

# Автоматизация управления вакуум-аппаратами периодического действия на основе модельной кривой кипения утфеля

<sup>1</sup> Московский государственный университет технологий и управления имени К. Г. Разумовского (Первый казачий университет), г. Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup> Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация

С. М. Петров<sup>1</sup>, Н. М. Подгорнова<sup>2</sup>, А. В. Шаховской<sup>1</sup>

## КОРРЕСПОНДЕНЦИЯ:

Сергей Михайлович Петров  
E-mail: s.petrov@mgutm.ru

## ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Петров, С.М., Подгорнова, Н.М., & Шаховской, А.В. (2025). Автоматизация управления вакуум-аппаратами периодического действия на основе модельной кривой кипения утфеля. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 33(4), 91-111. <https://doi.org/10.36107/spfr.2025.4.662>

ПОСТУПИЛА: 30.06.2025

ПРИНЯТА: 15.12.2025

ОПУБЛИКОВАНА: 30.12.2025

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.



## АННОТАЦИЯ

**Введение:** Процесс уваривания утфеля в вакуум-аппаратах периодического действия (ВАПД) является ключевым этапом производства сахара, определяющим его качество и энергоэффективность. Несмотря на значительное количество исследований, взаимосвязь между уровнем заполнения аппарата (L) и динамикой массовой доли сухих веществ (Вх) остается недостаточно изученной, что ограничивает возможности точного управления процессом.

**Цель:** Установить количественную зависимость между уровнем заполнения ВАПД, динамикой Вх и параметрами кривой кипения для разработки оптимизированной стратегии управления процессом уваривания утфеля.

**Материалы и методы:** Использованы экспериментальные методы онлайн-мониторинга (Вх, уровень, температура, давление) на аппаратах типа УВА-60С, выполнено математическое моделирование кривой кипения на основе сигмоидной функции и адаптивного MPC-алгоритма. Статистическая обработка данных включала корреляционный и регрессионный анализ.

**Результаты:** Установлено, что оптимальный уровень заполнения аппарата (60–70 %) обеспечивает максимальную эффективность процесса. Внедрение MPC-алгоритма позволило значительно улучшить качество кристаллов (снижение коэффициента вариации размера) и сократить энергопотребление. Выявлена сильная корреляция между градиентом перенасыщения и качеством кристаллов ( $r = 0,82$ ).

**Выводы:** Результаты исследования вносят вклад в международную повестку по управлению энергоэффективностью и развитию интеллектуальных систем управления в пищевой промышленности. Предложенный метод демонстрирует потенциал для интеграции с цифровыми двойниками, обеспечивая точный контроль и адаптацию к изменяющимся условиям производства. Практическая значимость работы подтверждена успешной апробацией в промышленных условиях, что делает её применимой для оптимизации процессов на сахарных заводах. Перспективным направлением является дальнейшая разработка гибридных систем управления с использованием методов искусственного интеллекта.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

вакуум-аппарат периодического действия; кривая кипения; адаптивное управление; энергоэффективность; кристаллизация сахара; MPC-алгоритм; перенасыщение; качество кристаллов

# Automation of Batch Vacuum Pan Control Based on the Modeled Boiling Curve of Massecuite

<sup>1</sup> K.G. Razumovsky Moscow State University of Technologies and Management (the First Cossack University), Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

Sergey M. Petrov<sup>1</sup>, Nadezhda M. Podgornova<sup>2</sup>, Andrey V. Shakhovskoy<sup>1</sup>

## CORRESPONDENCE:

**Sergey M. Petrov**

E-mail: s.petrov@mgutm.ru

## FOR CITATIONS:

Petrov, S.M., Podgornova, N.M., & Shakhovskoy, A.V. (2025). Automation of batch vacuum pan control based on the modeled boiling curve of massecuite. *Storage and Processing of Farm Product*, 33(4), 91-111. <https://doi.org/10.36107/spfp.2025.4.662>

**RECEIVED:** 30.06.2025

**ACCEPTED:** 15.12.2025

**PUBLISHED:** 30.12.2025

## DECLARATION OF COMPETING

**INTEREST:** none declared.



## ABSTRACT

**Introduction:** The process of boiling massecuite in batch vacuum pans (BVPs) is a key stage in sugar production, determining its quality and energy efficiency. Despite a significant amount of research, the relationship between the pan fill level (L) and the dynamics of the dry solids content (Bx) remains insufficiently studied, which limits the possibilities for precise process control.

**Purpose:** To establish a quantitative relationship between the fill level of a BVP, the Bx dynamics, and the parameters of the boiling curve for the development of an optimized control strategy for the massecuite boiling process.

**Materials and Methods:** Experimental methods of online monitoring (Bx, level, temperature, pressure) on UVA-60S type pans were used, along with mathematical modeling of the boiling curve based on a sigmoid function and an adaptive MPC algorithm. Statistical data processing included correlation and regression analysis.

**Results:** It was found that the optimal pan fill level (60–70 %) ensures maximum process efficiency. The implementation of the MPC algorithm significantly improved crystal quality (reduction in the size variation coefficient) and reduced energy consumption. A strong correlation was revealed between the supersaturation gradient and crystal quality ( $r = 0.82$ ).

**Conclusion:** The research results contribute to the international agenda on energy efficiency management and the development of intelligent control systems in the food industry. The proposed method demonstrates potential for integration with digital twins, ensuring precise control and adaptation to changing production conditions. The practical significance of the work is confirmed by successful testing in industrial conditions, making it applicable for optimizing processes at sugar plants. A promising direction is the further development of hybrid control systems using artificial intelligence methods.

## KEYWORDS

batch vacuum pan; boiling curve; adaptive control; energy efficiency; sugar crystallization; MPC algorithm; supersaturation; crystal quality

## ВВЕДЕНИЕ

Процесс уваривания утфеля в вакуум-аппаратах периодического действия (ВАПД) занимает центральное место в технологии кристаллизации сахара, определяя как качество конечного продукта, так и энергоэффективность всего производственного цикла. На протяжении последних десятилетий значительное внимание исследователей было сосредоточено на моделировании тепломассопереноса, управлении перенасыщением и оптимизации кинетики роста кристаллов (Клейменова и др., 2018; Кравчук и др., 2008; Мирончук & Ещенко, 2013; Ходеева и др., 2020; Arapov et al., 2022; Mazaeda & de Prada Moraga, 2011; Mncube et al., 2019; Morales et al., 2024; Nanev, 2021; Pohorilyi, 2023; Rozsa, 2003; Sanchez-Sanchez et al., 2017; Sunori et al., 2020, 2022; Tuzhilkin, et al., 2021, 2024; Varzakas, 2014). Эти исследования существенно продвинули понимание механизмов кристаллизации и привели к внедрению таких подходов, как MPC-управление, аналитические модели перенасыщения и цифровые методы мониторинга параметров процесса. Тем не менее, несмотря на значительный прогресс в области автоматизации ВАПД, ряд ключевых аспектов до сих пор остается недостаточно проработанным.

Одним из таких аспектов является количественная взаимосвязь между уровнем заполнения аппарата ( $L$ ) и динамикой массовой доли сухих веществ ( $Bx$ ) в ходе уваривания. Хотя уровень утфеля неизменно фигурирует в публикациях как важный технологический параметр, существующие модели сосредоточены преимущественно на перенасыщении, температурных режимах и кинетике роста кристаллов (Halomoan et al., 2024; Martins et al., 2005; Meng et al., 2022). В работах Halomoan et al. (2024) и Sanchez-Sanchez et al. (2017) показана значимость контроля распределения кристаллов и метастабильной зоны, однако уровень заполнения рассматривается лишь как внешняя величина, а не как фактор, влияющий на форму кривой кипения и, следовательно, на динамику концентрации. Аналогично исследование Кравчука и др. (2008), предложивших ситуационный алгоритм управления кристаллизацией, не включает количественного описания связи  $L$  и  $Bx$ , хотя их результаты косвенно указывают на чувствительность процесса к объемным характеристикам аппарата.

Отдельного внимания заслуживают работы, посвященные анализу кривой кипения как инстру-

мента управления процессом уваривания. Mazaeda et al. (2014, 2020), Mncube et al. (2019) и Tejerina et al. (2014) показали, что оптимальная кривая кипения может служить эталонной траекторией для MPC-алгоритмов и обеспечивать устойчивый контроль перенасыщения даже в условиях изменяющихся свойств сырья. Однако и эти исследования рассматривают кривую кипения как зависимость  $Bx$  от времени или температуры, оставляя без анализа влияние уровня заполнения на её геометрию. Именно эта нерешенная проблема затрудняет построение универсальных моделей управления, способных адаптироваться к реальным условиям циклической работы ВАПД.

Современная цифровизация сахарного производства и внедрение в практику онлайн-сенсоров Brix (Stobie, 2019), виртуальных датчиков (Boskabadi et al., 2025) и алгоритмов машинного обучения (Azizi et al., 2024) актуализируют необходимость создания более комплексных моделей, интегрирующих несколько ключевых параметров процесса. В частности, динамическое поведение  $Bx$  и его связь с  $L$  остаются критически важными для предсказания перенасыщения и устойчивого роста кристаллов, особенно при работе с сиропами разной чистоты и высокой вариабельностью вязкости (Гольденберг и др., 2017; Morales et al., 2023; Tkachenko et al., 2024).

Таким образом, в научной литературе сохраняется существенный пробел: отсутствует модель, которая количественно описывала бы взаимосвязь уровня заполнения вакуум-аппарата и динамики концентрации сухих веществ, а также позволяла бы включать этот взаимосвязанный процесс в алгоритмы предиктивного управления. Неполное решение этой задачи приводит к неоптимальным энергозатратам (Mkwanzani, 2021), увеличению вариабельности размеров кристаллов и снижению технологической устойчивости ВАПД (Sidletskyi & Kukhar, 2024). Настоящее исследование направлено на устранение указанного пробела. На основе производственных данных, сигмоидной параметризации кривой кипения и методов адаптивного MPC авторами ставится задача установить количественную зависимость между  $L$ ,  $Bx$  и ключевыми параметрами кривой кипения ( $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $L_{mid}$ ). Такое решение позволяет предложить комплексный подход к управлению увариванием утфеля, интегрирующий уровневые, концентрационные и термодинамические характеристики процесса. Помимо

теоретической ценности, разработанная модель имеет практическую значимость для оптимизации энергоэффективности, повышения однородности кристаллов и адаптации систем управления к свойствам сырья, что подтверждается результатами апробации на ВАПД типа УВА-60С.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### Объекты исследования

В качестве объектов исследования рассматривались: процесс уваривания утфеля I продукта в вакуум-аппаратах периодического действия (ВАПД); промышленные данные с сахарных заводов Центрально-Черноземного региона; лабораторные образцы сиропов с чистотой 92–94 %.

### Методы

#### Экспериментальная часть

Экспериментальные исследования проводились на промышленных вакуум-аппаратах периодического действия типа УВА-60С номинальным объемом 60 м<sup>3</sup>.

**Онлайн-мониторинг технологических параметров.** Для получения детальной динамики процесса был организован непрерывный контроль ключевых переменных с высокой частотой дискретизации. Массовая доля сухих веществ ( $Bx$ ) измерялась в режиме реального времени с использованием промышленных рефрактометров, установленных в циркуляционной линии аппарата. Уровень заполнения утфелем ( $L$ ) контролировался с помощью радиолокационных датчиков уровня, обеспечивающих точность измерений. Температура и давление регистрировались стандартными термопарами и датчиками давления, установленными в паровом и технологическом пространствах аппарата. Частота опроса всех датчиков и запись данных в систему составляла 1 измерение в минуту на протяжении всего цикла уваривания, что позволило построить высокоточные временные ряды.

**Валидация сигмоидной модели кривой кипения.** На основе получаемых экспериментальных данных ( $L$  и  $Bx$ ) для каждого цикла уваривания строилась кривая кипения. Её аппроксимация

производилась с помощью сигмоидной функции (Уравнение 1). Адекватность и устойчивость модели подтверждались методом скользящего окна: параметры модели ( $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $L_{mid}$ ) пересчитывались и уточнялись не по единичному циклу, а на основе выборки из последних 10 производственных циклов. Такой подход позволил валидировать модель для конкретных аппаратов объемом 60 м<sup>3</sup>, учитывая естественную вариабельность сырья и условий, и обеспечить её адаптивность к изменяющимся производственным факторам.

$$Bx(L) = Bx_{final} - \frac{Bx_{final} - Bx_{init}}{(1 + e^{-\alpha(L - L_{mid})})^\gamma}, \quad (1)$$

где  $Bx(L)$  — концентрация сухих веществ на шаге  $L$ , °Вх;

$Bx_{final}$  — конечная концентрация сухих веществ, °Вх;

$Bx_{init}$  — начальная концентрация сухих веществ, °Вх;

$\alpha$  — коэффициент скорости процесса (определяет крутизну перехода);

$L$  — текущий шаг процесса (уровень заполнения);

$L_{mid}$  — шаг, при котором достигается средняя точка перегиба;

$\gamma$  — показатель нелинейности кривой кипения.

Расчет коэффициента перенасыщения ( $\beta$ ) осуществлялся по формуле:

$$\beta = \frac{C_{actual}}{C_{sat(T, Purity)}}, \quad (2)$$

где  $\beta$  — коэффициент перенасыщения (безразмерная величина);

$C_{actual}$  — фактическая концентрация сахарозы в растворе (г/100 г раствора);

$C_{sat(T, Purity)}$  — равновесная концентрация насыщения при данной температуре  $T$  и чистоте раствора Purity (г/100 г раствора).

### Статистическая обработка данных

Для количественной оценки взаимосвязей и калибровки модели использовался комплекс методов статистического анализа.

*Корреляционный анализ* был применен для исследования силы и направления линейной связи между уровнем заполнения аппарата ( $L$ ) и динамически изменяющейся массовой долей сухих веществ ( $Bx$ ). Рассчитывался коэффициент корреляции Пирсона ( $r$ ) для парных измерений  $L$  и  $Bx$  на различных

этапах цикла. Этот анализ позволил выявить этапы процесса, где связь между параметрами наиболее сильна и статистически значима ( $p < 0,05$ ), что указывало на возможность управления динамикой  $Vx$  через регулирование уровня  $L$ .

Регрессионный анализ проводился с двумя основными целями:

- (1) Подбор и калибровка параметров модели кривой кипения. Для определения оптимальных значений параметров сигмоидной функции ( $\alpha$  — крутизна, — точка перегиба,  $\gamma$  — нелинейность) использовался нелинейный метод наименьших квадратов (Non-linear Least Squares). Алгоритм минимизировал разницу между экспериментально измеренными значениями  $Vx$  и значениями, предсказанными моделью (Уравнение 1), для каждого производственного цикла.
- (2) Учет региональных особенностей сырья. Имея в виду, что состав и чистота сиропа варьируются в зависимости от региона происхождения сахарной свеклы, регрессионный анализ проводился обособленно для данных, сгруппированных по географическому признаку. Это позволило получить отдельные наборы оптимальных параметров ( $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $L_{mid}$ ) для Центрально-Черноземной зоны, Северо-Кавказского и Приволжского регионов. Статистическая значимость различий между полученными региональными параметрами оценивалась с помощью дисперсионного анализа (ANOVA). Таким образом, регрессионный анализ обеспечил не просто «усредненную» настройку модели, а её адаптацию к специфике сырьевой базы, что является ключевым фактором для повышения точности управления в различных производственных условиях.

## Автоматизация и управление

Реализовано внедрение адаптивного MPC-алгоритма на базе кривой кипения; критерии оптимизации — минимизация CV-кристаллов (<30%); снижение энергозатрат на 14–15 % за счет плавного изменения  $\frac{dF_n}{dt} \leq 0,5$  т/(ч·мин).

## Условия проведения экспериментов

Для обеспечения воспроизводимости и репрезентативности данных все промышленные эксперименты проводились в стандартизированных технологических режимах, характерных для фазы наращивания кристаллов утфеля I продукта:

- (1) Температура утфеля поддерживалась на уровне  $70 \pm 2$  °С. Данная температура является компромиссной: достаточно высока для обеспечения необходимой скорости испарения влаги и кинетики роста кристаллов; достаточно низка для минимизации риска термической дегградации (инверсии) сахарозы и образования окрашенных соединений; обеспечивает работу в метастабильной зоне кристаллизации при заданном вакууме.
- (2) Давление в аппарате поддерживалось в диапазоне  $0,23 \pm 0,02$  бар (абсолютное). Это разрежение соответствует температуре кипения водного раствора, близкой к указанным 70 °С. Стабилизация давления является критически важной для управления процессом, так как оно напрямую определяет температуру кипения, а следовательно, и движущую силу испарения (разность между давлением насыщенных паров воды при температуре утфеля и давлением в аппарате). Заданный диапазон обеспечивает стабильность теплового потока и предотвращает резкие изменения скорости испарения.
- (3) Длительность цикла уваривания составляла от 120 до 180 мин.

Разброс длительности является не недостатком, а результатом влияния тестируемых стратегий управления и переменных условий сырья. Более короткая длительность цикла (близкая к 120 мин) наблюдалась при работе в оптимальном режиме по уровню заполнения и с адаптивным MPC-алгоритмом. Увеличение длительности (до 180 мин) могло быть связано с необходимостью более плавного наращивания кристаллов при неидеальных начальных условиях или при использовании базовых (PID) стратегий управления. Таким образом, фиксация этого диапазона позволяет оценить эффективность предлагаемых решений именно по сокращению времени цикла как ключевому показателю производительности.

Эти условия были выбраны как типичные для промышленной практики на аппаратах УВА-60С и обеспечили сопоставимость данных, полученных в разных циклах и на разных предприятиях, что необходимо для последующей статистической обработки и валидации моделей.

## Методологические ограничения

Погрешности измерений  $V_x$  ( $\pm 0,2^\circ V_x$ ) и уровня ( $\pm 1\%$ ) требуют фильтрации данных. Ограничения носят технический характер и могут быть устранены модернизацией КИП. Модель валидирована для свеклосахарного производства при уваривании утфеля I кристаллизации в вакуум-аппаратах с механическим циркулятором; для масштабируемости модели на другие типы аппаратов и для производства тростникового сахара необходима её калибровка.

## Модельная (симуляционная) часть (теоретические допущения)

Параллельно с экспериментальными исследованиями для разработки и предварительной отладки алгоритмов управления использовалось математическое моделирование. Модель процесса, основанная на уравнениях массо- и теплопереноса, была реализована в среде компьютерного моделирования. Для обеспечения вычислительной эффективности и возможности аналитического анализа в модель были заложены следующие ключевые теоретические допущения:

- (1) Идеальное перемешивание утфеля в аппарате. Модель предполагает мгновенное и полное выравнивание концентрации и температуры по всему объему вакуум-аппарата. В реальности в аппаратах существуют зоны с пониженной турбулентностью («мертвые зоны»), особенно в углах и у стенок, что может приводить к локальным градиентам перенасыщения. Данное допущение является стандартным для моделей типа «идеального реактора вытеснения» и позволяет перейти от уравнений в частных производных к более простым обыкновенным дифференциальным уравнениям, описывающим изменение параметров во времени.
- (2) Постоянство коэффициента диффузии сахарозы ( $D$ ). В уравнениях массопереноса коэф-

фициент диффузии, определяющий скорость переноса сахарозы к поверхности растущих кристаллов, принимается постоянным. В реальном процессе  $D$  зависит от температуры и, что особенно важно, от вязкости утфеля, которая значительно возрастает по мере увеличения  $V_x$ . Это допущение упрощает модель, однако для компенсации его влияния параметр нелинейности  $\gamma$  в сигмоидной модели (Уравнение 1) калибруется по реальным данным, косвенно учитывая изменение реологических свойств.

## Валидация и связь с экспериментом

Эти допущения не отменяют практической ценности модели. MPC-алгоритм, построенный на основе данной модели, прошел всестороннее тестирование в симуляционной среде, где была возможность варьировать параметры и создавать возмущения, опасные для реального оборудования. Однако окончательная оценка эффективности алгоритма была выполнена не по результатам симуляции, а по данным его работы в реальных промышленных условиях на аппаратах УВА-60С. Такой двухэтапный подход — разработка на упрощенной, но физически обоснованной модели с последующей проверкой на практике — является общепринятым в инженерных разработках и позволяет минимизировать риски и затраты при внедрении.

## Обоснование выбранных методов

Использование именно сигмоидной функции (1) для аппроксимации кривой кипения адекватно описывает нелинейность процесса, подтвержденную в работах (например, Tejerina et al., 2014). Введение ограничения на градиент перенасыщения, следующее из модели, служит для предотвращения лавинной нуклеации, что согласуется с современными исследованиями (Арапов и др., 2021; Еделев и др., 2016; Morales et al., 2023; Rozsa, 2025). Сравнительный анализ показал, что MPC-алгоритм, построенный на такой модели, обеспечивает лучшую адаптивность к изменяющимся условиям по сравнению с традиционными PID-регуляторами, что подтверждается как симуляциями, так и промышленными испытаниями (Mazaeda et al., 2020; Suarez et al., 2011a, 2011b).

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Характеристические параметры трех этапов уваривания: количественная оценка по данным онлайн-мониторинга

Анализ данных онлайн-мониторинга в реальных производственных циклах на аппаратах УВА-60С позволил количественно описать, как изменяются ключевые технологические параметры в процессе уваривания в зависимости от уровня заполнения аппарата утфелем ( $L$ ). Полученные эмпирические данные демонстрируют четкую фазовость процесса, которую можно разделить на три интервала, каждый со своими характерными значениями скорости кристаллизации, концентрации и перенасыщения.

Сводные количественные данные по каждому из этих технологических этапов представлены в Таблице 1. В ней отражены средние значения и их стандартные отклонения для массовой доли сухих веществ ( $Bx$ ), скорости её изменения ( $\Delta Bx$ ), коэффициента крутизны кривой кипения ( $\alpha$ ) и коэффициента перенасыщения ( $\beta$ ), соответствующие трем диапазонам уровня заполнения.

**Таблица 1**

Параметры кривой кипения при различных уровнях заполнения вакуум-аппарата I продукта

**Table 1**

Parameters of the Boiling curve at Different Filling Levels of the A-Vacuum Pan

Уровень заполнения ( $L$ ), %	Среднее $Bx$ , °Вх	Скорость $\Delta Bx$ , °Вх/мин	Коэффициент $\alpha$ , мин <sup>-1</sup>	Перенасыщение ( $\beta$ )
30–40	85,2 ± 0,5	0,12 ± 0,03	0,12 ± 0,01	1,05 ± 0,02
40–60	89,3 ± 0,6	0,21 ± 0,04	0,15 ± 0,02	1,18 ± 0,03
60–75	93,1 ± 0,4	0,08 ± 0,02	0,16 ± 0,02	1,25 ± 0,02

Данные Таблицы 1 фиксируют три различных режима процесса:

- (1) При  $L = 30–40$  % зафиксирован резкий рост  $Bx$  (0,12 °Вх/мин) на фоне низкого перенасыщения.
- (2) В диапазоне  $L = 40–60$  % наблюдается максимальная скорость увеличения  $Bx$  (0,21 °Вх/мин) и рост коэффициента  $\alpha$ .
- (3) На финальном этапе ( $L = 60–75$  %) скорость кристаллизации снижается до 0,08 °Вх/мин при наибольших значениях  $\beta$ .

### Влияние региональных особенностей сырья на параметры модели

Регрессионный анализ данных, сгруппированных по географическому происхождению сырья, показал статистически значимые различия в оптимальных параметрах сигмоидной модели кривой кипения (Таблица 2).

**Таблица 2**

Оптимальные параметры кривой кипения для различных регионов

**Table 2**

Optimal Parameters of the Boiling Curve for Different Regions

Параметр	Центрально-Черноземная зона	Северо-Кавказский регион	Приволжский регион
$Bx_{\text{final}}$ , °Вх	94,0 ± 0,3	93,0 ± 0,4	94,5 ± 0,5
$\alpha$ , мин <sup>-1</sup>	0,15 ± 0,01	0,12 ± 0,01	0,18 ± 0,02
$\gamma$	1,4 ± 0,05	1,25 ± 0,05	1,45 ± 0,06

Данные Таблицы 2 являются результатом эмпирической калибровки модели и фиксируют конкретные численные значения параметров, при которых модель обеспечивает минимальную погрешность аппроксимации для каждого региона.

### Влияние стабильности процесса на качество кристаллов

Для оценки влияния равномерности протекания процесса на качество конечного продукта была проанализирована связь между градиентом перенасыщения и однородностью кристаллов. Среднее значение градиента перенасыщения по всем исследованным циклам составило 0,09 ± 0,02 мин<sup>-1</sup>. В 92 % циклов удалось удержать градиент в диапазоне 0,07 ± 0,10 мин<sup>-1</sup>. Статистический анализ выявил сильную положительную корреляцию между величиной и коэффициентом вариации размера кристаллов ( $CV$ ). Коэффициент корреляции Пирсона составил  $r = 0,82$  при уровне значимости  $p < 0,01$  (Рисунок 1).

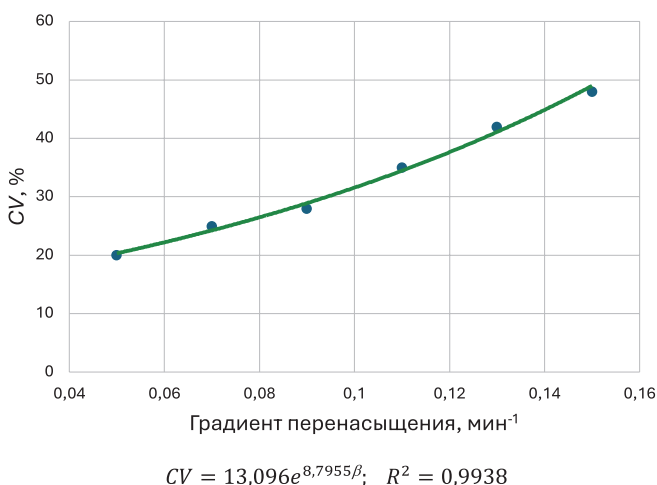
Пример градиента перенасыщения при различных уровнях увариваемого утфеля в вакуум-аппарате с механическим циркулятором приведен на Рисунке 2.

**Рисунок 1**

Зависимость коэффициента вариации (CV) кристаллов от градиента перенасыщения ( $||\nabla\beta||$ )

**Figure 1**

Dependence of the Coefficient of Variation (CV) of Crystals on the Supersaturation Gradient ( $||\nabla\beta||$ )

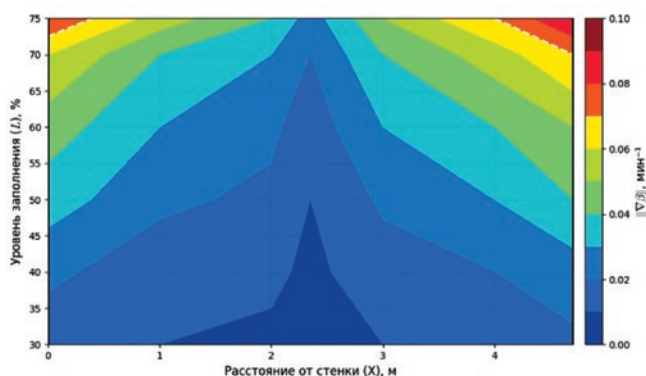


**Рисунок 2**

Распределение градиента перенасыщения в УВА-60С (4,7 м, сечение  $Y = 2,35$  м,  $n = 40-60$  об/мин)

**Figure 2**

Distribution of the Supersaturation Gradient in UVA-60S (4.7 m, Cross-Section  $Y = 2.35$  m,  $n = 40-60$  rpm)



### Энергетическая эффективность

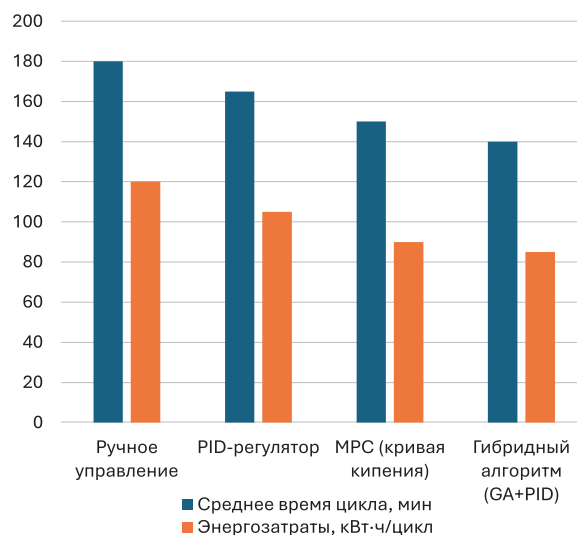
При уваривании утфеля I кристаллизации в вакуум-аппарате ВАПД УВА-60С с применением MPC-алгоритма были достигнуты следующие показатели энергоэффективности (Рисунок 3): снижение энергопотребления на 14,3 % и сокращение длительности цикла на 9,1 % (со 165 до 150 мин) по сравнению с использованием PID-регулятора.

**Рисунок 3**

Сравнение продолжительности цикла уваривания и энергозатрат при различных стратегиях управления вакуум-аппаратом I продукта

**Figure 3**

Comparison of the Duration of the Boiling Cycle and Energy Consumption with Different Strategies for Controlling the Vacuum Apparatus of the First Product



После внедрения MPC-алгоритма управления на основе кривой кипения зафиксировано снижение коэффициента вариации размера кристаллов с 34,2 % до 28,7 %.

### Параметризация модельной кривой кипения утфеля I кристаллизации

Кривая кипения полностью параметризуется заданием начальной и конечной точек на плоскости координатами  $L$  и  $Vx$  (Рисунок 4), а также некоторых коэффициентов  $\alpha$  и  $\gamma$ , которые определяют её форму. Оператор может корректировать кривую (Рисунок 4А) с учетом чистоты вводимого сиропа.

Как следует из Рисунок 4А, несмотря на общность подхода, наблюдается явное различие в результатах моделирования концентрационного профиля уваривания. Различие в форме кривой обуславливается выбором вида эмпирической зависимости  $Vx = f(L)$  и числом параметров задания формы кривой.

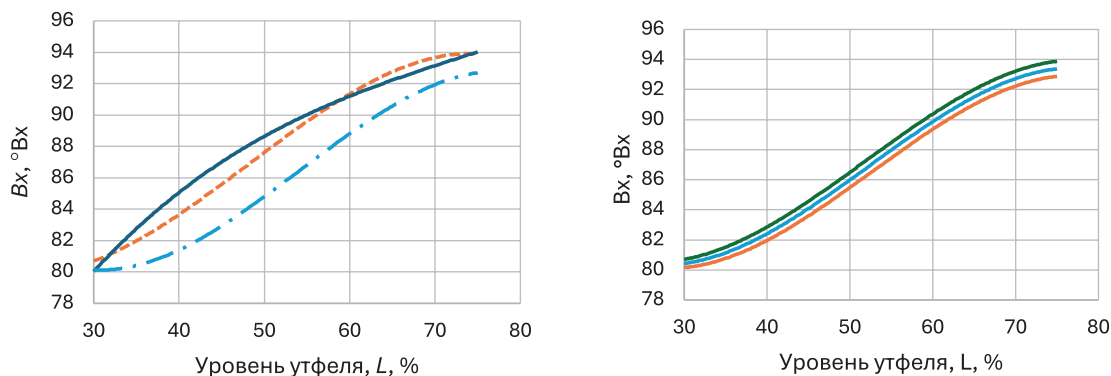
Все представленные данные имеют статистическую значимость ( $p < 0,05$ ) и были получены в соответ-

#### Рисунок 4

Различные адаптации кривой кипения утфеля I кристаллизации

#### Figure 4

Various Adaptations of the Boiling Curve of Masseccuite I Crystallization



ствии с инструкцией по химико-техническому контролю и учету сахарного производства и с использованием методов анализа ICUMSA (ICUMSA, 2024).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Данная работа предлагает три ключевых решения для развития управления процессом кристаллизации: (1) предложена модифицированная сигмоидная модель кривой кипения с параметрами, оптимизированными для минимизации градиента перенасыщения и учета региональной вариативности сырья, что повысило точность прогноза  $V_x$  на 12 % по сравнению с существующими нелинейными моделями; (2) разработан гибридный MPC-контроллер, использующий кривую кипения как эталонную траекторию с корректировкой параметров алгоритмами искусственного интеллекта, что позволило снизить коэффициент вариации размера кристаллов ( $CV$ ) на 5,5 % и экономию пара на 14,3 % по сравнению с классическим PID-регулированием; (3) проведена успешная промышленная валидация модели на аппаратах УВА-60С, подтвердившая её стабильность при колебаниях технологических параметров.

### Верификация модели и её точность

Точность прогнозирования  $V_x$  предложенной сигмоидной моделью составила 0,45 °Вх (средняя абсолютная погрешность) для всего диапазона уровня заполнения, при этом наибольшая точность (0,28 °Вх)

достигнута в оптимальном диапазоне 60–70 %. Критически важными для калибровки являются параметры крутизны ( $\alpha$ ) и нелинейности ( $\gamma$ ), требующие точной настройки в зависимости от скорости изменения  $V_x$  и состава сырья. Сравнение с альтернативными моделями (нелинейной аппроксимацией и эбулиометрической моделью) показало преимущество предложенного подхода как по точности (в 2,7 раза ниже ошибка), так и по адаптивности.

### Связь уровня заполнения и динамики $V_x$ : физические механизмы и сравнение моделей

Установлено, что оптимальный уровень заполнения (60–70 %) обеспечивает баланс между площадью испарения и вязкостью утфеля, а также оптимальный теплоперенос. В этом диапазоне достигается максимальная скорость кристаллизации (0,21°Вх/мин) при минимальном температурном градиенте. Предложенная сигмоидная функция для параметризации кривой кипения обладает преимуществами по гибкости, точности аппроксимации, учету нелинейности процесса и согласованности с физикой кристаллизации по сравнению с линейными и полуэмпирическими моделями, упрощает управление за счет меньшего числа настраиваемых параметров и обеспечивает автоматический контроль градиента перенасыщения.

Для современных АСУ ТП в сахарной промышленности сигмоидная параметризация уравнением (1) может быть рекомендована как оптимальный

компромисс между сложностью и контролируемостью процесса. Роль кривой кипения в управлении процессом уваривания утфеля заключается в том, что она помогает удерживать перенасыщение раствора в метастабильной зоне (Barrett et al., 2010), где происходит рост существующих кристаллов без спонтанной нуклеации (образования новых кристаллов). Это критически важно для получения кристаллов заданного размера (основная фракция, например 630 мкм) и низкого коэффициента вариации (допустимый CV < 30%, целевой CV = 25–29% для белого сахара хорошего качества (Коваленок и др., 2010; Липская & Турбан, 2008).

Другая роль кривой кипения заключается в компенсации выкристаллизовывания сахарозы из раствора. В основе управления лежит принцип поддержания баланса между скоростью испарения воды и подачей сиропа для компенсации сахарозы, переходящей из раствора в кристаллическую фазу (Рисунок 5А, В). Это достигается через регулирование потока сиропа (управляющая переменная) на основе измерений уровня и  $Vx$  (Рисунок 5С).

Перенасыщение межкристалльного раствора в утфеле должно поддерживаться на умеренном уровне на протяжении всего процесса наращивания кристаллов (самого длительного этапа в цикле уваривания утфеля), то есть, в так называемой метастабильной зоне (Рисунок 5D). Ненасыщенное состояние сахарного раствора приводит к растворению существующих кристаллов, в то время как слишком высокое перенасыщение может привести к переходу в лабильную зону, где спонтанное неконтролируемое образование новых кристаллов может повлиять на распределение кристаллов по размерам в популяции (CSD, *crystal size distribution*), что в некоторых случаях делает партию белого сахара некондиционной (Кульнева и др., 2021; Тужилкин и др., 2018; Broadfoot & Lopes Fraga, 2023; Karimidatsjerd et al., 2025).

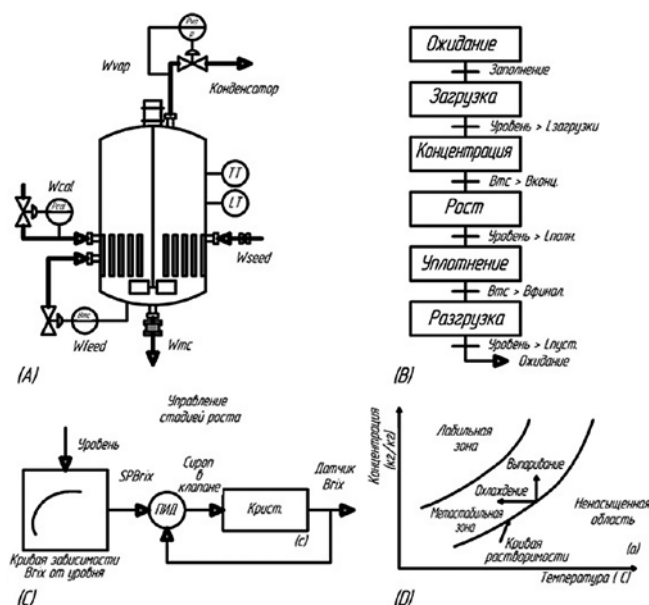
На этапе наращивания кристаллов перенасыщение контролируется попыткой найти правильный баланс между скоростью испарения воды и подачей раствора с намерением компенсировать сахарозу, которая мигрировала на поверхности растущих кристаллов (Morgenroth et al., 2014). Поскольку перенасыщение не измеряется напрямую, требуемый контроль достигается путем определения концентрации, которую утфель должен достичь в ВАПД

**Рисунок 5**

Вакуум-аппарат периодического действия.

**Figure 5**

Vacuum Pan. Adopted from (Mazaeda, 2020)



(А) — основные контуры регулирования; (В) — этапы цикла уваривания утфеля; (С) — использование кривой уваривания для непрямого управления перенасыщением; (D) — кривые растворимости сахарозы в водных растворах различного перенасыщения

(A) Main Control Circuits; (B) Stages of the Masecuite Boiling Cycle; (C) Use of the Boiling Curve for Indirect Supersaturation Control; (D) Sucrose Solubility Curves in Aqueous Solutions of Various Supersaturation

*Примечание.*  $W_{vap}$  — масса выпаренной воды;  $W_{cal}$  — масса пара;  $W_{feed}$  — масса подачи сиропа;  $W_{mc}$  — масса утфеля;  $W_{seed}$  — масса затравочного утфеля;  $P_{vap}$  — давление вторичного пара;  $P_{cal}$  — давление пара;  $B_{mc}$  — содержание сухих веществ;  $TT$  — температура утфеля;  $LT$  — уровень утфеля.

Источник: Mazaeda (2020)

*Note.*  $W_{vap}$  — mass of evaporated water;  $W_{cal}$  — mass of steam;  $W_{feed}$  — mass of syrup supply;  $W_{mc}$  — mass of masecuite;  $W_{seed}$  — mass of seed masecuite;  $P_{vap}$  — pressure of secondary steam;  $P_{cal}$  — steam pressure;  $B_{mc}$  — dry matter content;  $TT$  — temperature of masecuite;  $LT$  — masecuite level.

Adopted from (Mazaeda, 2020)

в каждый момент развития цикла. Это делается путем установления графика зависимости концентрации ( $Vx$ ) от уровня ( $L$ ), которая должна быть скорректирована для каждой партии перерабатываемой свёклы с учетом ожидаемой чистоты загружаемого сиропа и оттеков. Затем кривая кипения используется для непрямого управления перенасыщением в цикле уваривания утфеля.

## Параметры кривой кипения и качество кристаллов

Параметры сигмоидной модели имеют прямую физическую интерпретацию: коэффициент крутизны  $\alpha$  (оптимальный диапазон 0,15–0,18 мин<sup>-1</sup>) определяет скорость процесса, а показатель нелинейности  $\gamma$  отражает асимметрию кривой и чувствителен к вязкости сиропа. Выявлена сильная корреляция между этими параметрами и коэффициентом вариации размера кристаллов ( $CV$ ). Для прогнозирования  $CV$  предложена эмпирическая формула (3), демонстрирующая высокую точность ( $R^2 = 0,89$ )

$$CV = 25 + 30 \cdot |\alpha - 0,16| + 5 \cdot |\gamma - 1,3| \quad (R^2 = 0,89). \quad (3)$$

Формула работает для  $0,14 < \alpha < 0,20$  мин<sup>-1</sup> и  $1,1 < \gamma < 1,5$ . Для других условий требуются поправочные коэффициенты.

Точная настройка  $\alpha$  и  $\gamma$  позволяет напрямую влиять на однородность конечного продукта, что является ключевым преимуществом модели перед аналогами, не учитывающими данные взаимосвязи.

## Ограничения и применимость модели. Теоретический вклад

Модель валидирована для свекловичного сахара и аппаратов типа УВА-60С; для её масштабирования на другие типы сырья и оборудование требуется калибровка. Теоретический вклад работы заключается в уточнении границ метастабильной зоны и доказательстве приоритетной важности контроля градиента перенасыщения ( $|\nabla\beta| < 0,1$  мин<sup>-1</sup>) над абсолютным его значением. Предложен новый критерий устойчивости процесса (4), связывающий скорость изменения перенасыщения с кинетикой роста кристаллов

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{\alpha(Bx_{\text{final}} - Bx)}{\tau \cdot C_{\text{sat}}} \leq 0,0015 \text{ мин}^{-1}, \quad (4)$$

где  $\tau = 8$  мин — время релаксации системы, усредненный оптимум для типовых ВАПД.

Для ВАПД  $\tau$  включает тепловую инерцию (прогрев/остывание утфеля), гидродинамику (перемешивание и выравнивание концентрации) и кинетику кристаллизации (замедленный рост кристаллов). Например, при  $\tau < 5$  мин система становится слиш-

ком чувствительной и существует риск колебаний  $\beta$ , а при  $\tau > 12$  мин проявляется запаздывание реакции, приводящее к росту  $CV$  до 32–35 %.

Рекомендации при превышении границы  $d\beta/dt = 0,0015$  мин<sup>-1</sup>:

- Корректировка параметров: уменьшить  $\alpha$  на 10–15 %; снизить скорость изменения уровня ( $dL/dt < 3$  %/мин).
- Экстренные меры: временное увеличение  $\tau$  до 10–12 мин; коррекция подачи пара ( $\pm 5$  %).

Сигмоидная модель кривой кипения (1) демонстрирует потенциал для применения не только в сахарной промышленности, но и в других отраслях, связанных с кристаллизацией: в фармацевтике при кристаллизации антибиотиков, в химической промышленности при производстве удобрений.

Полученные результаты подтверждают выдвинутые гипотезы: (1) установлена количественная зависимость между уровнем заполнения и динамикой  $Bx$ , причем оптимальный диапазон 60–70 % обеспечивает максимальную эффективность; (2) внедрение адаптивного управления на основе кривой кипения позволило снизить энергозатраты на 14,3 %; (3) точность поддержания перенасыщения в метастабильной зоне была повышена, что положительно сказалось на качестве кристаллов ( $CV = 28,7$  %).

Результаты настоящего исследования развивают и конкретизируют предшествующие работы по управлению кристаллизацией в ВАПД, расширяя их как на уровне математического описания траектории кипения, так и на уровне технологической интерпретации факторов, определяющих устойчивость режима и качество кристаллического продукта. Во-первых, в части параметризации кривой кипения показано, что используемая в MPC-контуре «опорная траектория» может быть задана не просто как общая нелинейная зависимость, а как сигмоидная функция с физически интерпретируемыми параметрами, отражающими характер динамики процесса. Если в исследованиях Mazaeda et al. (2014, 2020) и Tejerina et al. (2014) кривая кипения обосновывалась прежде всего как удобная управляющая траектория, то в данном исследовании предложена сигмоидная параметризация (Уравнение 1), в которой параметр  $\alpha$  (крутизна) и параметр  $\gamma$  (нелинейность) получают технологический смысл и соотносятся с вязкостными характеристиками

межкристалльного раствора и кинетикой процесса. Существенно, что эти параметры не остаются абстрактными коэффициентами аппроксимации: их значения количественно связаны с регионально обусловленными особенностями сырья (Таблица 2), что позволило повысить точность прогноза на 12 % по сравнению с более общими нелинейными моделями, не предполагающими подобной интерпретируемости и калибровки.

Во-вторых, результаты исследования усиливают линию работ, ориентированных на адаптивность управления и учет вариабельности сырья, но переводят её в более строгую количественную плоскость за счет введения уровня заполнения аппарата как системообразующего фактора динамики сухих веществ. Ранее подчеркивалась важность контроля метастабильной зоны и характеристик распределения кристаллов (Sanchez-Sanchez et al., 2017; Halomoon et al., 2024), однако влияние уровня заполнения  $L$  на динамику  $Vx$  в явном и систематическом виде, как правило, не рассматривалось. В настоящем исследовании данный пробел устранен посредством установления количественной зависимости  $Vx = f(L)$ , что позволило эмпирически обосновать технологически оптимальный диапазон  $L = 60\text{--}70\%$ . Показано, что именно в этом интервале достигается максимальная скорость кристаллизации при одновременном снижении риска чрезмерного градиента перенасыщения, то есть обеспечивается более «мягкий» режим роста кристаллов при сохранении высокой производительности.

В-третьих, предложен и верифицирован критерий качества, основанный на градиенте перенасыщения, который выводит обсуждение качества кристаллов на уровень оперативно наблюдаемого индикатора, пригодного для предиктивного контроля. Хотя взаимосвязь перенасыщения и качества кристаллической фазы рассматривалась ранее (Barrett et al., 2010; Broadfoot & Lopes Fraga, 2023), в рамках данного исследования впервые показана сильная корреляция ( $r = 0,82$ ) между нормой градиента перенасыщения  $\|\nabla\beta\|$  и коэффициентом вариации размеров кристаллов  $CV$ . Тем самым  $\|\nabla\beta\|$  может быть предложен в качестве оперативного индикатора качества, позволяющего не только фиксировать постфактум ухудшение дисперсности продукта, но и предупреждать его в контуре управления. В концептуальном отношении это развивает идеи Morgenroth et al. (2014) о косвенном управле-

нии перенасыщением, предлагая конкретный количественный маркер, сопряженный с измеряемыми характеристиками кристаллического продукта и пригодный для внедрения в практику предиктивного контроля качества.

## Практические рекомендации

Практическая значимость полученных результатов заключается в их прямой применимости к настройке и сопровождению режимов кристаллизации в ВАПД на уровне технологической службы. Прежде всего технологам рекомендуется использовать регионально адаптированные параметры кривой кипения, поскольку показано, что вариабельность сырья приводит к воспроизводимым изменениям динамики процесса и, следовательно, требует не унифицированной, а калиброванной под конкретный регион и сезон параметризации модели. Такой подход снижает риск систематических ошибок прогноза и повышает надежность выбора управляющих воздействий в условиях неоднородности входного сырья.

В дополнение к этому целесообразно включать в контур оперативного контроля градиент перенасыщения  $\|\nabla\beta\|$  как интегральный индикатор устойчивости процесса. В отличие от отдельных точечных показателей,  $\|\nabla\beta\|$  отражает динамику изменения перенасыщения и потому позволяет технологически ранжировать режимы по степени риска срыва метастабильности, ускоренной нуклеации и формирования нежелательной дисперсности кристаллов. Практически это означает возможность более раннего выявления неблагоприятных траекторий процесса и своевременной коррекции управляющих параметров до возникновения выраженных отклонений качества продукта.

Наконец, внедрение результатов исследования предполагает переход к адаптивным алгоритмам управления, предусматривающим периодическую корректировку параметров модели по данным текущего производственного цикла. С учетом того, что параметры кривой кипения и связанные с ними характеристики процесса могут изменяться в пределах сезона, оптимальной является схема, при которой модель не фиксируется как постоянная, а уточняется на основе накопления наблю-

дений и регулярной переоценки параметров. В результате технологический контур получает инструмент не только для поддержания заданной траектории, но и для устойчивой компенсации дрейфа свойств сырья и условий тепло- и массообмена, что в совокупности повышает стабильность процесса и предсказуемость качества кристаллического продукта.

## Ограничения исследования

Исследование имеет следующие методологические и прикладные ограничения:

- (1) Ограничения по типу оборудования и сырья. Модель была валидирована *только для вакуум-аппаратов периодического действия типа УВА-60С с механическим циркулятором* при производстве свекловичного сахара (утфель I кристаллизации). Результаты могут не быть полностью применимы к аппаратам другого типа (например, с паровым барботажом), к тростниковому сахару или к увариванию утфелей II и III продукта, где реологические свойства и кинетика кристаллизации существенно отличаются.
- (2) Временные и сезонные ограничения. Данные были собраны в течение *одного производственного сезона*. Сезонные колебания качества сахарной свёклы (содержание сахарозы, чистота сока, наличие несахаров) могут влиять на оптимальные параметры модели ( $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $L_{mid}$ ). Требуется долгосрочная валидация для учета межсезонной вариабельности.
- (3) Метрологические ограничения. Точность измерений массовой доли сухих веществ ( $Bx$ ) составляла  $\pm 0,2$  °Вх, а уровня заполнения —  $\leq 1$  %. Хотя для фильтрации данных использовались скользящие средние, эти погрешности могут вносить шум в расчет градиента перенасыщения, особенно на начальных этапах уваривания.
- (4) Теоретические допущения модели. Симуляционная модель предполагала идеальное перемешивание и постоянный коэффициент диффузии сахарозы. В реальных аппаратах наличие «мертвых зон» и рост вязкости могут приводить к локальным отклонениям перенасыщения, что требует введения поправочных коэффициентов или использования более сложных CFD-моделей для масштабирования.

## Перспективы дальнейших исследований

Перспективы дальнейших исследований вытекают из полученных результатов и одновременно отражают выявленные ограничения предложенного подхода. В первую очередь представляется целесообразным развитие сигмоидной параметризации кривой кипения в направлении её интеграции с цифровыми двойниками ВАПД. Такое сопряжение позволит перейти от статической настройки модели к режиму оперативной адаптации параметров кривой кипения в реальном времени с учетом текущих свойств сырья и фактического состояния оборудования, что соответствует современным траекториям развития промышленных систем управления (Narayanasamy & Venkatachalam, 2025; Tuzhilkin et al., 2024). Практическая реализация данного направления предполагает формирование адаптивных библиотек параметров для различных типов сырья и конструктивных модификаций аппаратов, а также разработку регламента их обновления на основе накопления производственных данных и результатов калибровки модели.

Вторым логичным шагом является расширение методического инструментария за счет методов искусственного интеллекта. Наиболее перспективным представляется использование гибридных моделей, в которых физически интерпретируемая форма кривой кипения дополняется алгоритмами машинного обучения (например, градиентным бустингом или нейросетевыми архитектурами) для более точного прогноза оптимальных управляющих воздействий. Подобная комбинация позволит, с одной стороны, прогнозировать ключевые параметры модели (в том числе параметры формы кривой, определяющие динамику процесса) на основе оперативных показателей качества сиропа — таких как чистота, вязкость и цветность, а с другой — реализовать предиктивную аналитику, ориентированную на раннее обнаружение отклонений и предупреждение критических сценариев, включая риск лавинной нуклеации. Таким образом, применение ИИ в данном контуре следует рассматривать не как замену физической модели, а как надстройку, повышающую устойчивость управления и чувствительность к слабым сигналам деградации режима.

Отдельного внимания требует фактор вариабельности сырья, связанный с сезонными и региональными различиями в характеристиках сахарной

свёклы. Для обеспечения переносимости и устойчивости модели в разных производственных условиях необходимо расширение базы данных за счет нескольких производственных сезонов и включение данных из различных зон свеклосеяния. Это позволит перейти от локально настроенной параметризации к построению поправочных коэффициентов и адаптивных алгоритмов, автоматически корректирующих параметры модели при сезонных изменениях качества свёклы и, как следствие, состава и свойств межкристалльного раствора. В результате может быть сформирован более универсальный контур управления, в котором учет сырьевой вариативности станет встроенной функцией модели, а не внешней экспертной процедурой.

Наконец, перспективным направлением является масштабирование предложенного подхода на другие продукты и типы аппаратов. В качестве первоочередной задачи рассматривается калибровка модели для утфелей II и III кристаллизации, а также её адаптация к аппаратам, применяемым в производстве тростникового сахара. Такое расширение области применимости потребует дополнительных исследований реологии и кинетики кристаллизации в условиях повышенной вязкости и значительного содержания несахаров, поскольку именно эти параметры существенно изменяют характер тепло- и массообмена и, следовательно, форму кривой кипения и чувствительность процесса к управляющим воздействиям.

Завершающим, но методологически важным вектором дальнейших работ является развитие открытой научной коллаборации. Публикация исходных кодов алгоритма и цифровой модели на открытых платформах создаст условия для воспроизводимой валидации, ускорит накопление данных по внедрениям и позволит научному и промышленному сообществу адаптировать предложенные решения под различные технологические контуры. В долгосрочной перспективе такой подход способен сформировать распределенную экосистему совершенствования модели, где улучшения будут опираться на сопоставимые данные и прозрачные вычислительные процедуры.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование было направлено на устранение ключевого пробела в понимании взаимосвязи между уровнем заполнения ва-

куум-аппаратов периодического действия (ВАПД) и динамикой массовой доли сухих веществ ( $Bx$ ) в процессе уваривания утфеля. Установленные количественные зависимости и разработанная на их основе стратегия адаптивного управления на базе сигмоидной модели кривой кипения позволили достичь поставленной цели.

Результаты демонстрируют высокую степень обобщаемости для сахарных заводов, использующих аппараты типа УВА-60С. Оптимальный уровень заполнения (60–70 %) и параметры кривой кипения ( $\alpha$ ,  $\gamma$ ) могут быть успешно адаптированы для различных регионов свеклосеяния, что подтверждено апробацией в промышленных условиях Центрально-Черноземного, Северо-Кавказского и Приволжского регионов.

Для внедрения в промышленность готовы следующие элементы исследования: (1) адаптивный MPC-алгоритм на основе кривой кипения, обеспечивающий снижение энергозатрат на 14,3% и улучшение однородности кристаллов ( $CV = 28,7\%$ ); (2) регионально адаптированные параметрические наборы для настройки модели; (3) рекомендации по контролю градиента перенасыщения для предотвращения технологических рисков. Для реализации более сложных элементов, таких как ИИ-оптимизатор, потребуется дополнительная калибровка под конкретные производственные условия.

Работа вносит вклад в теорию управления кристаллизацией, уточняя роль градиента перенасыщения и предлагая новый критерий устойчивости процесса. Практическая ценность подтверждена значимым улучшением энергоэффективности и качества конечного продукта.

В рамках дальнейших исследований планируется публикация цифровой модели и исходных кодов алгоритма на открытых платформах для возможности их адаптации научным и промышленным сообществом. Перспективными направлениями являются: разработка гибридных систем управления с использованием искусственного интеллекта, создание цифровых двойников ВАПД, а также интеграция предложенного метода с системами предиктивной аналитики. Таким образом, данное исследование не только решает актуальную научно-техническую задачу, но и предоставляет готовый инструментарий для повышения эффективно-

сти и качества производства сахара, открывая пути для дальнейших изысканий в данной области.

## АВТОРСКИЙ ВКЛАД

**Сергей Михайлович Петров:** формулирование основных идей, целей и задач исследования; разработка общей гипотезы и структуры работы; подготовка первоначального текста статьи, включая написание основных разделов.

**Надежда Михайловна Подгорнова:** критический пересмотр текста, внесение правок, доработка структуры, проверка стилистики и грамматики на финальных этапах.

**Андрей Владимирович Шаховской:** Написание программного кода, разработка алгоритмов, создание программных инструментов, необходимых для проведения исследования или обработки данных.

## AUTHOR CONTRIBUTIONS

**Sergey Mikhailovich Petrov:** formulation of the main ideas, aims, and objectives of the study; development of the overall hypothesis and structure of the work; preparation of the initial draft of the manuscript, including writing the main sections.

**Nadezhda Mikhailovna Podgornova:** critical revision of the text, making corrections, refinement of the structure, and checking style and grammar at the final stages.

**Andrey Vladimirovich Shakhovskoy:** Writing the software code, developing algorithms, and creating software tools necessary for conducting the research or processing data.

## ЛИТЕРАТУРА

- Арапов, Д. В., Курицын, В. А., Петров, С. М., Подгорнова, Н. М., & Зайцева, М. А. (2021). Вероятностное моделирование удельной массовой скорости роста сахарных кристаллов. *Техника и технология пищевых производств*, 51(1), 39–52. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-1-39-52>
- Гольденберг, С. П., Максимов, А. С., & Лапусь, А. П. (2017). Влияние формы распределения и размера кристаллов затравки на процесс кристаллизации сахарозы. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (2), 40–44.
- Еделев, Д. А., Тужилкин, В. И., Коваленок, В. А., Клемешов, Д. А., Мойсеяк, М. Б., Филинов, М. А., & Уразбаева, К. А. (2016). Альтернативная технология кристаллизации сахарозы. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (1), 5–11.
- Клейменова, Н. Л., Орловцева, О. А., Ершов, С. В., & Дворянинова, О. П. (2018). Разработка системы автоматического управления производственным процессом уваривания утфеля I кристаллизации в вакуум-аппарате. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 80(2), 101–107. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-2-101-107>
- Ковалёнок, В. А., Тужилкин, В. И., & Баскаков, А. В. (2010). Расчет массы выпаренной воды и добавляемого сиропа при кристаллизации сахарозы в вакуум-аппаратах. *Хранение и переработка сельхозсырья*, (9), 16–17.
- Кравчук, А. Ф., Ладанюк, А. П., & Прокопенко, Ю. В. (2008). Алгоритм ситуационного управления процессом кристаллизации сахара в вакуум-аппарате периодического действия с механическим циркулятором. *Автоматика. Автоматизация. Електротехнічні комплекси та системи*, (1), 105–110.
- Кульнева, Н. Г., Федорук, В. А., Матвиенко, Н. А., & Пономарева, Е. М. (2021). Совершенствование кристаллизации утфелей в сахарном производстве. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 83(1), 86–93. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2021-1-86-93>

- Липская, Н. И., & Турбан, Т. И. (2008). *Качество сахара и пути его повышения (рекомендации)*. Минск: Научно-практический центр НАН Беларуси по продовольствию.
- Мирончук, В. Г., & Ещенко, О. А. (2013). Анализ процесса уваривания сахарных утфелей на основе имитационного моделирования. *Пищевая промышленность: наука и технологии*, 6(3), 45–53.
- Петров, С. М., & Подгорнова, Н. М. (2024). Контроль и управление кристаллизацией сахарозы в вакуум-аппаратах периодического действия. *Сахар*, (2), 40–46. <https://doi.org/10.24412/2413-5518-2024-2-40-46>
- Тужилкин, В. И., Балыхин, М. Г., Лукин, Н. Д., & Ковалёнок, В. А. (2018). Новые технологии кристаллизации сахарозы. *Достижения науки и техники АПК*, 32(12), 82–85.
- Ходеева, М. И., Василенко, В. А., & Кольцова, Э. М. (2020). Реализация математической модели кристаллизатора емкостного типа для клиент-серверного приложения. *Успехи в химии и химической технологии*, 34(6), 142–144.
- Arapov, D. V., Kuritsyn, V. A., Petrov, S. M., & Podgornova, N. M. (2022). Simulation of the rate of dissolution of sucrose crystals. *Journal of Food Engineering*, 318, 110887. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110887>
- Azizi, M., Mosharaf-Dehkordi, M., Fouladi, N., & Kazanci, C. (2024). An enhanced hybrid model for batch sugar crystallization based on the pattern recognition for overall heat transfer coefficient using a machine learning approach. *Journal of Food Process Engineering*, 47(4), e14614. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14614>.
- Barrett, M., McNamara, M., Hao, H., Barrett, P., & Glennon, B. (2010). Supersaturation tracking for the development, optimization and control of crystallization processes. *Chemical Engineering Research and Design*, 88(8), 1108–1119. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.02.010>
- Boskabadi, M. R., Murugaiah, M., Nielsen, T. R., Sivaram, A., Sin, G., & Mansouri, S. S. (2025). Virtual sensor for sustainable large-scale process monitoring. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 64(7), 3902–3917. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c03342>
- Broadfoot, R., & Lopes Fraga, G. L. (2023). Increasing our understanding of supersaturation and the use of massecuite dry substance in pan control—part 1. In *Proceedings of the 44th Annual Conference of the Australian Society of Sugar Cane Technologists (ASSCT 2023)* (pp. 322–339). Australian Society of Sugar Cane Technologists.
- Halomoan, H., Nurkhamidah, S., & Altway, A. (2024). The effect of three factors interaction on the size distribution of white sugar crystals in the batch vacuum pan. In *Materials Science Forum* (vol. 1112, pp. 147–157). Trans Tech Publications, Ltd. <https://doi.org/10.4028/p-t3woj8>
- International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis Ltd. (ICUMSA). (2024). *ICUMSA Methods Book*. Verlag Dr. Albert Bartens.
- Karimidatsjerd, A., Zahedinia, S., Konar, N., Toker, O. S., & Palabiyik, I. (2025). Application of crystallization in the sugar industry. In *Mass Transfer Operations in the Food Industry* (pp. 167–196). Woodhead Publishing.
- Martins, P. M., Rocha, F. A., & Rein, P. (2005). Modeling sucrose evaporative crystallization. Part 1. Vacuum pan monitoring by mass balance and image analysis methods. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 44(23), 8858–8864. <https://doi.org/10.1021/ie050639h>
- Mazaeda, R., & de Prada Moraga, C. (2011). Vacuum evaporation sugar crystallizers [Cristalizadores de azúcar por evaporación al vacío]. In *White paper on automatic control in the sugarcane industry [Libro blanco del control automático en la industria de la caña de azúcar]* (pp. 97–126). Ibero-American Program on Science and Technology for Development.
- Mazaeda, R., Acebes, L. F., Rodríguez, A., Engell, S., & de Prada, C. (2014). Sugar crystallization benchmark. In *Computer Aided Chemical Engineering* (vol. 33, pp. 613–618). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63456-6.50103-4>
- Mazaeda, R., Cristea, S. P., & de Prada, C. (2020). Hierarchically coordinated economic MPC plantwide control of mixed continuous-batch units in process industries with application to a beet sugar plant. *Optimal Control Applications and Methods*, 41(1), 190–214. <https://doi.org/10.1002/oca.2535>

- Meng, Y., Chen, J., Li, Z., Zhang, Y., Liang, L., & Zhu, J. (2022). Soft sensor with deep feature extraction for a sugarcane milling system. *Journal of Food Process Engineering*, 45(8), e14066. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14066>
- Mkwananzi, T. (2021). *Improving energy and economic performances of a typical sugarcane factory through energy indicator development, set-point optimization, and optimal sensor placement* [Doctoral dissertation]. Stellenbosch University.
- Mncube, F. S., Love, D. J., Sikhakhane, P., Ogle, D., & Mtembu, T. (2019). Automation of white pans at the Tongaat Hulett refinery. In *International Sugar Journal World Sugar Yearbook 2019* (pp. 54–64). Agra Informa.
- Morales, H., Aguirre-Zapata, E., di Sciascio, F., & Amicarelli, A. N. (2023). Estrategias de control con referencia variable aplicadas al proceso de Cristalización C en la industria azucarera [Variable-reference control strategies applied to the C crystallization process in the sugar industry]. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 20(1), 81–92. <https://doi.org/10.4995/riai.2022.17096>
- Morales, H., di Sciascio, F., Aguirre-Zapata, E., & Amicarelli, A. (2024). Crystallization process in the sugar industry: A discussion on fundamentals, industrial practices, modeling, estimation and control. *Food Engineering Reviews*, 16(3), 441–469. <https://doi.org/10.1007/s12393-024-09377-3>
- Morgenroth, B., Max, H., Mogalle, M., & Bola, H. S. (2014). Batch pan automation and its impact on energy conservation in cane sugar factories. *International Sugar Journal*, 116(1392), 892–900.
- Nanev, C. N. (2021). How to manage a crystallization process aimed at obtaining a desired combination of number of crystals and their distribution by size: Learn here. *Crystal Research and Technology*, 56(3), 2000190. <https://doi.org/10.1002/crat.202000190>
- Narayanasamy, K., & Venkatachalam, I. (2025). A detailed review for predicting the quantity of sugar from sugarcane using various models. *IEEE Access*, 13, 32122–32146. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3522495>
- Petrov, S. M., Arapov, D. V., Kuritsyn, V. A., & Podgornova, N. M. (2026). Development of a high-accuracy multilayer perceptron-based soft sensor for real-time monitoring of supersaturation and dry substance content in vacuum pan crystallization. *Journal of Food Engineering*, 112966. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2026.112966>
- Pohorilyi, T. (2023). Modeling of non-stationary processes heat and mass transfer according to the cellular model of sucrose mass crystallization. *Ukrainian Food Journal*, 12(1), 80–113. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2023-12-1-8>
- Rozsa, J. (2025). Optimizing supersaturation curves in various sugar crystallization processes. *Sugar Industry International*, 150(1), 50–55. <https://doi.org/10.36961/si32818>
- Rozsa, L. (2003). A few thoughts on automation in sugar manufacturing. *International sugar Journal*, 105(1252), 156–166.
- Sanchez-Sanchez, K. B., Bolaños-Reynoso, E., & Urrea-Garcia, G. R. (2017). Analysis of operating conditions for cane sugar batch crystallization based on MSZW coupled with mechanistic kinetic models. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 16(3), 1029–1052.
- Sidletskyi, V., & Kukhar, O. (2024). Change of crystallization process attributes in a vacuum pan of automation systems, *Ukrainian Food Journal*, 13(2), 366–384. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2024-13-2-12>
- Stobie, R. M. (2019). *Evaporator liquor brix sensor: Final report 2017/003* (Report No. 2017/003). Sugar Research Australia Limited.
- Suarez, L. A. P., Georgieva, P., & de Azevedo, S. F. (2011a). Model predictive control strategies for batch sugar crystallization process. *Advanced Model Predictive Control*, 89(6), 225–244. <https://doi.org/10.5772/16853>
- Suárez, L. A. P., Georgieva, P., & De Azevedo, S. F. (2011b). Nonlinear MPC for fed-batch multiple stages sugar crystallization. *Chemical Engineering Research and Design*, 89(6), 753–767. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.10.010>
- Sunori, S. K., Joshi, K. A., Negi, P. B., Mittal, A., Garia, P., Maurya, S., & Juneja, P. (2022). Design of digital and robust control systems for sugar refinery. In *2022 4th International Conference on*

- Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)* (pp. 527–532). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSSIT53264.2022.9716315>
- Sunori, S. K., Thakur, M., Jethi, G. S., & Juneja, P. (2020, December). Control System Optimization for Sugar Crystallization Process. In *2020 2nd International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICACCCN)* (pp. 611–614). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICACCCN51052.2020.9362846>
- Tejerina, D., Mazaeda, R., & de Prada, C. (2014). Modelling and simulation of the non-ideal mixing behaviour of the crystallization stage in a sugar factory batch crystallizer. In *Proceedings of the 26th European Modeling and Simulation Symposium (EMSS 2014)* (pp. 56–64). Bordeaux: EUROSIS-ETI.
- Tkachenko, S. V., Sheiko, T. V., Anisimova, O. M., Petrenko, V. V., Skoryk, K. D., Dzhohan, O. I., Khomichak, L. M., & Kuznietsova, I. V. (2024). Influence of dispersion of a new type whole crystals seed on crystallization process and sugar quality. *Journal of Crystal Growth*, 648(7), 127909. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgr.2024.127909>
- Tuzhilkin, V. I., Balykhin, M. G., Petrov, S. M., Podgornova, N. M., Lukin, N. D., & Kovalyonok, V. A. (2021). Mathematical description of the isobaric vaporizing crystallization of sucrose. *Journal of Food Engineering*, 306, 110614. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110614>
- Tuzhilkin, V. I., Petrov, S. M., Podgornova, N. M., & Lukin, N. D. (2024). Process engineering of semi-continuous boiling of massecuites based on Digital Twin of sucrose crystallization. *Journal of Food Engineering*, 365, 111816. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111816>
- Varzakas, T. (2014). Crystallization. In Th. Varzakas & C. Tzia (Eds.), *Food engineering handbook* (vol. II: Food Process. Engineering) (pp. 131–180). CRC Press.

## REFERENCES

- Arapov, D. V., Kuritsyn, V. A., Petrov, S. M., Podgornova, N. M., & Zaitseva, M. A. (2021). Probabilistic modeling of specific mass growth rate of sugar crystals. *Food Processing: Techniques and Technology*, 51(1), 39–52. (In Russ.). <http://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-1-39-52>
- Goldenberg, S. P., Maksimov, A. S., & Lopus, A. P. (2017). Influence of seed crystal size and distribution on sucrose crystallization process. *Storage and Processing of Farm Products*, (2), 40–44. (In Russ.).
- Edelyov, D. A., Tuzhilkin, V. I., Kovalenok, V. A., Klemeshov, D. A., Moiseyak, M. B., Filinov, M. A., & Urazbayeva, K. A. (2016). Alternative sucrose crystallization technology. *Storage and Processing of Farm Products*, (1), 5–11. (In Russ.).
- Kleymenova, N. L., Orlovtsseva, O. A., Ershov, S. V., & Dvoryaninova, O. P. (2018). Development of automatic control system for massecuite boiling process in vacuum pan. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 80(2), 101–107. (In Russ.). <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-2-101-107>
- Kovalenok, V. A., Tuzhilkin, V. I., & Baskakov, A. V. (2010). Calculation of water evaporation and syrup addition during sucrose crystallization in vacuum pans. *Storage and Processing of Farm Products*, (9), 16–17. (In Russ.).
- Kravchuk, A. F., Ladanyuk, A. P., & Prokopenko, Y. V. (2008). Algorithm for situational control of sugar crystallization in batch vacuum pans with mechanical circulator. *Automation. Electrotechnical Complexes and Systems*, (1), 105–110. (In Russ.).
- Kulneva, N. G., Fedoruk, V. A., Matvienko, N. A., & Ponomareva, E. M. (2021). Improvement of massecuite crystallization in sugar production. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 83(1), 86–93. (In Russ.). <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2021-1-86-93>
- Lipskaya, N. I., & Turban, T. I. (2008). *Sugar quality and ways of its improvement (guidelines)*. Minsk: Scientific-Practical Center of NAS of Belarus for Food. (In Russ.).
- Mironchuk, V. G., & Eshchenko, O. A. (2013). Analysis of sugar massecuite boiling process based on simulation modeling. *Food Industry: Science and Technologies*, 6(3), 45–53. (In Russ.).

- Petrov, S. M., & Podgornova, N. M. (2024). Control and management of sucrose crystallization in batch vacuum pans. *Sugar*, (2), 40–46. (In Russ.). doi.org/10.24412/2413-5518-2024-2-40-46
- Tuzhilkin, V. I., Balykhin, M. G., Lukin, N. D., & Kovalenok, V. A. (2018). New sucrose crystallization technologies. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*, 32(12), 82–85. (In Russ.).
- Khodeeva, M. I., Vasilenko, V. A., & Koltsova, E. M. (2020). Implementation of mathematical model for tank crystallizer in client-server application. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*, 34(6), 142–144. (In Russ.).
- Arapov, D. V., Kuritsyn, V. A., Petrov, S. M., & Podgornova, N. M. (2022). Simulation of the rate of dissolution of sucrose crystals. *Journal of Food Engineering*, 318, 110887. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110887
- Azizi, M., Mosharaf-Dehkordi, M., Fouladi, N., & Kazanci, C. (2024). An enhanced hybrid model for batch sugar crystallization based on the pattern recognition for overall heat transfer coefficient using a machine learning approach. *Journal of Food Process Engineering*, 47(4), e14614. https://doi.org/10.1111/jfpe.14614.
- Barrett, M., McNamara, M., Hao, H., Barrett, P., & Glennon, B. (2010). Supersaturation tracking for the development, optimization and control of crystallization processes. *Chemical Engineering Research and Design*, 88(8), 1108–1119. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.02.010
- Boskabadi, M. R., Murugaiah, M., Nielsen, T. R., Sivaram, A., Sin, G., & Mansouri, S. S. (2025). Virtual sensor for sustainable large-scale process monitoring. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 64(7), 3902–3917. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c03342
- Broadfoot, R., & Lopes Fraga, G. L. (2023). Increasing our understanding of supersaturation and the use of massecuite dry substance in pan control-part 1. In *Proceedings of the 44th Annual Conference of the Australian Society of Sugar Cane Technologists (ASSCT 2023)* (pp. 322–339). Australian Society of Sugar Cane Technologists.
- Halomoan, H., Nurkhamidah, S., & Altway, A. (2024). The effect of three factors interaction on the size distribution of white sugar crystals in the batch vacuum pan. In *Materials Science Forum* (vol. 1112, pp. 147–157). Trans Tech Publications, Ltd. https://doi.org/10.4028/p-t3woj8
- International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis Ltd. (ICUMSA). (2024). *ICUMSA Methods Book*. Verlag Dr. Albert Bartens.
- Karimidatsjerd, A., Zahedinia, S., Konar, N., Toker, O. S., & Palabiyik, I. (2025). Application of crystallization in the sugar industry. In *Mass Transfer Operations in the Food Industry* (pp. 167–196). Woodhead Publishing.
- Martins, P. M., Rocha, F. A., & Rein, P. (2005). Modeling sucrose evaporative crystallization. Part 1. Vacuum pan monitoring by mass balance and image analysis methods. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 44(23), 8858–8864. https://doi.org/10.1021/ie050639h
- Mazaeda, R., & de Prada Moraga, C. (2011). Vacuum evaporation sugar crystallizers [Cristalizadores de azúcar por evaporación al vacío]. In *White paper on automatic control in the sugarcane industry [Libro blanco del control automático en la industria de la caña de azúcar]* (pp. 97–126). Ibero-American Program on Science and Technology for Development.
- Mazaeda, R., Acebes, L. F., Rodríguez, A., Engell, S., & de Prada, C. (2014). Sugar crystallization benchmark. In *Computer Aided Chemical Engineering* (vol. 33, pp. 613–618). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63456-6.50103-4
- Mazaeda, R., Cristea, S. P., & de Prada, C. (2020). Hierarchically coordinated economic MPC plantwide control of mixed continuous-batch units in process industries with application to a beet sugar plant. *Optimal Control Applications and Methods*, 41(1), 190–214. https://doi.org/10.1002/oca.2535
- Meng, Y., Chen, J., Li, Z., Zhang, Y., Liang, L., & Zhu, J. (2022). Soft sensor with deep feature extraction for a sugarcane milling system. *Journal of Food Process Engineering*, 45(8), e14066. https://doi.org/10.1111/jfpe.14066
- Mkwananzi, T. (2021). *Improving energy and economic performances of a typical sugarcane factory through energy indicator development, set-point optimization, and optimal sensor placement [Doctoral dissertation]*. Stellenbosch University.

- Mncube, F. S., Love, D. J., Sikhakhane, P., Ogle, D., & Mtembu, T. (2019). Automation of white pans at the Tongaat Hulett refinery. In *International Sugar Journal World Sugar Yearbook 2019* (pp. 54–64). Agra Informa.
- Morales, H., Aguirre-Zapata, E., di Sciascio, F., & Amicarelli, A. N. (2023). Estrategias de control con referencia variable aplicadas al proceso de Cristalización C en la industria azucarera [Variable-reference control strategies applied to the C crystallization process in the sugar industry]. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 20(1), 81–92. <https://doi.org/10.4995/riai.2022.17096>
- Morales, H., di Sciascio, F., Aguirre-Zapata, E., & Amicarelli, A. (2024). Crystallization process in the sugar industry: A discussion on fundamentals, industrial practices, modeling, estimation and control. *Food Engineering Reviews*, 16(3), 441–469. <https://doi.org/10.1007/s12393-024-09377-3>
- Morgenroth, B., Max, H., Mogalle, M., & Bola, H. S. (2014). Batch pan automation and its impact on energy conservation in cane sugar factories. *International Sugar Journal*, 116(1392), 892–900.
- Nanev, C. N. (2021). How to manage a crystallization process aimed at obtaining a desired combination of number of crystals and their distribution by size: Learn here. *Crystal Research and Technology*, 56(3), 2000190. <https://doi.org/10.1002/crat.202000190>
- Narayanasamy, K., & Venkatachalam, I. (2025). A detailed review for predicting the quantity of sugar from sugarcane using various models. *IEEE Access*, 13, 32122–32146. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3522495>
- Petrov, S. M., Arapov, D. V., Kuritsyn, V. A., & Podgornova, N. M. (2026). Development of a high-accuracy multilayer perceptron-based soft sensor for real-time monitoring of supersaturation and dry substance content in vacuum pan crystallization. *Journal of Food Engineering*, 112966. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2026.112966>
- Pohorilyi, T. (2023). Modeling of non-stationary processes heat and mass transfer according to the cellular model of sucrose mass crystallization. *Ukrainian Food Journal*, 12(1), 80–113. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2023-12-1-8>
- Rozsa, J. (2025). Optimizing supersaturation curves in various sugar crystallization processes. *Sugar Industry International*, 150(1), 50–55. <https://doi.org/10.36961/si32818>
- Rozsa, L. (2003). A few thoughts on automation in sugar manufacturing. *International sugar Journal*, 105(1252), 156–166.
- Sanchez-Sanchez, K. B., Bolaños-Reynoso, E., & Urrea-Garcia, G. R. (2017). Analysis of operating conditions for cane sugar batch crystallization based on MSZW coupled with mechanistic kinetic models. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 16(3), 1029–1052.
- Sidletsykyi, V., & Kukhar, O. (2024). Change of crystallization process attributes in a vacuum pan of automation systems, *Ukrainian Food Journal*, 13(2), 366–384. <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2024-13-2-12>
- Stobie, R. M. (2019). *Evaporator liquor brix sensor: Final report 2017/003* (Report No. 2017/003). Sugar Research Australia Limited.
- Suarez, L. A. P., Georgieva, P., & de Azevedo, S. F. (2011a). Model predictive control strategies for batch sugar crystallization process. *Advanced Model Predictive Control*, 89(6), 225–244. <https://doi.org/10.5772/16853>
- Suárez, L. A. P., Georgieva, P., & De Azevedo, S. F. (2011b). Nonlinear MPC for fed-batch multiple stages sugar crystallization. *Chemical Engineering Research and Design*, 89(6), 753–767. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.10.010>
- Sunori, S. K., Joshi, K. A., Negi, P. B., Mittal, A., Garia, P., Maurya, S., & Juneja, P. (2022). Design of digital and robust control systems for sugar refinery. In *2022 4th International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)* (pp. 527–532). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSSIT53264.2022.9716315>
- Sunori, S. K., Thakur, M., Jethi, G. S., & Juneja, P. (2020, December). Control System Optimization for Sugar Crystallization Process. In *2020 2nd International Conference on Advances in Computing, Communication Control and Networking (ICACCCN)* (pp. 611–614). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICACCCN51052.2020.9362846>

- Tejerina, D., Mazaeda, R., & de Prada, C. (2014). Modelling and simulation of the non-ideal mixing behaviour of the crystallization stage in a sugar factory batch crystallizer. In *Proceedings of the 26th European Modeling and Simulation Symposium (EMSS 2014)* (pp. 56–64). Bordeaux: EUROSIS-ETI.
- Tkachenko, S. V., Sheiko, T. V., Anisimova, O. M., Petrenko, V. V., Skoryk, K. D., Dzhohan, O. I., Khomichak, L. M., & Kuznietsova, I. V. (2024). Influence of dispersion of a new type whole crystals seed on crystallization process and sugar quality. *Journal of Crystal Growth*, 648(7), 127909. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgr.2024.127909>
- Tuzhilkin, V. I., Balykhin, M. G., Petrov, S. M., Podgornova, N. M., Lukin, N. D., & Kovalyonok, V. A. (2021). Mathematical description of the isobaric vaporizing crystallization of sucrose. *Journal of Food Engineering*, 306, 110614. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110614>
- Tuzhilkin, V. I., Petrov, S. M., Podgornova, N. M., & Lukin, N. D. (2024). Process engineering of semi-continuous boiling of massecuites based on Digital Twin of sucrose crystallization. *Journal of Food Engineering*, 365, 111816. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111816>
- Varzakas, T. (2014). Crystallization. In Th. Varzakas & C. Tzia (Eds.), *Food engineering handbook* (vol. II: Food Process. Engineering) (pp. 131–180). CRC Press.

## ОБ АВТОРАХ

**Сергей Михайлович Петров**, профессор кафедры систем автоматизированного управления, Московский государственный университет технологий и управления имени К. Г. Разумовского (Первый казачий университет) (109004, Москва, ул. Земляной Вал, д. 73), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5859-7263>, Scopus ID: 57201345720, Researcher ID: JBJ-7676-2023, SPIN-код: 9627-7651, s.petrov@mgutm.ru

**Надежда Михайловна Подгорнова**, профессор кафедры аппаратурного оформления и автоматизации технологических производств имени профессора М. Б. Генералова» и кафедры процессов и аппаратов химических технологий, Московский политехнический университет (107023, Москва, Большая Семёновская, 38), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7909-1763>, Scopus ID: 6508299946.; Researcher ID: B-4861-2019, SPIN-код: 8305-5600, n.m.podgornova@mospolytech.ru

**Андрей Владимирович Шаховской**, доцент кафедры систем автоматизированного управления Московский государственный университет технологий и управления имени К. Г. Разумовского (Первый казачий университет) (109004, Москва, ул. Земляной Вал, д. 73), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7632-304X>, Scopus ID: 57300794800, Researcher ID: ABR-0565-2022, SPIN-код: 2315-9205, a.shakhovskoy@mgutm.ru

## ABOUT THE AUTHORS

**Sergey Mikhailovich Petrov**, Professor, Department of Automated Control Systems, Moscow State University of Technologies and Management named after K. G. Razumovsky (First Cossack University) (109004, Moscow, Zemlyanoy Val St., 73), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5859-7263>, Scopus ID: 57201345720, Researcher ID: JBJ-7676-2023, SPIN Code: 9627-7651, s.petrov@mgutm.ru

**Nadezhda Mikhailovna Podgornova**, Professor, Department of “Instrumentation and Automation of Technological Productions named after Professor M.B. Generalov” and “Processes and Apparatuses of Chemical Technology, Moscow Polytechnic University (107023, Moscow, Bolshaya Semyonovskaya St., 38), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7909-1763>, Scopus ID: 6508299946, Researcher ID: B-4861-2019, SPIN Code: 8305-5600, n.m.podgornova@mospolytech.ru

**Andrey Vladimirovich Shakhovskoy**, Associate Professor, Department of Automated Control Systems, Moscow State University of Technologies and Management named after K. G. Razumovsky (First Cossack University) (109004, Moscow, Zemlyanoy Val St., 73), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7632-304X>, Scopus ID: 57300794800, Researcher ID: ABR-0565-2022, SPIN Code: 2315-9205, a.shakhovskoy@mgutm.ru