

УДК 678.4 + 004.9

## ИНЖЕНЕРНЫЙ МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

**И.В. Веселов, профессор**  
**Ю.А. Гамлицкий, доцент**

*Кафедра химии и технологии переработки эластомеров им. Ф.Ф. Кошелева,  
Московский технологический университет (Институт тонких химических технологий  
им. М.В. Ломоносова), Москва 119571, Россия,  
ООО НПКЦ ВЕСКОМ, Москва 105118, Россия  
@Автор для переписки, e-mail: gamlit48@mail.ru*

В предлагаемой работе изложен инженерный метод моделирования и оптимизации на примере технологического процесса (ТП) создания шин. Предлагается новый вид целевой функции, который позволяет практически полностью определять оптимальные параметры ТП. Связь каждой выходной характеристики готового изделия с параметрами ТП записывается в виде полного уравнения регрессии второй степени. Все выходные характеристики делятся на три группы: 1) ограниченные снизу; 2) ограниченные сверху; 3) ограниченные сверху и снизу. Для каждой группы записано выражение, которое стремится к нулю при улучшении значения данной выходной характеристики. Сумма этих трех выражений представляет собой значение целевой функции, которая тем меньше, чем в большей степени удовлетворяются пожелания заказчика продукции. В случае большого числа показателей используют численные алгоритмы нахождения минимума функции многих переменных (покоординатный спуск, градиентный спуск, скорейший спуск и др.), которые реализуются с использованием ЭВМ. Изложенный подход апробирован на опытном шинном заводе НИИШП. Осуществлен отбор наиболее важных показателей, характеризующих ТП шинного производства; составлены программы для ЭВМ. С целью отработки и апробации изложенного подхода, контроля и управления технологическим качеством проведены исследования на участке, включающем процесс заготовки деталей, сборки шин и их вулканизации. Выполнены измерения показателей ТП и выходных характеристик для партии из двухсот шин. Обработка полученных данных подтвердила работоспособность изложенной методологии.

**Ключевые слова:** моделирование, оптимизация, уравнения регрессии, целевая функция, технологический процесс, шинное производство.

## ENGINEERING METHOD OF MODELING AND OPTIMIZATION OF CHEMICAL-TECHNOLOGICAL PROCESSES

**I.V. Veselov,  
Y.A. Gamlitskiy**

*Moscow Technological University (M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies),  
Moscow 119571, Russia,*

*Research and Production Commercial Centre VESKOM, Moscow 105118, Russia*

*@Corresponding author e-mail: gamlit48@mail.ru*

In the proposed work, the engineering method of modeling and optimization will be described using the example of tire development and rubber products. A new kind of objective function is proposed that allows to determine almost completely optimal technological process parameters (including properties of raw materials and raw materials) taking into account the robustness. Examples of application of the proposed method are given.

**Keywords:** modeling, optimization, regression equations, objective function, technological process, tire production.

Общая постановка проблемы оптимизации достаточно детально описана в литературе [1 – 4]. Об оптимизации в механике шин говорится в монографии [5], где имеется краткий раздел «Модели оптимального проектирования пневматической шины».

С точки зрения технологии производства, качество продукции будет обеспечено, если: 1) все параметры, существенно влияющие на качество продукции, включены в перечень контролируемых параметров; 2) контролируемые параметры находятся в требуемых пределах.

В качестве важного критерия, который следует учитывать при оценке оптимальности технологического процесса (ТП), является его робастность [6]. Это понятие, введенное Тагути, характеризует устойчивость уровня выходных характеристик к отклонениям от оптимума параметров ТП, свойств материала, размеров деталей и их положений в готовом изделии и т.д. Количественно робастность связана с отношением «сигнал/шум», максимизация которого при достижении номинального значения параметра качества и называется робастным режимом. Использование критерия робастности неотрывно связано с общей статистической системой обеспечения качества [7].

В предлагаемой работе инженерный метод моделирования и оптимизации будет изложен на примере разработки шин и РТИ. Предлагается новый вид целевой функции, который позволяет практически полностью определять оптимальные параметры ТП (включая свойства исходного сырья и материалов) с учетом робастности.

Для такого сложного в технологическом и конструктивном плане изделия, как шина, процесс производства которого начинается с обработки разнородного сырья и материалов (каучук, технический углерод и другие наполнители, химикаты более чем 20 наименований, корд, бортовая проволока и др.) и включает в себя множество переделов (смешение материалов с целью изготовления сырой резины, пропитка и обрезинивание корда, заготовка деталей шины, многостадийный процесс сборки шины, формование, вулканизация и др.), количество контролируемых и регулируемых параметров  $N$  измеряется сотнями.

Для каждого из них установлены нормы  $A_i$  ( $i = 1, 2 \dots, N$ ) и допустимые отклонения от норм – допуски  $\Delta A_i$ . Как правило, значения  $A_i$  и  $\Delta A_i$  устанавливаются эмпирически.

Число показателей  $M$ , характеризующих качество готового изделия, существенно меньше около 10. Сюда входят показатели  $V_j$  ( $j = 1, \dots, M$ ) – масса шины, габариты, жесткостные характеристики, значения максимальной нагрузки на шину и максимальной скорости, сцепные свойства, потери на качение, гарантийный пробег, показатели шума, силовой и геометрической однородности, комфортности и проч. Допуски на эти показатели  $\Delta V_j$  определяются требованиями заказчика, конъюнктурой рынка и существенно влияют на конкурентоспособность изделия.

Очевидно, что не все из  $N$  показателей  $A_i$ , характеризующих ТП изготовления шин, одинаково существенно влияют на  $M$  показателей  $V_j$ , характеризующих качество готового изделия. Встает задача выбора из  $N$  показателей  $N^*$ , наиболее важных для получения качественного изделия. Эту задачу можно решить тремя способами [8].

Первый способ - метод экспертных оценок. Он состоит в том, что наиболее квалифицированные специалисты в данной области знаний, основываясь на своем опыте, объявляют некоторые показатели из всех имеющихся наиболее важными, считая при этом, что остальные показатели могут рассматриваться как фоновые, шумовые, влияние которых на качество продукции не превышает некоторого допустимого значения.

Второй способ можно назвать «из первых принципов». Здесь используются результаты фундаментальных исследований (теоретических, экспериментальных, компьютерных), позволяющие получать аналитические соотношения между параметрами ТП, включая свойства сырья, материалов и полуфабрикатов, образующихся в процессе производства, и показателями, характеризующими качество готовой продукции – шины. Из анализа этих соотношений нетрудно определить наиболее значимые параметры.

Наконец, третий способ отбора  $N^*$  наиболее значимых показателей из общего их числа  $N$  состоит в применении статистических методов [9, 10]. Если для достаточно большого числа однородной продукции (шин одного размера и модели, с использованием одинаковых материалов и технологии изготовления) измерить значения  $A_i$  всех  $N$  показателей, то известные математические и статистические приемы позволят определить наличие корреляции между конкретными показателями ТП и параметрами качества шин, степень этой корреляции. Кроме этого, статистические методы позволяют проследивать стабильность работы оборудования, величину разброса измеряемых показателей в зависимости от различных факторов: объективных (качество сырья, температура и давление пара, степень изношенности оборудования и др.), и субъективных (мастерство сборщиков шин, аккуратность наладчиков оборудования и др.).

Все три описанных способа определения наиболее значимых показателей рекомендуется применять в комплексе. Вначале эксперты устанавливают предварительный перечень показателей, используя рекомендации, разработанные в результате проведенных научных исследований. Для этого предварительного перечня применяют статистические методы, в результате чего выявляется избыточность или недостаточность использованных показателей. При избыточности числа показателей отбрасывают наименее значимые. При недостаточности вновь собирают экспертов, которые решают, какие неучтенные ранее показатели ввести в рассмотрение. Таким образом, процесс повторяется до достижения оптимума.

Как уже отмечалось выше, оптимум может определяться разумным соотношением доли неучтенных (фоновых) факторов и сложностью организации автоматизированного измерения контролируемых параметров. (Безусловно, контроль всех  $N$  возможных параметров был бы идеальным решением проблемы, но, очевидно, это дорого).

Изложим кратко некоторые математические соотношения, позволяющие установить количественную связь между критериями качества шин и параметрами ТП.

Проблема выбора адекватной регрессионной модели ТП достаточно подробно описана в литературе [11, 12]. Отметим лишь, что наиболее часто используют степенные зависимости, начиная с наиболее простой линейной модели без учета взаимодействия параметров. Это во многих случаях оказывается оправданным, если колебания  $\Delta A_i$  малы по сравнению с величинами  $A_i$ .

Однако для решения статистическими методами задач оптимизации уравнения регрессии должны содержать не только линейные члены. Это требование обусловлено следующими очевидными соображениями. Многие показатели качества шины имеют экстремальный характер. Например, дисбаланс шины ухудшается при отклонениях длины протектора от оптимального значения как в одну, так и в другую сторону. Следовательно, указанная зависимость не может быть линейной. Для ее описания требуется полином не менее, чем второй степени. Если, кроме того, имеется влияние какого-либо параметра на показатели качества других параметров, то следует использовать члены с произведениями взаимосвязанных параметров.

Запишем уравнения для полиномиальной модели с учетом парных корреляций второй степени:

$$B_j = C_0 + \sum_{i=1}^{N^*} C_{ij} \cdot A_i + \sum_{i=N^*+1}^{2N^*} C_{ij} \cdot A_{i-N^*}^2 + \sum_{\substack{i=2N^*+1 \\ 0 < (p,q) \leq N^* \\ p < q}}^{N_r} C_{ij} (A_p \cdot A_q) \quad (1)$$

( $j = 1, 2, \dots, M$ ),

$C_{ij}$  – численные коэффициенты, подлежащие определению.

Нетрудно показать, что соотношение для числа коэффициентов  $N_c$  имеет вид:

$$N_r = N_c - 1 = N^* \left( 2 + \frac{N^* - 1}{2} \right) \quad (2)$$

Чтобы решить каждое из  $M$  уравнений (1), т.е. найти коэффициенты  $C_{ij}$ , поступают следующим образом. Для  $L$  испытываемых изделий (в нашем примере шин) определяют показатели  $A_i$  ( $i=1, \dots, N^*$ ) и  $B_j$  ( $j=1, \dots, M$ ) и для каждой шины под номером  $s$  ( $s=1, \dots, L$ ) записывают систему уравнений, линейных относительно  $C_{ij}$ :

$$B_j^{(s)} = C_0 + \sum_{i=1}^{N^*} C_{ij} A_i^{(s)} + \sum_{\substack{i=N^*+1 \\ 0 < p \leq N^*}} C_{ij} A_p^{(s)2} + \sum_{\substack{i=2N^*+1 \\ 0 < (p,q) \leq N^* \\ p < q}}^{N_r} C_{ij} A_p^{(s)} A_q^{(s)} \quad (3)$$

( $s=1, \dots, L$ ).

Общее число испытанных шин  $L$  должно удовлетворять двум условиям:

1)  $L$  должно представлять существенную выборку (напомним, что существенной, или репрезентативной, считается такая выборка, все используемые моменты которой отличаются от моментов генеральной функции распределения не более, чем на некоторую допустимую величину [12]);

2)  $L \gg N_c$ .

Первое из указанных требований обусловлено необходимостью знания статистических характеристик (моментов) «случайных» величин  $A_i$  и  $B_j$  (среднее значение, дисперсия и т.д.), второе – необходимо для решения системы (3) с использованием метода наименьших квадратов [13].

Для определения  $C_{ij}$  требуется решить систему  $L$  линейных алгебраических уравнений. Так как  $L$  достаточно велико (до нескольких сотен), то необходимо использование компьютерных методов. На вычислительных подробностях здесь останавливаться не представляется возможным. Отметим лишь, что используемые методы в достаточной степени стандартны.

После определения коэффициентов  $C_{ij}$  осуществляется процедура контроля правильности их определения (достаточности показателей ТП, входящих в число  $N^*$ ). При этом используются критерии экстремальности, симметрии и др. Например, если в соотношение (3) подставить «идеальные» значения показателей  $A_i$ , то соответствующая величина  $B_j$  должна стать экстремальной (если  $B_j$  – один из показателей силовой неоднородности шины, то  $B_j \rightarrow 0$ ).

С помощью уравнений (3) может быть проведено сравнение теоретических предсказаний о степени и характере влияния тех или иных показателей ТП на качество шины с результатами статистического обобщения эксперимента. Могут быть определены пределы изменения  $A_i$ , при которых влияние  $A_i$  на  $B_j$  описывается линейной зависимостью. Те члены уравнения (3), которые имеют малые коэффициенты, могут в дальнейшем не учитываться, что упростит систему (3) за счет уменьшения числа членов.

Остановимся более подробно на практически важной проблеме установления допустимых значений  $\Delta A_i$  колебаний параметров  $A_i$ , при которых колебания  $\Delta B_j$  критериев выходного контроля качества  $B_j$  не будут выходить за пределы установленных норм.

В настоящее время существует и повсеместно используется система жестких норм контроля. Очевидно, что чем меньше разброс показателей ТП, тем более стабильными будут показатели, характеризующие качество готового изделия. Опыт показывает, что в рамках реального производственного процесса на шинных заводах редко можно обнаружить шину, в процессе изготовления которой не было нарушено ни одной нормы. Вместе с тем по результатам выходного контроля основная часть продукции удовлетворяет предъявленным требованиям. Это свидетельствует о том, что система жестких допусков (СЖД) не всегда адекватна качеству изделия.

Приведем наглядный пример. Допустим, масса заготовки протектора несколько ниже допустимого значения. Однако общая масса шины осталась в требуемых пределах за счет увеличения калибра обрешиненного металлокордного полотна и увеличения массы других деталей конструкции шины в допустимых пределах.

Пример иллюстрирует важность использования не жестких отдельных критериев и

их допусков, а системы связанных допусков (ССД), обеспечивающих требуемое качество изделия в целом. Использование ССД потребует в рамках автоматизированного шинного производства осуществление контроля не только «внешних» параметров (давление, температура, калибры и т.п.), но и свойств материалов-полуфабрикатов. Для приведенного выше примера о компенсации массы шины это означает, что потребуются показатели, характеризующие, например, зависимость вероятности отслоения протектора от брекера от колебаний размеров последних при эксплуатации шины.

Использование ССД имеет еще одно важное преимущество перед СЖД. Если в СЖД нарушение одного из допусков в процессе производства автоматически приводит к отбраковке данного изделия, то в ССД остается возможность оперативного вмешательства в дальнейший ТП с целью исправления (компенсации) создавшегося положения. Такая компенсация возможна исключительно на основе высокоавтоматизированного производства с компьютеризацией на всех уровнях, причем выработка управляющего сигнала (рекомендации) должна осуществляться быстро, в масштабах реального времени.

Вернемся к соотношениям (1) и посмотрим, как на их основе создать ССД. После определения коэффициентов  $C_{ij}$  будем считать переменными величинами  $A_i$ . Используем то обстоятельство, что величины  $V_j$  имеют экстремальный характер. Тогда задача подбора величин  $A_i$  сводится математически к решению системы уравнений для частных производных  $V_j$  по  $A_i$ :

$$\frac{\partial V_j}{\partial A_i} = 0, \quad (i = 1, \dots, N^*; \quad j = 1, \dots, M) \quad (4)$$

Из уравнений (4) определяются оптимальные значения  $A_{i, \text{opt}}$ , при которых критерии качества  $V_j$  являются наилучшими –  $V_{j, \text{opt}}$  (Мы здесь опускаем вопрос о возможности существования нескольких экстремумов при близких значениях  $A_i$ ). Подчеркнем, что найденные решения уравнений (4) можно назвать оптимальными только для данного показателя  $V_j$ . Это не значит, что при решении комплексной задачи оптимизации всего ТП значения  $A_{i, \text{opt}}$  не изменятся. Полное решение задачи оптимизации приведено ниже.

Понятно, что отклонение  $\Delta A_i$  от  $A_{i, \text{opt}}$  приведет к изменению  $V_j$  на  $\Delta V_j$ . Максимально допустимые отклонения показателей, характеризующих качество шины,  $\Delta V_{j, \text{max}}^1$  будем считать заданными. Возникает вопрос: каково максимальное значение  $\Delta A_{i, \text{max}}$ , при котором оптимальное значение  $V_{j, \text{opt}}$  изменится на величину, не превышающую  $\Delta V_{j, \text{max}}$ ?

Ответ можно получить, воспользовавшись уравнениями (1). Будем считать переменными все  $A_i$ , кроме одной с номером  $q$ , для которой зададим некоторое значение  $A_q = A_{q, \text{opt}} + \Delta A_q$ . Далее, как и прежде, решим систему уравнений для производных, аналогичную системе (4) и найдем все значения  $A_{i, \text{opt}} (i \neq q)$ , удовлетворяющие условию экстремальности  $V_j$  при некотором фиксированном значении  $A_q$ . Повторив описанную процедуру для разных значений  $A_q$ , получим ряд значений  $V_j$ . Из обработки полученных данных методом интерполяции нетрудно найти  $\Delta A_{q, \text{max}}$ , при котором  $\Delta V_j = \Delta V_{j, \text{max}}$ .

<sup>1</sup>При использовании термина «максимальный» имеется в виду, что отклонения могут быть как со знаком «+», так и со знаком «-».

Поступив подобным образом для всех  $N^*$  показателей  $A_i$ , найдем для каждого из них максимально допустимые отклонения, при которых качество изделия останется в допустимых пределах.

Приведенные рассуждения можно повторить не для одного, а для зафиксированных значений двух, трех, и т. д. показателей  $A_i$ . При этом можно рассчитать требуемые значения остальных  $A_i$ , при которых качество шины будет наилучшим.

Смысл изложенного следующий. На основе приведенных уравнений можно рассчитать  $A_{i\text{opt}}$  и  $\Delta A_{i\text{max}}$ , удовлетворяющие требованиям качества готового изделия. После прохождения того этапа ТП, где контролируются  $A_i$ , мы имеем реальное значение  $A_i$ . Зная это реальное значение, рассчитывается допустимое отклонение  $\Delta A_{2\text{max}}$  на втором этапе, которое зависит от  $A_i$ . После прохождения второго этапа рассчитывается допустимое отклонение  $\Delta A_{3\text{max}}$  при фиксированных  $A_2$  и  $A_3$  и т. д. В этом и состоит смысл системы связанных допусков.

Отметим еще раз, что применение ССД возможно только в условиях автоматизированного производства при наличии системы измерения  $A_i$  и передачи данных в компьютерную сеть. При наличии обратной связи (регулирование параметров ТП  $A_i$  по командам управляющего компьютера) ССД позволяет контролировать качество и управлять им не только для партии шин, но и для каждой отдельной шины.

Теперь обратим внимание на важную специфику шинного производства. Весь ТП условно можно разделить на две части. Первая – изготовление материала (резина и резинокордное полотно), вторая – заготовка деталей, сборка и вулканизация изделия. Преимущество такого разделения в том, что при удовлетворительных значениях показателей свойств материалов можно сделать вывод об общем удовлетворительном состоянии всего ТП до стадии заготовки деталей и сборки. Такой прием называется декомпозицией [5].

Еще одно преимущество декомпозиции заключается в возможности введения промежуточных критериев качества, характеризующих свойства материалов, идущих на изготовление шин. Общая задача сквозного учета влияния всех контролируемых параметров на качество шины делится на две математически сходные, но по числу параметров (и, соответственно, уравнений) существенно более компактные подзадачи, требующие меньшего времени на их решение.

Эти две подзадачи, сходные по методам их решения, различаются по набору контролируемых параметров  $A_i$ . На втором этапе практически весь контроль сводится к определению геометрических размеров. На первом же этапе необходимо контролировать свойства материалов.

Перейдем к описанию процедуры оптимизации всего ТП. Работа над новым изделием начинается с определения его целевой функции (или функционала)  $R$ . Показателями  $V_i$  ( $i = 1, \dots, M$ ), от которых зависит  $R$ , являются выходные характеристики – масса шины, габариты, жесткостные характеристики, значения максимальной нагрузки на шину и максимальной скорости, сцепные свойства, потери на качение, гарантийный пробег, показатели шума, силовой и геометрической однородности, комфортности и проч. Сюда же входит и цена шины.

Показатели  $V_i$  зависят от переменных  $A_j$  ( $j = 1, \dots, N$ ), которыми являются варьируемые параметры, характеризующие конструкцию шины и свойства ее материалов.

Задача состоит в нахождении величин  $A_j$ , обеспечивающих оптимальные значения величин  $B_i$ . В качестве критерия оптимизации предлагается функционал следующего вида:

$$R = \sum_{i=1}^{m_1} \left( \frac{B_i^{\text{расч}} - B_i^{\text{треб}}}{\Delta B_i} \right)^{n_i} + \sum_{i=m_1+1}^{m_2} \left( \frac{B_i^{\text{min}}}{B_i^{\text{расч}}} \right)^{n_i} + \sum_{i=m_2+1}^{m_3} \left( \frac{B_i^{\text{расч}}}{B_i^{\text{max}}} \right)^{n_i} \quad (5)$$

Здесь:

$m_3$  – общее число показателей оптимизации,

$m_1$  – число показателей, входящих в  $m_3$  и ограниченных сверху и снизу,

$m_2 - m_1$  – число показателей, входящих в  $m_3$  и ограниченных снизу,

$m_3 - m_2$  – число показателей, входящих в  $m_3$  и ограниченных сверху,

$B_{i \text{ треб}}$  – середина интервала требуемых значений  $i$ -го показателя,

$B_{i \text{ max}}$  – максимальное значение  $i$ -го показателя,

$B_{i \text{ min}}$  – минимальное значение  $i$ -го показателя

$\Delta B_i$  – полуширина интервала требуемых значений  $i$ -го показателя,

$n_i$  – чётные числа, определяющие форму области допустимых значений показателей  $B_i$ .

Выражение (5) отличается от большинства известных тем, что он имеет аналитический вид, не требующий применения дополнительных ограничений. Первый член выражения (5) описывает показатели, ограниченные и сверху, и снизу. Например, длина заготовки протектора, ширина брекера и другие геометрические размеры. Второй член описывает показатели, ограниченные снизу. К ним относятся: число километров до разрушения каждой детали (это могут быть разные величины с учетом, например, многократного восстановления протектора), сцепные свойства. Третий член описывает показатели, ограниченные сверху. Например: потери на качение, силовая и геометрическая неоднородность, масса, шумообразование, вибрация.

Кроме указанных, могут быть показатели, не имеющие количественного выражения. Например: внешний вид, комфортность при езде, экологическая безопасность, способность к утилизации. Для них может быть использована балльная оценка, сводящая данные показатели к описанным трем типам.

Задача оптимизации будет решенной, если будут выполнены неравенства

$$\begin{aligned} \frac{B_i^{\text{расч}} - B_i^{\text{треб}}}{\Delta B_i} &\leq 1 \quad (i = 1, \dots, m_1) \\ \frac{B_i^{\text{min}}}{B_i^{\text{расч}}} &\leq 1 \quad (i = m_1 + 1, \dots, m_2) \\ \frac{B_i^{\text{расч}}}{B_i^{\text{max}}} &\leq 1 \quad (i = m_2 + 1, \dots, m_3) \end{aligned} \quad (6)$$

Существенно, что условия (6), как правило, выполняются автоматически при надлежащем выборе  $n_i$ , а также допустимых отклонений  $\Delta B_i$  и ограничений  $B_{i \text{ max}}$ ,  $B_{i \text{ min}}$ . Чем больше  $n_i$ , тем ближе  $R$  к нулю внутри области допустимых значений и тем быстрее возрастает за границами этой области.



Для небольших значений  $m_3$  минимум  $R$  находится простым перебором всех возможных вариантов с определенным шагом, не превышающим точность измерения соответствующих показателей. Для числа факторов  $m_3 > 5$  используют различные алгоритмы нахождения минимума функции многих переменных (см., напр., [1, 2]).

Изложенный подход был апробирован на опытном шинном заводе НИИШП [14]. На основе экспертных оценок проведен отбор наиболее важных показателей, характеризующих ТП шинного производства, в том числе показателей, характеризующих свойства резин и резинокордных деталей конструкции шины. Разработаны регрессионные модели, составлены программы для ЭВМ. Для отработки и практической проверки изложенного подхода к контролю и управлению технологическим качеством в рамках автоматизированного шинного производства проведены исследования на участке, включающем процесс заготовки деталей, сборки шин, их вулканизации. Для партии около двухсот шин проведены измерения как показателей ТП, так и критериев их качества. Обработка данных показала, что изложенная методология работоспособна. Выявлены показатели, наиболее сильно влияющие на качество шин. Показана возможность оценки стабильности работы заготовительного и сборочного оборудования. Указаны «узкие» места и пути совершенствования производства с целью управления качеством.

С использованием изложенного метода были решены и другие практические задачи оптимизации, представляющие собой информацию для служебного пользования.

### Литература:

1. Гончаров В.А. Методы оптимизации. М.: Высшее образование, 2009. 191 с.
2. Сухарев А.Г., Тимохов А.В., Федоров В.В. Курс методов оптимизации. Учебное пособие. 2-е изд. М.: Физматлит, 2005. 368 с.
3. Монтгомери Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных: Пер. с англ., Л.: Судостроение, 1980. 384 с.
4. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.
5. Бухин Б.Л. Введение в механику пневматических шин. М.: Химия, 1988. 224 с.
6. Barker B. Quality engineering by design Taguchi's philosophy // Quality Progress. – 1986. December. P. 32–49
7. Калита П.Я. Технология обеспечения качества по обратным связям // Стандарты и качество. 1989. № 1. С. 56–58.
8. ИСО 9000. Общее руководство качеством и стандарты по обеспечению качества. 1987.
9. Соколовская Ф.М., Яшунская Ф.И. Управление качеством продукции резиновой промышленности. М.: Химия, 1982. 156 с.
10. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. М.: Физматлит, 2006. 816 с.
11. Дрейлер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Зарубежные статистические исследования. М.: Статистика, 1973. 392 с.
12. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний. Справочник. М.: Машиностроение, 1985. 232 с.

13. Демидович В.П., Марон И.А. Основы вычислительной математики. М.: Гос. изд-во физ.-мат. литературы. 1969. 660 с.

14. Швачич М.В., Мудрук В.И., Попов В.Ф., Гамлицкий Ю.А., Басс Ю.П. Статистический анализ формирования силовой неоднородности шин // В кн.: Проблемы шин и резинордных композитов. Тринадцатый симпозиум. Т. 2. М., 14–18 окт. 2002 г., с. 141–147.