

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ СБОРА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЛЯ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ КЛИНИЧЕСКИХ ЛАБОРАТОРИЙ

Баранчиков Алексей Иванович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры ЭВМ, ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина»¹.

Батраков Данил Романович

аспирант кафедры ЭВМ, ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина»¹; инженер данных, ООО «Мор Дэйта»².

Токмин Данил Сергеевич

магистр, аналитик данных, ООО «Мор Дэйта»²; University³ of London.

Кучеров Данила Игоревич

ведущий медицинский аналитик, ООО «Мор Дэйта»²; Самарский государственный медицинский университет⁴.

¹Адрес: 390005, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

²Адрес: 125009, Российская Федерация, г. Москва, ул. Тверская, д. 9.

³Адрес: WC1E 7HU, Великобритания, Лондон, Malet Street, Senate House.

⁴Адрес: 443099, Российская Федерация, г. Самара, ул. Чапаевская, д. 89.

E-mail для связи: alexib@inbox.ru

Аннотация: В работе представлена математическая модель клинической лаборатории, разработанная на основе статистического анализа реальных данных и позволяющая оптимизировать процессы обработки проб. Ключевой вклад исследования заключается в разработке алгоритмов расчёта персональных коэффициентов скорости работы лаборатории и вероятностного распределения потока проб. На основе этих показателей создана имитационная модель, реализованная на языке Python с использованием библиотеки SimPy для дискретно-событийного моделирования. Модель позволяет воспроизводить различные сценарии нагрузки на лабораторию и достоверно прогнозировать эффективность работы, что обеспечивает оптимизацию использования оборудования, реагентов и человеческих ресурсов в клинических лабораториях.

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

Введение

Сегодня медицинские лаборатории являются критически важным составляющим медицинской диагностики. Многое в медицине зависит от качества и скорости производства результатов лабораторий. Медицинские лаборатории помогают в объективизации показателей состояния здоровья любого пациента.

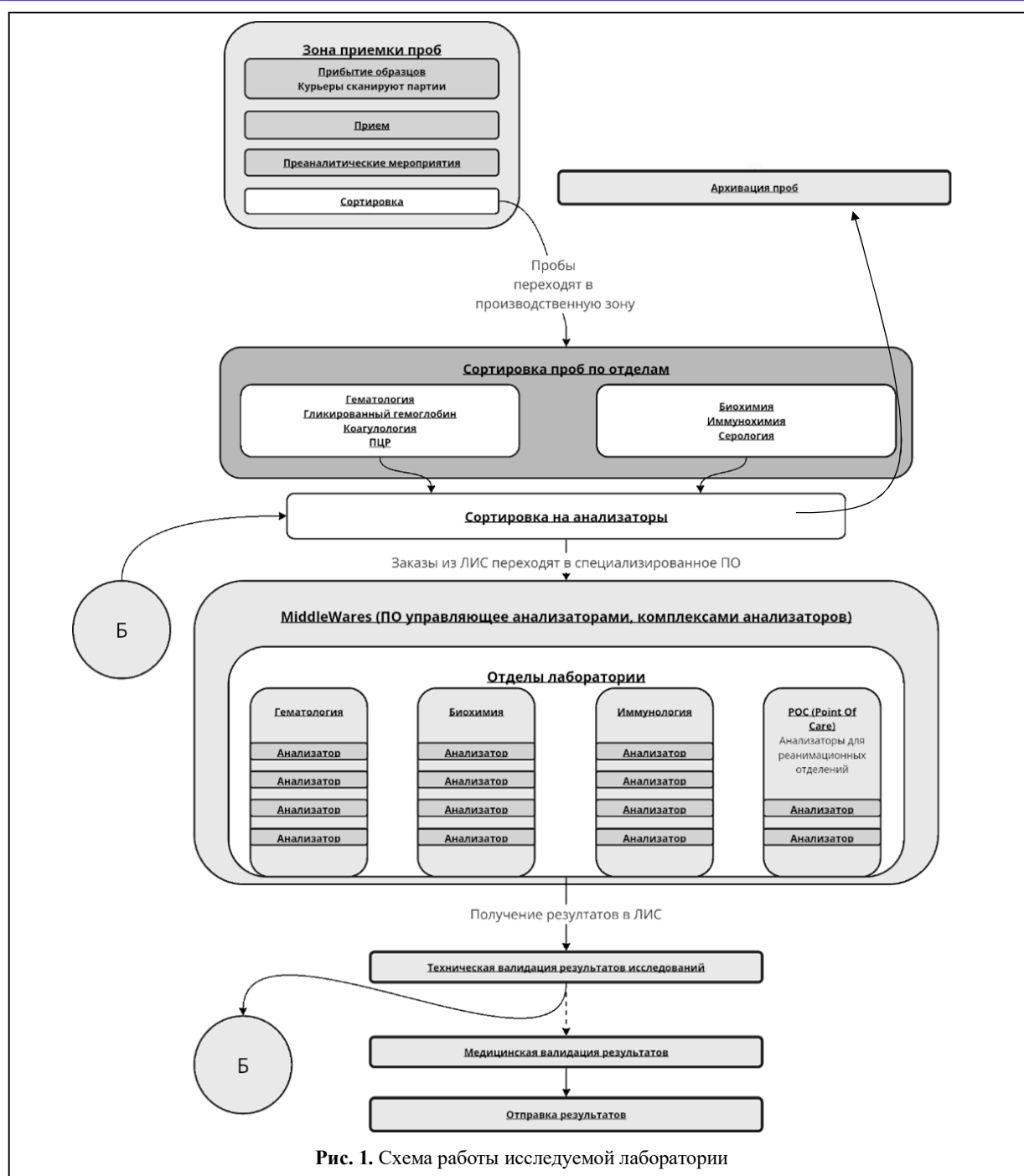
Современные клинические лаборатории представляют собой сложные системы, в которых обработка проб включает множество этапов, начиная от регистрации биоматериала и заканчивая выдачей результатов. Под пробой в данном контексте понимается часть образца биоматериала, непосредственно используемая в измерении, тогда как анализ представляет собой комплекс лабораторных процедур, выполняемых над этой пробой для получения диагностически значимой информации. Автоматизация процессов в лабораториях играет ключевую роль в повышении их эффективности, снижении вероятности ошибок и оптимизации использования оборудования, реагентов, и, что не менее важно, человеческого ресурса.

В данной работе представлена математическая модель клинической лаборатории, построенная на основе реальных данных лаборатории. Основными моментами являются формирование универсальных показателей, характеризующих направленность деятельности лаборатории, распределение типов проб,

коэффициентов, влияющих на скорость производства результатов, на основе представленных данных. На основе данных показателей написан алгоритм генерирующий синтетический датасет с заданным количеством проб и вероятностными характеристиками тестов, а также симуляция работы лаборатории с учётом её организационной структуры и загрузки. Алгоритмы расчёта показателей лаборатории были написаны на языке программирования Python в связке с библиотекой Simply, позволяющей реализовать дискретно-событийное моделирование процессов лабораторных исследований.

Разработка математических моделей, основанных на данных о реальных данных лаборатории [1], позволяет подобрать правильное количество оборудования с учётом текущего персонала, оптимизировать расходы на реагенты для оборудования в следствие объединения или, наоборот, разделения потоков проб, а также позволяет спрогнозировать работу лаборатории при увеличении количества производимых тестов по каждому отдельно взятому отделу [2].

Бизнес-процессы лаборатории автоматизируются с помощью специализированных анализаторов, блоков анализаторов (составленных из нескольких анализаторов), систем управления анализаторами и блоками анализаторов, лабораторных информационных систем, логистических систем и т.д.



Анализаторы позволяют получать результаты анализов в автоматическом режиме. Системы управления анализаторами позволяют проводить исследования, контроль качества, калибровку, в редких случаях корректировку результатов.

Лабораторные информационные системы позволяют оцифровать работу лаборатории, уйти от ручного ведения журналов, счетов, хранения результатов в бумажном виде. Данные из анализаторов попадают в лабораторную информационную систему. Перед выдачей результатов данные подвергаются валидации и, после утверждения медицинским персоналом, могут быть выданы пациенту или врачу, выписавшему направление на исследование [3].

Общая структура математической модели

Разрабатываемая математическая модель клинической лаборатории базируется на вероятностно-статистическом анализе реальных данных. Основные компоненты модели включают:

- описание структуры лаборатории — определение количества департаментов, типов тестов, их распределения по лабораторным отделениям;
- генерация синтетического датасета — моделирование поступления проб с учётом вероятностного распределения тестов внутри одной пробы;
- симуляция процессов обработки проб — дискретно-событийное моделирование с учётом ограничений по количеству анализаторов, времени выполне-

ния тестов и загруженности лаборатории.

Целью работы клинической лаборатории является своевременное выполнение заказов. Существуют как нормы по сроку хранения и выполнения заказов, так и часы работы лаборатории. В целях оптимизации затрат реагентов, времени, человеческого и финансового ресурсов, стоит правильно рассчитывать количество анализаторов в лаборатории, с учётом его характеристик, а также персонала лаборатории. Систем, позволяющих правильно и корректно рассчитать количество анализаторов на данный момент нет, что влечёт за собой либо неоптимальное использование времени персонала, либо, неоптимальное использование оборудования и реагентов, приводящее к финансовым и временным потерям.

Обобщённая 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.

Определяющие факторы (переменные), влияющие на время выполнения заказа:

- Время дня (зависимость количества поступивших проб от времени);
- Количество накопившихся проб, на каждый прибор;
- Коэффициент распределения проб различных классов к общему количеству поступаемых проб;
- Коэффициент распределения среднего количества срочных (Cito) проб к общему количеству поступаемых проб;
- Мощность анализатора;
- Количество сотрудников лаборатории;
- График работы лаборатории.

Время поступления проб в лабораторию 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 [4]. Зависимость количества поступающих проб в час, можно проиллюстрировать следующим графиком (рис. 2), построенный на основе реальных данных рассматриваемой лаборатории. Наблюдаемый пик в середине дня обусловлен логистическими особенностями доставки проб, когда большинство биоматериала поступает в лабораторию группами после забора всех проб

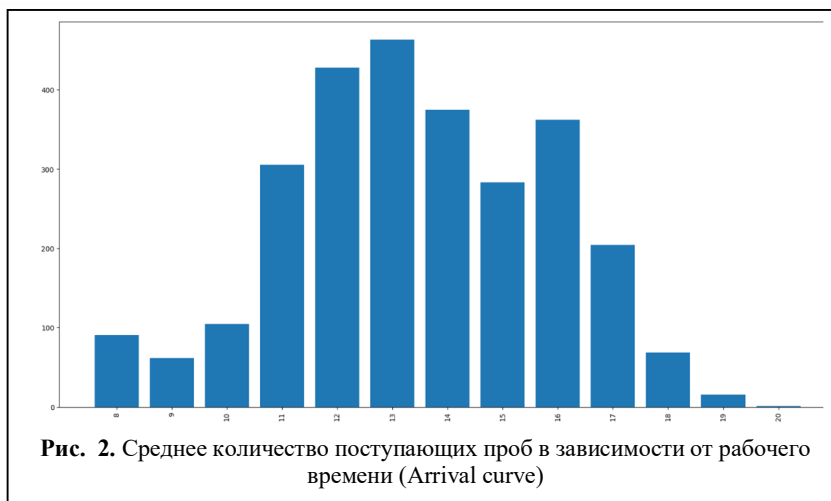


Рис. 2. Среднее количество поступающих проб в зависимости от рабочего времени (Arrival curve)

у всех пациентов, а также требуется время на транспортировку проб в лабораторию. Для рассматриваемой лаборатории медианное время с момента забора пробы и до принятия её в лаборатории составляет 256 минут, медианное время получения результата после приёма материала в лаборатории составляет 59 минут.

Разница между накопившимися пробами (очередью) и выполненными пробами фактически является прогрессом в час:

$$\text{progress}_i = \text{backlogSamples}_i - \text{resultSamples}_i.$$

Backlog (накопившееся количество проб) на анализаторе рассчитывается как разница между поступившими и обработанными пробами за определенный период:

$$\text{backlogSamples}_i = \text{backlogSamples}_{i-1} + \text{receptedSamples}_i - \text{progress}_i.$$

Коэффициент распределения проб различных классов к общему количеству поступаемых 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; $N(T_{\text{cito}})$ — количество случаев, когда тест является срочным; N — общее количество тестов.

На данном этапе разработки в модели не учитывается срочность пробы и данный коэффициент не будет рассчитан.

График работы исследуемой лаборатории с 9:00 до 17:00, что в общей сложности составляет 8 рабочих часов. Время работы симуляции на данном этапе моделирования ограничено рабочими часами.

Мощность анализатора, фактически, является заданным производителем оборудования параметром. Однако, так как скорость выполнения различных тестов различна, производители указывают скорость работы анализатора основываясь на выполнении теста с самым коротким временем измерения. В связи с чем имеется некий test_constraint коэффициент.

Наиболее точную величину реальной производительности анализатора в данной лаборатории можно получить, проанализировав часы с наибольшей загрузкой. Часы с наибольшей загрузкой являются часами, где backlog на начало часа превышает заявленную производителем скорость производства результатов.

$$\text{real_performance} = \text{average}(n_{\text{result_in_hours_with_big_backlog}}),$$

где real_performance — это реальная производительность анализатора, вычисляемая как среднее количество результатов, полученных при наличии большой очереди (backlog). Большой очередью является количество накопившихся на начало часа проб превышающее теоретический максимум анализатора

$$\text{test_constraint} = \frac{\text{real_performance}}{n_{\text{result_teoretical}}},$$

где test_constraint — это коэффициент, характеризующий отношение реальной производительности к теоретической максимальной производительности анализатора.

На производительность анализатора, также, влияет скорость постановки проб. Скорость поставки проб зависит от:

- Наличия в лаборатории специализированных сортеров;

- Наличия специализированных автоматизированных систем подачи биоматериалов в анализатор (автоматизированный трэк);

- Скорости работы персонала лаборатории.

В рассматриваемой лаборатории отсутствует автоматизированная система подачи биоматериалов в анализатор (автоматизированный трэк), однако присутствуют специализированные сортировщики проб, в связи с чем скорость подачи биоматериалов в анализатор зависит исключительно от скорости работы персонала лаборатории. В связи с вышеперечисленными фактами заключаем, что существует некоторый коэффициент скорости работы сотрудников лаборатории, влияющий на скорость производства результатов

$$\text{personal_constraint} = \frac{\text{real_performance}}{\max(n_{\text{result_per_hour}})},$$

где $\text{personal_constraint}$ — это коэффициент, отражающий влияние скорости работы персонала на производительность лаборатории, рассчитываемый как отношение реальной производительности к максимальному количеству результатов, обработанных за час.

Стоит пояснить, что в коде, представленном на рисунках 5 и 6, используются следующие переменные:

- $\text{real_performance_avg}$ — объект типа ключ-значение, где для каждого отдела хранится средняя реальная производительность, рассчитанная как среднее количество выполненных тестов в часы, когда количество накопленных к началу часа проб превышало теоретические (заявленные производителем) значения;

Функция `calculate_biomaterial_probabilities`(таблица данных `df`):

Группируем данные по типу биоматериала и уникальному идентификатору пробы по колонкам [`biomaterial`, `sample_id`]

Рассчитать количество тестов для каждой группы

Создать таблицу `biomaterial_counts` со столбцами: [`biomaterial`, `sample_id`, `test_count` (число тестов на пробу)]

Подсчитать число проб для каждого биоматериала
`biomaterial_samples_count` = количество значений `sample_id` для каждого `biomaterial` в `biomaterial_counts`

Определить общее количество проб
`total_count` = сумма всех значений `biomaterial_samples_count`

Рассчитать вероятность для каждого биоматериала как отношение количества проб данного биоматериала к общему числу проб
`probabilities` = `biomaterial_samples_count` / `total_count`

Создать итоговую таблицу `biomaterial_probabilities` с колонками: [`biomaterial`, `10_test_number`, `20_test_number`, ..., `90_test_number` (квантили числа тестов для биоматериала), `probability` (вероятность)]
для каждого квантиля (10%, 20%, ..., 90%) вычислить значение тестов (`test_count`) для `biomaterial`

`return biomaterial_probabilities`

Рис. 3. Листинг алгоритма расчёта распределения биоматериалов

```

Функция calculate_department_probabilities(таблица данных df):

    Добавить в таблицу df колонку day = дата из колонки dt_result

    daily_counts = сгруппировать df по [day, department], посчитать уникальные sample_id

    mean_daily_counts = сгруппировать daily_counts по department, посчитать среднее sam-
ples_per_day

    total_mean = сумма mean_daily_counts

    # Рассчитать вероятность распределения проб по отделам как долю от общего числа проб
    probabilities = mean_daily_counts / total_mean

    department_samples_counts = сгруппировать df по [department, sample_id], посчитать размер
каждой группы

    Создать таблицу department_samples с колонками [department, sample_id, test_count]

    Для каждого отдела вычислить квантили (10%, 20%, ..., 90%) по test_count

    Создать итоговую таблицу с колонками [department, 10_test_number, 20_test_number, ...,
90_test_number, probability]

    return results
return biomaterial_probabilities

```

Рис. 4. Листинг алгоритма расчёта распределения проб по отделам

```

Функция calculate_analyte_probabilities(таблица данных df):

    grouped = сгруппировать df по [department, biomaterial, test_name]

    analyte_samples_counts = для каждой группы вычислить размер (количество проб)

    Создать таблицу analyte_count с колонками [department, biomaterial, test_name, count
(число проб с этим тестом)]

    total_count = сумма всех значений count

    probabilities = count / total_count

    Создать итоговую таблицу probabilities_df с колонками [department, biomaterial,
test_name, probabilities]

    Отсортировать таблицу probabilities_df по department, biomaterial, test_name

    return probabilities_df

Вернуть tests_constr

```

Рис. 5. Листинг алгоритма расчёта распределения тестов

```

Функция get_tests_constraints():

    Инициализировать словарь tests_constr с пустыми списками для каждого отдела

    for key in tests_constr:

        Объединить все таблицы из best_tests_per_hour[key] в одну (best_tests_ever)

        max_results = max(best_tests_ever['number_of_results'])

        num_analyzers = длина(real_lab_analyzers[key])

        tests_constr[key] = max_results / theoretical_capacity[key] / num_analyzers

    Вернуть tests_constr

```

Рис. 6. Листинг алгоритма расчета test_constraint коэффициентов

- `best_tests_per_hour` — объект типа ключ-значение, где для каждого отдела (ключа) хранится список таблиц с данными по лучшему (максимально-му) количеству тестов, выполненным за час, по неделям;
- `theoretical_capacity` — объект типа ключ-

Функция `get_personal_constraints()`:

```

Инициализировать словарь personal_constr с пустыми списками для каждого отдела

for key in personal_constr:

    Объединить все таблицы из best_tests_per_hour[key] в одну (best_tests_ever)

    Найти максимальное число выполненных тестов в час: max_results =
    max(best_tests_ever['number_of_results'])

    avg_real_perf = real_performance_avg[key]

    personal_constr[key] = avg_real_perf / max_results

Вернуть personal_constr

```

Рис. 7. Листинг алгоритма расчета `personal_constraint` коэффициентов

значение, с теоретической максимальной производительности каждого отдела, переданный при инициализации класса;

- `real_lab_analyzers` — объект типа ключ-значение, где для каждого отдела хранится список

анализаторов (оборудования).

Из таблицы 1 видно, что реальная загрузка анализаторов расходится с номинальной, из-за чего прогнозы основанные на номинальной мощности оборудования могут быть ошибочными. На практике, биохимический отдел лаборатории, в свете неравномерности времени выполнения различных тестов, наиболее явно показывает этот эффект. Можно заметить, что

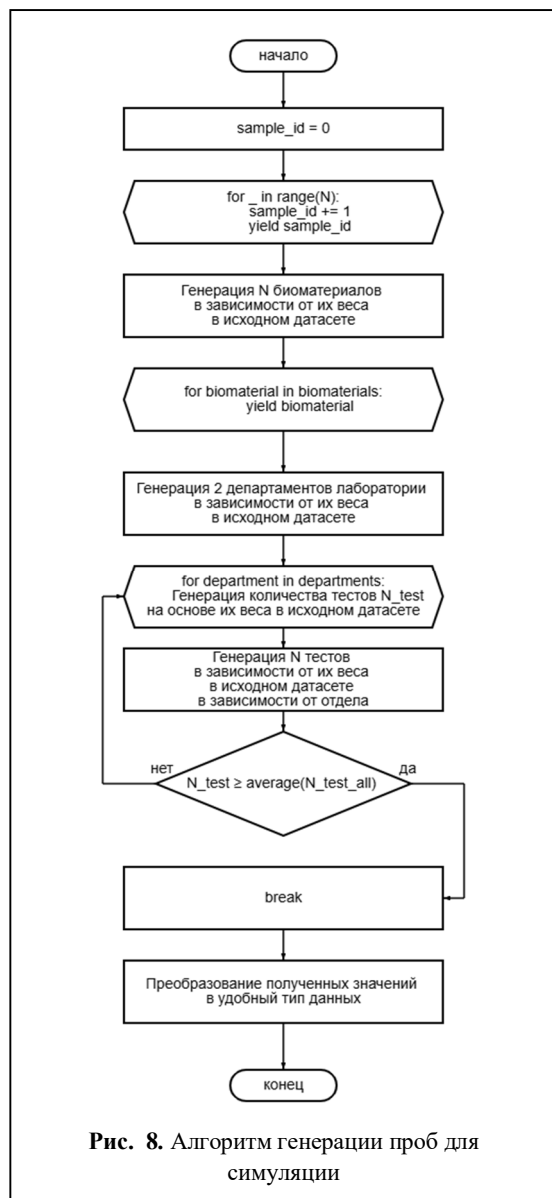


Рис. 8. Алгоритм генерации проб для симуляции

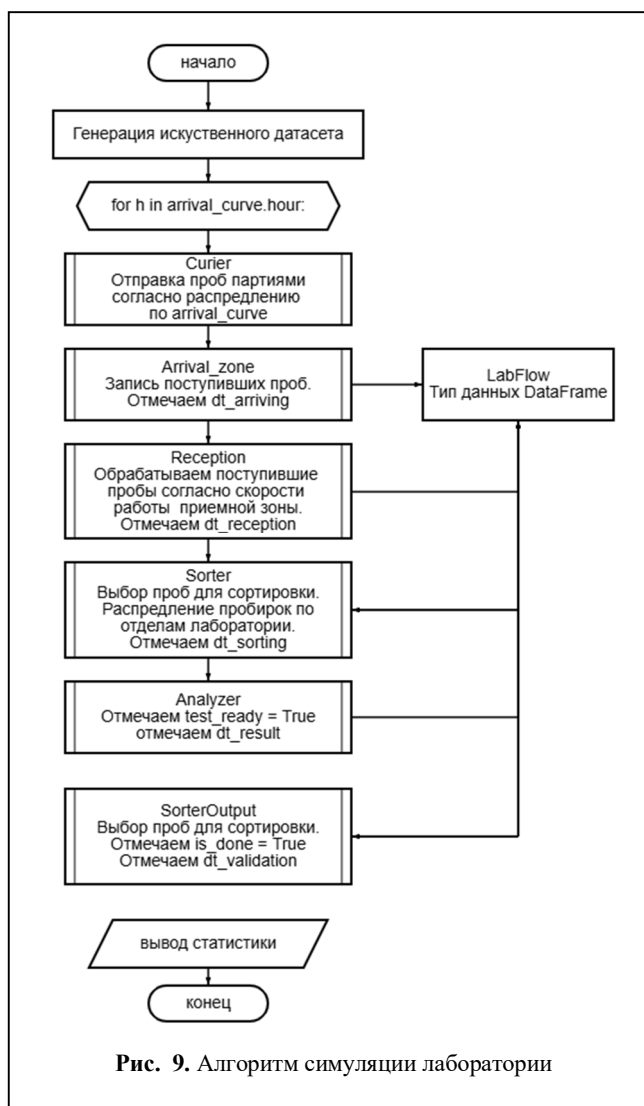


Рис. 9. Алгоритм симуляции лаборатории

Таблица 1. Результаты, полученные в процессе анализа исходных данных

Отдел лаборатории	Анализатор	Количество	Номинальная производительность	Реальная пиковая производительность	Реальная средняя производительность	Количество BackLog часов
Immunohematology	Erytra Eflexis	1	72	66.0	0.0	0.0
Helicobacter	Kibion Dynamic	1	60	24.0	11.0	48.0
Biochemistry	AU5812	1	3000	2628.0	1698.0	202.0
Hematology	DXH 800	3	100	75.3	48.6	853.0
Immunochemistry	Alinity	3	250	148.3	76.6	976.0
Electrophoresis	Cappylaris 3 Terra	6	120	46.7	45.8	1763.0
ESR	Test1	2	60	52.0	30.0	17.0
Hemostasis	ACL Top 500	1	80	47.5	13.0	7.0
Hemostasis	STA R MAX	1	250	47.5	13.0	7.0
Electrophoresis	DAS AP22	1	140	46.7	45.8	1763.0

оборудование для электрофореза имеет относительно большое число backlog часов, малое различие между пиковой нагрузкой и средней нагрузкой анализаторов, большую разницу между номинальной мощностью и реальной нагрузкой, что говорит о сценарии работы лаборатории в виде накопления большого количества проб и прогонки их в анализаторе за раз [5]. Аналогичная, описанному выше сценарию ситуация с отделом иммунохимии. В связи с тем, что гематологические анализаторы выполняют только один комплексный анализ (с множеством показателей), различие номинальной мощности и пиковой нагрузки являются интересными для дальнейшего анализа [6].

Результаты симуляции лаборатории, при средней

реальной нагрузке на исследуемую лабораторию в 2500 проб, представлены следующими графиками.

Результаты работы симуляции соответствуют реальной картине в лаборатории. Однако, требуется дополнительная валидация модели на данных других лабораторий для подтверждения её универсальности и точности.

Следует отметить, что дальнейшее развитие модели должно быть направлено на повышение точности прогнозов путём включения таких важных параметров, как срочность проб и время включения анализаторов в работу.

Дополнительно необходимо усложнить логику сортировки проб, что позволит более точно учитывать приоритеты обработки, срочность анализов и их распределение между департаментами лаборатории. Это обеспечит более точную имитацию реальных рабочих процессов.

В дальнейшем возможно развитие модели в направлении интеграции с лабораторными информационными системами (LIS), что позволит автоматизировать анализ данных и предлагать оптимальные конфигурации оборудования в режиме реального времени. Также планируется разработка удобного интерфейса для настройки параметров модели, что сделает её применение доступным для широкого круга лабораторий.

Литература

1. Каширин И.Ю. Модели знаний для коррекции дрейфа данных в Data Mining // Вестник РГРТУ. 2023. № 84. С. 108–118.
2. Бронев С.А. Имитационное моделирование: учеб. пособие. Красноярск: СФУ, 2007. 82 с.
3. Кишкун А.А. Клиническая лабораторная диагностика: учеб.

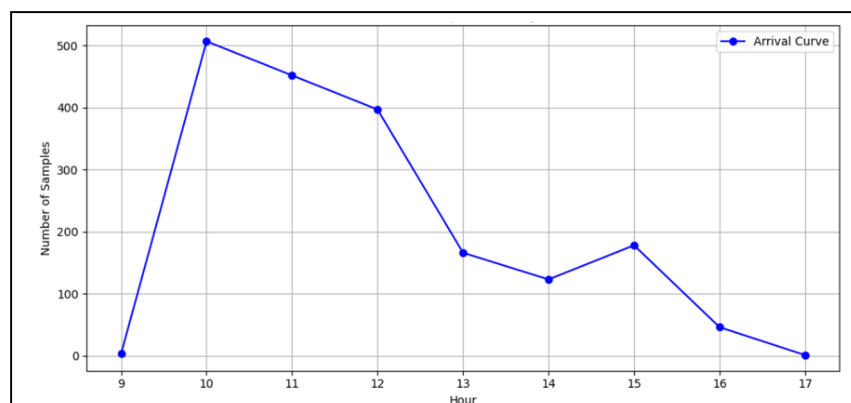


Рис. 10. Кривая поступающих проб на сгенерированных данных

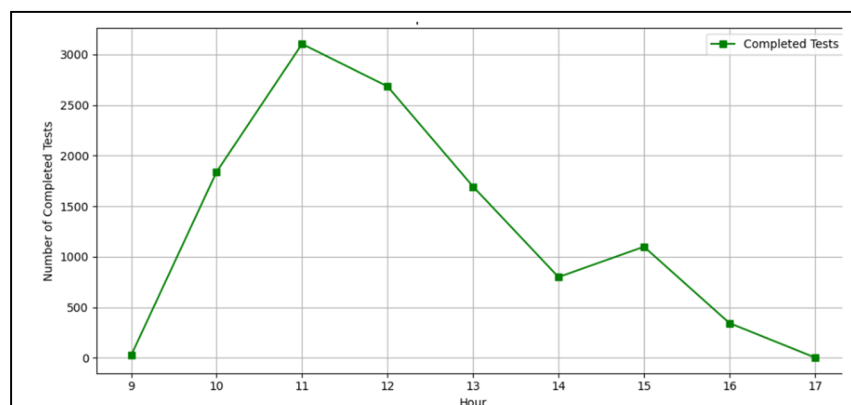


Рис. 11. Зависимость количества результатов в зависимости от времени

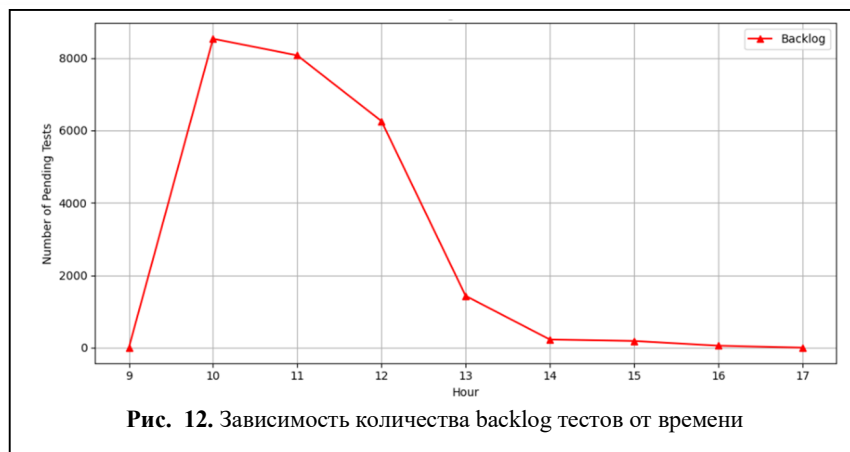


Рис. 12. Зависимость количества backlog тестов от времени

пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2019. 624 с.

4. Янов Е.С., Анцев А.В. Автоматизированный контроль технологической дисциплины современного машиностроительного производства // Вестник РГРТУ. 2024. № 88. С. 85–94.

5. Garcia L.S., editor in chief. Clinical laboratory management / Paul Bachner [et al.]. 2nd ed. Santa Monica, CA: LSG & Associates, 2013. 1068 с.

6. Жаров М.В. Моделирование оптимизации для организации производств цехов машиностроения в программной среде AnyLogic // Вестник РГРТУ. 2020. № 71. URL: https://vestnik.rsreu.ru/images/archive/2020/71/5_4_.pdf (дата обращения: 10.12.2025).

7. Jun J.B., Jacobson S.H., Swisher J.R. Application of discrete-event simulation in health care clinics: A survey // Operations Research. 1999. Vol. 50, No. 2. P. 254–271.

8. Monks T., Robinson S., Kottiadis K. Discrete-event simulation in healthcare: Reviewing the use and realism of

modelling // Int J Environ Res Public Health. 2021. Vol. 18, No. 22.

9. Mustafee N., Katsaliaki K. Simulation for healthcare: A taxonomy of applications // Operational Research for Emergency Planning in Healthcare: Volume 2. 2010. Pp. 252–295.

10. Law A.M. Simulation modeling and analysis. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2015. URL: <https://industri.fatek.unpatti.ac.id/wp-content/uploads/2019/03/108-Simulation-Modeling-and-Analysis-Averill-M.-Law-Edisi-5-2014.pdf> (дата обращения 10.12.2025).

11. Laskowski M. [et al.] Models of emergency departments for reducing patient waiting times // PLoS ONE. 2009. Vol. 4, No. 7. e6127.

12. Brailsford S.C. [et al.] An analysis of the academic literature on simulation and modelling in health care // Journal of Simulation. 2009. Vol. 3, No. 3. P. 130–140.

13. Rossetti M.D. Simulation modeling and Arena. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008. 680 p.

14. Синцева М.М., Кузьмин А.В., Дятлов Н.Е. Система моделирования процесса обслуживания пациентов в медицинских учреждениях для поддержки принятия управленческих решений // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2022. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-modelirovaniya-protssessa-obsluzhivaniya-patsientov-v-meditsinskih-uchrezhdeniyah-dlya-podderzhki-prinyatiya-upravlencheskih> (дата обращения 10.12.2025).

Поступила 10 декабря 2025 г.

English

METHODS AND ALGORITHMS FOR DATA COLLECTION AND PROCESSING FOR DECISION SUPPORT SYSTEMS FOR CLINICAL LABORATORIES

Aleksey Ivanovich Baranchikov — Grand Dr. in Engineering, Professor, Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin¹.

Danil Romanovich Batrakov — Postgraduate Student, Department of Electronic Computers, Ryazan State Radio Engineering University named after V.F. Utkin¹; Data Engineer, «More Data» company².

Danil Sergeevich Tokmin — Data Analyst, «More Data» company²; Master, University³ of London.

Danila Igorevich Kucherov — Lead Medical Analyst, «More Data» company²; Samara State Medical University⁴.

¹Address: 390005, Russian Federation, Ryazan, Gagarin st., 59/1.

²Address: 125009, Russian Federation, Moscow, Tverskaya St., 9.

³Address: 390005, WC1E 7HU, Great Britain, London, Malet St., Senate House.

⁴Address: 443099, Russian Federation, Ryazan, Samara, Chapaevskaya St., 89.

E-mail: alexib@inbox.ru

Abstract: Modern clinical laboratories face the need to optimize the processes of obtaining test results under conditions of limited resources and high demands on the speed and quality of diagnostics. One of the key problems is the lack of universal tools for calculating the optimal amount of equipment and personnel, taking into account real performance characteristics. The article proposes a mathematical model of a clinical laboratory, built on the basis of probabilistic-statistical analysis of real data, which allows predicting the efficiency of the laboratory under various workload scenarios. The developed model is based on a set of algorithms for calculating key indicators, such as coefficients of sample distribution by type of biomaterial and department, and coefficients of equipment and personnel performance constraints. These indicators make it possible to take into account the actual workload of analyzers and the speed of laboratory staff, which ensures the reliability of forecasts. Based on these coefficients, a simulation model is implemented using the Python lan-

guage and the SimPy library for discrete-event modeling of laboratory research processes. The modeling process includes generating a synthetic dataset with a given number of samples and probabilistic characteristics of tests based on the analysis of initial retrospective data, as well as simulating the operation of the laboratory taking into account its organizational structure and workload. The result of the study is a tool that allows laboratory managers to reasonably plan the amount of equipment, optimize reagent costs, and predict the laboratory's performance when the volume of tests performed changes. Further development of the model involves integration with laboratory information systems (LIS) and the development of a user-friendly interface for widespread use in clinical laboratories.

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

References

1. Kashirin I.Yu. Models of knowledge for correcting data drift in Data Mining. Vestnik RGRTU. 2023. No. 84. Pp. 108–118.
2. Bronov S.A. Simulation modeling: Study guide. Siberian Federal University, Department of Automated Design Systems. Krasnoyarsk: SFU, 2007. 82 p.
3. Kishkun A.A. Clinical laboratory diagnostics: Study guide. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow: GEOTAR-Media, 2019. 624 c.
4. Yanov E.S., Antsev A.V. Automated control of technological discipline in modern mechanical engineering production. Vestnik RGRTU. 2024. No. 88. Pp. 85–94.
5. Garcia L.S., editor in chief. Clinical laboratory management. Paul Bachner [et al.]. 2nd ed. Santa Monica, CA: LSG & Associates, 2013. 1068 c.
6. Zharov M.V. Optimization modeling for organizing mechanical engineering production using AnyLogic software. Vestnik RGRTU. 2020. No. 71. URL: https://vestnik.rsreu.ru/images/archive/2020/71/5.4_.pdf (Access Date: 10.12.2025).
7. Jun J.B., Jacobson S.H., Swisher J.R. Application of discrete-event simulation in health care clinics: A survey. Operations Research. 1999. Vol. 50, No. 2. P. 254–271.
8. Monks T., Robinson S., Kotiadis K. Discrete-event simulation in healthcare: Reviewing the use and realism of modeling // Int J Environ Res Public Health. 2021. Vol. 18, No. 22.
9. Mustafee N., Katsaliaki K. Simulation for healthcare: A taxonomy of applications. Operational Research for Emergency Planning in Healthcare: Volume 2. 2010. Pp. 252–295.
10. Law A.M. Simulation modeling and analysis. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2015. URL: <https://industri.fatek.unpatti.ac.id/wp-content/uploads/2019/03/108-Simulation-Modeling-and-Analysis-Averill-M.-Law-Edisi-5-2014.pdf> (Access Date: 10.12.2025).
11. Laskowski M. [et al.] Models of emergency departments for reducing patient waiting times. PLoS ONE. 2009. Vol. 4, No. 7. e6127.
12. Brailsford S.C. [et al.] An analysis of the academic literature on simulation and modelling in health care. Journal of Simulation. 2009. Vol. 3, No. 3. P. 130–140.
13. Rossetti M.D. Simulation modeling and Arena. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008. 680 p.
14. Sintseva M.M., Kuzmin A.V., Dyatlov N.E. Simulation system for servicing patients in medical institutions to support managerial decision-making // Models, systems, networks in economics, technology, nature and society. 2022. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-modelirovaniya-protssessa-obsluzhivaniya-patsientov-v-meditsinskih-uchrezhdeniyah-dlya-podderzhki-prinyatiya-upravlencheskih> (Access Date: 10.12.2025).