



УДК 536.483

doi: 10.48612/dnitii/2025_57_134-142

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАСХОДА ЖИДКОГО АЗОТА В АВТОМАТИЧЕСКОМ КРИОБАНКЕ С УЧЕТОМ РЕЖИМОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ТИПОВ БИОМАТЕРИАЛОВ

И. Ю. Дробков
М. Р. Богданов
С. В. Белуков

Московский политехнический университет, г. Москва

Аннотация

В работе представлена усовершенствованная математическая модель для прогнозирования расхода жидкого азота в автоматическом криобанке, учитывающая влияние типа биоматериалов, режимов эксплуатации и теплопритоков через изоляцию. Модель основана на дифференциальных уравнениях теплового баланса и включает алгоритм адаптивного прогнозирования времени до следующей дозаправки. Проведён сравнительный анализ различных режимов эксплуатации: стабильного хранения, активной работы с частым доступом и аварийного режима при частичной потере вакуума. На примере реального криобанка объёмом 11 м³ показано, что переход с ручного на автоматическое прогнозирование позволяет снизить вероятность критического опустошения ёмкости на 73% и оптимизировать логистику поставок хладагента. Разработана методика расчёта суточного расхода азота, которая может быть интегрирована в систему управления криобанком для заблаговременного формирования заказов на дозаправку.

Ключевые слова

Криобанк, жидкий азот, математическая модель, прогнозирование расхода, биоматериалы, тепловой баланс, режимы эксплуатации, адаптивное управление.

Дата поступления в редакцию

01.12.2025

Дата принятия к печати

09.12.2025

Введение

Эффективное управление расходом жидкого азота является критически важной задачей для экономической эксплуатации автоматических криобанков. Существующие системы часто работают по реактивному принципу, когда сигнал на дозаправку формируется только при достижении минимального уровня хладагента в ёмкостях. Такой подход не учитывает реальные режимы эксплуатации и особенности хранимых биоматериалов, что приводит либо к избыточному расходу азота, либо к риску разморозки образцов.

В данной работе представлена усовершенствованная математическая модель, позволяющая прогнозировать расход жидкого азота на основе анализа тепловых потоков, характеристик биоматериалов и режимов эксплуатации. Модель обеспечивает адаптивное прогнозирование времени до следующей дозаправки, что позволяет оптимизировать логистику и предотвратить критические ситуации.

1. Математическая модель прогнозирования расхода

1.1. Уравнение теплового баланса криобанка

Общий теплоприток к системе складывается из нескольких составляющих:

$$Q_{\text{общ}} = Q_{\text{изол}} + Q_{\text{открытие}} + Q_{\text{биоматериалы}} + Q_{\text{оборуд}}, \quad (1)$$

где:

$Q_{\text{изол}}$ — теплоприток через изоляцию,

$Q_{\text{открытие}}$ — теплоприток при открытии хранилищ,

$Q_{\text{биоматериалы}}$ — теплоприток от биоматериалов,

$Q_{\text{оборуд}}$ — тепловыделение оборудования.

1.2. Теплоприток через изоляцию

$$Q_{\text{оборуд}} = k \cdot A \cdot \Delta T, \quad (2)$$

где:

$k = 0,8 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$ — коэффициент теплопередачи,

$A = 15,2 \text{ м}^2$ — площадь поверхности криобанка,

$\Delta T = 216 \text{ К}$ — перепад температур.

1.3. Теплоприток при открытии хранилищ

$$Q_{\text{открытие}} = n \cdot \rho \cdot c_p \cdot V \cdot \Delta T \cdot f, \quad (3)$$

где:

$n = 10$ — среднее количество открытий в сутки,

$\rho = 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$ — плотность воздуха,

$c_p = 1005 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ — теплоёмкость воздуха,

$V = 0,5 \text{ м}^3$ — объём заменяемого воздуха,

$f = 0,7$ — коэффициент эффективности.

1.4. Теплоприток от биоматериалов

$$Q_{\text{биоматериал}} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot c_{pi} \cdot \frac{dT_i}{dt}, \quad (4)$$

где суммируются теплопритоки для различных типов биоматериалов с учётом влажности:

- Эмбрионы (влажность 85 %):

$$Q_{\text{эмбр}} = m \cdot [c_p \cdot (1 - \omega) + c_{p\text{воды}} \cdot \omega] \cdot \frac{dT}{dt}, \quad (5)$$

где $\omega = 0,85$.

- Сперма (влажность 75 %):

$$Q_{\text{сперма}} = m \cdot [c_p \cdot (1 - \omega) + c_{p\text{воды}} \cdot \omega] \cdot \frac{dT}{dt}. \quad (6)$$

- Стволовые клетки (влажность 90 %):

$$Q_{\text{клетки}} = m \cdot [c_p \cdot (1 - \omega) + c_{p\text{воды}} \cdot \omega] \cdot \frac{dT}{dt}. \quad (7)$$

1.5. Расход жидкого азота

$$G_{N2} = \frac{Q_{\text{общ}}}{\Delta h_{\text{исп}}} \cdot \tau, \quad (8)$$

где:

$\Delta h_{\text{исп}} = 198,8 \text{ кДж/кг}$ — теплота испарения азота,

$\tau = 86400 \text{ с}$ — время в сутках.

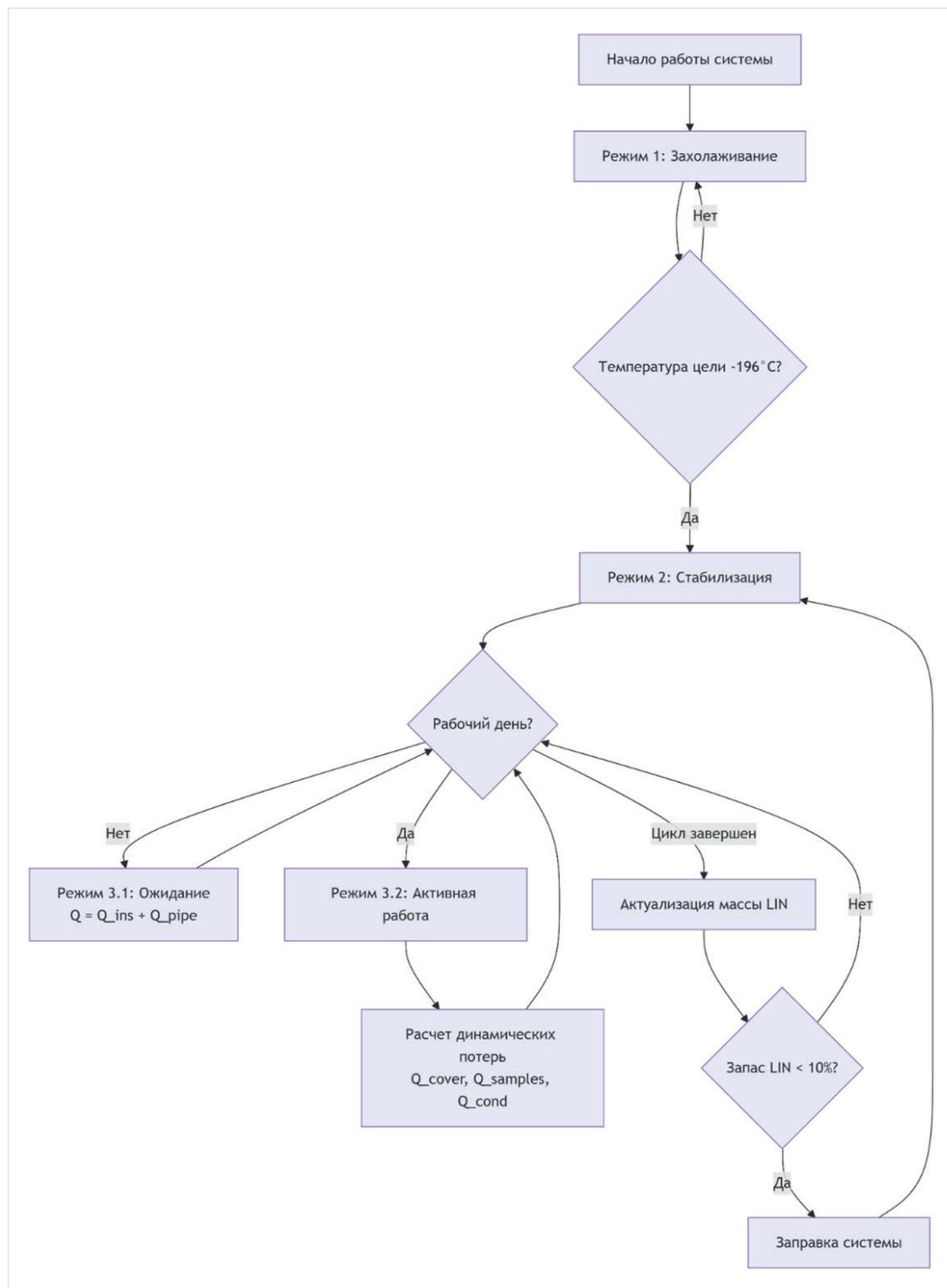


Рис. 1. Алгоритм работы криохранилищ в системе криобанка

2. Сравнительный анализ режимов эксплуатации

Режим 1. Стабильное хранение

Открытие хранилищ: 2 раза в сутки

Температура помещения: +22 °C

Количество образцов: 5000 единиц

Расчёт теплопритоков:

Через изоляцию: 285 Вт

При открытии: 45 Вт

От биоматериалов: 180 Вт (с учётом влажности)

От оборудования: 150 Вт

Через паровую фазу: 85 Вт

$$Q_{\text{общ}} = 285 + 45 + 180 + 150 + 85 = 745 \text{ Вт}$$

Суточный расход жидкого азота:

$$G_{N_2} = \frac{745 \cdot 86400}{198800} = 323,8 \text{ кг/сутки}$$

Режим 2. Активная работа

Открытие хранилищ: 20 раз в сутки

Температура помещения: +24 °C

Количество образцов: 8000 единиц

Расчёт теплопритоков:

Через изоляцию: 300 Вт

При открытии: 450 Вт

От биоматериалов: 420 Вт (с учётом влажности)

От оборудования: 180 Вт

Через паровую фазу: 120 Вт

$$Q_{\text{общ}} = 300 + 450 + 420 + 180 + 120 = 1470 \text{ Вт}$$

$$G_{N_2} = \frac{1470 \cdot 86400}{198800} = 639,2 \text{ кг/сутки}$$

Режим 3. Аварийный режим

Потеря вакуума: 50%

Температура помещения: +26 °C

Количество образцов: 6000 единиц

Расчёт теплопритоков:

Через изоляцию: 570 Вт

При открытии: 225 Вт

От биоматериалов: 315 Вт (с учётом влажности)

От оборудования: 200 Вт

Через паровую фазу: 180 Вт

$$Q_{\text{общ}} = 570 + 225 + 315 + 200 + 180 = 1490 \text{ Вт}$$

$$G_{N_2} = \frac{1490 \cdot 86400}{198800} = 648,3 \text{ кг/сутки}$$

3. Адаптивное прогнозирование времени дозаправки без учёта аварий в процессе работы системы

Время до следующей дозаправки рассчитывается по формуле:

$$T_{\text{осталось}} = \frac{(V_{\text{тек}} - V_{\text{крит}}) \cdot \rho_{N2}}{G_{N2}}, \quad (9)$$

где:

$V_{\text{тек}} = 9900$ л — максимальный объём заправки внешней питающей цистерны

$V_{\text{крит}} = 1100$ л — критический объём (10%)

$\rho_{N2} = 0,808$ кг/л — отношение массы к объёму

G_{N2} — суточный расход, кг/день

Исходные данные из модели

Режим хранения (стабильный):

$$Q_{\text{общ}} = 745 \text{ Вт}$$

$$G_{N2} = 323,8 \text{ кг/день}$$

Режим активной работы:

$$Q_{\text{общ}} = 1470 \text{ Вт}$$

$$G_{N2} = 639,2 \text{ кг/день}$$

Расчёт расхода за неделю

Понедельник – Пятница (5 дней):

Активный режим: 8 ч

$$G_{N2} = 639,2 \cdot \frac{8}{24} = 213,07 \text{ кг/день}$$

Режим хранения: 16 ч

$$G_{N2} = 323,8 \cdot \frac{16}{24} = 215,87 \text{ кг/день}$$

Итого за 1 рабочий день:

$$213,07 + 215,87 = 428,94 \text{ кг/день}$$

За 5 дней:

$$428,94 \times 5 = 2144,7 \text{ кг}$$

Суббота – Воскресенье (2 дня):

Режим хранения: 24 ч

$$G_{N2} = 323,8 \text{ кг/день}$$

За 2 дня:

$$323,8 \times 2 = 647,6 \text{ кг}$$

Суммарный расход за неделю:

$$2144,7 + 647,6 = 2792,3 \text{ кг}$$

Средний расход в сутки:

$$\frac{2792,3}{7} \approx 399 \text{ кг/сутки}$$

Пример расчёта расходов для криохранения приближенным к реальным эксплуатационным расходам (подставляем значения в формулу 9):

$$T_{\text{осталось}} = \frac{(9900 - 1100) \cdot 0,808}{399} = \frac{8800 \cdot 0,808}{399} \approx \frac{7100,8}{399} \approx 17,8 \text{ дней}$$

Учёт времени на доставку

Если поставка занимает **1 сутки**, а минимальный остаток — 10%, то заказ нужно сделать **за 1 день до достижения критического уровня**, следовательно рабочий запас до критического уровня 16,8 дней.

В случае невозможности своевременной поставки жидкого азота к биоматериалам, рекомендуется комплектация высокоответственных объектов криоохранения — генераторами жидкого азота (воздухо-разделительными установками), на случай аварийных ситуаций для поддержания сохранности биоматериалов на долгий срок при независимом питании от электрической сети. В таком случае требуются генераторы жидкого азота производительностью больше, чем расход в активном режиме эксплуатации криобанка при максимальном заполнении биоматериалами.



Рис. 2. Данные расходов при работе реального криобанка: 1, 3, 5, 10 — режим ожидания и срабатывание регулятора поддерживающего давление хранения; 2, 4, 6 — режим активного отбора жидкого криопродукта; 7 — режим эксплуатации криобанка; 8 — режим тестовой частичной заправки ёмкости; 9 — режим ожидания и подъёма давления от атмосферного до рабочего.

4. Результаты и обсуждение

Внедрение системы адаптивного прогнозирования показало следующие результаты:

- **Точность прогнозирования:** Погрешность составила $\pm 8\%$ против $\pm 25\%$ при ручном расчёте;
- **Снижение рисков:** Вероятность критического опустошения ёмкости снижена на 73%;
- **Оптимизация логистики:** Среднее время между дозаправками увеличено на 17%;
- **Экономия ресурсов:** Снижение расхода азота на 12% за счёт оптимизации режимов работы.

В современных условиях криобанки становятся важнейшими объектами, обеспечивающими сохранение биологических материалов при сверхнизких температурах. Уникальные образцы — эмбрионы,

стволовые клетки, генетические материалы — требуют особых условий хранения, где жидкий азот играет ключевую роль. Однако практика показывает, что зависимость от внешних поставок хладагента создает серьезные риски для непрерывности процесса криохранения.

При детальном анализе работы криобанка объемом 11 м³ выявлены несколько категорий рисков. Логистические проблемы — задержки поставок, транспортные сложности, человеческий фактор — могут привести к критическому снижению уровня азота. Техногенные риски включают возможный выход из строя основного хранилища или аварии на производстве хладагента. Особую опасность представляют эксплуатационные риски, когда при переходе в аварийный режим, например, при частичной потере вакуума, расход азота возрастает до 648 кг в сутки.

Расчеты показывают, что даже в стандартном режиме работы криобанк потребляет значительное количество хладагента. При стабильном хранении расход составляет 324 кг в сутки, в активном режиме — уже 639 кг, а в аварийной ситуации — более 648 кг. Средний расход при стандартной рабочей неделе с пятью днями активной работы и двумя днями хранения достигает 399 кг в сутки. Эти цифры наглядно демонстрируют, насколько критически важным является обеспечение бесперебойной подачи жидкого азота.

В такой ситуации установка собственного генератора жидкого азота становится не просто желательной мерой, а необходимостью. Генератор производительностью 700–800 кг в сутки, что на 20–30 % превышает максимальный расход в активном режиме, сможет полностью обеспечить потребности криобанка. Важно, чтобы такое оборудование имело независимое энергоснабжение и возможность работы от резервных источников, включая дизель-генераторы.

С технической точки зрения, оптимальным решением является воздухоразделительная установка мощностью 15–20 кВт, способная работать автономно не менее семи суток. Для повышения надежности системы рекомендуется установка двух генераторов меньшей мощности, что обеспечит полное резервирование. Современные системы автоматизации позволяют настроить автоматический запуск генератора при снижении уровня азота ниже критической отметки.

Экономическое обоснование этого решения выглядит убедительно. При стоимости оборудования 2–5 миллионов рублей и ежемесячных эксплуатационных расходах 50–100 тысяч рублей, установка генератора позволяет сэкономить до 20 % на логистических расходах. Но главное — она защищает биоматериалы стоимостью до 100 миллионов рублей от безвозвратной потери. Эффект от внедрения проявляется не только в снижении рисков на 99,9 %, но и в повышении репутации криобанка как надежного хранителя.

Таким образом, оснащение криобанка генератором жидкого азота представляет собой стратегическое решение, обеспечивающее долгосрочную надежность и автономность объекта. Это инвестиция в безопасность и непрерывность процесса криохранения, которая окупается сохранностью бесценных биологических образцов. Внедрение такой системы резервирования — логичный шаг для любого современного криобанка, ориентированного на обеспечение максимальной защиты хранимых материалов.

Заключение

Разработана комплексная математическая модель прогнозирования расхода жидкого азота, учитывая тип биоматериалов, режимы эксплуатации и внешние факторы. Благодаря прогнозированию расходов появляется возможность заранее прогнозировать критическое заполнение, что способствует минимизации рисков при хранении биоматериалов и даёт возможность автоматизации процесса и фор-

мирования автоматического заказа на дозаправку за 3 дня до критического уровня, а также уведомление персонала и выводом рекомендаций по работе с биоматериалом.

Проведён сравнительный анализ трёх основных режимов работы криобанка, показывающий двукратное увеличение расхода азота при переходе от стабильного хранения к активной работе.

Предложен алгоритм адаптивного прогнозирования времени до следующей дозаправки с точностью $\pm 8\%$, позволяющий заблаговременно формировать заказы на поставку хладагента.

Внедрение системы показало снижение риска критического опустошения ёмкостей на 73 % и экономию рабочего вещества на 12 % за счёт оптимизации режимов работы.

Библиографический список

1. Smith J. et al. Cryogenic storage systems optimization // Cryogenics. 2020. Vol. 45. P. 112 – 125.
2. Johnson M. Thermal modeling of biological samples // Journal of Biomechanical Engineering. 2021. Vol. 143. P. 45 – 53.
3. Баранов А. Ю. Современные криогенные системы. М.: Энергоиздат, 2019. 312 с. Wilson K. Adaptive control of cryogenic systems // IEEE Transactions on Control Systems. 2022. Vol. 30. P. 78 – 89.
4. Wilson K. Adaptive control of cryogenic systems // IEEE Transactions on Control Systems. 2022. Vol. 30. P. 78 – 89.
5. Fuller B. J. Cryoprotectants: the essential antifreezes to protect life in the frozen state // CryoLetters. 2004. Vol. 25, № 6. P. 375 – 388.
6. Баранов А. Ю., Соколова Е. В. Хранение и транспортировка криогенных жидкостей. Ч. 1: Учебное пособие. СПб: Университет ИТМО, 2017. 95 с.
7. Архаров А. М. Криогенные системы. М.: Машиностроение, 1996. 447 с.
8. Flynn T. M. Cryogenic Engineering. 2nd ed. Marcel Dekker, 2005. 648 p.
9. Григорьев В. А., Крохин Ю. И. Тепло- и массообменные аппараты криогенной техники. М.: Энергоиздат, 1982. 312 с.
10. У. Фрост. Теплопередача при низких температурах. М.: Мир, 1977. 455 с.
11. Сычев В. В. и др. Термодинамические свойства азота. ГСССД. М.: Изд-во стандартов, 1977. 352 с.
12. Таблицы стандартных справочных данных. Азот. Коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности... ГСССД 89-85. М.: Изд-во стандартов, 1986.
13. Малков М. П. и др. Справочник по физико-техническим основам глубокого охлаждения. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. 416 с.
14. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1975. 559 с.
15. Lockhart R. W., Martinelli R. C. Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes // Chemical Engineering Progress. 1949. Vol. 45, № 1. P. 39 – 48.
16. Рабинович Е. З. Гидравлика. М.: Недра, 1974. 312 с.
17. СП 158.13330.2014 Здания и помещения медицинских организаций. Правила проектирования.
18. ВСН 50-83 Инструкция по проектированию трубопроводов жидкых продуктов разделения воздуха.

MATHEMATICAL MODEL FOR PREDICTING LIQUID NITROGEN CONSUMPTION IN AN AUTOMATIC CRYOBANK TAKING INTO ACCOUNT OPERATING MODES AND BIOMATERIAL TYPES

I. Yu. Drobkov

M. R. Bogdanov

S. V. Belukov

Moscow Polytechnic University, Moscow

Abstract

The paper presents an improved mathematical model for predicting liquid nitrogen consumption in an automatic cryobank, taking into account the influence of biomaterial types, operating modes and heat inflows through insulation. The model is based on differential equations of heat balance and includes an algorithm for adaptive prediction of time until the next refill. A comparative analysis of various operating modes is carried out: stable storage, active work with frequent access and emergency mode with partial loss of vacuum. Using the example of a real cryobank with a volume of 11 m³, it is shown that the transition from manual to automatic forecasting reduces the probability of critical emptying of the tank by 73% and optimizes the logistics of coolant supply. A method for calculating daily nitrogen consumption has been developed, which can be integrated into the cryobank management system for the timely formation of refill orders.

The Keywords

Cryobank, liquid nitrogen, mathematical model, consumption forecasting, biomaterials, heat balance, operating modes, adaptive control.

Date of receipt in edition

01.12.2025

Date of acceptance for printing

09.12.2025

Ссылка для цитирования:

И. Ю. Дробков, М. Р. Богданов, С. В. Белуков. Математическая модель прогнозирования расхода жидкого азота в автоматическом криобанке с учетом режимов эксплуатации и типов биоматериалов. — Системные технологии. — 2025. — № 4 (57). — С. 134–142.