

II. ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ. АВТОМАТИЗАЦИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 666.1.013: 658.511.3

Valery P. Meshalkin¹, Alexander A. Bolshakov², Dmitry Y. Petrov^{1,3}

Мешалкин В.П.¹, Большаков А.А.², Петров Д.Ю.^{1,3}

OPTIMIZATION OF PRODUCTION PLANNING FOR LOTS OF MULTI-ASSORTMENT HIGH-QUALITY SHEET GLASS

¹D. Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

²St. Petersburg State Institute of Technology St. Petersburg, Russian Federation

³IPMTU RAS, Saratov, Russian Federation
iac_sstu@mail.ru

An algorithm for optimal production planning for a lot of multi-assortment high-quality sheet glass is proposed. Cluster analysis of the product range of multi-stage production of high-quality sheet glass allowed us to identify 4 types of sheet glass. Based on the strategic map of goals and performance indicators for multi-stage production of high-quality sheet glass, a system-dynamic model to produce 4 types of sheet glass is developed. A model of the states of the "Production" agent is developed to switch production modes in the system-dynamic model. A discrete-event multi-agent model for forming order packages of high-quality sheet glass of different types is proposed. Numerical experiments and optimization of the sizes of production lots of multi-assortment high-quality sheet glass were performed according to the criterion of maximum energy efficiency, considering the limitations imposed by the seasonality of demand for high-quality construction sheet glass.

Key words: algorithm, system-dynamic model, agent state model, discrete-event multi-agent model, optimization, energy efficiency, high-quality sheet glass, AnyLogic

ОПТИМИЗАЦИЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ВЫПУСКА ПАРТИЙ МНОГОАССОРТИМЕНТНОГО ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО ЛИСТОВОГО СТЕКЛА

¹Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Российская Федерация

²Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), Санкт-Петербург, Российская Федерация

³Институт проблем точной механики и управления РАН, г.Саратов, Российская Федерация
iac_sstu@mail.ru

Предложен алгоритм оптимального планирования выпуска партии многоассортиментного высококачественного листового стекла. Кластерный анализ номенклатуры продукции многостадийного производства высококачественного листового стекла позволил выделить 4 типа листовых стёкол. На основе стратегической карты целей и показателей функционирования многостадийного производства высококачественного листового стекла разработана системно-динамическая модель выпуска 4-х типов листовых стёкол. Разработана модель состояний агента «Производство» для переключения режимов производства в системно-динамической модели. Предложена дискретно-событийная многоагентная модель формирования пакетов заказов высококачественного листового стекла разных типов. Выполнены численные эксперименты и оптимизация размеров партий выпуска многоассортиментного высококачественного листового стекла по критерию максимальной энергоэффективности с учетом ограничений, накладываемых сезонностью спроса на строительное высококачественное листовое стекло.

Ключевые слова: алгоритм, системно-динамическая модель, модель состояний агента, дискретно-событийная многоагентная модель, оптимизация, энергоэффективность, высококачественное листовое стекло, AnyLogic

DOI 10.36807/1998-9849-2025-74-100-66-72

Статья поступила в редакцию – 18.08.2025

Принята к публикации – 09.09.2025

Введение

В настоящее время для производителей высококачественного листового стекла (ВЛС) становится актуальной задача энергоресурсоэффективного управления режимами производственных линий в условиях необходимости оперативного удовлетворения изменяющихся требований потребителей [1–4]. Поэтому необходима разработка систем поддержки принятия решений (СППР) на основе компьютерных имитационных моделей предприятий, эксперименты с которыми позволяют определить лучшие значения характеристик производственного процесса при различных сценарных условиях, например, при резком изменении спроса на конечную продукцию или при возникновении перебоев в поставках сырья и комплектующих [5, 6]. Принятие обоснованных решений по управлению производственными, организационными и вспомогательными процессами предприятия основано на анализе результатов компьютерного моделирования

функционирования этих процессов с использованием инструментов «Индустрии 4.0».

В результате компьютерного моделирования оптимизируются значения основных характеристик процессов производства, что приводит к снижению производственных запасов, себестоимости, времени производственного цикла, энергоресурсозатрат на производство единицы продукции, к обеспечению требуемого уровня качества и своевременности поставок готовой продукции [8–10].

При имитационном моделировании [11–13] производственных характеристик предприятий применяются методы дискретно-событийного моделирования [14, 15], системной динамики [16–18], агентного моделирования [19 – 22], расширенные сети Петри [23] и др.

Интеграция имитационных моделей технологических и производственных процессов с оптимизационными модулями систем моделирования с базами данных SCADA

и ERP-систем предприятия является основой создания «цифровых двойников производства» [24, 25].

Среда имитационного моделирования AnyLogic [22] на основе базовых типов моделей: «системная динамика», «дискретно-событийный» и «агент» позволяет строить иерархические модели сложных систем. Модель системной динамики функционирования многостадийного производства ВЛС в среде AnyLogic обеспечивает возможность оптимизации расходов на проведение мероприятий и определения значений параметров модели для минимизации или максимизации значения целевого функционала.

Встроенный в AnyLogic оптимизатор OptQuest позволяет решать задачи многокритериальной оптимизации при заданных ограничениях. Так как оптимизация стохастических моделей связана с варьированием значений величин, для каждой итерации процесса применяется заранее заданное число репликаций (экспериментов) или «прогонов», по результатам которых формулируются результаты итерации [26].

В настоящей статье развивается подход к построению имитационных моделей непрерывного производства на основе методов системно-динамического, дискретно-событийного и агентного моделирования (модель состояний агента). Предложена новая имитационная модель непрерывного производства, реализованная в системе AnyLogic. На примере производства ВЛС выполнена оптимизация по критерию энергоресурсоэффективности производства наиболее важных производственных характеристик при различных условиях сценариев.

Алгоритм моделирования оптимального планирования выпуска партии многоассортиментного высококачественного листового стекла

Многостадийное производство ВЛС флоат-способом является сложной ХТС и состоит из следующих стадий: подготовка шихты; стекловарение; формование ленты стекла на расплаве олова; отжиг ленты стекла; контроль дефектов; резка ленты стекла на листы заданного размера и упаковка полученных листов (рис. 1).



Рис. 1. Структурная схема производства листового стекла

Производство ВЛС как объект управления характеризуется большими постоянными затратами на электроэнергию, природный газ и сырье, а также сезонным спросом на строительное стекло. Необходимость удовлетворения запросов потребителей на ВЛС различных типов (толщина, цвет, размер) требует изменять технологические режимы производства ВЛС. Периоды изменения режимов производства ВЛС относятся к категории планового простоя оборудования, что увеличивает себестоимость продукции и снижает энергоресурсоэффективность производства. Решением этой проблемы является увеличение количества производственных линий для обеспечения возможности их специализации на производстве ВЛС постоянной толщины и размера, а также создание больших складских площадей для обеспечения хранения полугодовых складских запасов каждого типа продукции ВЛС. При отсутствии таких возможностей предприятиям необходимо решать задачи оптимального планирования выпуска партии многоассортиментного ВЛС.

Разработка алгоритма оптимального планирования производства, обеспечит оптимизацию размера партий выпуска ВЛС различных типов и сокращение количества изменений технологических режимов производства

ВЛС, что позволит повысить энергоресурсоэффективность производства. Алгоритм оптимального планирования выпуска партии многоассортиментного ВЛС, состоит из следующих этапов.

Этап 1. Анализ исходных данных на основе разведочного анализа характеристик производства ВЛС и кластерного анализа номенклатуры производимого ВЛС.

Этап 2. Разработка стратегической карты целей и показателей функционирования многостадийного производства ВЛС для определения объектов типа «Накопитель» [22] в системно-динамической модели (СДМ) [27].

Этап 3. Описание функционирования многостадийного производства ВЛС системой дифференциальных уравнений, определяющих скорость изменения объектов типа «Накопитель» на основе значений динамических переменных функций потоков СДМ.

Этап 4. Разработка СДМ на основе системы дифференциальных уравнений функционирования многостадийного производства ВЛС [28].

Этап 5. Разработка модели состояний агента «Производство» (МСА) для переключения режимов производства в СДМ [29].

Этап 6. Разработка дискретно-событийной многоагентной модели (ДСММ) формирования пакетов заказов на ВЛС разных типов для СДМ производства ВЛС.

Этап 7. Апробация комплексной компьютерной имитационной модели на статистических данных производств ВЛС. При необходимости корректировки модели выполняется переход на «Этап 1».

Этап 8. Выполнение численных экспериментов с комплексной компьютерной имитационной модели при различных сценарных условиях для оптимизации значений объемов заказов каждого типа ВЛС в месячных и годовых планах производства, а также количества изменений режимов производства ВЛС, влияющих на энергоресурсоэффективность многостадийного производства.

Этап 9. Принятие решений по управлению энергоресурсоэффективностью многостадийного производства ВЛС на основе анализа результатов «Этапа 8». Переход на «Этап 7».

Схема моделирования оптимального планирования выпуска партии многоассортиментного ВЛС представлена на рис. 2.



Рис. 2. Схема моделирования оптимального планирования выпуска партий ВЛС

Пример реализации алгоритма моделирования оптимального планирования выпуска партии многоассортиментного ВЛС

Этап 1. Кластерный анализ номенклатуры продукции многостадийного производства ВЛС позволил выделить следующие типы листовых стекол: «Т1» – бесцветные стекла толщиной 3 ÷ 4 мм; «Т2» – бесцветные стекла толщиной 5 ÷ 10 мм; «Т3» – окрашенные стекла толщиной 3 ÷ 4 мм; «Т4» – бесцветные стекла толщиной 1,4 ÷ 2,2 мм. При рассмотрении дополнительных параметров ЛС можно определить дополнительные типы.

Этап 2. На основе стратегической карты целей

[30], разработанной в среде Business Studio, определены объекты системно-динамической модели типа «Накопитель»: S_1 – «Финансы предприятия» (определяет прибыль предприятия в рублях), S_2 – «Штатное состояние оборудования» (определяет долю оборудования в штатном состоянии как безразмерную единицу измерения в диапазоне от 0 до 1), S_3 – «Аварийное состояние оборудования» (определяет долю оборудования в аварийном состоянии как безразмерную единицу измерения в диапазоне от 0 до 1), S_4 – «Склад стеклобоя» (определяет массу стеклобоя на складе в тоннах), S_5 – «Производство шихты» (определяет массу шихты в тоннах), S_6 – «Варка стекла» (определяет массу расплавленного стекла в тоннах), S_7 – «Формование стекла в ванне расплава» (определяет массу стекла в ванне расплава в тоннах), S_8 – «Склад стекла Т1» (определяет массу стекла Т1 на складе Т1 в тоннах), S_9 – «Склад стекла Т2» (определяет массу стекла Т2 на складе Т2 в тоннах), S_{10} – «Склад стекла Т3» (определяет массу стекла Т3 на складе Т3 в тоннах), S_{11} – «Склад стекла Т4» (определяет массу стекла Т4 на складе Т4 в тоннах).

Этап 3. Система дифференциальных уравнений, описывающая функционирование многостадийного производства ВЛС, имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dS_1}{dt} = f_1(v_1, v_2, v_3, v_4, v_5) - f_2(v_6, v_7, v_8, v_9, v_{10}, v_{11}, v_{12}, c_9) \\ \frac{dS_2}{dt} = f_4(c_{25}, f_3) - f_3(v_{13}, c_8) \\ \frac{dS_3}{dt} = f_3(v_{13}, c_8) - f_4(c_{25}, f_3) \\ \frac{dS_4}{dt} = f_5(S_4) - f_6(S_4, v_{10}) + f_{11}(S_7, f_{12}, f_{13}, f_{14}, f_{15}, v_{14}) \\ \frac{dS_5}{dt} = f_7(c_{11}, c_{12}, f_6) + f_6(S_4, c_{10}, c_{12}) - f_8(S_5) \\ \frac{dS_6}{dt} = f_8(S_5) - f_9(S_6, c_{11}, c_{12}) - f_{10}(S_6, c_{12}) \\ \frac{dS_7}{dt} = f_{10}(S_6, c_{12}) - f_{11}S_7, f_{12}, f_{13}, f_{14}, f_{15}, v_{14} - f_{12}(S_7, c_{13}) - \\ - f_{13}(S_7, c_{14}) - f_{14}(S_7, c_{15}) - f_{15}(S_7, c_{16}) \\ \frac{dS_8}{dt} = f_{12}(S_7, c_{13}) - f_{16}(S_8, c_{17}) \\ \frac{dS_9}{dt} = f_{13}(S_7, c_{14}) - f_{17}(S_9, c_{18}) \\ \frac{dS_{10}}{dt} = f_{14}(S_7, c_{15}) - f_{18}(S_{10}, c_{19}) \\ \frac{dS_{11}}{dt} = f_{15}(S_7, c_{16}) - f_{19}(S_{11}, c_{20}) \end{cases}$$

где f_1 – функция потока «Доход»; f_2 – функция потока «Расход»; f_3 – функция потока «Износ оборудования»; f_4 – функция потока «Обслуживание оборудования»; f_5 – функция потока «Поставка стеклобоя»; f_6 – функция потока «Загрузка стеклобоя»; f_7 – функция потока «Поставка сырьевых материалов»; f_8 – поток «Загрузка шихты»; f_9 – функция потока «Угар сырья»; f_{10} – функция потока «Произведенное стекло»; f_{11} – функция потока «Контроль качества»; $f_{12} \div f_{15}$ – функции потоков производства стекла типов «Т1-Т4», соответственно; $f_{16} \div f_{19}$ – функции потоков отгрузки стекла типов «Т1-Т4», соответственно; v_1 – переменная «Сумма продаж»; $v_2 \div v_5$ – переменные стоимость отгруженного стекла типов «Т1-Т4», соответственно; v_6 – переменная «Стоимость приобретенного стеклобоя в час»; v_7 – переменная «Стоимость потребленной электроэнергии в час»; v_8 – переменная «Стоимость потребленного газа в час»; v_9 – переменная «Стоимость затраченного сырья в час»; v_{10} – переменная «Зарплата

сотрудников в день»; v_{11} – переменная «Налоги в день»; v_{12} – переменная «Стоимость обслуживания оборудования в день»; v_{13} – переменная «Износ оборудования»; v_{14} – переменная «Брак стекла»; c_8 – константа «Процент износа оборудования»; c_9 – константа «Норма затрат на ремонт оборудования»; c_{10} – константа «Процент стеклобоя в шихте»; c_{11} – константа «Процент угара сырья»; c_{12} – константа «Масса съема стекла в час»; $c_{13} \div c_{16}$ – константы нормы съема в час стекла типов «Т1-Т4», соответственно; $c_{17} \div c_{20}$ – константы массы заказов стекла типов «Т1-Т4», соответственно; $c_{21} \div c_{24}$ – константы цен за тонну стекла типов «Т1-Т4»; соответственно; c_{25} – константа «Норма времени на ремонт оборудования». Начальные условия, определяющие состояние производственной системы в момент времени начала моделирования, задаются начальными значениями: $S_1 \div S_{11}$, $c_1 \div c_{24}$ [28].

Этап 4. Потоки, связывающие «Накопители», определяются функциями динамических переменных. На основе системы дифференциальных уравнений (5) в среде имитационного моделирования AnyLogic разработана СДМ многостадийного производства ВЛС (рис. 3).

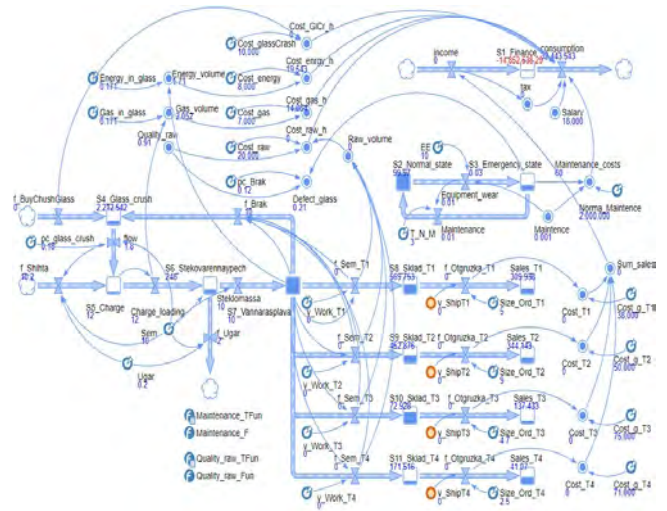


Рис. 3. Блок-схема системно-динамической модели производства ВЛС

Этап 5. Переключение режимов производства ВЛС (функции потоков $f_{12} \div f_{15}$) моделируется как агент «Производство» с различными состояниями. На рис. 4 в МСА «Производство» определены 14 основных состояний производства ВЛС: 1) производство стекла равновесной толщины (Equilibrium), 2) плановое техническое обслуживание и ремонт оборудования (TORO), 3) четыре состояния производства стекла типов «Т1-Т4» (DoTx), 4) 4 состояния перехода в режим производства стекло типов «Т1-Т4» (toTx), 5) 4 состояния перехода из режима производства стекла равновесной толщины (TxtoEq). В наименованиях перечисленных состояний символ «x» принимает значения от 1 до 4, соответственно.



Рис. 4. Блок-схема модели состояний агента «Производство»

Этап 6. Для моделирования процессов формирования заданий на производство и отгрузки потребителям ВЛС разработана ДСММ, которая состоит из 4-х подси-

стем по числу рассматриваемых типов ВЛС (рис. 5). Формирование заданий на производство каждого типа ВЛС выполняется на основе анализа заполненности склада и длинные очереди запросов потребителей с учетом сезонной составляющей спроса на каждый тип ВЛС. В ДСММ выполнения заказов на каждый тип стекла («Т1» – «Т4») используются по 3 вида «заявок» (агентов, требований): «orderTx» – заказанное ВЛС, «planTx» – произведенное ВЛС, «shipTx» – отгруженное ВЛС. В наименованиях перечисленных «заявок» символ «x» принимает значения от 1 до 4, соответственно.

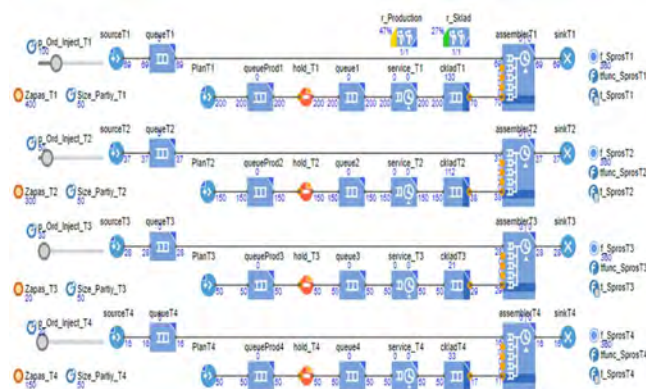


Рис. 5. Блок-схема дискретно-событийной многоагентной модели выполнения заказов

При завершении изготовления одного типа ВЛС в МСА (рис. 4) выполняется проверка условия перехода в новое состояние. Если условие выполнено, например, для стекла типа «Т1», осуществляется переход с состояние «toT1» и для источника «PlanT1» формируется партия заявок «planT1» размером «Size_Parti_T1». Переход из состояния «toT1» в состояние «Do_T1» выполняется после завершения времени необходимого на обеспечение начала выпуска ВЛС типа «Т1». При этом объекту «Hold_T1» ДСММ (рис. 5) посылается команда `hold_T1.unblock()` разблокировать и все заявки «planT1» из очереди «queueProd1» поступают в очередь «queue1» ДСММ. Далее заявки поступают на обработку в блок «service_T1» и накапливаются в очереди «ckladT1» ДСММ. В блоке «assemblerT1» происходит объединение заявок «planT1» (произведенное ВЛС) и заявок «orderT1» (заказанное ВЛС) и формирование из них новой заявки «shipT1» (отгруженное ВЛС).

При входе в состояние «Do_T1» МСА выполняется блокировка объекта «Hold_T1» командой `hold_T1.block()` и устанавливается значение 0,87 динамической переменной «v_Work_T1» СДМ. Не нулевое значение переменной «v_Work_T1» открывает поток «f_Sem_T1» СДМ, который моделирует производство ВЛС типа «Т1». Выход из состояния «Do_T1» МСА осуществляется при выполнении условия «service_T1.size() <= 0» – завершение изготовления партии заявок «planT1» размером «Size_Parti_T1». В состоянии «T1toEq» выполняется переход из режима производства ВЛС типа «Т1» в режим производства стекла разнотолщинной в течение заданного технологическим режимом времени. Аналогично реализуется имитационное моделирование для остальных типов ВЛС.

Этап 7. Дискретно-событийная многоагентная модель и модель состояний агента «Производство» дополняют системно-динамическую модель функционирования производства ВЛС. Эта комплексная компьютерная имитационная модель апробирована на статистических данных производств ВЛС. Динамические зависимости, полученные по результатам моделирования, показывают высокую объяснимость модели, коэффициент детерминации равен 95%.

Этап 8. В среде имитационного моделирования

AnyLogic для выполнения экспериментов с комплексной компьютерной имитационной моделью многостадийного производства ВЛС для решения системы дифференциальных уравнений применяется метод Эйлера. В качестве единицы модельного времени выбран период – час. Моделирование выполняется на интервале 1 год. В результате численных экспериментов с комплексной имитационной моделью получены графики динамика заполненности складов ВЛС различного типа (рис. 6). Высокой энерго-ресурсоэффективности производства ВЛС соответствуют минимальные значения выпуска стеклобоя и его запаса.



Рис. 6. Заполненность складов ВЛС различного типа

В результате оптимизационных численных экспериментов с комплексной имитационной моделью получены значения размеров партий выпуска ВЛС различного типа для различных сочетаний производства типов ВЛС от 2 до 4. Оптимизируемым значением в численных экспериментах являлось минимальное значение заполненности склада стеклобоя, изменяемыми параметрами размер запаса и размер производственной партии по каждому типу стекла (Т1-Т4). Для каждого типа стекла установлены одинаковые начальные значения для оптимизации: минимальный размер партии 0 тонн, максимальный размер партии 1000 тонн, минимальный размер запаса 0 тонн, максимальный размер запаса 4000 тонн. Спрос на каждый тип стекла задается функцией, которая учитывает влияние сезонности спроса на каждый тип продукции. В таблице показаны значения оптимизированных параметров, полученные при выполнении 500 итераций моделирования AnyLogic.

Таблица. Результаты выполнения оптимизационных экспериментов

Тип стекла	T1	T2	T3	T4
Размер партии стекла, т	800	950	750	1000
Размер запаса стекла, т	3200	3200	4000	3900

В результате использования оптимизированных значений размера запаса и размера производственной партии по каждому типу стекла (Т1-Т4) в численных экспериментах с комплексной имитационной моделью получен график динамики заполненности склада стеклобоя (рис. 7).

При одинаковых начальных условиях по спросу ВЛС уменьшение запасов стеклобоя в течение года на 16% (рис. 7) выполнено с использованием оптимизированной программы управления производством, обеспечивающей сокращения времени переходов с одного на другой технологический режим. В период технологического перехода с одного технологического режима на другой затраты на компоненты стекольной шихты, природный газ и электричество сохраняются, а выпуск ВЛС не производится, поэтому сокращение времени таких переходов обеспечивает повышение энерго-ресурсоэффективности производства ВЛС.

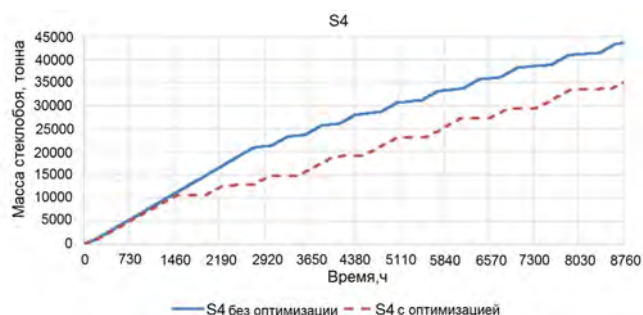


Рис. 7. График заполненности склада стеклослоя

В результате численных экспериментов с комплексной имитационной моделью с оптимизированными размерами производственных партии по каждому типу стекла (Т1-Т4) для различных сочетаний производства типов ВЛС от 2 до 4 получены графики энергоресурсоэффективности производства ВЛС (рис. 8).

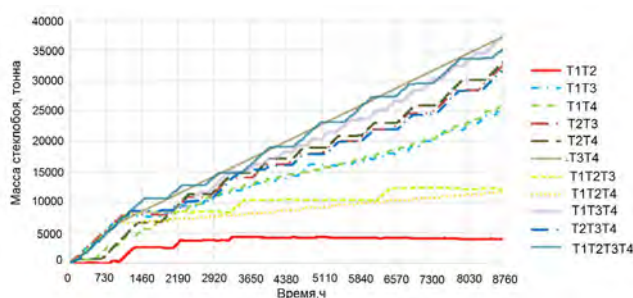


Рис. 8. График накопления стеклослоя при производстве различных типов ВЛС

Этап 9. Анализ графиков накопления стеклослоя при производстве различных типов ВЛС (рис. 8) показывает, что наибольшей энергоресурсоэффективностью обладает программа производства типов стекла Т1 и Т2.

Результаты численных экспериментов показателей энергоресурсоэффективности многостадийного производства ВЛС на основе применения алгоритма оптимального планирования выпуска партии многоассортиментного ВЛС указанного производства хорошо согласуются с ретроспективными регламентными показателями с использованием метода наименьших квадратов (МНК) существующих производств и качественно совпадают с многочисленными эмпирическими зависимостями.

Заключение

Предложен алгоритм моделирования для оптимального планирования выпуска партий многоассортиментного ВЛС. Кластерный анализ номенклатуры продукции многостадийного производства ВЛС позволил выделить 4 типа листовых стёкол. На основе стратегической карты целей и показателей функционирования многостадийного производства ВЛС разработана системно-динамическая модель выпуска 4 типов листовых стёкол. Разработана модель состояний агента «Производство» для переключения режимов производства в системно-динамической модели. Предложена дискретно-событийная многоагентная модель формирования пакетов заказов ВЛС разных типов. Выполнены численные эксперименты и оптимизация размеров партий выпуска многоассортиментного ВЛС по критерию максимальной энергоэффективности с учетом ограничений, накладываемых сезонностью спроса на строительное ВЛС.

Литература

1. Meshalkin V.P., Belyakov A.V., Butusov O.B., Burukhina T.F., Khodchenko S.M., Garabadzhiu A.V., Dovi V.G., Bobkov V.I. State of the art and research development prospects of energy and resource-efficient environmentally safe chemical process systems engineering // *Mendelev communications*. 2021. Vol. 31. № 5. P. 593-604.
2. Petrov D.Yu. The architecture of the information system for managing the life cycle of a digital twin for continuous production // *Proceedings of the St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)*. 2021. No. 57. P. 98-104.
3. Makarov R.I., Khorosheva E.R. Information Analysis of the Sheet-Glass Utilization Factor in Production // *Glass Ceram.* 2020. Vol. 77. P. 295-297. <https://doi.org/10.1007/s10717-020-00292-7>.
4. Анализ рынка листового стекла в России – 2024. Показатели и прогнозы [Электронный ресурс] // *Магазин исследований: [сайт]*. URL: <https://marketing.rbc.ru/research/39824/> (дата обращения: 16.06.2025).
5. Makarov R.I., Khorosheva E.R. Salient Aspects of the Implementation of Digital Economics in Glass Plants in Russia // *Glass Ceram.* 2019. Vol. 75. P. 438-440. <https://doi.org/10.1007/s10717-019-00107-4>.
6. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л., Акопов А.С. Цифровой завод: методы дискретно-событийного моделирования и оптимизации производственных характеристик // *Бизнес-информатика*. 2021. Т. 15. № 2. С. 7-20. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.2.7.20. EDN JUUAGQ.
7. Казаринов Л.С., Барбасова Т.А. Интегрированное управление энергоёмкостью металлургического производства // *Вестник Южно-Уральского государственного университета Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. 2015. № 15. С. 121-124.
8. Kamyar R., John S., Fu Z. et. al. Current state and emerging trends in advanced manufacturing: smart systems // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2024. Vol. 134. P. 3031-3050. DOI: 10.1007/s00170-024-14279-z. (дата обращения 22.05.2025).
9. Redelinghuys A.J.H.; Basson A.H.; Kruger K. A six-layer architecture for the digital twin: A manufacturing case study implementation // *J. Intell. Manuf.* 2020. Vol. 31. P. 1383-1402 [Электронный ресурс]: URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10845-019-01516-6> (дата обращения 12.02.2022).
10. Robinson S. Simulation: The practice of model development and use. Wiley. 2004.
11. Минаев В.А., Сычев М.П., Куликов Л.С., Вайц Е.В. Моделирование манипулятивных воздействий в социальных сетях // *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2019. Т. 7. № 1(24). С. 494-510. DOI: 10.26102/2310-6018/2019.24.1.003. EDN ZFBWUX.
12. Копп В.Я., Замоленов М.В., Чаленков Н.И. Имитационное моделирование процесса функционирования технической ячейки с необесцениваемыми отказами // *Интеллектуальные системы в производстве*. 2020. Т. 18. № 1. С. 57-64. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-1-57-64. EDN ZQMSPM.
13. Ершова И.В., Тотьмянин А.А. Моделирование производственных заданий с использованием программы Anylogic // *Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении*. 2023. № 1(19). С. 32-39. DOI: 10.30987/2658-6436-2023-1-32-39. EDN WKBNTA.
14. Акопов А.С. Имитационное моделирование. М.: Юрайт. 2014.
15. Tang J., Leu G., Abbass H.A. Discrete event simulation. Simulation and Computational Red Teaming for

Problem Solving // IEEE. 2020. P. 121-142.

16. *Акопов А.С., Хачатрян Н.К.* Системная динамика. М.: ЦЭМИ РАН. 2014.

17. *Akopov A.S.* Designing of integrated system-dynamics models for an oil company // International Journal of Computer Applications in Technology. 2012. Vol. 45. No. 4. P. 220-230. DOI: 10.1504/IJCAT.2012.051122.

18. *Beklaryan G.L., Akopov A.S., Khachatryan N.K.* Optimisation of system dynamics models using a real-coded genetic algorithm with fuzzy control // Cybernetics and Information Technologies. 2019. Vol. 19. No. 2. P. 87-103. DOI: 10.2478/cait-2019-0017.

19. *Акопов А.С., Хачатрян Н.К.* Агентное моделирование. М.: ЦЭМИ РАН. 2016.

20. *Бахтизин А.Р.* Агент-ориентированные модели экономики. М.: Экономика. 2008.

21. *Akopov A.S., Beklaryan L.A., Saghatelian A.K.* Agent-based modelling of interactions between air pollutants and greenery using a case study of Yerevan, Armenia // Environmental Modelling and Software. 2019. No 116. P. 7-25. DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.02.003.

22. *Borshchev A.* The Big Book of simulation modeling. Multimethod modeling with AnyLogic 6. AnyLogic North America. 2013.

23. *Волошко А.Г., Ивутин А.Н., Крюков О.С.* Методы моделирования и анализа производственных процессов для разработки стратегии модернизации предприятия // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 12. С. 36-44. EDN REYYXK.

24. *Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Beklaryan G.L.* Developing digital twins for production enterprises // Business Informatics. 2019. Vol. 14. No 1. P. 7-16. DOI: 10.17323/1998-0663.2019.4.7.16.

25. Zhang H., Li Y., Zhang S., Song L. Artificial Intelligence-Enhanced Digital Twin Systems Engineering Towards the Industrial Metaverse in the Era of Industry 5.0. // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2015. Vol. 38. DOI: 10.1186/s10033-025-01210-0.

26. Эксперимент Монте-Карло [Электронный ресурс] // Документация AnyLogic: [сайт]. URL: <https://help.anylogic.ru/index.jsp?topic=%2Fcom.anylogic.help%2Fhtml%2Fexperiments%2Fmonte-carlo-experiment.html> (дата обращения: 16.06.2025)

27. *Петров Д.Ю.* Стратегическая карта целей производства листового стекла // Математические методы в технологиях и технике. 2022. № 10. С. 133-139.

28. *Petrov D.Yu.* A System Dynamics Model for Float Glass Production Management // Springer, Cham. Society 5.0. Studies in Systems, Decision and Control. 2023. Vol. 437. P. 227-240. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35875-3_18.

29. *Петров Д.Ю.* Структура комплексной модели изменения режимов функционирования производства листового стекла // Математические методы в технологиях и технике. 2023. № 8. С. 82-85. DOI 10.52348/2712-8873_MMTT_2023_8_82.

30. *Петров Д.Ю.* Стратегическая карта целей производства листового стекла // Математические методы в технологиях и технике. 2022. № 10. С. 133-139. DOI 10.52348/2712-8873_MMTT_2022_10_133.

References

1. *Meshalkin V.P., Belyakov A.V., Butusov O.B., Burukhina T.F., Khodchenko S.M., Garabadzhiu A.V., Dovì V.G., Bobkov V.I.* State of the art and research development prospects of energy and resource-efficient environmentally safe chemical process systems engineering // Mendeleev communications. 2021. Vol. 31. No 5. Pp. 593-604.

2. *Petrov D.Yu.* The architecture of the information system for managing the life cycle of a digital twin for continuous production // Proceedings of the St. Petersburg

State Technological Institute (Technical University). 2021. No. 57. P. 98-104.

3. *Makarov R.I., Khorosheva E.R.* Information Analysis of the Sheet-Glass Utilization Factor in Production // Glass Ceram. 2020. Vol. 77. P. 295-297. <https://doi.org/10.1007/s10717-020-00292-7>.

4. *Analiz rynka listovogo stekla v Rossii – 2024. Pokazateli i prognozy [Elektronnyy resurs] // Magazin issledovaniy: [sajt]. URL: <https://marketing.rbc.ru/research/39824/> (data obrashcheniya: 16.06.2025).*

5. *Makarov R.I., Khorosheva E.R.* Salient Aspects of the Implementation of Digital Economics in Glass Plants in Russia // Glass Ceram. 2019. Vol. 75. P. 438-440. <https://doi.org/10.1007/s10717-019-00107-4>.

6. *Makarov V.L., Bahtizin A.R., Beklaryan G.L., Akopov A.S.* Cifrovoy zavod: metody diskretno-sobytiynogo modelirovaniya i optimizatsii proizvodstvennykh harakteristik // Biznes-informatika. 2021. T. 15. № 2. S. 7-20. DOI: 10.17323/2587-814X.2021.2.7.20. EDN JUUAGQ.

7. *Kazarinov L.S., Barbasova T.A.* Integrirovannoe upravlenie energoemkost'yu metallurgicheskogo proizvodstva // Vestnik YUzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta Seriya «Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika». 2015. № 15. S. 121-124.

8. *Kamyar R., John S., Fu Z. et. al.* Current state and emerging trends in advanced manufacturing: smart systems // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2024. Vol. 134. P. 3031-3050. DOI: 10.1007/s00170-024-14279-z.

9. *Redelinghuys A.J.H.; Basson A.H.; Kruger K.* A six-layer architecture for the digital twin: A manufacturing case study implementation // J. Intell. Manuf. 2020. Vol. 31. P. 1383-1402 URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10845-019-01516-6>.

10. *Robinson S.* Simulation: The practice of model development and use. Wiley. 2004.

11. *Minaev V.A., Sychev M.P., Kulikov L.S., Vajc E.V.* Modelirovanie manipulyativnykh vozdeystviy v social'nykh setyah // Modelirovanie, optimizatsiya i informacionnye tekhnologii. 2019. T. 7. № 1(24). S. 494-510. DOI: 10.26102/2310-6018/2019.24.1.003. EDN ZFBWUX.

12. *Kopp V.YA., Zamorenov M.V., Chalenkov N.I.* Imitacionnoe modelirovanie processa funkcionirovaniya tekhnicheskoy yachejki s neobescenivayushchimi otkazami // Intellektual'nye sistemy v proizvodstve. 2020. T. 18. № 1. S. 57-64. DOI: 10.22213/2410-9304-2020-1-57-64. EDN ZQMSPM.

13. *Ershova I.V., Tot'myanin A.A.* Modelirovanie proizvodstvennykh zadaniy s ispol'zovaniem programmy Anylogic // Avtomatizatsiya i modelirovanie v proektirovanii i upravlenii. 2023. № 1(19). S. 32-39. DOI: 10.30987/2658-6436-2023-1-32-39. EDN WKBNTA.

14. *Akopov A.S.* Imitacionnoe modelirovanie. M.: YUrajt. 2014.

15. *Tang J., Leu G., Abbass H.A.* Discrete event simulation. Simulation and Computational Red Teaming for Problem Solving // IEEE. 2020. P. 121-142.

16. *Akopov A.S., Hachatryan N.K.* Sistemnaya dinamika. M.: CEMI RAN. 2014.

17. *Akopov A.S.* Designing of integrated system-dynamics models for an oil company // International Journal of Computer Applications in Technology. 2012. Vol. 45. No. 4. P. 220-230. DOI: 10.1504/IJCAT.2012.051122.

18. *Beklaryan G.L., Akopov A.S., Khachatryan N.K.* Optimisation of system dynamics models using a real-coded genetic algorithm with fuzzy control // Cybernetics and Information Technologies. 2019. Vol. 19. No. 2. P. 87-103. DOI: 10.2478/cait-2019-0017.

19. *Akopov A.S., Hachatryan N.K.* Agentnoe modelirovanie. M.: CEMI RAN. 2016.

20. *Bahtizin A.R.* Agent-orientirovannye modeli ekonomiki. M.: Ekonomika. 2008.

21. *Akopov A.S., Beklaryan L.A., Saghatelian*

A.K. Agent-based modelling of interactions between air pollutants and greenery using a case study of Yerevan, Armenia // *Environmental Modelling and Software*. 2019. No 116. P. 7-25. DOI: 10.1016/j.envsoft.2019.02.003.

22. Borshchev A. The Big Book of simulation modeling. Multimethod modeling with AnyLogic 6. AnyLogic North America. 2013.

23. Voloshko A.G., Ivutin A.N., Kryukov O.S. Metody modelirovaniya i analiza proizvodstvennyh processov dlya razrabotki strategii modernizatsii predpriyatiya // *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. 2020. № 12. S. 36-44. EDN REYYXK.

24. Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Beklaryan G.L. Developing digital twins for production enterprises // *Business Informatics*. 2019. Vol. 14. No 1. P. 7-16. DOI: 10.17323/1998-0663.2019.4.7.16.

25. Zhang H., Li Y., Zhang S., Song L. Artificial Intelligence-Enhanced Digital Twin Systems Engineering Towards the Industrial Metaverse in the Era of Industry 5.0. // *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2015. Vol. 38. DOI: 10.1186/s10033-025-01210-0.

26. Eksperiment Monte-Karlo [Elektronnyy resurs] // Dokumentatsiya AnyLogic: [sait]. URL: <https://help.anylogic.ru/index.jsp?topic=%2Fcom.anylogic.help%2Fhtml%2Fexperiments%2Fmonte-carlo-experiment.html> (data obrashcheniya: 16.06.2025)

27. Petrov D.Yu. Strategicheskaya karta celej proizvodstva listovogo stekla // *Matematicheskie metody v tekhnologiyah i tekhnike*. 2022. № 10. S. 133-139.

28. Petrov D.Yu. A System Dynamics Model for Float Glass Production Management // Springer, Cham. Society 5.0. Studies in Systems, Decision and Control. 2023. Vol. 437. P. 227-240. https://doi.org/10.1007/978-3-031-35875-3_18.

29. Petrov D.Yu. Struktura kompleksnoy modeli izmeneniya rezhimov funkcionirovaniya proizvodstva listovogo stekla // *Matematicheskie metody v tekhnologiyah i tekhnike*. 2023. № 8. S. 82-85. DOI 10.52348/2712-8873_MMTT_2023_8_82.

30. Petrov D.Yu. Strategicheskaya karta celej proizvodstva listovogo stekla // *Matematicheskie metody v tekhnologiyah i tekhnike*. 2022. № 10. S. 133-139. DOI 10.52348/2712-8873_MMTT_2022_10_133.

Информация об авторах

Мешалкин Валерий Павлович, академик РАН, д-р техн. наук, проф., профессор кафедры Логистики и экономической информатики РХТУ им. Д.И. Менделеева; **Valery P. Meshalkin**, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Logistics and Economic Informatics of the Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia, vpmeshalkin@gmail.com

Большаков Александр Афанасьевич, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры систем автоматизированного проектирования и управления СПбГТИ(ТУ); **Alexander A. Bolshakov**, Dr Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Automated Design and Control Systems of SPbSTI (TU), aabolshakov57@gmail.com

Петров Дмитрий Юрьевич, канд. техн. наук, доцент, старший научн. сотрудник Института проблем точной механики и управления РАН (г. Саратов); доцент кафедры «Логистики и экономической информатики» РХТУ им. Д.И. Менделеева; **Dmitry Y. Petrov**, Ph.D. (Eng.), Associate Professor, Senior Researcher, Institute of Precision Mechanics and Control Problems, Russian Academy of Sciences (Saratov); Associate Professor of the Department of Logistics and Economic Informatics of the Mendeleyev University of Chemical Technology of Russia, iac_sstu@mail.ru