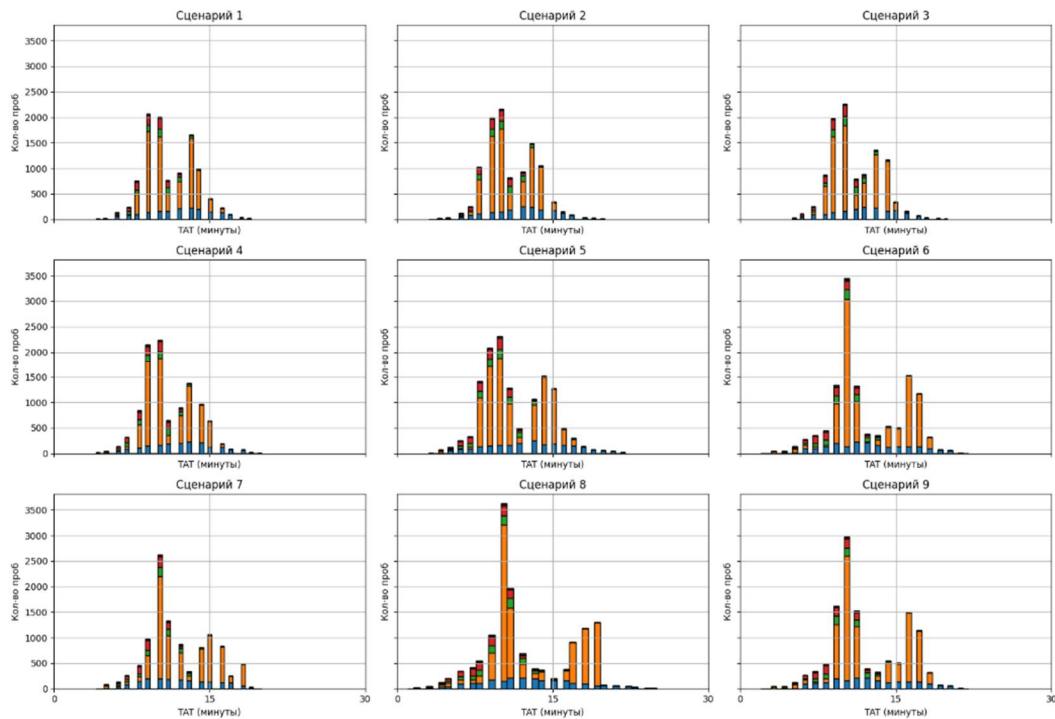


Рисунок 5 – Графики распределения времени от момента сортировки до момента получения результатов

Figure 5 – Time distribution graphs from the moment of sorting to the moment of receiving results

Таблица 4 – Количество выполненных и не выполненных проб
Table 4 – Number of completed and failed tests

Сценарий	Количество проб	Количество готовых проб	Количество не готовых проб
1	3000	1959	1041
2	3000	1987	1013
3	3000	1953	1047
4	3000	2019	981
5	3000	2524	476
6	3000	2280	720
7	3000	1961	1039
8	3000	2601	399
9	3000	2280	720

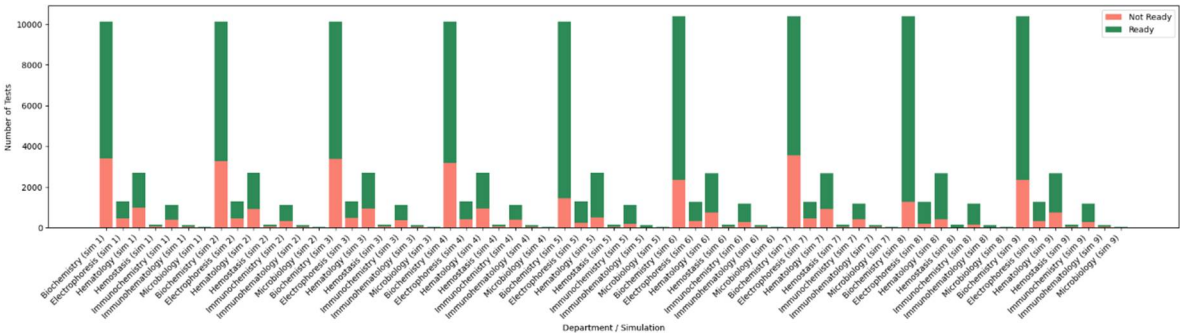


Рисунок 6 – Распределение количества выполненных и не выполненных тестов по отделениям по симуляциям

Figure 6 – Distribution of the number of completed and failed tests by departments by simulations

При применении данной модели на практике лаборатория сможет оценивать различные сценарии использования сортировщиков проб до ввода их в эксплуатацию, тем самым

уменьшая потенциальные потери в производительности на время экспериментов при подборе параметров оборудования.

Проверка модели на адекватность и валидность

При построении модели лаборатории и сценариев сортировки проб параметры подбирались эмпирическим путём из-за отсутствия полной информации о конфигурации реального сортировщика. Несмотря на это, модель продемонстрировала высокую информативность и позволила отразить ключевые закономерности работы лаборатории, даже при частичном расхождении с фактическими данными.

Для тестирования использовался исторический максимум нагрузки, тогда как в реальных условиях лаборатории при пиковых объёмах часть проб может быть перенесена на утреннюю обработку следующего дня, а отдельные виды исследований (например, электрофорез) выполняются накопительно, в течение недели, что вносит различие между моделируемыми и реальными результатами.

Модель сортировочной станции показала свою работоспособность, однако для подтверждения её универсальности требуется валидация общей модели лаборатории, включающей сортировщик, на данных других лабораторий. Далее представлены графики (рисунки 7-9) сравнения результата 8 сценария симуляции и анализа одного дня из реальных данных лаборатории.

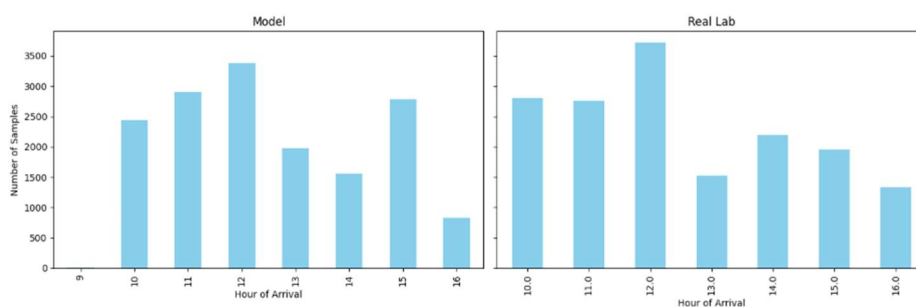


Рисунок 7 – Распределение количества поступивших тестов по часам
Figure 7 – Distribution of the number of received tests by hours

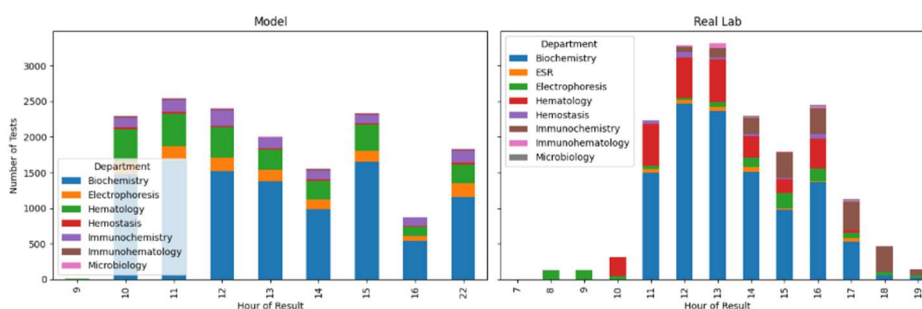


Рисунок 8 – Распределение количества результатов по часам по отделам лаборатории
Figure 8 – Distribution of the number of results by hour by laboratory department

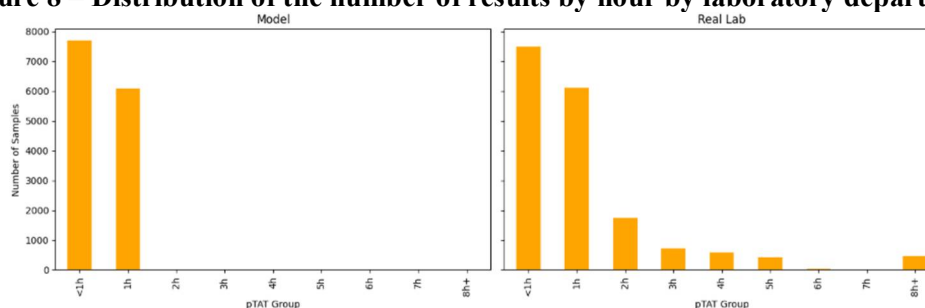


Рисунок 9 – Производственный ТАТ (время от приема пробы до получения результата) разбитый на группы
Figure 9 – Production TAT (time from sample reception to result) spited into groups

Вывод

Разработанная модель сортировочной станции клинической лаборатории является эффективным инструментом для анализа и оптимизации процессов распределения проб по отделах и оценки производительности при различных сценариях нагрузки. Учёт ключевых особенностей организации лабораторной работы обеспечивает реалистичность полученных результатов. Перспективными направлениями являются расширение модели до полного воспроизведения работы лаборатории и её валидация на данных нескольких медицинских учреждений, что позволит использовать её в качестве надёжного средства поддержки управленческих решений.

Библиографический список

1. Ucar F., Erden G., Taslipinar M.Y., Ozturk G., Ginis Z., Bulut E., Delibas N. Greater efficiency observed 12 months post-implementation of an automatic tube sorting and registration system in a core laboratory // J Med Biochem. 2016. T. 35, no. 1. C. 1-6. DOI: 10.1515/jomb-2015-0012.
2. Chiu M., Kuo P., Lecrone K., Garcia A., Chen R., Natalie E.Q., Xin M.Tu, Pride D.T. Comparison of the APAS Independence Automated Plate Reader System with the Manual Standard of Care for Processing Urine Culture Specimens // ASM Journals / Microbiology Spectrum. 2022. Vol. 10. № 5.
3. Hawker C.D., Roberts W.L., Garr S.B., Hamilton L.T., Penrose J.R., shwood E.R., Weiss R.L. Automated transport and sorting system in a large reference laboratory: part 2. Implementation of the system and performance measures over three years. PubMed. Clin Chem. 2002. T. 48. № 10. C. 1761-1767. PMID: 12324493.
4. Coulter B. Автоматизированные системы обработки проб AutoMate 2500. URL: <https://www.beckmancoulter.com/en/products/automation/automate-2500-family-sample-processing-systems> (дата обращения: 13.07.2025).
5. Sarstedt. Высокоскоростная сортировочная станция High Speed Sorter (HSS). URL: <https://hss.sarstedt.com/en/> (дата обращения: 13.07.2025).
6. Micronic. Системы автоматизированного управления пробками. URL: <https://micronic.com/sample-management-systems/> (дата обращения: 13.07.2025).
7. ASP Lab Automation. Сортировщик пробирок SortPro. URL: <https://www.asplabauto.com/en/products/sortpro-tubesorter-bulksorter/> (дата обращения: 13.07.2025).
8. Орешков В.И., Цепулин И.А. Модель данных на основе расширяемой структуры для информационных систем, в условиях динамического внешнего окружения // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2020. № 74.
9. Wan W., Kotaka T., Harada K. Arranging test tubes in racks using combined task and motion planning // arXiv preprint arXiv:2005.03342. 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2005.03342>.
10. Fakhruddin H., Pizzuto G., Glowacki J., Cooper A.I. ARChemist: autonomous robotic chemistry system architecture // arXiv preprint arXiv:2204.13571. 2022. URL: <https://arxiv.org/abs/2204.13571>.
11. Başağaoğlu H., Succi S., Wyrick D., Blount J. Particle shape influences settling and sorting behavior in microfluidic domains // arXiv preprint arXiv:2006.14524. 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2006.14524>.
12. Pizzuto G., Wang H., Fakhruddin H., Peng B., Luck K.S., Cooper A.I. Accelerating laboratory automation through robot skill learning for sample scraping // arXiv preprint arXiv:2209.14875. 2022. URL: <https://arxiv.org/abs/2209.14875>.
13. Holman J.W., Mifflin T.E., Felder R.A., Demers L.M. Evaluation of an automated preanalytical robotic workstation at two academic health centers // Clin Chem. 2002. T. 48. № 3. C. 540-548. PMID: 11861445.
14. Burdett R.L., Kozan E. Analysing the performance of an automated pathology specimen handling system // Journal of Intelligent Manufacturing. 2008. Vol. 19, № 2. P. 179-190. DOI: 10.1007/s10845-008-0072-x.
15. Lai K.-M., Liu Z., Zhang Y., Wang J., Ho T.-Y. Automated design of a 3D passive microfluidic particle sorter // Processes. 2023. Vol. 11. No. 3. P. 1020. DOI: 10.3390/pr11031020.
16. Ziheng X., Jiajia Z., Yuhui H. Design and simulation of small-scale waste separation and sorting equipment // Processes, 2022. Vol. 10, no. 5. Article 1020. DOI: 10.3390/pr10051020.

17. **Ágnes B., Attila E., András S., Róbert K., János A.** Expert-based modular simulator for municipal waste processing technology design // *Sustainability*, 2022. Vol. 14. No 24. Article 16403. DOI: 10.3390/su142416403.
18. **Elalouf A., Tsadikovich D., Hovav S.** Simulation-based approach for improving the clinical blood sample supply chain // *Health Care Management Science*, 2021. Vol. 24. No 1. PP. 216-233. DOI: 10.1007/s10729-020-09534-0.
19. **Каширин И.Ю.** Модели знаний для коррекции дрейфа данных в data mining // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2023. No. 84.
20. **Kishkun A.A.** Clinical laboratory diagnostics: Study guide. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow: GEOTAR-Media, 2019. ISBN 978-5-9704-4830-4.
21. **Янов Е.С., Анцев А.В.** Автоматизированный контроль технологической дисциплины современного машиностроительного производства // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2024. № 88.
22. **Lynne S.G.** Clinical laboratory management, editor in chief, LSG & Associates, Santa Monica, CA; editors, Paul Bachner, Department of Pathology & Laboratory Medicine, University of Kentucky Chandler Medical Center, Lexington, KY [and eight others]. 2nd edition.

УДК 004.67

ALGORITHM OF AUTOMATIC SAMPLE SORTING FOR DECISION-MAKING SYSTEMS IN CLINICAL LABORATORY

A. I. Baranchikov, Dr. in technical sciences, full professor, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0009-0002-1472-6075, e-mail: alexib@inbox.ru

D. R. Batrakov, post-graduate student, RSREU, Ryazan, Russia;

orcid.org/0009-0002-1472-6075, e-mail: danilbatrakov@outlook.com

The paper examines the problem of constructing a simulation model of laboratory automated sample sorter. The aim of work is to construct a mathematical model of clinical laboratory automated sample sorter that can simulate workload profile, analyze and optimize sorting processes, and evaluate the performance of various sorting strategies. Retrospective data for six weeks taking seasonality into account has been used to construct the model and generate input flow. Equipment configurations and priorities are specified from external configuration files. Scenario analysis of nine configurations was conducted, assessing TAT, throughput, and proportion of unprocessed samples. The practical significance of this study is that it provides a tool to select configurations and reduce logistical errors.

Keywords: *mathematical modeling, clinical laboratory, simulation modeling, resource optimization.*

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-93-184-199

References

1. **Ucar F., Erden G., Taslipinar M.Y., Ozturk G., Ginis Z., Bulut E., Delibas N.** Greater efficiency observed 12 months post-implementation of an automatic tube sorting and registration system in a core laboratory. *J Med Biochem*. 2016, vol. 35, no. 1, pp. 1-6. DOI: 10.1515/jomb-2015-0012.
2. **Chiu M., Kuo R., Lecrone K., Garcia A., Chen R., Natalie E.Q., Xin M.Tu, Pride D.T.** Comparison of the APAS Independence Automated Plate Reader System with the Manual Standard of Care for Processing Urine Culture Specimens. *ASM Journals / Microbiology Spectrum*. 2022, vol. 10, no. 5.
3. **Hawker C.D., Roberts W.L., Garr S.B., Hamilton L.T., Penrose J.R., Ashwood E.R., Weiss R.L.** Automated transport and sorting system in a large reference laboratory: part 2. Implementation of the system and performance measures over three years. *PubMed. Clin Chem*. 2002, vol. 48, no. 10, pp. 1761-1767. PMID: 12324493.
4. **Coulter B.** Avtomatizirovannye sistemy obrabotki prob AutoMate 2500. URL: <https://www.beckmancoulter.com/en/products/automation/automate-2500-family-sample-processing-systems> (data obrashcheniya: 13.07.2025).

5. **Sarstedt**. Vysokoskorostnaya sortirovochnaya stanciya High Speed Sorter (HSS). URL: <https://hss.sarstedt.com/en/> (data obrashcheniya: 13.07.2025).
6. **Micronic**. Sistemy avtomatizirovannogo upravleniya probami. URL: <https://micronic.com/sample-management-systems/> (data obrashcheniya: 13.07.2025).
7. **ASP Lab Automation**. Sortirovshchik probirok SortPro. URL: <https://www.asplabauto.com/en/products/sortpro-tubesorter-bulksorter/> (data obrashcheniya: 13.07.2025).
8. **Oreshkov V.I., Cepulin I.A.** Model' dannykh na osnove rasshiraemoj struktury dlya informacionnykh sistem, v usloviyakh dinamicheskogo vneshnego okruzheniya. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2020, no. 74. (in Russian).
9. **Wan W., Kotaka T., Harada K.** Arranging test tubes in racks using combined task and motion planning. *arXiv preprint arXiv:2005.03342*. 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2005.03342>.
10. **Fakhruldeen H., Pizzuto G., Glowacki J., Cooper A.I.** ARChemist: autonomous robotic chemistry system architecture. *arXiv preprint arXiv:2204.13571*. 2022. URL: <https://arxiv.org/abs/2204.13571>.
11. **Başağaoğlu H., Succi S., Wyrick D., Blount J.** Particle shape influences settling and sorting behavior in microfluidic domains. *arXiv preprint arXiv:2006.14524*. 2020. URL: <https://arxiv.org/abs/2006.14524>.
12. **Pizzuto G., Wang H., Fakhruldeen H., Peng B., Luck K.S., Cooper A.I.** Accelerating laboratory automation through robot skill learning for sample scraping. *arXiv preprint arXiv:2209.14875*. 2022. URL: <https://arxiv.org/abs/2209.14875>.
13. **Holman J.W., Mifflin T.E., Felder R.A., Demers L.M.** Evaluation of an automated preanalytical robotic workstation at two academic health centers. *Clin Chem*. 2002. T. 48, no. 3, pp. 540-548. PMID: 11861445.
14. **Burdett R.L., Kozan E.** Analysing the performance of an automated pathology specimen handling system. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2008, vol. 19, no. 2, pp. 179-190. DOI: 10.1007/s10845-008-0072-x.
15. **Lai K.-M., Liu Z., Zhang Y., Wang J., Ho T.-Y.** Automated design of a 3D passive microfluidic particle sorter. *Processes*. 2023, vol. 11, no. 3, pp. 1020. DOI: 10.3390/pr11031020.
16. **Ziheng KH., Jiajia Z., Yuhui H.** Design and simulation of small-scale waste separation and sorting equipment. *Processes*, 2022, vol. 10, no. 5. *Article 1020*. DOI: 10.3390/pr10051020.
17. **Ágnes B., Attila E., András S., Róbert K., János A.** Expert-based modular simulator for municipal waste processing technology design. *Sustainability*. 2022, vol. 14, no. 24. *Article 16403*. DOI: 10.3390/su142416403.
18. **Elalouf A., Tsadikovich D., Hovav S.** Simulation-based approach for improving the clinical blood sample supply chain. *Health Care Management Science*. 2021, vol. 24, no. 1, pp. 216-233. DOI: 10.1007/s10729-020-09534-0.
19. **Kashirin I.Yu.** Modeli znanij dlya korrektsii drejfa dannykh v data mining. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2023, no. 84. (in Russian).
20. **Kishkun A.A.** Clinical laboratory diagnostics: Study guide. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow: GEOTAR-Media, 2019. ISBN 978-5-9704-4830-4.
21. **Yanov E.S., Ancev A.V.** Avtomatizirovannyj kontrol' tekhnologicheskoy discipliny sovremennogo mashinostroitel'nogo proizvodstva. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*. 2024, no. 88. (in Russian).
22. **Lynne S.G.** Clinical laboratory management, editor in chief, LSG & Associates, Santa Monica, CA; editors, Paul Bachner, Department of Pathology & Laboratory Medicine, *University of Kentucky Chandler Medical Center, Lexington, KY* [and eight others]. 2nd edition