

DOI: 10.15593/2499-9873/2019.3.08

УДК 519.23

Д.А. Толстобров

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ОПЕРАТИВНАЯ ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАКАЗА ПРИ УСЛОВИИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПОТРЕБИТЕЛЬСКОГО СПРОСА

Современное программное обеспечение позволяет промышленным предприятиям рационализировать использование рабочего времени сотрудников, добиваться снижения трудоемкости и материалоемкости выпускаемой продукции, но фактор неопределенности потребительского спроса вынуждает ориентироваться на вероятностную модель при формировании портфеля заказов. Рассматривается метод оперативного прогнозирования производственных издержек и вероятности выполнения заявки предприятием, работающем на рынке совершенной конкуренции в условиях предоставления клиентами заявок с неполным объемом информации. Авторский подход к оперативной оценке производственных издержек основан на методе ABC и правилах проектирования раскроя «Мюллер и сын». Он позволяет на этапе расчета заявки вести редактирование группы многомерных продуктов согласно требованиям заказчика, в результате достигается соотношение баланса между ожидаемой клиентом ценой и закладываемой предприятием рентабельностью. Согласно данному методу для расчета нестандартной заявки многомерный продукт представляется в виде группы из форм прямоугольного параллелепипеда. Издержки для каждого применяемого в продукте слоя материала в процессе расчета рассматриваются отдельно. Исследование характера зависимости между показателями расхода листового материала, габаритными размерами многомерного продукта и полезной шириной рулона позволило установить их соотношение, которое приводит к пиковым величинам перерасхода материала. Для исключения дополнительных затрат на материал разработан и апробирован метод поиска оптимального расхода материала с учетом вероятности выполнения заказа. Применение данных рекомендаций позволит промышленным предприятиям повысить ценность выпускаемой продукции и самого предприятия для каждого участника отношений, станет основой роста конкурентоспособности отечественных продуктов.

Ключевые слова: промышленное предприятие, бережливое производство, САПР, многомерный продукт, потребительские предпочтения, неполный объем информации, метод оценки производственных издержек, карта раскроя.

D.A. Tolstobrov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

OPERATIONAL EVALUATION OF THE PROBABILITY OF PERFORMANCE OF THE ORDER IN THE CONDITION OF UNCERTAINTY OF CONSUMER DEMAND

Modern software allows industrial enterprises to rationalize the use of employees' working hours, to reduce labor intensity and material consumption of manufactured products, but the factor of consumer demand uncertainty forces us to focus on a probabilistic model when forming a portfolio of orders. The paper considers the method of operational forecasting of production costs and the probability of execution of the application by an enterprise operating in the market of perfect competition in the conditions of clients filing applications with an incomplete amount of information. The author's approach to the operational assessment of production costs is based on the ABC method and the rules of cutting design "Muller and son". It allows the calculation step of the request to edit a group of multidimensional products according to customer's requirements, the result is the ratio of the balance between expected customer price and pledged the company profitability. It allows at the stage of calculating the application to edit a group of multidimensional products according to customer requirements, as a result, a balance is reached between the price expected by the client and the profitability laid by the enterprise. According to this method, for calculating a non-standard request, a multidimensional product is represented as a group of rectangular parallelepiped shapes. Costs for each material layer used in the product are considered separately in the calculation process. The study of the nature of the relationship between the consumption rates of sheet material, the dimensions of a multidimensional product and the useful width of the roll made it possible to establish their proportions leading to peak values of the consumption of material. To exclude additional material costs, a method has been developed and tested to find the optimal material consumption taking into account the probability of order fulfillment. Application of these recommendations will allow industrial enterprises to increase the value of products and the enterprise for each participant of relations; will be the basis for the growth of competitiveness of domestic products.

Keywords: industrial enterprise, lean manufacturing, CAD, multidimensional product, consumer preferences, incomplete amount of information, production cost estimation method, nesting map.

Современный уровень развития цифровых технологий расширил промышленным предприятиям (ПП) спектр возможностей для развития, предоставляя возможность упрощать, частично или полностью автоматизировать работу сотрудников, меняя роль исполнителя на специалиста, контролирующего работу программного обеспечения [1].

Предметом исследования данной работы стали механизмы прогнозирования ПП расхода рулонных (листовых) материалов при выпуске защитных изделий на этапе их согласования с индивидуальными требованиями клиента, потребительские предпочтения которого носят неопределенный характер. Защитное изделие после монтажа создает замкнутую оболочку и служит для ограничения влияния негативных факторов на объект защиты клиента – оборудование или его обслуживающий персонал.

Исследование происходит в рамках развития системы менеджмента бережливого производства (СМБП) ПП, позволяя сократить производственный цикл выпуска продукции, увеличить эффективность деятельности, повысить ценность выпускаемой продукции и ПП в целом для каждого внутреннего и внешнего участника отношений [2].

Целью исследования является разработка метода оперативного прогнозирования производственных издержек на материалы на основе оценки параметров многомерной продукции ПП для обоснования предварительной стоимости заказа в условиях предоставления клиентом неполной информации.

ПП, выполняющему на этапе производства раскрой листовых материалов для выполнения требований СМБП, необходимо использовать технологии эффективной оптимизации карт раскроя, позволяющих сократить количество используемого материала, объем рабочего времени сотрудников на их формирование при условии сохранения для выпускаемой продукции ее потребительской ценности [3, 4].

Потеря потребительской ценности продукции может произойти вследствие создания неудобной для применения конструкции защитного изделия, размещения соединительных швов на ее поверхности или важных конструктивных узлах. Внесение таких изменений требует обязательного этапа согласования на технологическом, функциональном, экономическом и потребительском уровне.

Современные системы автоматизированного проектирования (САПР) после внедрения в действующую структуру ПП позволяют решать широкий спектр задач, начиная от этапа конструирования продукции до ее выполнения с формированием соответствующих отчетов для отделов бухгалтерии, снабжения, складирования, логистики и т.п. [5].

В статье рассматриваются методики, позволяющие осуществить оперативную оценку производственных издержек выпуска ограниченной серии продукции согласно индивидуальным требованиям клиента. Внедрение ПП САПР позволяет в сравнении с ручным подбором увеличить эффективность использования листового материала при формировании карт раскроя от 5 до 12 %, а также сократить рабочее время сотрудников на это до нескольких минут вместо затрачиваемого ранее (не менее получаса). Также в зависимости от обрабатываемой группы лекал САПР может предлагать на выбор для редактирования до нескольких различных вариантов карт раскроя [6, 7].

Для проведения САПР подобных расчетов необходимо провести ее подробную оцифровку, что требует значительных временных затрат от сотрудников. Такой подход в реализации сложных продуктов способствует достижению ПП высоких показателей производительности и чаще применим для гарантированного заказа, а также если его прогнозная стоимость превосходит в десятки раз рабочее время сотрудников на его подробную обработку [1].

ПП, придерживающемуся принципа сокращения производственных издержек и возможных рисков, свойственен продолжительный этап расчета и согласования нестандартного или крупносерийного заказа. Это характерно для стратегии олигополии, когда каждый участник обладает заданной долей рынка. Клиента и ПП связывают договорные, временные или территориальные ограничения. Передача заказа другому крупному ПП, имеющему распланированный на несколько месяцев вперед график, вынудит согласиться с увеличением срока либо стоимости заказа. Для таких крупных ПП характерно постепенное развитие производственных возможностей, проходящее этапы планирования и экономического обоснования на продолжительный период времени.

ПП с малосерийным производством в основном соответствуют рынку совершенной конкуренции, состоящему из большого количества активных участников, динамично развивающих свой портфель клиентов. Такие ПП могут создать для себя рынок монополии или олигополии лишь при условии чуткого реагирования на индивидуальные ожидания своего клиента.

Участники рынка совершенной конкуренции не могут позволить себе продолжительно готовить ответ на подаваемые клиентами заявки, так как, по наблюдениям, клиент в течение 3–5 рабочих дней определяется с выбором потенциального исполнителя. Ожидание клиента может быть продолжительным, только если ему необходим эксклюзивный продукт, не имеющий аналогов.

Как правило, подаваемая клиентом заявка содержит неполный объем информации, что значительно усложняет оперативность реакции на нее и вынуждает ПП выполнять расчеты без точного представления о будущих производственных издержках, способных превзойти закрепленную в договоре сумму. В большинстве случаев заявка, имеющая полный объем информации, соответствует ранее выполненному заказу,

но тогда возможное влияние конкурентов может вынудить ПП снизить рентабельность до предельной окупаемости расходов [8].

Подаваемый клиентом в первоначальной заявке неполный объем информации можно объяснить присутствием коммерческой тайны, нежеланием открывать конкурентам информацию о направлении своей деятельности, отсутствием специалистов или времени на ее проработку.

Согласно наблюдениям, предоставленные клиенту результаты предварительных расчетов редко поддаются повышению и могут быть пересчитаны, только если есть аргументированное обоснование о кардинальном влиянии недостающей информации на ключевые этапы производственного процесса. Зная об этом, ПП старается закладывать расходы на возможные риски, но здесь важно помнить о потенциальном влиянии конкурентов на выбор клиента. Одной из стратегий сохранения и развития ПП является ориентирование на ведение нестандартных заказов с применением быстрых методов расчета издержек, обладающих высокой степенью достоверности [9].

Каждый нестандартный заказ представляет собой многомерный продукт, описываемый множеством потребительских свойств $X = (X_1, X_2, \dots, X_N)$, поддающихся на этапе согласования с клиентом корректированию в соответствии с устанавливаемыми внешними условиями при сохранении своей общей структурной схемы. Такая стратегия поведения позволяет промышленному предприятию сохранять прогнозируемое оптимальное значение рентабельности, корректируя в согласии с клиентом параметры продукта для достижения ожидаемой им цены и степени выраженности потребительских свойств [10].

Одним из таких методов оперативной оценки производственных издержек в условиях предоставления клиентом ограниченного объема информации является авторский, основанный на методе ABC и правилах проектирования раскроя «Мюллер и сын». Согласно данному методу на этапе расчета каждое нестандартное защитное изделие представляется в виде одной или группы фигур формы прямоугольного параллелепипеда (ФПП). На рис. 1 представлен пример изометрии изделия ФПП (рис. 1, а) и ее развернутой поверхности (рис. 1, б). При таком подходе каждая из фигур ФПП описывается комбинацией ее габаритных размеров (x, y, z) , наличием каждой из граней (A, B, C) , а также сочетанием и количеством слоев применяемых материалов для верхнего, нижнего покрытий и наполнителя [11].

Фигура ФПП была выбрана основной для построения метода оперативной оценки, как базовая геометрическая фигура, обладающая рядом преимуществ: позволяет осуществить плотное соприкосновение граней в группе подобных, проста в математическом описании, удобна для пространственного восприятия при моделировании единой замкнутой оболочки вокруг объекта защиты.

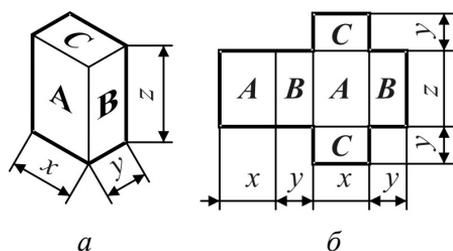


Рис. 1. Изделие ФПП и его поверхность: *а* – изометрия изделия; *б* – развернутая поверхность ФПП

Защитное изделие объединяет в себе несколько слоев (верхний, нижний и наполнитель), выполняющих до нескольких заданных клиентом барьерных свойств. Для упрощения этапа расчета для каждого из применяемых материалов будут проводиться отдельные вычисления.

Использование в защитных изделиях материалов на текстиль-

ной основе позволяет производственному участку не зависеть от дорогостоящего оборудования, что предполагает оперативные и многовариантные решения поставленных задач. Такие текстильные материалы поставляются в виде рулонов, где длина значительно превышает полезную ширину, а также каждый из габаритных размеров защитного изделия. На практике применяют деление защитного изделия, если его размеры превышают 2,0–2,5 м, так как это сказывается на его весе, трудоемкости производства и удобстве эксплуатации. Согласно этому на этапе расчетов можно принять длину рулона материала равной бесконечности и опираться только на его полезную ширину W [12, 13].

В процессе изготовления защитных изделий на участке раскроя происходит скапливание обрезки использованных материалов, требующей сортировки и выделенного хранения. Размещение сотрудниками предприятия отдельных частей (лекал) изделий на полученной обрезки материала увеличивает их рабочее время, а востребованность в дальнейшем такой обрезки материала сложнопрогнозируема. Следовательно, следует включать расходы на получаемую обрезку использованных материалов в стоимость конечного изделия [14–17].

На этапе производства изделие ФПП представляется как группа лекал, состоящих из одной или комбинации нескольких граней. Лекала

защитного изделия согласно образуемым ими элементам разделяются на два типа: основные, образующие основную поверхность, и дополнительные, отвечающие за эксплуатационные показатели: рукава, карманы, окна, двери, клапаны, ремни. Как правило, на этапе предварительного расчета заявки клиент указывает только информацию о виде объекта защиты, его габаритных размерах и требуемых барьерных свойствах, что относится к основным конструктивным элементам защитного изделия. Более подробная информация о конструктивных особенностях защитного изделия устанавливается на этапе согласования заказа, что является критичным на этапе предварительного расчета стоимости.

Учитывая условие предоставления клиентом неполной информации, проводить предварительный расчет расхода материала следует с учетом возможного присутствия дополнительных элементов, как правило, уступающих в своих размерах и занимаемой площади основным элементам защитного изделия. При проведении раскроя материала сотрудники предприятия придерживаются следующего правила: вначале на материале размещаются лекала основных элементов, а на образованных незадействованных свободных областях размещаются лекала дополнительных элементов.

На основании принятых условий и для упрощения текущей системы расчета примем, что на материале каждое из лекал или образуемая ими группа представляют собой фигуру, близкую к прямоугольной форме, описываемую двумя габаритными размерами. Используемые в производстве технические текстильные материалы не имеют выраженного направления фактуры и рисунка и поэтому можно считать, что для лекал нет привязки к их положению на материале.

При размещении лекала на рулоне с полезной шириной W оно будет обладать габаритными размерами X_w , L_w поперек и вдоль рулона соответственно. На рис. 2 изображены графические примеры размещения на материале двух вариантов: лекало вписывается в границы рулона (рис. 2, *a*) и лекало превышает ширину рулона и его получают совмещением материала (рис. 2, *б*). Величина недостающего для лекала отреза материала Δ определяется как остаток от целочисленного деления X_w на W при условии, что $X_w > W$.

На основании ГОСТ 14.322–83 «Нормирование расхода материалов. Основные положения» для контроля эффективности использова-

ния в производстве материала введем линейный коэффициент распределения расхода материала k , представляющий собой результат отношения затраченного количества материала и полезной величины лекала или их группы.

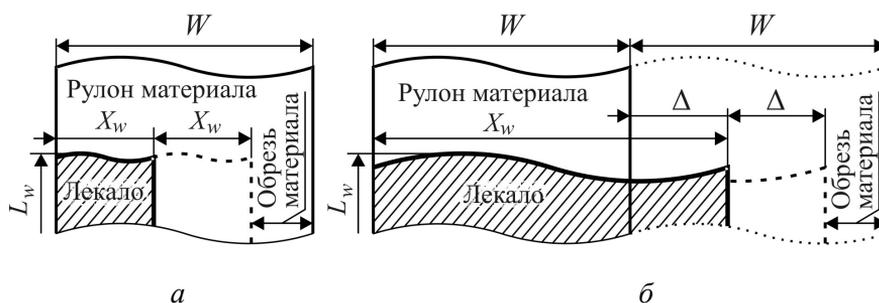


Рис. 2. Графические примеры размещения лекала на рулоне материала

Величина k позволяет оценить планируемый дополнительный расход материала. Для примера в машиностроительном производстве существуют следующие показатели эффективности использования материала: повышенная точность (менее 1,05), точная (от 1,05 до 1,33), пониженная точность (от 1,33 до 2), грубая (более 2) [18, 19].

Линейный коэффициент распределения расхода материала для выполнения лекала с шириной X_w поперек рулона с полезной шириной W определяется как результат следующей системы логических формул:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \text{If } W \times X_w = 0, \text{ then } k = 0, \text{ else // проверка выполнения условия} \\
 W \neq 0 \text{ и } X_w \neq 0; \\
 \text{If } X_w \leq W, \text{ then } k = W / (X_w \times [W / X_w]), \text{ else // вычисление } k \\
 \text{если } X_w \leq W; \\
 \text{If } Rz = 0, \text{ then } k = 0, \text{ else // проверка разрешения на совмещение} \\
 \text{материала;} \\
 \text{If } (W \bmod X_w) = 0, \text{ then } k = 1, \text{ else // определение } k \text{ если } X_w \\
 \text{кратен } W; \\
 k = (W \times [X_w / W] + W / [W / (X_w \bmod W)]) / X_w \text{ // итоговый} \\
 \text{расчет } k.
 \end{array} \right. \quad (1)$$

где W – полезная ширина рулона, X_w – габаритный размер лекала поперек рулона; Rz – разрешение на совмещение материала в границах лекала (0 – No, 1 – Yes); k – линейный коэффициент распределения расхода материала; $[]$ – операция по определению целой части от деления, mod – операция по определению остатка от деления, $//$ – обозначение границы комментария.

На основании приведенной формулы (1) можно установить следующее:

– при $X_w \leq W$ значения линейных коэффициентов распределения расхода материала $k^{Rz=0} = k^{Rz=1} \geq 1$. Совмещение материала в границах лекала, вписывающегося в рулон, не рассматривается: соблюдается принцип ненарушения потребительской ценности продукта и несоздания дополнительных работ для рабочего персонала;

– при $X_w > W$ значения $k^{Rz=0} = 0$, а $k^{Rz=1} \geq 1$. Выполнение лекала возможно только применением совмещения материала.

Согласно данной методике расчета можно утверждать, что выполняется следующее равенство:

$$k^{Rz}(X_w; W) = k^{Rz}(X_w / W; 1), \text{ при } W > 0. \quad (2)$$

Рассмотрим график зависимости линейного коэффициента распределения расхода материала k от отношения X_w / W с принятым условием о разрешении на совмещение материала в границах лекала $Rz = 1$ (рис. 3).

Согласно этому графику $k^{Rz=1}(X_w / W; 1)$ можно установить, что линейный коэффициент распределения расхода материала характеризуется нелинейной зависимостью и принимает значение единица для следующих точек кратности:

– кратное отношение ширины рулона W к размеру лекала X_w ($W \text{ mod } X_w = 0$, при $0 < X_w \leq W$);

– кратное отношение ширины рулона W к остатку от деления лекала, превышающего W рулона ($W \text{ mod } (X_w \text{ mod } W) = 0$, при $X_w > W$).

Эти точки кратного сочетания соответствуют оптимальному расходованию материала. Постепенный рост размера X_w при неизменном W ведет к прохождению одной из точек кратного сочетания, сопровождае-

мой резким увеличением значения k , так как между такими точками возникает обрезь материала, непригодная для применения с данным типом лекал. Дальнейшее увеличение значения X_w приближает к следующей точке оптимального расходования материала и, как следствие, стремлению k к значению единица. Наибольшее значение k , близкое к 2, было установлено при прохождении величиной X_w значения $W / 2$.

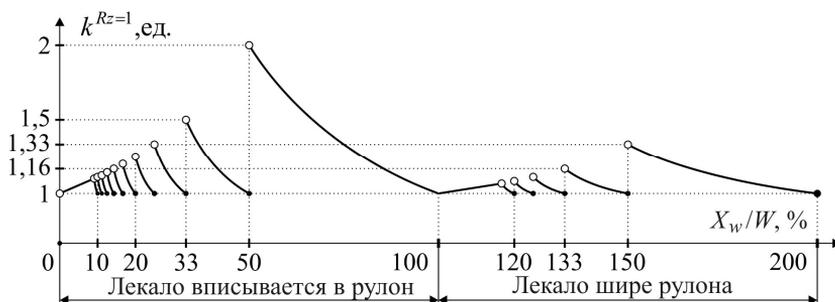


Рис. 3. График зависимости $k^{Rz=1}(X_w / W; 1)$

Взяв за основу принятые утверждения о форме лекал, близкой к прямоугольной, а также отсутствие ограничения к их положению на рулоне, сокращения расхода материала следует достигать изучением всех линейных коэффициентов распределения расхода материала для каждого из габаритных размеров лекала и их групп. Следовательно, введем замену обозначений габаритных размеров лекала X_w в X_{w_1} , а L_w в X_{w_2} [20–22].

Для контроля эффективности использования площади материала введем коэффициент распределения расхода площади материала k_S . Минимальное значение k_S будет достигаться сравнением соответствующих габаритным размерам k для каждого лекала или их группы. Минимальный коэффициент распределения расхода площади материала следует определять по формуле

$$\begin{aligned}
 k_S^{Rz} (X_{w_1}; X_{w_2}; W) &= k_S^{Rz} \left(\frac{X_{w_1}}{W}; \frac{X_{w_2}}{W}; 1 \right) = \\
 &= \min \left(k^{Rz} \left(\frac{X_{w_1}}{W}; 1 \right); k^{Rz} \left(\frac{X_{w_2}}{W}; 1 \right) \right). \quad (3)
 \end{aligned}$$

На основании полученной формулы (3) можно построить график изменения k_s (коэффициента распределения расхода площади материала) от отношения габаритных размеров лекала X_{w_1} и X_{w_2} к полезной ширине рулона W (рис. 4). Для простоты сравнения на рисунке выполнено диагональное соединение графиков с запретом ($k_s^{Rz=0}$) и разрешением ($k_s^{Rz=1}$) на совмещение материала в границах лекала.

Координатная плоскость, ограниченная осями X_{w_1}/W и X_{w_2}/W , размечена точками D, E, F, G, H, I, J, L и M . Фигура DFM представляет область с разрешением на совмещение материала $Rz = 1$ (Yes), а фигура DJM – область с запрещением на совмещение материала $Rz = 0$ (No). Такое объединение двух графиков допустимо, так как не препятствует проведению анализа показателей k_s исследуемой двумерной фигуры, размеры которой можно переставлять местами без искажения полученных результатов.

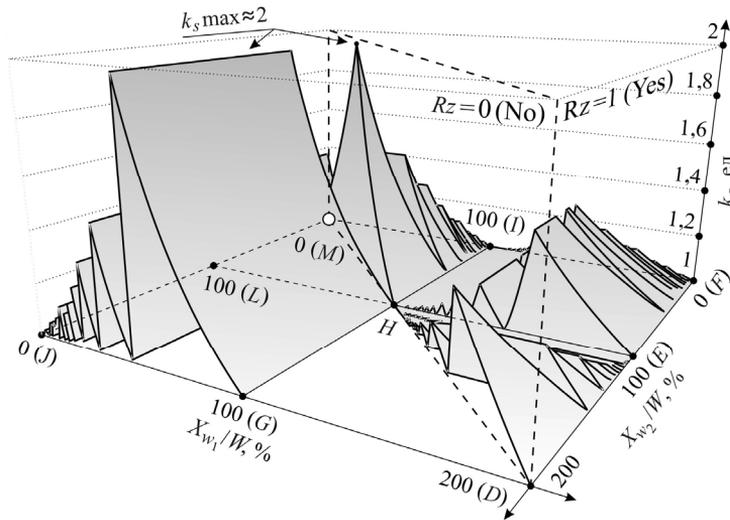


Рис. 4. График зависимости $k_s(X_{w_1}/W; X_{w_2}/W; 1)$

Из представленного графика видно, что сохраняется связь между k_s и кратностью величин: X_{w_1} и W фигура $GIMJ$; X_{w_2} и W – фигура $ELMF$; $(X_{w_1} \bmod W)$ и W – фигура $DFIG$; $(X_{w_2} \bmod W)$ и W – фигура $DJLE$.

Область $HIML$ представляет собой значения при $0 < (X_{w_1} / W, X_{w_1} / W) \leq 1$ – лекало полностью вписывается в полезную ширину рулона. Областям HLM и HIM соответствует симметричная форма графиков – выполняются главные условия производства о несоздании дополнительных работ и ненарушении потребительской ценности.

Исходя из значений k_S для области $GHLJ$, можно сделать вывод, что при запрете на совмещение материала лекала, которые превышают одним из своих размеров полезную ширину рулона, необходимо располагать наибольшим размером только вдоль длины рулона. На рис. 4 видно, что при таких ситуациях происходит сохранение значений локальных экстремумов k_S в виде продольных областей.

Незаполненная область DHG соответствует лекалу, превышающему своими габаритными размерами полезную ширину рулона и невыполнимому без применения совмещения материала.

Для сравнения область $DHIF$, имеющая разрешение на совмещение материала в границах лекала, обладает меньшими по величине и продолжительности локальными экстремумами k_S .

На основании проведенного общего анализа полученного графика можно сделать вывод о том, что наиболее оптимальное решение при выполнении лекала или их группы с габаритными размерами X_{w_1} и X_{w_2} из рулонного материала с полезной шириной W следует достигать путем проведения сравнительного анализа показателей k_S , получаемых при наличии запрета и разрешения на проведение совмещения материала в границах лекала.

Описываемый в работе метод расчета производственных издержек относится к теории оптимального использования ресурсов Л.В. Канторовича, а точнее к группе двумерных задач упаковки, описывающих плотное размещение малых элементов, исключающее их взаимное пересечение внутри заданного большого объекта, при условии достижения минимума использования его площади. Точное название данной задачи – упаковка прямоугольников в полосу 2DSP (2D Strip Packing), где полоса обладает заданным размером своей ширины W и переменной длиной L . Главными условиями при проведении решения подобных задач является условие наличия исчерпывающих сведений о количестве и форме всех размещаемых на материале объек-

тов, что является неприменимым для проведения предварительного расчета подаваемой клиентом заявки в условиях предоставления им ограниченного объема информации [23–29].

Следовательно, авторский метод расчета издержек по выполнению нестандартного защитного изделия относится к числу ранее не решенных задач. Для решения этой задачи был выбран метод ветвей и границ, заключающийся в последовательном переборе заданного перечня комбинаций отдельного или группового размещения лекал основных элементов на материале с отсечением неперспективных вариантов. Расчет прогнозируемого распределения обрезки материала с ориентированием на точки кратного сочетания размеров позволяет достигать эффективного использования ресурсов.

Для подбора оптимального решения был проведен подробный анализ всех возможных комбинаций взаимного сочетания граней и образуемых ими лекал. Объединение нескольких соседствующих граней в единое целое называется склейкой [30, с. 102–104]. Такой подход позволяет достигать оптимального баланса интересов потребителя и производителя, установления между ними взаимовыгодных отношений.

В ходе исследования была составлена классификация из 14 различных вариантов комбинации склейки соседствующих граней фигуры ФПП (рис. 5). Изучению подвергались варианты, начиная с представления каждой грани как отдельного лекала с последующим склеиванием их в группы, объединяющие собой до пяти граней. Комбинация, объединяющая в единое целое сразу все шесть граней, не рассматривалась как технически сложная в выполнении для многослойного изделия.

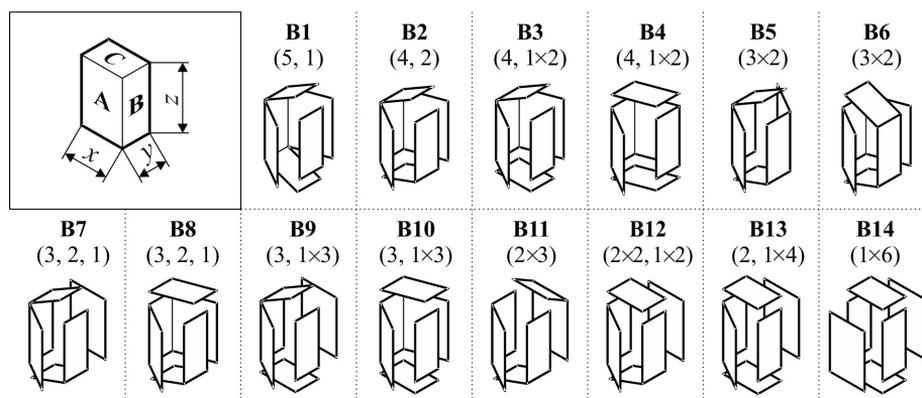


Рис. 5. Варианты сборки фигуры ФПП

Общее количество разработанных вариантов сборки и их компоновки на материале составило 191 и представлено в табл. 1.

Таблица 1

Соответствие вариантам сборки фигуры ФПП различных комбинаций компоновки лекал и их групп на материале

Вариант сборки фигуры ФПП		B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14
Склеивание	5 граней	1													
	4 грани		1	1	1										
	3 грани					2	2	1	1	1	1				
	2 грани		1					1	1			3	2	1	
Самостоятельная грань		1		2	2			1	1	3	3		2	4	6
Комбинации компоновки лекал, ед.		7	9	15	8	5	7	16	11	15	22	9	17	23	27
Всего, ед.		191													

Процесс формирования вариантов склеивания лекал и их групп был основан на следующем подходе:

- грани ФПП ранжировались по соответствующим им габаритным размерам с присвоением обозначений: большая (А), средняя (В) и малая (С);

- склеиванию подвергались только соседствующие между собой грани;

- для каждой из групп наибольшая грань задавалась как основной центр склеивания;

- допускалось принятие центром склейки не наибольшей грани в группе, если образуемое ими лекало представляло собой прямоугольную форму.

В результате проведенного перебора возможных комбинаций габаритных размеров ФПП в границах от $0,05W$ до W с шагом $0,05W$ была составлена группа из 1540 неповторяющихся троек ее габаритных размеров $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$, где $\dot{x} \geq \dot{y} \geq \dot{z}$. Для каждой тройки $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$ был проведен расчет всех 191 комбинаций компоновки лекал и их групп на материале с отсечением вариантов с показателем $k_s > 2$. На основании полученных результатов был составлен график вероятности выполне-

ния защитного изделия формы ФПП с габаритными размерами, не превышающими W и задаваемыми критериями k_s и Rz в условиях предоставления клиентом ограниченного объема информации (рис. 6).

Согласно графику коэффициенту $k_s = 1,16$ соответствует вероятность 25 % при $Rz = 0$ и 50 % при $Rz = 1$. Это говорит о том, что при выборе оптимального расхода материала также следует проводить отдельный анализ на разрешение совмещения материала в границах лекалах для каждого слоя: верхний, нижний и наполнитель.

Дополнительно также был проведен анализ других верхних границ для габаритных размеров x, y, z фигуры ФПП, его результаты представлены в табл. 2.

Согласно полученным результатам, представленным на рис. 6 и в табл. 2, можно сделать вывод о нелинейной зависимости вероятности выполнения заказа от задаваемых значений k_s , Rz , а также верхними границами габаритных размеров x, y, z фигуры ФПП. Можно отметить преобладание вероятности выполнения заказа при наличии разрешения на совмещение материала в границах лекала $Rz = 1$ в сравнении с $Rz = 0$. Также видно общее снижение вероятности выполнения заказа при уменьшении k_s от 2 до 1 – сокращение допустимой границы расхода материала.

На основании более 600 имеющихся отчетов о расходе материала на выпуск защитных изделий формы ФПП был проведен анализ соответствия фактического и прогнозного расхода материала, вычисленного согласно авторскому методу оперативного прогнозирования производственных издержек. В ходе исследования было проведено группирование отчетов о расходе согласно виду использованного материала – «Наполнитель» или «Ткань», так как в большинстве случаев дополнительные конструктивные элементы (рукава, карманы, окна, двери, клапаны, ремни и т.п.) выполняются из материала «Ткань». При анализе полученных данных с применением метода наименьших квадратов были составлены следующие уравнения регрессии [31, с. 23–25] общего вида

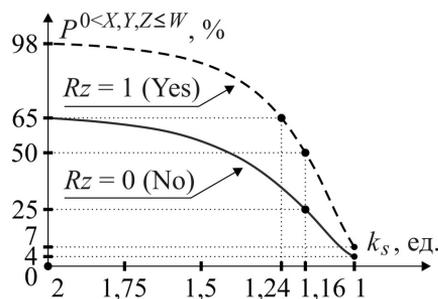


Рис. 6. График вероятности выполнения заказа фигуры ФПП при устанавливаемых параметрах k_s , Rz и границах $0 < x, y, z \leq W$

$$\widehat{k}_S = a_0 + a_1 k_{\text{Спрогноз}},$$

где \widehat{k}_S и $k_{\text{Спрогноз}}$ – соответственно регрессионный и прогнозный коэффициенты распределения расхода площади материала; a_0 и a_1 – параметры регрессии.

Таблица 2

Вероятность выполнения заказа фигуры ФПП при устанавливаемых параметрах k_s , Rz и верхней границе габаритных размеров $x, y, z, \%$

Верхняя граница габаритных размеров ФПП $\max(x, y, z)$	k_s	Rz										
		2,0	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1
0,25W	0	96,6	95,6	94,2	92,3	89,7	85,5	79,1	70,2	57,6	37,5	7,2
	1	96,6	95,6	94,3	92,4	89,8	85,6	79,2	70,2	57,6	37,6	7,2
0,5W	0	93,0	91,1	88,7	85,6	81,7	76,1	68,4	58,5	45,2	25,8	5,4
	1	96,6	95,6	94,0	91,8	88,5	83,5	76,0	65,4	50,8	29,7	6,1
0,75W	0	80,2	78,6	76,6	73,8	69,7	63,7	54,6	42,8	29,3	15,0	5,0
	1	97,8	97,1	96,1	94,4	91,7	87,6	80,3	68,9	50,9	28,1	7,5
1W	0	65,3	64,4	63,2	61,5	58,9	55,2	49,4	41,3	30,4	16,1	3,9
	1	98,1	97,5	96,6	95,2	93,0	89,6	83,7	74,1	58,5	35,1	6,8
1,25W	0	43,0	42,4	41,6	40,4	38,5	35,9	31,9	26,3	19,2	10,1	2,4
	1	98,2	97,7	96,9	95,6	93,7	90,9	85,7	76,9	62,8	41,2	8,9
1,5W	0	30,5	30,0	29,4	28,5	27,1	25,2	22,3	18,3	13,3	6,9	1,6
	1	98,2	97,7	96,9	95,8	94,0	91,3	86,5	78,2	64,5	42,7	7,7
1,75	0	22,7	22,4	21,9	21,2	20,1	18,7	16,4	13,4	9,7	5,0	1,2
	1	98,2	97,7	97,0	95,8	94,1	91,6	86,9	78,8	65,1	42,1	6,3
2W	0	17,6	17,3	16,9	16,4	15,5	14,4	12,6	10,3	7,4	3,8	0,9
	1	98,2	97,8	97,0	95,9	94,3	91,8	87,2	79,4	66,2	44,3	6,0

Полученные параметры регрессии, представленные в табл. 3, позволяют оценить общее отклонение между прогнозными и фактическими показателями расхода материала и являются значимыми по критерию Фишера на уровне 0,05.

При выполнении фигур ФПП для материала «Ткань» и «Наполнитель» значения a_1 близки по своим величинам 0,619 9 и 0,653 7 соответственно, это говорит о незначительном влиянии дополнительных конструктивных элементов на расход материала «Ткань».

Таблица 3

Показатели параметров регрессии по группам расхода материала

Группы расхода материала	Параметры регрессии	
	a_0	a_1
Фигура ФПП, «Ткань»	0,364 8	0,619 9
Фигура ФПП, «Наполнитель»	0,252 9	0,653 7

Близость этих коэффициентов можно объяснить применяемым на производстве правилом раскроя: вначале на материале размещаются лекала основных элементов, а на образованных незадействованных свободных областях размещаются лекала дополнительных элементов. Образующая обрезь материала «Наполнитель» при производстве фигур ФПП не находит своего дальнейшего применения, так как этот материал выполняет функцию тепло-, вибро-, звукопоглощения, обладает неплотной структурой и в сравнении с тканью имеет меньший спектр возможностей для дополнительного применения.

Согласно рис. 7, а при выполнении из материала «Ткань» фигуры ФПП значение мода коэффициента расхода площади материала $k_{S\text{прогноз}} \approx 1,3$, а средний арифметический коэффициент расхода площади материала приблизительно $k_{S\text{прогноз}} \approx 1,38$.

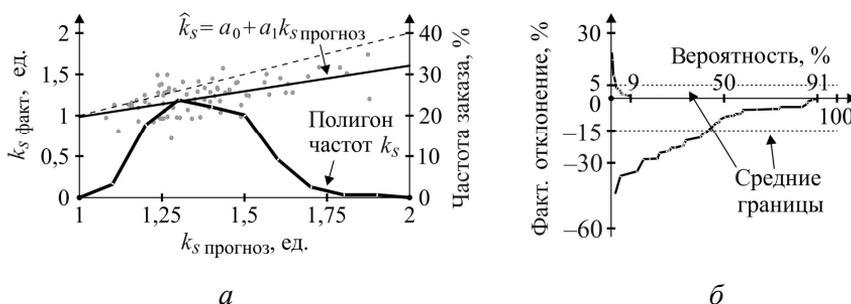


Рис. 7. Графики соответствия рассчитанных (а) и фактических (б) показателей расхода ткани при выполнении защитного изделия, фигура ФПП

Для 9 % случаев было зафиксировано превышение фактического расхода материала «Ткань» над прогнозом, среднее арифметическое превышение составило 5 %. В остальных 91 % случаях фактический расход был меньше прогнозируемого расчета, средняя арифметическая экономия материала составила 15 %.

При выполнении фигуры ФПП из материала «Наполнитель» (рис. 8, а) видно, что расположение моды коэффициента расхода площади материала соответствует $k_{S \text{ прогноз}} \approx 1,3$, а средний арифметический коэффициент расхода площади материала $k_{S \text{ прогноз}} \approx 1,33$.

В 3 % случаев для материала наполнитель было зафиксировано превышение фактического расхода над его прогнозной величиной, среднее арифметическое превышение расхода составило 4 %. Для остальных 97 % случаев фактический расход материала «Ткань» оказался меньше прогнозного расчета, а средняя арифметическая экономия материала «Наполнитель» составила 17 %.

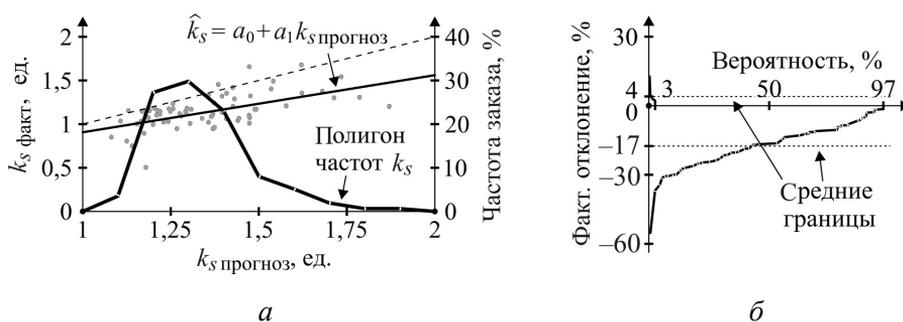


Рис. 8. Графики соответствия рассчитанных (а) и фактических (б) показателей расхода наполнителя при выполнении защитного изделия, фигура ФПП

Точки на рис. 7, а и 8, а с показателем $k_{S \text{ факт}} < 1$ означают, что при производстве данных защитных изделий было затрачено материала меньше, чем общая полезная площадь их граней. Такие факты возникают при использовании при производстве ранее полученной обрезки материала. Это подтверждает применение предприятием принципов бережливого производства. Согласно статистическим расчетам при производстве защитных изделий формы ФПП из материала «Ткань» показатель $k_{S \text{ факт}}$ меньше единицы на 29 %, а для материала «Наполнитель» – на 9 %. Такое отклонение еще раз подтверждает универсальность обрезки ткани для дальнейшего использования в сравнении с наполнителем.

Общая статистика выпуска защитных изделий формы ФПП показала, что в 6 % случаев наблюдается превышение расхода материала в среднем на 4,75 %, а для остальных 94 % случаев фактический расход материала оказался ниже в среднем на 16 %.

Полученные выводы позволяют говорить о высокой эффективности применения метода оперативного прогнозирования производственных издержек в условиях предоставления клиентом на этапе расчета неполного объема информации. Удобство и простота предлагаемого метода расчета позволяют проводить с его помощью оценку поданной клиентом заявки в процессе ведения прямого диалога с ним, а также добавляет возможность выбора варианта сборки фигуры ФПП. В процессе ведения такого диалога сотрудник компании может оперативно подбирать и корректировать параметры и свойства защитного изделия согласно ожиданиям клиента.

Данная научная работа имеет высокую значимость для применения быстрых расчетов в условиях неполной информации о заказе. Простота метода и удобство для внедрения без жесткой привязки к сложному и дорогостоящему программному обеспечению дает возможность его применения на ПП разных масштабов, создавая условия для реализации концепции взаимовыгодного сотрудничества с клиентом.

Хотим выразить свою благодарность промышленному предприятию ООО «НПО „Пермнефтегаз“» за предоставленную возможность провести данное научное исследование.

Библиографический список

1. Каблов Е.В., Финогеев А.Г. Автоматизация расчетов по раскрою и нормированию материалов средствами системы, интегрированной в САПР технологических процессов // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 5-2. – С. 252–259.
2. Толстобров Д.А., Федосеев С.А. Особенности организации выпуска промышленного многомерного продукта // *Инновационное развитие экономики: тенденции и перспективы*. – 2018. – Т. 1. – С. 488–494.
3. Смирнов А.А., Кремлева Н.А. Организационно-экономические аспекты бережливого производства на машиностроительном предприятии [Электронный ресурс] // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки*. – 2017. – Т. 10, № 3. – С. 171–182. – URL: <http://dx.doi.org/10.18721/JE.10315> (дата обращения: 31.08.2019).
4. Краковский Д. Итоги и прогнозы [Электронный ресурс] // *САПР и графика*. – 2018. – № 12. – URL: <http://sapr.ru/article/25765> (дата обращения: 30.08.2019).
5. Каблов Е.В., Финогеев А.Г. Проблемы внедрения систем автоматизированного проектирования в проектных предприятиях // *Современные наукоемкие технологии*. – 2015. – № 11. – С. 14–17.

6. Батьковский А.М., Трофимец В.Я. Исследование экономических систем методом имитационного статистического моделирования // The latest concepts of research: experience, tradition, innovation, effective development strategy materials of the II International research and practice conference. – 2018. – С. 9–20.

7. Галифанова Р.И., Горлова И.Р. Проблемы внедрения систем автоматизированного проектирования на предприятиях // Электрон. науч. журн. – 2016. – № 4 (7). – С. 81–87.

8. Толстобров Д.А. Формирование ценовой политики для клиентоориентированного производственного предприятия // Повышение производительности труда как ключевое направление региональной промышленной политики и основа неиндустриального подъема инновационной конкурентоспособности корпораций: материалы VIII междунар. науч.-практ. конф. – 2015. – С. 311–318.

9. Толстобров Д.А. Многомерный продукт – конкурентное преимущество для развития промышленного предприятия в сфере B2B // Шумпетеровские чтения. – 2017. – Т. 1. – С. 186–192.

10. Гитман М.Б., Столбов В.Ю., Федосеев С.А. Математическая модель управления качеством продукции // Качество в обработке материалов. – 2014. – № 1 (1). – С. 21–26.

11. Tolstobrov D.A., Tolstobrova N.A., Fedoseev S.A. Economic and mathematical model for calculation of preliminary production costs of multidimensional products for objects of protection having complex geometric shape // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2019. – No. 483 (012065). – URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/483/1/012065> (accessed 31 Aug. 2019).

12. Мухачева Э.А. Рациональный раскрой промышленных материалов. Применение в АСУ. – М.: Машиностроение, 1984. – 176 с.

13. Файзрахманов Р.И. Оптимизация процесса раскроя промышленных материалов по критерию минимума материальных потерь при наличии технологических ограничений: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – Уфа, 2011. – 19 с.

14. Выбор деловых остатков для раскроя на основе анализа заказа / В.С. Приступов, Р.Т. Мурзакаев, А.Н. Аношкин, А.Н. Поляков // Фундаментальные и прикладные разработки в области технических и физико-математических наук: сб. науч. ст. по итогам работы третьего международного круглого стола. – 2018. – С. 97–99.

15. Смирнов А.А., Степанов А.С., Кремлева Н.А. Организация раскроя и сортировки остатков листового металла на машиностроительном предприятии // Неделя науки СПбПУ: материалы науч. конф. с междунар. участием: в 2 ч. / Ин-т промышлен. менеджмента, экономики и торговли. – Ч. 1. – СПб., 2016. – С. 157–159.

16. Исследование бизнес-процесса учета делового остатка при раскрое листовых материалов / Р.А. Файзрахманов, Р.Т. Мурзакаев, В.С. Шилов,

А.В. Буркова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2013. – № 7. – С. 143–148.

17. Delorme M., Iori M., Martello S. Bin packing and cutting stock problems: Mathematical models and exact algorithms // *European Journal of Operational Research*. – 2016. – No. 255 (1). – P. 1–20.

18. Железняк И.С., Железняк Т.Е., Шерстобитова В.Н. Раскрой листового проката // *Инновации в машиностроении: сб. тр. IX междунар. науч.-практ. конф. / АлтГТУ им. И.И. Ползунова*. – 2018. – С. 299–304.

19. Смирнов А.А., Кремлева Н.А. Организационно-экономические аспекты бережливого производства на машиностроительном предприятии // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки*. – 2017. – Т. 10, № 3. – С. 171–182. – URL: <http://dx.doi.org/10.18721/JE.10315>.

20. Epstein L. Two-dimensional online bin packing with rotation // *Theoretical Computer Science*. – 2010. – Vol. 411, no. 31–33. – P. 2899–2911. – URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tcs.2010.04.021> (accessed 31 Aug. 2019).

21. A New Genotype-Phenotype Genetic Algorithm for the Two-Dimensional Strip Packing Problem with Rotation of 90° / G. Gatica, G. Villagrán, C. Contreras-Bolton, R. Linfati, J.W. Escobar // *Ing. Univ. Bogotá*. – Colombia, 2016. – No. 20 (1). – P. 119–138. – URL: <http://dx.doi.org/10.11144/Javeriana.iyu20-1.ngpg> (accessed 31 Aug. 2019).

22. An iterative bidirectional heuristic placement algorithm for solving the two-dimensional knapsack packing problem / K. Shiangjen, J. Chaijaruwanich, W. Srisujjalertwaja, P. Unachak, S. Somhom // *Engineering Optimization*. – 2018. – No. 50 (2). – P. 347–365. – URL: <http://dx.doi.org/10.1080/0305215X.2017.1315571> (accessed 31 Aug. 2019).

23. Филиппова А.С., Валиахметова Ю.И. Теория оптимального использования ресурсов Л.В. Канторовича в работах Уфимской научной школы // *Омский научный вестник*. – 2013. – № 1. – С. 39–42.

24. Lodi A. Algorithms for Two-Dimensional Bin Packing and Assignment Problems. – URL: https://www.dei.unipd.it/~fisch/ricop/tesi/tesi_dottorato_Lodi_1999.pdf (accessed 30 Aug. 2019).

25. Robust mixed-integer linear programming models for the irregular strip packing problem / L.H. Cherri, L.R. Mundim, M. Andretta, F.M.B. Toledo, J.F. Oliveira, M.A. Carravilla // *European Journal of Operational Research*. – 2016. – No. 253. – P. 570–583. – URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2016.03.009> (accessed 31 Aug. 2019).

26. Monaci M., Santos A.G. Minimum tiling of a rectangle by squares // *Ann Oper Res*. – 2018. – № 271. – P. 831–851. – URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s10479-017-2746-2> (accessed 31 Aug. 2019).

27. Neidlein V., Scholz A., Wäscher G. Sloppgen: a problem generator for the two-dimensional rectangular single large object placement problem with defects // *Intl. Trans. in Op. Res.* – 2016. – № 23. – P. 173–186. – URL: <http://dx.doi.org/10.1111/itor.12119> (accessed 31 Aug. 2019).

28. Circle Covering Representation for Nesting problems with continuous rotations / P. Rocha, R. Rodrigues, A.M. Gomes, F.M.B. Toledo, M. Andretta // *IFAC Proceedings Volumes.* – 2014. – № 47 (3). – P. 5235–5240.

29. Santoro M.C., Lemos F.K. Irregular packing: MILP model based on a polygonal enclosure // *Ann Oper Res.* – 2015. – № 235. – P. 693–707. – URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s10479-015-1971-9> (accessed 31 Aug. 2019).

30. Романовский И.В. Решение задачи гильотинного раскроя методом переработки списка состояний. – Свердловск: Кибернетика, 1969. – № 1. – С. 102–104.

31. Эконометрика: учебник для бакалавриата и магистратуры / И.И. Елисеева [и др.]; под ред. И.И. Елисеевой. – М.: Юрайт, 2017. – 449 с. – (Бакалавр и магистр. Академический курс).

References

1. Kablov E.V., Finogeev A.G. Avtomatizatsiia raschetov po raskroiu i normirovaniu materialov sredstvami sistemy integrirovanoi v SAPR tekhnologicheskikh protsessov. *Fundamental'nye issledovaniia*, 2016, no. 5-2, pp. 252–259.

2. Tolstobrov D.A., Fedoseev S.A. Osobennosti organizatsii vypuska promyshlennogo mnogomernogo produkta. *Innovatsionnoe razvitie ekonomiki: tendentsii i perspektivy*, 2018, vol. 1, pp. 488–494.

3. Smirnov A.A., Kremleva N.A. Organizatsionno-ekonomicheskie aspekty berezhlivogo proizvodstva na mashinostroitel'nom predpriatii. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Ekonomicheskie nauki*, 2017, vol. 10, no. 3, pp. 171–182, available at: <http://dx.doi.org/10.18721/JE.10315>.

4. Krakovskii D. Itogi i prognozy. *SAPR i grafika*, 2018, no. 12, available at: <http://sapr.ru/article/25765> (accessed 31 Aug. 2019).

5. Kablov E.V., Finogeev A.G. Problemy vnedreniia sistem avtomatizirovannogo proektirovaniia v proektnykh predpriatiiakh. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, 2015, no. 11, pp. 14–17.

6. Bat'kovskii A.M., Trofimets V.Ia. Issledovanie ekonomicheskikh sistem metodom imitatsionnogo statisticheskogo modelirovaniia. The latest concepts of research: experience, tradition, innovation, effective development strategy materials of the II International research and practice conference, 2018, pp. 9–20.

7. Galifanova R.I., Gorlova I.R. Problemy vnedreniia sistem avtomatizirovannogo proektirovaniia na predpriatiiakh. *Elektronnyi nauchnyi zhurnal*, 2016, no. 4 (7), pp. 81–87.

8. Tolstobrov D.A. Formirovanie tsenovoi politiki dlia klientoorientirovannogo proizvodstvennogo predpriiatiia. Povyslenie proizvoditel'nosti truda kak kliuchevoe napravlenie regional'noi promyshlennoi politiki i osnova neoindustrial'nogo pod"ema innovatsionnoi konkurentosposobnosti korporatsii Materialy VIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 2015, pp. 311–318.

9. Tolstobrov D.A. Mnogomernyi produkt – konkurentnoe preimushchestvo dlia razvitiia promyshlennogo predpriiatiia v sfere B2B. Shumpeterovskie chteniia, 2017, vol. 1, pp. 186–192.

10. Gitman M.B., Stolbov V.Iu., Fedoseev S.A. Matematicheskaia model' upravleniia kachestvom produktsii. Kachestvo v obrabotke materialov, 2014, no. 1 (1), pp. 21–26.

11. Tolstobrov D.A., Tolstobrova N.A., Fedoseev S.A. Economic and mathematical model for calculation of preliminary production costs of multidimensional products for objects of protection having complex geometric shape. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2019, no. 483 (012065), available at: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/483/1/012065>.

12. Mukhacheva E.A. Ratsional'nyi raskroi promyshlennykh materialov. Primenenie v ASU. Moscow, Mashinostroenie, 1984, 176 p.

13. Faizrakhmanov R.I. Optimizatsiia protsessa raskroia promyshlennykh materialov po kriteriiu minimuma material'nykh poter' pri nalichii tekhnologicheskikh ogranichenii. Abstract Ph.D. thesis, Ufa, 2011. 19 p.

14. Pristupov V.S., Murzakaev R.T., Anoshkin A.N., Poliakov A.N. Vybor delovykh ostatkov dlia raskroia na osnove analiza zakaza. Fundamental'nye i prikladnye razrabotki v oblasti tekhnicheskikh i fiziko-matematicheskikh nauk: Sbornik nauchnykh statei po itogam raboty tret'ego mezhdunarodnogo kruglogo stola, 2018, pp. 97–99.

15. Smirnov A.A., Stepanov A.S., Kremleva N.A. Organizatsiia raskroia i sortirovki ostatkov listovogo metalla na mashinostroitel'nom predpriiati. Nedelia nauki SPbPU: materialy nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem / Institut promyshlennogo menedzhmenta, ekonomiki i torgovli. Ch. 1. Sankt-Peterburg, 2016, pp. 157–159.

16. Faizrakhmanov R.A., Murzakaev R.T., Shilov V.S., Burkova A.V. Issledovanie biznes-protsessa ucheta delovogo ostatka pri raskroe listovykh materialov. Vestnik PNIPU. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia, 2013, no. 7, pp. 143–148.

17. Delorme M., Iori M., Martello S. Bin packing and cutting stock problems: Mathematical models and exact algorithms. European Journal of Operational Research, 2016, no. 255 (1), pp. 1–20.

18. Zhelezniak I.S., Zhelezniak T.E., Sherstobitova V.N. Raskroi listovogo prokata. Innovatsii v mashinostroenii sbornik trudov IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. AltGTU im. I.I. Polzunova, 2018, pp. 299–304.
19. Smirnov A.A., Kremleva N.A. Organizatsionno-ekonomicheskie aspekty berezhlivogo proizvodstva na mashinostroitel'nom predpriiatii. Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Ekonomicheskie nauki, 2017, vol. 10, no. 3, pp. 171–182, available at: <http://dx.doi.org/10.18721/JE.10315>.
20. Epstein L. Two-dimensional online bin packing with rotation. *Theoretical Computer Science*, 2010, no. 31–33, vol. 411, pp. 2899–2911, available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tcs.2010.04.021>.
21. Gatica G., Villagrán G., Contreras-Bolton C., Linfati R., Escobar J.W. A New Genotype-Phenotype Genetic Algorithm for the Two-Dimensional Strip Packing Problem with Rotation of 90°. *Ing. Univ. Bogotá. Colombia*, 2016, no. 20 (1), pp. 119–138, available at: <http://dx.doi.org/10.11144/Javeriana.iyu20-1.ngpg>.
22. Shiangjen K., Chaijaruwanich J., Srisujjalertwaja W., Unachak P., Somhom S. An iterative bidirectional heuristic placement algorithm for solving the two-dimensional knapsack packing problem. *Engineering Optimization*, 2018, no. 50 (2), pp. 347–365, [dx.doi.org/10.1080/0305215X.2017.1315571](https://doi.org/10.1080/0305215X.2017.1315571).
23. Filippova A.S., Valiakhmetova Iu.I. Teoriia optimal'nogo ispol'zovaniia resursov L.V. Kantorovicha v rabotakh Ufimskoi nauchnoi shkoly. *Omskii nauchnyi vestnik*, 2013, no. 1, pp. 39–42.
24. Lodi A. Algorithms for Two-Dimensional Bin Packing and Assignment Problems, available at: https://www.dei.unipd.it/~fisch/ricop/tesi/tesi_dottorato_Lodi_1999.pdf (accessed 30 Aug. 2019).
25. Cherri L.H., Mundim L.R., Andretta M., Toledo F.M.B., Oliveira J.F., Carravilla M.A. Robust mixed-integer linear programming models for the irregular strip packing problem. *European Journal of Operational Research*, 2016, no. 253, pp. 570–583, [dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2016.03.009](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.03.009).
26. Monaci M., Santos A.G. Minimum tiling of a rectangle by squares. *Ann Oper Res*, 2018, no. 271, pp. 831–851, [dx.doi.org/10.1007/s10479-017-2746-2](https://doi.org/10.1007/s10479-017-2746-2).
27. Neidlein V., Scholz A., Wäscher G. Sloppgen: a problem generator for the two-dimensional rectangular single large object placement problem with defects. *Intl. Trans. in Op. Res.*, 2016, no. 23, pp. 173–186, [dx.doi.org/10.1111/itor.12119](https://doi.org/10.1111/itor.12119).
28. Rocha P., Rodrigues R., Gomes A.M., Toledo F.M.B., Andretta M. Circle Covering Representation for Nesting problems with continuous rotations. *IFAC Proceedings Volumes*, 2014, no. 47 (3), pp. 5235–5240.
29. Santoro M.C., Lemos F.K. Irregular packing: MILP model based on a polygonal enclosure. *Ann Oper Res*, 2015, no. 235, pp. 693–707, available at [dx.doi.org/10.1007/s10479-015-1971-9](https://doi.org/10.1007/s10479-015-1971-9).

30. Romanovskii I.V. Reshenie zadachi gil'otinnogo raskroia metodom pererabotki spiska sostoianii. Sverdlovsk, Kibernetika, 1969, no. 1, pp. 102–104.

31. Eliseeva I.I. et al. Ekonometrika: uchebnik dlia bakalavriata I magistratury. Seriya: Bakalavr i magistr. Akademicheskii kurs. Moscow, Iurait, 2017. 449 p.

Сведения об авторе

Толстобров Данил Александрович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Строительный инжиниринг и материаловедение», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: 2told@mail.ru).

About the author

Danil A. Tolstobrov (Perm, Russian Federation) – Ph.D. Student, Department of Construction engineering and material sciences, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: 2told@mail.ru).