

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ, ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА ELECTRICAL TECHNOLOGIES, ELECTRICAL EQUIPMENT AND POWER SUPPLY OF THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX



Оригинальное эмпирическое исследование

УДК 681.51:66.047

Энерготехнологический критерий для управления резервом охлаждения молока при нарушении электроснабжения

Савенков Д.Н.¹ , Щербаков А.А.¹ , Мироненко А.А.¹ , Кобыляцкий П.С.² ¹Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация²Донской государственный аграрный университет, п. Персиановский, Ростовская обл., Российская Федерация✉ savenkov-dstu@yandex.ru

Аннотация

Введение. Качество молочной продукции детерминировано совокупным влиянием энергетических параметров и временных факторов процесса охлаждения. Непосредственно после доения требуется оперативное снижение температуры сырья с последующим поддержанием заданного термического режима до этапа транспортировки либо переработки. Существующие методики энергетического расчёта, применяемые к молочным резервуарам, не отражают полной картины: необходимо принимать во внимание наличие пассивного теплового резерва, обусловленного конечной теплоёмкостью продукта и ограждающих конструкций, а также кинетику развития психротрофной микрофлоры. Исследования показывают, что время до охлаждения и скорость прохождения высокотемпературной зоны влияют на качество. Критерий должен быть динамическим и опираться на данные датчиков. Цель исследования — разработать энерготехнологический критерий, объединяющий тепловой, микробиологический и электрический резервы для принятия решений при нарушении электроснабжения.

Материалы и методы. Предложен энерготехнологический критерий для оценки резерва времени при нарушении электроснабжения молочного резервуара. Учитываются три составляющие: тепловой резерв (обусловленный инерцией нагрева продукта и ограждающих конструкций); микробиологический (определяемый динамикой роста микрофлоры с учётом исходной обсеменённости); энергетический (зависящий от ёмкости резервного источника питания и уровня критической нагрузки). Итоговый показатель сопоставляется с прогнозируемым сроком восстановления электроснабжения: при превышении прогнозного срока над расчётным резервом требуется аварийное реагирование. Параметризация модели предусматривает локальную идентификацию тепловых характеристик резервуара и калибровку микробиологических зависимостей на основании фактических данных.

Результаты исследования. Проведён анализ чувствительности температурного резерва к ключевым параметрам: установлено доминирующее влияние начальной и предельной температур, обусловленное узким технологическим интервалом. Показана возможность снижения требований к аккумуляторному накопителю за счёт увеличения пассивного теплового резерва. С учётом измерительной неопределённости предложен безопасный резерв на основе статистической оценки. Разработан безразмерный критерий для ранжирования зон технологического риска и формирования алгоритма управленческих решений. Верификация модели предусматривает поэтапные экспериментальные измерения тепловых, электрических и микробиологических параметров с последующей проверкой прогнозной точности.

Обсуждение и заключение. Критерий объединяет энергетические и технологические параметры, обеспечивая прозрачную оценку резерва. Приоритетные меры зависят от лимитирующего фактора — теплового, микробиологического или электрического. Показатель служит прогнозным индикатором между лабораторными анализами и применением для многокритериальной оптимизации затрат и рисков. Усложнение модели оправдано лишь при снижении ошибок на независимых данных; в остальных случаях предпочтительна консервативная простая модель.

Ключевые слова: охлаждение молока, нарушение электроснабжения, тепловая инерция, микробиологический риск; аккумуляторный накопитель, резерв времени, энерготехнологический критерий, АПК

Финансирование. Работа выполнена в рамках реализации Государственного задания 075-03-2025-302/1 (FZNE-2025-0002).

Для цитирования. Савенков Д.Н., Щербakov А.А., Мироненко А.А., Кобыляцкий П.С. Энерготехнологический критерий для управления резервом охлаждения молока при нарушении электроснабжения. *Продовольственная безопасность и биоэкономика*. 2026;1(1):83–93.

Original Empirical Research

Energy-Technological Criterion for Managing Milk Cooling Reserve During Power Supply Failures

Dmitry N. Savenkov¹ , Aleksey A. Sherbakov¹ , Alexander A. Mironenko¹ , Pavel S. Kobylatsky² 

¹Don State Technical University, Donetsk, Russian Federation

²Don State Agrarian University, Persianovsky settlement, Rostov region, Russian Federation

✉ savenkov-dstu@yandex.ru

Abstract

Introduction. The quality of dairy products is determined by the cumulative effect of energy parameters and temporal factors within the cooling process. Immediately after milking, prompt reduction of raw material temperature is required, followed by maintaining the specified thermal regime until the transportation or processing stage. Existing energy calculation methodologies applied to milk storage tanks fail to provide a comprehensive framework; it is essential to account for the passive thermal reserve, which is conditioned by the finite heat capacity of both the product and the containment structures, as well as the development kinetics of psychrotrophic microflora. Research indicates that the pre-cooling duration and the transition rate through the high-temperature zone critically influence product quality. Consequently, the evaluation criterion must be dynamic and based on sensor data. The objective of this study is to develop an energy-technological criterion that integrates thermal, microbiological, and electrical reserves to facilitate operational decision-making during power supply interruptions.

Materials and Methods. An energy-technological criterion has been proposed to evaluate the time reserve during power supply interruptions in a milk storage tank. The criterion incorporates three distinct components: a thermal reserve (conditioned by the thermal inertia of both the product heating and the containment structures); a microbiological reserve (determined by the dynamics of microflora growth, accounting for the initial bacterial load); and an electrical reserve (dependent on the capacity of the backup power source and the critical load level). The resulting composite indicator is compared with the forecasted power restoration time: if the forecasted duration exceeds the calculated reserve, emergency response actions are required. Model parameterization involves local identification of the tank's thermal characteristics and calibration of microbiological dependencies based on empirical data.

Research results. An analysis of the temperature margin's sensitivity to key parameters was conducted; the dominant influence of the initial and limiting temperatures was established, driven by the narrow process window. The feasibility of reducing requirements for the thermal storage unit by increasing the passive thermal margin was demonstrated. Taking measurement uncertainty into account, a safety margin based on statistical estimation has been proposed. A dimensionless criterion has been developed to rank process risk zones and formulate an algorithm for management decisions. Model verification involves phased experimental measurements of thermal, electrical, and microbiological parameters, followed by an assessment of predictive accuracy.

Discussion and conclusion. The criterion integrates energy and process parameters, providing a transparent assessment of the reserve capacity. Priority measures depend on the limiting factor — whether thermal, microbiological, or electrical. The metric serves as a predictive indicator between laboratory analyses and is applicable to the multi-criteria optimization of costs and risks. Increasing model complexity is justified only if it reduces errors on independent data; otherwise, a simple, conservative model is preferable.

Keywords: milk cooling, power supply interruption, thermal inertia, microbiological risk; thermal energy storage, time reserve, energy-technological criterion, agro-industrial complex

Funding. This work was carried out within the framework of State Assignment 075-03-2025-302/1 (FZNE-2025-0002).

For citation: Savenkov DN, Shcherbakov AA, Mironenko AA, Kobylatsky PS. Energy-technological criterion for managing milk cooling reserves during power supply interruptions. *Food Security and Bioeconomy*. 2026;1(1):83–93.

Введение. Первичное охлаждение молока относится к процессам, в которых качество продукции зависит одновременно от энергетики и времени. После доения продукт необходимо быстро охладить, а затем удерживать в

установленном температурном диапазоне до вывоза или переработки. ISO 5708 задаёт требования к охлаждающим танкам, а ISO 23130 — к устройствам мониторинга и регистрации температуры в резервуарах. Технический регламент Таможенного союза 033/2013 устанавливает обязательные требования безопасности молока и молочной продукции. Однако ни номинальная мощность холодильного агрегата, ни ёмкость аккумулятора по отдельности не отвечают на диспетчерский вопрос: сколько времени остаётся до технологически значимого ухудшения состояния партии при текущих температуре продукта, температуре среды и ожидаемом времени восстановления электроснабжения.

Традиционный энергетический расчёт определяет автономию как отношение доступной энергии к мощности нагрузки. Для молочного танка этот подход неполон. После отключения компрессора температура не перескакивает к температуре воздуха, а растёт вследствие конечной теплоёмкости продукта и ограждений. Таким образом, существует пассивный тепловой резерв. С другой стороны, допустимость температуры не может оцениваться без длительности: психротрофная микрофлора способна развиваться и при холодильном хранении, а скорость роста зависит от температуры и исходной обсеменённости [1–5]. Технологический предел должен учитывать либо нормативную температуру, либо отношение текущей микробной численности к допускаемой.

Исследования охлаждения сырого молока показывают, что время до начала охлаждения и скорость прохождения высокотемпературной области существенно влияют на качество. Christiansson подчёркивал особую значимость ранней стадии охлаждения [2]. Работа Paludetti и соавторов по предварительному охлаждению демонстрирует одновременно энергетический и технологический эффект [3]. Исследования хранения при 2, 4 и 6 °C показывают, что низкая температура замедляет изменения, но не превращает хранение в неограниченный процесс [4, 5]. Следовательно, критерий должен быть динамическим и обновляться по данным датчиков.

В исходной концепции обозначение R_{milk} использовалось как коэффициент изменения микробиологического состояния молока. В настоящей переработке устранена неоднозначность: $R_{milk} = N/N_0$, где N — текущая численность выбранной индикаторной группы микроорганизмов, N_0 — начальная численность. Допустимое отношение $R_{milk} = N_{lim}/N_0$ зависит от измеренного N_0 и нормативного или технологического предела N_{lim} . Значение $R_{lim}=3$ допустимо только в частном случае, когда N_0 ровно вдвое меньше N_{lim} ; оно не является универсальной константой.

Цель работы — разработать воспроизводимый энерготехнологический критерий, который объединяет тепловой, микробиологический и электрический резервы и позволяет принимать решения при нарушении электроснабжения молочного хозяйства. Исследование является расчётно-теоретическим и параметрическим; оно не заявляет результаты не проведённых микробиологических опытов.

Материалы и методы

Структура критерия. Рассматривается охлаждаемый резервуар с массой молока M , начальной температурой T_0 , температурой окружающей среды T_a и предельной температурой T_{lim} . В нормальном режиме холодильная машина поддерживает заданную температуру. При нарушении питания компрессор останавливается либо получает питание от аккумуляторного накопителя. Доступный интервал складывается из электрической автономии τ_E и остаточного пассивного резерва после истощения батареи. Пассивный резерв ограничивается меньшим из двух времён: достижением температурного предела τ_T и достижением микробиологического предела τ_R .

Из суммарного интервала вычитается технологический запас τ_m , включающий обнаружение отказа, связь с персоналом, переключение схемы, неопределённость параметров и время безопасной остановки. Итоговый критерий имеет размерность времени и непосредственно сопоставим с прогнозом восстановления электроснабжения t_{rest} .

$$\tau^* = \tau_E + \min(\tau_T, \tau_R) - \tau_m \quad (1)$$

$$\chi = t_{rest}/\tau^* \quad (2)$$

При $\chi < 0,7$ система имеет рабочий запас; интервал $0,7 \leq \chi < 1$ рассматривается как предупреждающий; $\chi \geq 1$ означает, что ожидаемое восстановление выходит за предел текущего резерва. Граница 0,7 — управленческая уставка, а не норматив: хозяйство может выбрать более консервативное значение на основании неопределённости прогноза и стоимости партии. Если $\tau^* \leq 0$, аварийное действие требуется независимо от t_{rest} .

Алгоритм формирования и применения энерготехнологического критерия представлен на рис. 1. Обозначения и способы определения параметров — в таблице 1.

Алгоритм применения энерготехнологического критерия

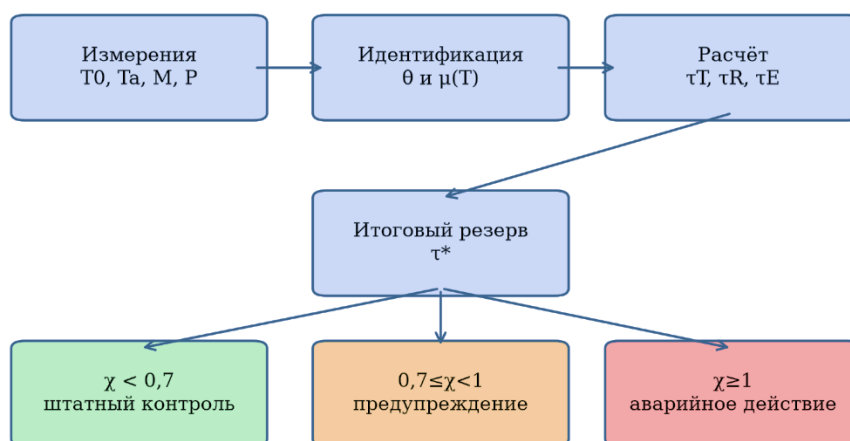


Рис. 1. Алгоритм формирования и применения энерготехнологического критерия

Таблица 1

Обозначения и способы определения параметров

Параметр	Смысл	Единица	Источник данных
T_0, T_a, T_{lim}	начальная, наружная и предельная температуры	°C	датчики и технологический регламент
θ	тепловая постоянная резервуара	мин	идентификация по кривой пассивного нагрева
N_0, N_{lim}	начальная и предельная численность	КОЕ/см ³	лабораторный анализ/норматив
$\mu(T)$	удельная скорость роста	мин ⁻¹	калиброванная микробиологическая модель
E_u	полезная энергия накопителя	кВт·ч	контрольный разряд и система BMS
P_c	критическая электрическая нагрузка охлаждения	кВт	измеритель мощности
t_{rest}	прогноз времени восстановления	мин	диспетчерская оценка/статистика сети
τ_m	резерв на действие и неопределённость	мин	политика управления риском

Тепловая модель. После прекращения активного охлаждения тепловой баланс в модели сосредоточенной теплоёмкости записывается как $C_\Sigma dT/dt = U_A(T_a - T)$, где C_Σ — эффективная теплоёмкость молока, стенок и внутренних конструкций, U_A — интегральная теплопередача от среды. При постоянной T_a решение является аperiodическим:

$$T(t) = T_a - (T_a - T_0)\exp(-t/\theta) \quad (3)$$

$$\theta = C_\Sigma / (U_A) \quad (4)$$

Если $T_a > T_{lim} > T_0$, время достижения предела определяется обращением формулы (3):

$$\tau_T = \theta \ln[(T_a - T_0)/(T_a - T_{lim})] \quad (5)$$

Формула (5) показывает, что запас линейно растёт с θ , но нелинейно зависит от температур. При $T_a \leq T_{lim}$ предел не достигается в рамках модели и τ_T формально стремится к бесконечности; в алгоритме такое состояние ограничивается горизонтом прогноза. При изменяющейся T_a используется численное интегрирование дифференциального уравнения, а не подстановка средней температуры.

Для резервуара, в котором теплоёмкость молока доминирует, $C_\Sigma \approx M_{cm} + C_{wall}$. Если U_A меняется с уровнем заполнения, θ не обязательно пропорциональна массе. Поэтому параметр идентифицируют отдельно для характерных уровней 25, 50, 75 и 100 % заполнения. Эксперимент проводится без включения компрессора на коротком безопасном интервале; θ оценивается нелинейной регрессией по измеренной $T(t)$ и $T_a(t)$. Параметрические кривые нагрева при $T_a = 22$ °C и $T_{lim} = 6$ °C представлены на рис. 2.

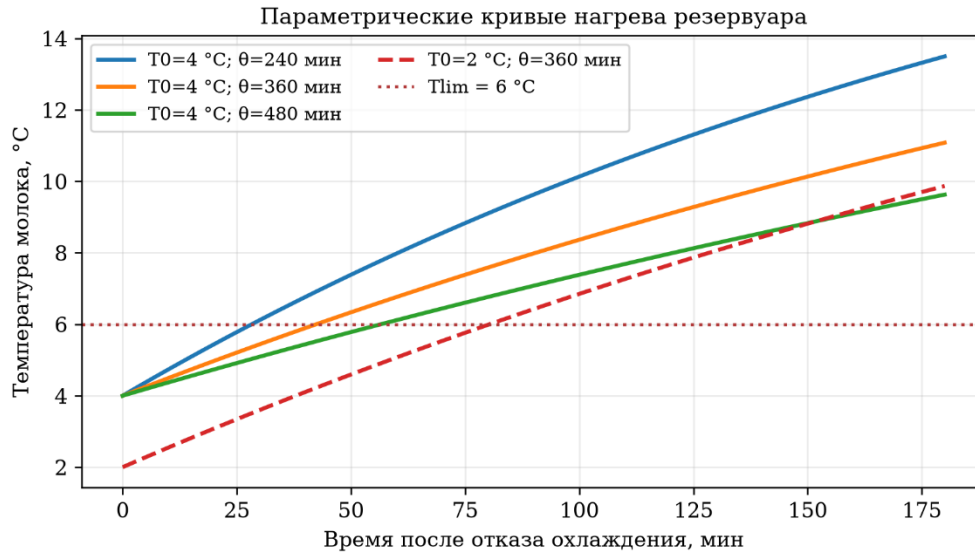


Рис. 2. Параметрические кривые нагрева при $T_a=22\text{ °C}$ и $T_{lim}=6\text{ °C}$

Микробиологическая составляющая R_{milk} . Для выбранной индикаторной группы микроорганизмов используется модель $dN/dt = \mu[T(t)]N$. Интегрирование даёт относительный критерий:

$$R_{milk}(t) = N(t)/N_0 = \exp(\int \mu[T(s)]ds) \quad (6)$$

$$R_{lim} = N_{lim}/N_0 \quad (7)$$

Микробиологический резерв τ_R — первый момент, когда $R_{milk}(t) = R_{lim}$. Если μ постоянна, $\tau_R = \ln(R_{lim})/\mu$; при меняющейся температуре интеграл вычисляется по траектории $T(t)$. Для вторичной температурной модели может применяться зависимость Ратковского $\sqrt{\mu} = b(T - T_{min})$ в допустимом диапазоне [1]. Однако параметры b и T_{min} специфичны для вида микроорганизмов, матрицы продукта и условий хранения; использование литературных коэффициентов без локальной калибровки допускается только для сценарной оценки.

Начальная обсеменённость влияет на результат не меньше температуры. При одном и том же N_{lim} партия с большим N_0 имеет меньший R_{lim} и быстрее достигает предела. Поэтому оперативный алгоритм должен получать N_0 из лабораторного контроля или использовать консервативный квантиль исторического распределения. Простое назначение $R_{milk} \leq 3$ без учёта N_0 способно как переоценить, так и недооценить допустимый интервал.

Модель экспоненциального роста описывает фазу без ограничения субстрата и не учитывает лаг-фазу. Для короткого аварийного интервала это может быть консервативно или неконсервативно в зависимости от адаптации психротрофной микрофлоры. Программа верификации должна сравнивать модели без лаг-фазы и с лаг-фазой, а выбор выполнять по независимой выборке и информационному критерию.

Энергетическая составляющая. Электрический резерв определяется полезной энергией накопителя E_u и критической мощностью P_c . Если мощность постоянна, $\tau E = 60 E_u / P_c$. Для переменного графика работающего компрессора, насосов и автоматики используется интегральное условие $\int P(t)dt = E_u$. Полезная энергия должна быть получена контрольным разрядом при проектной температуре и конечном напряжении; номинальная энергия батареи без коэффициентов КПД, глубины разряда и старения превышает резерв.

$$\tau E = 60 E_u / P_c \quad (8)$$

Если прогноз восстановления электроснабжения t_{rest} известен, минимальная полезная энергия батареи выводится из условия $t_{rest} + \tau_m \leq \tau_E + \min(\tau_T, \tau_R)$:

$$E_{\min} = P_c \cdot \max[0, t_{rest} + \tau_m - \min(\tau_T, \tau_R)] / 60 \quad (9)$$

$$E_{nom, \min} = E_{\min} / (\eta \cdot DOD \cdot k_T \cdot k_{SOH}) \quad (10)$$

Здесь k_{SOH} учитывает остаточное состояние батареи. Формула (9) показывает эффект технологической инерции: батарея покрывает не всё время восстановления, а только часть, не перекрытую безопасным пассивным резервом. Вместе с тем аккумулятор нельзя уменьшать до нуля только потому, что τ_T велик: питание требуется автоматике, клапанам, связи и средствам контроля. Поэтому P_c должна включать критическую, а не только компрессорную нагрузку, а минимальный резерв для управления задаётся отдельно.

Параметрический численный эксперимент

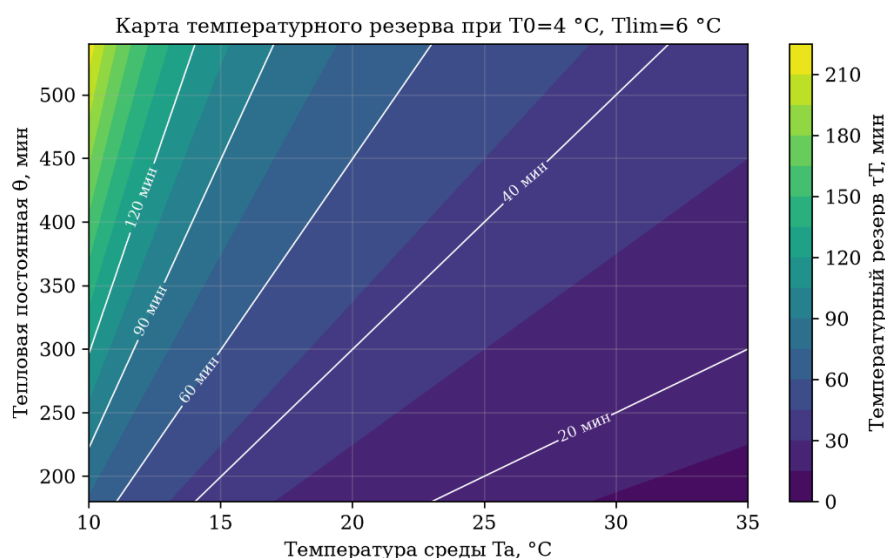
План и воспроизводимость расчёта. Численный эксперимент проведён в диапазоне $T_a=10\text{--}35\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\theta=180\text{--}540$ мин при $T_{lim}=6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Рассматривались $T_0=2$ и $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для каждого узла сетки вычисляли τ_T по формуле (5), затем определяли чувствительности и минимальную энергию батареи. Такой план охватывает прохладную и жаркую погоду, а также резервуары с различной теплоизоляцией и наполнением. Расчёт детерминирован; искусственная случайная выборка и неподтверждённые результаты Монте-Карло не использовались. Факторы параметрического эксперимента представлены в таблице 2.

Базовый сценарий: $T_a=22\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{lim}=6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\theta=360$ мин, $T_0=4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_c=7,5$ кВт, $\eta=0,88$, $\tau_m=15$ мин. Микробиологический резерв в численном примере не задавался произвольно; предполагается, что $\tau_R \geq \tau_T$, поэтому ограничивающим является температурный предел. Если лабораторная калибровка даст $\tau_R < \tau_T$, в формулах используется τ_R .

Таблица 2

Факторы параметрического эксперимента

Фактор	Уровни/диапазон	Причина включения
T_a	10–35 $^{\circ}\text{C}$	сезонное изменение теплопритока
T_0	2 и 4 $^{\circ}\text{C}$	сравнение предварительного переохлаждения
T_{lim}	6 $^{\circ}\text{C}$	иллюстративная технологическая граница
θ	180–540 мин	различная теплоизоляция и масса продукта
P_c	7,5 кВт в базовом примере	критическая мощность охлаждения
τ_m	15 мин	резерв на действие и неопределённость

Рис. 3. Карта температурного резерва в диапазоне T_a и θ при $T_0=4\text{ }^{\circ}\text{C}$

Расчётные результаты. При $T_a=22\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T_{lim}=6\text{ }^{\circ}\text{C}$ логарифмический множитель для $T_0=4\text{ }^{\circ}\text{C}$ равен $\ln(18/16)=0,1173$. Для $\theta=240, 360$ и 480 мин температурный резерв составляет 28,3; 42,4 и 56,5 мин. При $T_0=2\text{ }^{\circ}\text{C}$ множитель $\ln(20/16)=0,2231$, а резерв — 53,6; 80,3 и 107,1 мин. Снижение начальной температуры на $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ даёт прирост 25,3; 37,9 и 50,6 мин. Относительный прирост одинаков — 89,5 %, поскольку оба времени линейно масштабируются с θ .

Результат не означает, что предварительное переохлаждение всегда энергетически выгодно. Для достижения $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ компрессор потребляет дополнительную энергию, а слишком низкая температура может быть нежелательна по технологическим причинам. Критерий позволяет поставить оптимизационную задачу: сравнить стоимость дополнительного охлаждения в штатном режиме со снижением требуемой батарейной энергии и риска потери партии.

Карта на рис. 3 показывает резкое уменьшение τ_T при повышении T_a . Это следует из сближения T_a с высокотемпературной областью и увеличения движущей силы теплопередачи. При больших θ изолинии сдвигаются к большему резерву почти пропорционально. Следовательно, улучшение теплоизоляции и увеличение эффективно охлаждённой массы могут быть альтернативой чисто электрическому увеличению накопителя.

Таблица 3

Температурный резерв при $T_a=22\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T_{lim}=6\text{ }^{\circ}\text{C}$

θ , мин	τ_T при $T_0=4\text{ }^{\circ}\text{C}$, мин	τ_T при $T_0=2\text{ }^{\circ}\text{C}$, мин	Прирост, мин	Прирост, %
240	28,3	53,6	25,3	89,5
360	42,4	80,3	37,9	89,5
480	56,5	107,1	50,6	89,5

Анализ чувствительности. Локальные производные формулы (5) позволяют оценить, какие измерения сильнее влияют на τ_T :

$$\partial\tau_T/\partial\theta = \ln[(T_a-T_0)/(T_a-T_{lim})] \quad (11)$$

$$\partial\tau_T/\partial T_0 = -\theta/(T_a-T_0) \quad (12)$$

$$\partial\tau_T/\partial T_a = \theta[1/(T_a-T_0) - 1/(T_a-T_{lim})] \quad (13)$$

$$\partial\tau_T/\partial T_{lim} = \theta/(T_a-T_{lim}) \quad (14)$$

В базовой точке $T_a=22\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_0=4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{lim}=6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\theta=360$ мин производные равны: $\partial\tau_T/\partial\theta=0,1173$ мин/мин; $\partial\tau_T/\partial T_0=-20,0$ мин/ $^{\circ}\text{C}$; $\partial\tau_T/\partial T_a=-2,50$ мин/ $^{\circ}\text{C}$; $\partial\tau_T/\partial T_{lim}=22,5$ мин/ $^{\circ}\text{C}$. Большая чувствительность к T_0 и T_{lim} объясняется узким интервалом между исходной и предельной температурами. Ошибка датчика $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ может дать несколько минут неопределённости, поэтому датчики должны быть откалиброваны в рабочем диапазоне $2-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 4).

Знак $\partial\tau_T/\partial T_0$ отрицателен: более тёплое начальное молоко уменьшает запас. Знак $\partial\tau_T/\partial T_a$ также отрицателен: жаркая среда ускоряет достижение предела. Повышение θ и T_{lim} увеличивает расчётное время, но T_{lim} нельзя выбирать из энергетических соображений – он задаётся требованиями качества и безопасности.

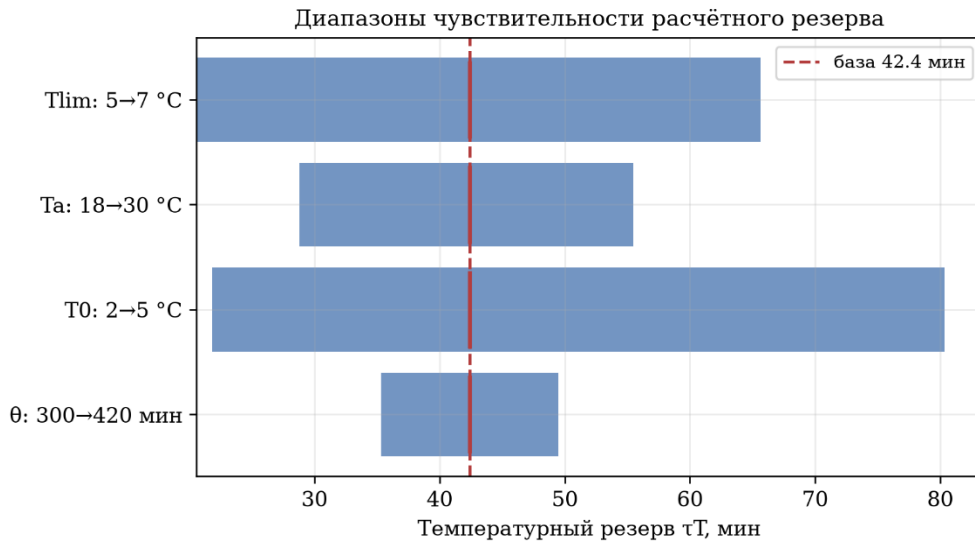


Рис. 4. Диапазоны чувствительности τ_T к тепловой постоянной и температурам

Согласование с аккумуляторным накопителем. Для $P_c=7,5$ кВт и $\eta=0,88$ каждый 1 кВт·ч номинальной энергии, доступный с учётом остальных коэффициентов, добавляет $60 \cdot 0,88/7,5=7,04$ мин активного охлаждения. Наоборот, 10 кВт·ч полезной энергии обеспечивают 80 мин работы нагрузки 7,5 кВт до учёта ограничений мощности и пусковых токов. Если $t_{rest}=120$ мин, $\tau_m=15$ мин и пассивный резерв равен 60 мин, формула (9) даёт $E_{w,min}=7,5 \cdot 75/60=9,375$ кВт·ч.

При $\eta \cdot DOD \cdot k_T \cdot k_{SOH}=0,88 \cdot 0,8 \cdot 0,85=0,4787$ требуемая номинальная энергия возрастает до 19,6 кВт·ч.

Рис. 5 показывает, что при коротком времени восстановления батарея может не требоваться для компрессора, если пассивного резерва достаточно, однако остаётся необходимость питать автоматику и связь. После пересечения линии $t_{rest}+\tau_m=\tau_{pass}$ требуемая энергия растёт линейно. Увеличение пассивного резерва с 30 до 90 мин сдвигает начало роста на один час и может существенно снизить капиталоемкость накопителя.

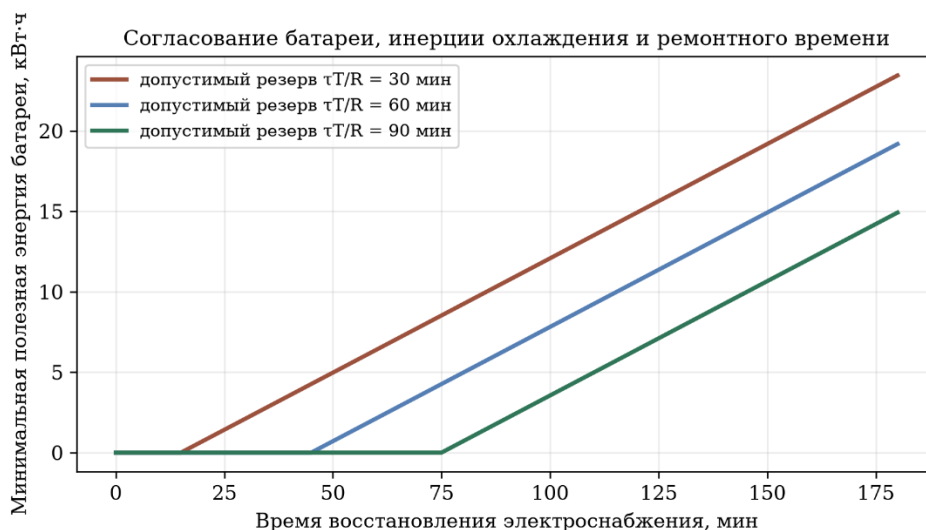


Рис. 5. Минимальная полезная энергия батареи для нагрузки 7,5 кВт при различных пассивных резервах

Таблица 4

Пример подбора накопителя при $P_c=7,5$ кВт, $\tau_m=15$ мин

t_{rest} , мин	τ_{pass} , мин	$E_{u,min}$, кВт·ч	$E_{nom,min}$ при коэффициенте 0,4787, кВт·ч
60	60	1,875	3,92
90	60	5,625	11,75
120	60	9,375	19,58
180	60	16,875	35,25
120	90	5,625	11,75

Неопределённость и безопасный резерв. Для независимых входных параметров стандартную неопределённость τ_T можно приближённо оценить по закону распространения:

$$u^2(\tau_T) = \sum (\partial \tau_T / \partial x_i)^2 u^2(x_i) \quad (15)$$

Пусть $u(\theta)=20$ мин, $u(T_0)=u(T_a)=u(T_{lim})=0,2$ °С. В базовой точке вклады составят 2,35; 4,00; 0,50 и 4,50 мин соответственно, а суммарная стандартная неопределённость $u(\tau_T)=6,52$ мин. Односторонний безопасный резерв при коэффициенте $k=1,645$ равен $\tau_{safe}=42,4-1,645 \cdot 6,52=31,7$ мин. Пример показывает, что управленческий запас 15 мин сопоставим с измерительной неопределённостью и должен уточняться по фактическим характеристикам датчиков и модели.

Для зависимых параметров и нелинейной области около $T_a=T_{lim}$ линейное распространение недостаточно. Тогда применяют бутстрэп по остаткам идентификации θ или вероятностное моделирование с документированными распределениями. Настоящая работа намеренно не приводит численных вероятностей потери партии без исходного массива наблюдений.

$$\tau_{safe} = \tau - k \cdot u(\tau^*) \quad (16)$$

Интерпретация критерия в системе управления. Отношение $\chi = t_{rest}/\tau^*$ превращает неоднородные параметры в единую безразмерную шкалу. При $\chi < 0,7$ оператор продолжает штатный контроль; при $0,7 \leq \chi < 1$ система выдаёт предупреждение и готовит действия; при $\chi \geq 1$ требуется аварийная стратегия. Ею может быть запуск генератора, подключение мобильного накопителя, снижение теплопритока, запрет поступления новой тёплой порции молока либо досрочный вывоз партии. Выбор действия зависит от хозяйства, но триггер формируется одинаково.

Индекс следует обновлять при каждом новом измерении. Если температура среды растёт, θ переоценивается или диспетчер увеличивает t_{rest} , χ повышается. После запуска генератора или уменьшения мощности некритической нагрузки τ_E возрастает, и χ снижается. Таким образом, критерий описывает состояние, а не неизменную характеристику установки.

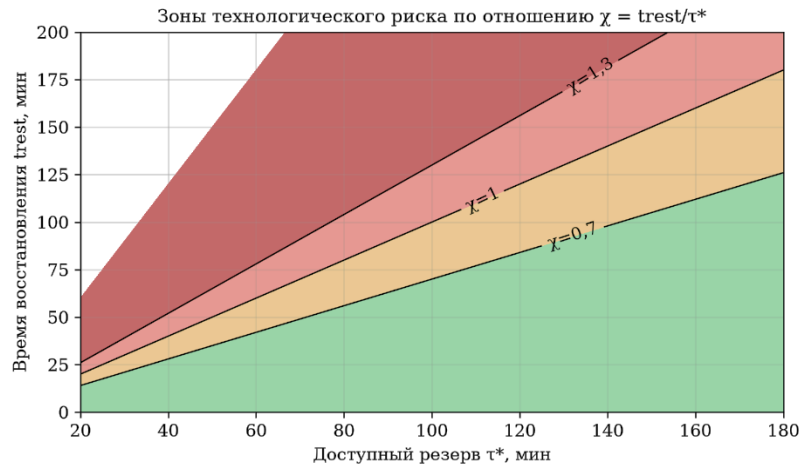


Рис. 6. Зоны технологического риска по отношению времени восстановления к доступному резерву

Программа экспериментальной верификации. Для превращения критерия в измерительную методику требуется серия безопасных опытов на конкретном молочном танке. На первом этапе определяют θ при разных уровнях заполнения и температурах среды. Датчики устанавливают минимум в трёх точках продукта, на стенке и в воздухе; перемешивание задают одинаково. После стабилизации T_0 охлаждение отключают на интервал, не доводящий продукт до недопустимого состояния, затем аппроксимируют формулу (3) и анализируют остатки.

На втором этапе измеряют электрическую мощность компрессора, насосов, мешалки и автоматики во всех режимах. Пусковые события проверяют отдельно по мощности инвертора, а полезную энергию батареи – контрольным разрядом при проектной температуре. На третьем этапе калибруют $\mu(T)$ для выбранных индикаторных микроорганизмов по утверждённой лабораторной программе, включая исходную обсеменённость, лаг-фазу и воспроизводимость анализа.

На четвёртом этапе проводят слепую проверку: по первым измерениям прогнозируют τ_T и τ_R , затем сравнивают с фактическим достижением контрольной температуры и микробиологическим результатом. Показателями качества модели являются средняя абсолютная ошибка времени, покрытие доверительного интервала и доля опасных недооценок. Ввод критерия в эксплуатацию допустим только после определения безопасной односторонней погрешности.

Таблица 5

План верификации модели

Этап	Измерения	Результат	Критерий качества
Тепловой	$T(t)$, $T_a(t)$, уровень, перемешивание	θ и модель остатка	ошибка прогноза τ_T
Энергетический	$P(t)$, E_{in} , температура батареи	τ_E и $E_{nom,min}$	ошибка энергетического баланса
Микробиологический	N_0 , $N(t)$, $T(t)$	$\mu(T)$, R_{lim} , τ_R	ошибка и опасная недооценка
Интегральный	t_{rest} и все резервы	χ и действие	отсутствие выхода за предел без тревоги

Обсуждение и заключение. Предлагаемый критерий развивает энергетический подход за счёт включения технологической инерции. Его преимущество – прозрачность: каждое слагаемое имеет физический смысл и способ измерения. Если ограничивающим оказывается τ_T , эффективны теплоизоляция, предварительное охлаждение и управление поступлением тёплого молока. Если τ_R , приоритетом становятся санитарное состояние и исходная обсеменённость. Если τ_E , требуется увеличение полезной энергии, снижение критической мощности или генератор.

На практике R_{milk} не должен подменять лабораторный контроль. Это прогнозный индикатор, который обновляет риск между анализами. Даже при низкой температуре качество зависит от исходной микрофлоры, ферментов психротрофов и длительности хранения [7, 8]. Поэтому предельное значение N_{lim} выбирают для конкретного показателя и маршрута переработки, а не переносят из чужой модели.

Снижение T_0 с 4 до 2 °C почти удваивает τ_T в рассматриваемом примере, но требует дополнительной холодильной энергии. Оптимум зависит от тарифа, вероятности отказов и стоимости потери партии. Критерий пригоден для многокритериальной оптимизации, где целевая функция включает стоимость электроэнергии, деградацию батареи, запуск генератора и ожидаемый технологический ущерб.

Модель первого порядка хорошо интерпретируема, но реальный резервуар может иметь стратификацию, периодическое перемешивание, изменение T_a и приток новой порции. Для таких условий применяют многозональную модель или серый ящик, сохраняя физические ограничения. Сложность модели оправдана только если она уменьшает опасную ошибку на независимых данных; иначе предпочтительнее консервативная простая модель с большим τ_m . Разработан критерий $\tau^* = \tau_E + \min(\tau_T, \tau_R) - \tau_m$, объединяющий электрическую автономию, тепловую инерцию и микробиологический резерв молока. Безразмерное отношение $\chi = t_{rest}/\tau^*$ формирует штатную, предупреждающую и аварийную зоны управления.

Для аperiodической модели нагрева получена формула $\tau_T = \theta \ln[(T_a - T_0)/(T_a - T_{lim})]$. При $T_a = 22^\circ\text{C}$ и $T_{lim} = 6^\circ\text{C}$ снижение T_0 с 4 до 2 $^\circ\text{C}$ увеличивает резерв на 25,3–50,6 мин при $\theta = 240$ –480 мин, или на 89,5 %. Минимальная полезная энергия накопителя определяется как $E_{u,\min} = P_c \cdot \max[0, t_{rest} + \tau_m - \min(\tau_T, \tau_R)]/60$. Формула показывает взаимозаменяемость части электрического и пассивного технологического резерва, но не отменяет питание автоматики и проверку пусковой мощности.

В базовой точке высокая чувствительность τ_T к T_0 и T_{lim} требует калиброванных датчиков и одностороннего запаса неопределённости. Числовые вероятности риска допустимы только после идентификации параметров по экспериментальным данным. Предложена программа верификации, включающая идентификацию θ для уровней заполнения, измерение полезной энергии и нагрузки, калибровку $\mu(T)$ и слепую проверку времени достижения пределов.

Список литературы/References

1. Ratkowsky DA, Olley J, McMeekin TA, Ball A. Relationship between temperature and growth rate of bacterial cultures. *Journal of Bacteriology*. 1982;149(1):1–5. <https://doi.org/10.1128/jb.149.1.1-5.1982>
2. Christiansson AA. Predictive model to evaluate the impact of the cooling profile on growth of psychrotrophic bacteria in raw milk from conventional and robotic milking. *Journal of Dairy Research*. 2017;84(3):318–321. <https://doi.org/10.1017/S0022029917000334>
3. Paludetti LF, Kelly AL, O'Brien B, Jordan K, Gleeson D. The effect of different precooling rates and cold storage on milk microbiological quality and composition. *Journal of Dairy Science*. 2018;101(3):1921–1929. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13668>
4. O'Connell A. et al. The effect of storage conditions on the composition and functional properties of blended bulk tank milk. *Journal of Dairy Science*. 2017;100:991–1003. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-11314>
5. Zhuang J. et al. Relationship between microorganisms and milk metabolites during quality changes in refrigerated raw milk: A metagenomic and metabolomic exploration. *International Journal of Food Microbiology*. 2024;425:110891. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2024.110891>
6. Andrus AD et al. Postpasteurization hold temperatures of 4 or 6 $^\circ\text{C}$ affect bacterial outgrowth in pasteurized fluid milk. *Journal of Dairy Science*. 2015;98(11):7640–7643. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-9531>
7. McMeekin TA et al. *Predictive Microbiology: Theory and Application*. Taunton: Research Studies Press, 1993.
8. Baranyi J, Roberts TA. A dynamic approach to predicting bacterial growth in food. *International Journal of Food Microbiology*. 1994;23:277–294. [https://doi.org/10.1016/0168-1605\(94\)90157-0](https://doi.org/10.1016/0168-1605(94)90157-0)
9. Zwietering MH. et al. Modeling of the bacterial growth curve. *Applied and Environmental Microbiology*. 1990;56(6):1875–1881. <https://doi.org/10.1128/aem.56.6.1875-1881.1990>
10. Koutsoumanis KP, Lianou A. Stochasticity in colonial growth dynamics of individual bacterial cells. *Applied and Environmental Microbiology*. 2013;79:2294–2301. <https://doi.org/10.1128/AEM.03629-12>
11. James C, Onarinde BA, James SJ. The use and performance of household refrigerators: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2017;16:160–179. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12242>
12. ASHRAE. Handbook – Refrigeration. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2022.
13. Incropera FP. et al. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 8th ed. Hoboken: Wiley, 2017.
14. Doerffel D, Sharkh SA. A critical review of using the Peukert equation for determining the remaining capacity of batteries. *Journal of Power Sources*. 2006;155:395–400. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.04.030>
15. O'Connor PDT, Kleyner A. *Practical Reliability Engineering*. 5th ed. Chichester: Wiley, 2012.
16. Meeker WQ, Escobar LA, Pascual FG. *Statistical Methods for Reliability Data*. 2nd ed. Hoboken: Wiley, 2022.

Об авторах:

Савенков Дмитрий Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры техники и технологий пищевых производств, руководитель НИЛ "PCM-STAR" Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1) [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9151-1000), savenkov-dstu@yandex.ru

Щербаков Алексей Александрович, научный сотрудник НИЛ "PCM-STAR", ведущий инженер ИЦ Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1) [ORCID](#), alexey_shcherbakov97@mail.ru

Мироненко Александр Андреевич, инженер НИЛ "PCM-STAR", магистрант Передовой Инженерной Школы Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1) aleksandr.mironenko2012@yandex.ru

Кобыляцкий Павел Сергеевич, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры пищевых технологий Донского государственного аграрного университета (346493, Российская Федерация, Ростовская обл., п. Персиановский, ул. Кривошлыкова, 24) [ORCID](#), dongau@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Д.Н. Савенков: разработка концепции и общей структуры критериев, постановка задачи, формулировка основных соотношений, общее руководство исследованием, финальное редактирование текста.

А.А. Щербаков: проведение параметрического численного эксперимента, анализ чувствительности, расчёт производных, подготовка таблиц и рисунков.

А.А. Мироненко: обзор литературы, сбор и систематизация исходных данных, формулировка программы экспериментальной верификации, подготовка иллюстративного материала, оформление рукописи, участие в интерпретации полученных результатов.

П.С. Кобыляцкий: сбор, структурирование и анализ первичных данных; разработка программы экспериментальной апробации.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Dmitry N. Savenkov, Cand. Sci (Eng), Associate Professor at the Department of Food Production Machinery and Technologies, Head of the "RSM-STAR" Research Laboratory at Don State Technical University State Technical University (1 Gagarina Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation) [ORCID](#), savenkov-dstu@yandex.ru

Aleksey A. Sherbakov, Research Fellow at the RSM-STAR Research Laboratory and Lead Engineer at the Engineering Center of Don State Technical University (1 Gagarina Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation) [ORCID](#), alexey_shcherbakov97@mail.ru

Alexander A. Mironenko, Engineer at the RSM-STAR Research and Development Laboratory, Master's student at the Advanced Engineering School of Don State Technical University (1 Gagarina Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation) aleksandr.mironenko2012@yandex.ru

Pavel S. Kobilyatsky, Cand. Sci (Agricultural), Associate Professor of the Department of Food Technologies, Don State Agrarian University (24, Krivoshlykova St., Persianovsky Settlement, Rostov Region, 346493, Russian Federation) [ORCID](#), dongau@mail.ru

Claimed contributorship:

DN Savenkov: development of the concept and general structure of criteria, problem definition, formulation of key relationships, general supervision of the research, final editing of the text.

AA Sherbakov: conducting a parametric numerical experiment, sensitivity analysis, calculating derivatives, preparing tables and figures.

AA Mironenko: literature review, collection and systematization of initial data, formulation of the experimental verification program, preparation of illustrative material, manuscript formatting, participation in the interpretation of the obtained results.

PS Kobilyatsky: collection, structuring, and analysis of primary data; development of an experimental approbation program.

Conflict of interest statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Поступила в редакцию/Received 07.07.2026

Поступила после рецензирования/Reviewed 21.07.2026

Принята к публикации/Accepted 01.08.2026