

ОПТИМАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВА НА ПИВОВАРЕННЫХ ЗАВОДАХ

Шаталова Алевтина Юрьевна

Ассистент, Финансовый университет при
Правительстве РФ
ayshatalova@fa.ru

OPTIMAL PRODUCTION PLANNING AT BREWERIES

A. Shatalova

Summary. The problem of optimal planning at beer production enterprises is considered. Breweries are different from other beverage industries in terms of the long time required for the fermentation process/beer maturation and thereby a large amount of costs. Therefore, minimizing costs and maximizing profits is a top priority. In this paper, we will compare the previously applied improved integer model of linear programming based on a mixed representation of discrete-continuous time and the structure of immediate precedence (GEG), the effectiveness of which has been proven by comparison with the existing integer model of linear programming (BSAM), with the developed parametric α -level method λ -continuation of the problem of fuzzy linear programming to maximize profit. enterprises.

Keywords: optimal production planning, cost optimization, fuzzy linear programming, integer model.

Аннотация. Рассматривается проблема оптимального планирования на предприятиях по производству пива. Пивоваренные заводы в основном отличаются от остальных отраслей производства напитков с точки зрения длительного времени, необходимого для процесса ферментации/созревания пива и тем самым большим объемом издержек. Поэтому минимизация затрат и максимизация прибыли — это первоочередная задача. В этой работе мы сравним примененную ранее усовершенствованную целочисленную модель линейного программирования на основе смешанного представления дискретно-непрерывного времени и структуры непосредственного предшествования (GEG), эффективность которой была доказана путем сравнения с существующей целочисленной моделью линейного программирования (BSAM), с разработанным параметрическим α -уровневым методом λ -продолжения задачи нечеткого линейного программирования, чтобы максимизировать прибыль предприятия.

Ключевые слова: оптимальное планирование производства, оптимизация затрат, нечеткое линейное программирование, целочисленная модель.

Введение

Предлагаемая ранее модель обеспечивает последовательно лучшие решения, и сообщается об улучшениях до 50% [2]. Для решения крупномасштабных проблем и удовлетворения вычислительных ограничений, налагаемых промышленностью, разрабатывается новая стратегия решения на основе целочисленного линейного программирования [1]. В результате создаются оптимальные решения для сложной модели производства пива, состоящей из 30 ферментационных резервуаров, 5 линий розлива и 40 продуктов, которые внедрены в работу греческой пивоварни. Данная модель используется для подтверждения рабо-

тоспособности α -уровневого метода λ -продолжения задачи нечеткого линейного программирования, которая показала свою эффективность на российском предприятии по производству кирпича [3].

С 2015 по 2019 гг. по данным [4] объём предложения пива и пивных напитков на российском рынке снизился на 8,4%, т.е. на 1,0 млрд. л. На снижение показателя повлияло сокращение внутреннего производства пивной продукции в стране (–1,15 млрд. л. за исследуемый

период). Ожидается, что в 2022–2024 гг. будет меняться незначительно. В настоящее время рынки характеризуются возросшей конкуренцией, которая вынуждает отрасли работать с минимальной прибылью. Кроме того, сильное давление затрат приводит к необходимости снижения издержек и сокращению запасов. Особенно в пищевой промышленности и производстве напитков рыночные тенденции характеризуются повышенным и крайне неустойчивым спросом на большое количество высококачественных продуктов. Поэтому более гибкое промышленное производство имеет решающее значение для жизнеспособности и будущего роста всех отраслей промышленности. Целостное совершенствование и управление производственным процессом могут быть достигнуты с помощью эффективного планирования производства. Это важнейший процесс принятия решений, который связан с распределением ограниченных ресурсов (например, оборудования, коммунальных услуг, рабочей силы и т.д.). Также эффективное планирование производства чрезвычайно выгодно для всех отраслей промышленности, поскольку некоторые из вызванных выгод заключаются в повышении производительности, снижении производственных затрат и сокращении потребностей в энергии и отходов. Поэтому систематический способ принятия решений

по планированию и составлению графиков должен быть краеугольным камнем любой компании, которая стремится к достижению экономической и экологической устойчивости.

Цифровизация производства привлекает большое внимание в таких отраслях как пищевая промышленность и производство напитков, химическая промышленность, производство стройматериалов, фармацевтика и т.д. И, как ожидается, будет иметь значительное влияние на то, как работает отрасль. Однако нынешняя промышленная реальность отличается, поскольку в большинстве случаев производственные графики формируются вручную инженерами-технологами и операторами. Процесс принятия решений и, следовательно, качество графиков зависят от правил и эвристики, которые вытекают из опыта инженеров и понимания производственного процесса. Проблемы планирования в реальной жизни чрезвычайно сложны, поскольку они учитывают сложные производственные объекты, которые включают в себя несколько этапов обработки, параллельные машины и производственные маршруты, постоянно расширяющийся ассортимент продукции, коммунальные услуги (например, холодная вода, пар, электричество и т.д.) и многочисленные ограничения. Поэтому ручное составление производственных графиков становится чрезвычайно сложной и утомительной задачей, которая требует на ежедневной основе значительных усилий. В некоторых случаях отрасли используют коммерчески доступные инструменты планирования, чтобы автоматизировать процесс и создавать быстрые и выполнимые производственные графики.

Однако расписания создаются на основе простых эвристик, которые обеспечивают только их осуществимость. Сгенерированные и позже выполненные графики не могут быть оценены с точки зрения их эффективности, поэтому руководители производства не могут оценить истинные потенциальные выгоды, реализованные на заводе. В результате снижается производительность, ресурсы часто используются недостаточно, клиенты недовольны и имеют место значительные потери прибыли, что приводит к снижению конкурентоспособности отраслей.

Внедрение инструментов, основанных на оптимизации, в промышленных задачах может решить эти проблемы, помогая производственным инженерам систематически совершенствовать свои решения, что приведет к важным экономическим, экологическим и социальным выгодам.

Менеджерам и операторам требуются методы, позволяющие оперативно составлять производственные графики. Таким образом, процесс принятия решений может

быть гибким в случае сбоев в производстве, например, поломки оборудования, отмены заказа и т.д. Более того, решения для планирования могут быть использованы для проведения анализа «что, если», который часто дает важные управленческие идеи.

В работе [1] авторы добились сокращения переналадок, повысив общую производительность завода. Георгадис и др. предложили трехэтапное решение для планирования, основанное на агрегированной модели целочисленного линейного программирования (GEG). Главной целью моделирования была максимизация прибыли.

Основным вкладом этой работы является разработка нового подхода к решению задачи оптимального планирования производства на пивоваренных заводах с использованием параметрического α -уровневого метода λ -продолжения задачи нечеткого линейного программирования. Приводятся доказательства эффективности данной модели по сравнению с использованной ранее моделью (GEG) на основе смешанного представления дискретно-непрерывного времени и структуры непосредственного предшествования.

Постановка задачи

Производство пива — это сложный процесс, состоящий из множества этапов производства с использованием многочисленных общих ресурсов.

Пивоваренную промышленность, как и большинство предприятий пищевой промышленности и производства напитков, можно описать как предприятие по производству и упаковке, где на начальных этапах сырье обрабатывается на основе заданного производственного рецепта, а затем упаковывается в желаемую конечную форму. Для эффективного решения проблемы оптимального планирования производства и планирования пивоваренных заводов явно моделируются только процессы, которые являются основными узкими местами производства.

Рассматриваемую проблему можно формально сформулировать следующим образом.

Дано:

- ◆ Горизонт планирования, разделенный на набор временных периодов.
- ◆ Набор резервуаров для ферментации/созревания и набор линий розлива.
- ◆ Набор жидкостей, которые необходимо подготовить, и набор конечных продуктов, которые должны быть произведены в пределах данного горизонта.

Таблица 1. Основные проектные характеристики рассмотренных тематических исследований.

	Резервуары	Линии	Жидкости	Продукты
Случаи 1.	3	1	1	5
Случаи 2.	3	1	2	10
Случаи 3.	2	2	2	10
Случаи 4.	4	2	3	15
Случаи 5.	8	2	3	15
Случаи 6.	8	3	4	20
Случаи 7.	10	4	5	25

Таблица 2. Сравнение моделей BSAM и GEG.

№ случая	BSAM	GEG
	Результирующие значения	
1.A	11177	10067
1.B	5083	5080
1.C	10232	10234
1.D	16885	16555
2.A	247461	203674
2.B	59074	52274
2.C	14874	14662
2.D	1060844	929332
...		
7.A	6916373	5541703
7.B	40177	451862
7.C	339429	154366
7.D	10446975	6858949

- ◆ Многомерное множество, которое обозначает, содержит ли текущий продукт выбранную жидкость.
- ◆ Набор сопоставлений, определяющий набор продуктов, которые могут быть обработаны на линии розлива.
- ◆ Все параметры, связанные с производством, в частности, спрос, время приготовления жидкости, скорость заполнения для каждого конечного продукта, емкость каждого резервуара и количество жидкости требуется для одной единицы продукта.
- ◆ Зависящая от последовательности настройка для очистки и/или смены оборудования всякий раз, когда происходит переключение производства между двумя конечными продуктами.
- ◆ Каждая задача переключения требует определенного времени.
- ◆ Коэффициенты затрат, связанные с запасами, отставанием и операциями переключения.

Определить:

- ◆ Планировочные решения для этапа подготовки жидкости. Более конкретно, определить опера-

ции наполнения и опорожнения в каждом резервуаре, а также материальный баланс (количество готовой жидкости) в каждом резервуаре.

- ◆ Количество жидкости, которое передается из каждого резервуара в каждую линию розлива.
- ◆ Распределение продуктов по линиям наполнения, а также последовательность между продуктами в каждой линии и время выполнения каждой операции наполнения.
- ◆ Объемы производства конечной продукции, а также товарные запасы и запасы.

Модель GEG [1] используется для решения различных случаев, представляющих собой комплексные задачи планирования и планирования пивоваренных предприятий малого и среднего размера. Было проведено в общей сложности 28 тестовых примеров, которые можно разделить на 7 групп в зависимости от различного количества линий, резервуаров, жидкостей и продуктов (таблица 1).

Чтобы оценить качество сгенерированных производственных планов, решения GEG сравнивались с решениями, сгенерированными моделью BSAM [2], которая

Таблица 3. Параметрический α -уровневый метод λ -продолжения задачи нечёткого линейного программирования.

Вид целевой функции	Вид ограничений
$fL(z) = \lambda(c^T x)_\alpha^L + (1 - \lambda) \cdot (c^T x)_\alpha^R \rightarrow \min(\max)$	$\lambda(Ax)_\alpha^L + (1 - \lambda) \cdot (Ax)_\alpha^R \leq \lambda b_\alpha^R + (1 - \lambda) \cdot b_\alpha^L$
$fR(z) = \lambda(c^T x)_\alpha^R + (1 - \lambda) \cdot (c^T x)_\alpha^L \rightarrow \min(\max)$	



Рис. 1. Схема работы программы оптимизации задачи нечеткого линейного программирования параметрического метода продолжения (POFLPP)

была создана для решения подобной задачи оптимизации (таблица 2). Для каждой группы изучаются 4 альтернативных тестовых примера, которые различаются с точки зрения остальных производственных характеристик, таких как соотношение спроса (размер заказов и сроки выполнения), время обработки, время переналадки и коэффициенты затрат. Сравнивая значения столбцов можно заметить последовательные улучшения, которые привносит модель GEG.

Все используемые данные в модели [1] являлись детерминированными, и поэтому не рассматривался какой-либо тип неопределенности. Тем не менее, на практике не всегда входные данные точно определены, так при решении оптимизационных задач значения коэффициентов, определяемые экспертами, могут быть известны лишь приближённо [3]. Традиционно, небольшие, измеримые долями процента неточности в исходных данных просто игнорируются, и задача решается при упрощенных значениях. Такие приближения могут повлиять на конечный результат чувствительных задач, показывая неверное оптимальное значение или пустое множество решений.

Чтобы входные параметры в задачах линейного программирования учитывали неточности входящих значений, такие данные могут быть взяты в виде нечетких чисел.

Параметрический α -уровневый метод λ -продолжения задачи нечёткого линейного программирования

В работе [3] представлен метод нечёткой линейной оптимизации, позволяющий находить оптимальные решения задач линейного программирования с коэффициентами в виде нечётких чисел LR-типа путём сведения их к параметрическим задачам линейного программирования, алгоритм которого реализован в программе POFLPP (рис. 1).

С помощью выбора λ можно оценить уровень влияния фактора отношения LR – RL. Ясно, что задавая промежуточные значения λ в промежутке от нуля до единицы, получим возможность влиять на характеристики задачи нечеткого линейного программирования (ЗНЛП): разрешимость, устойчивость, чувствительность к изменению параметров.

Похожий подход сведения задачи нечеткого линейного программирования используется и в работе [5]. За исключением того, что входные нечетких параметры преобразуются на входе в числа нового типа LL/RR-числа и результатом является линейная комбинация решения с $\alpha=0$ и $\alpha=1$ без учета значений функций принадлежности, что приводит к более компактной записи, но лишает лицо принимающее влиять на характеристики ЗНЛП.

Таблица 4. Затраты каждого ресурса на изготовление единицы продукции и цена единицы продукции.

	П1	П2	П3	П4	Объем
P1	8	10	8	10	3600
P2	4	7	4	6	1850
P3	4	3	3	5	1500
Цена	25	30	40	35	

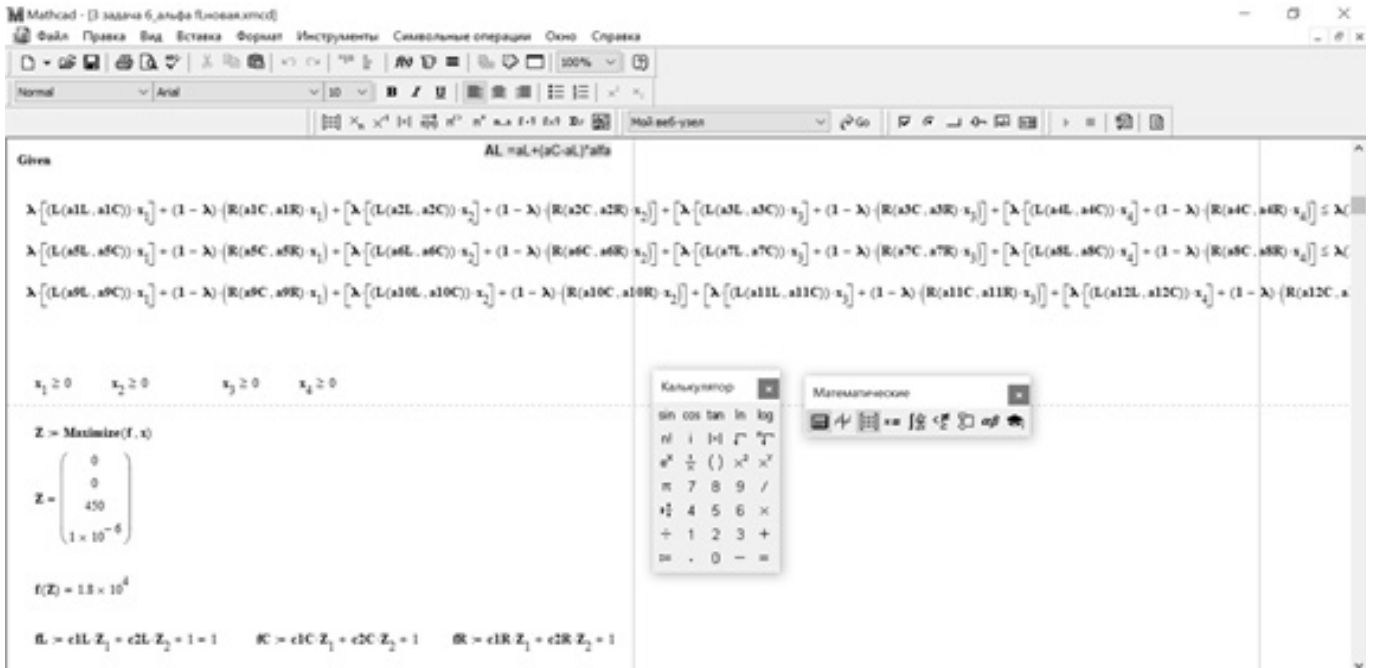


Рис. 2. Скриншот программы POFLPP

Проверим достоверность методики [3] и уравнений таблицы 3, решив задачу планирования производства [6], используя данные задачи с «четко» представленными методами.

Пример.

Предприятие планирует выпускать четыре вида продукции. Объемы ресурсов трех видов (в расчете на трудовую неделю), затраты каждого ресурса на изготовление единицы продукции и цена единицы продукции приведены в таблице 4. Найти, сколько продукции и какого вида необходимо производить, чтобы общая выручка от реализации всей выпущенной продукции была бы наибольшей.

Обозначим через x_1, \dots, x_4 число изготавливаемых продуктов. Тогда условие задачи может быть записано в следующем виде:

$$25x_1 + 30x_2 + 40x_3 + 35x_4 \rightarrow \max$$

$$\begin{aligned} 8x_1 + 10x_2 + 8x_3 + 10x_4 &\leq 3600 \\ 4x_1 + 7x_2 + 4x_3 + 6x_4 &\leq 1850 \\ 4x_1 + 3x_2 + 3x_3 + 5x_4 &\leq 1500 \\ x_1 &\geq 0 \\ x_2 &\geq 0 \\ x_3 &\geq 0 \\ x_4 &\geq 0 \end{aligned}$$

Решение, полученное в результате работы программы POFLPP [3] аналогично решению симплекс-методом [6] и говорит о том, что необходимо выпускать 450 единиц продукции третьего вида, чтобы выручка была максимальной и составляла 18 тысяч.

Теперь, если мы заменим входные показатели на нечеткие, представив их в виде треугольных чисел по примеру $a_j = (24, 25, 26)$, то при изменении значений α и λ в диапазоне $[0, 1]$ лицо принимающее решение сможет наблюдать за устойчивостью полученных решений, выбирая приемлемый уровень неопределенности.

Таблица 5. Зависимость оптимального решения от значений α и λ

α	0	0,2	0	0,5	0,2	0,5	0,8	0,5	1
λ	0	0	0,2	0,2	0,5	0,5	0,5	0,8	1
$fL(z)$	14350	15040	15630	16970	17640	17780	17910	18480	18000
$fR(z)$	14720	15270	16040	16970	17910	17780	17640	18480	17550

Таблица 6. Затраты каждого ресурса на изготовление единицы продукции и цена единицы продукции

	П1	П2	П3	П4	П5	Затраты на накопление запасов
T1	0,012	0,013	0,014	0,15	0,4	1,2
T2	0,1	0,12	0,13	0,14	0,15	16,5
T3	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45	45
Спрос на конечную продукцию	60	345	123460	189030	256710	

Достоверность методики подтверждается сохранением естественных отношений между компонентами нечетких решений. Это исключает сравнение методики с известными аналогами, которые не обеспечивают указанные свойства решений [3].

Оптимальное планирование производства на пивоваренных заводах

Применим параметрический α -уровневый метод λ -продолжения задачи нечеткого линейного программирования к задаче [1].

Коэффициент стоимости запасов для каждого продукта за один период времени определяется из [0,012, 0,45], в то время как коэффициент затрат на накопление запасов (стоимость невыполненных работ) устанавливается равным стократному коэффициенту стоимости запасов, поскольку приоритетом является удовлетворение потребностей клиентов до начала установленных сроков [1]. Спрос на конечную продукцию по количеству позиций находится в интервале [60, 256710]. Предприятие планирует выпускать пять видов продукции (таблица 1) и использовать 3 резервуара. Медианы треугольных нечетких чисел стоимости запасов, спроса на конечную продукцию и цены единицы продукции приведены в таблице. Найти, сколько продукции и какого вида необходимо производить, чтобы общий спрос от реализации всей выпущенной продукции был бы наибольшим.

Обозначим через $y_1 \dots y_3$ число изготавливаемых продуктов. Тогда условие задачи может быть записано в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 f(z) &= 1,2y_1 + 345y_2 + 12346y_3 \rightarrow \min \\
 0,012y_1 + 0,1y_2 + 0,41y_3 &\leq 60 \\
 0,013y_1 + 0,12y_2 + 0,42y_3 &\leq 345 \\
 0,014y_1 + 0,13y_2 + 0,43y_3 &\leq 123460 \\
 0,15y_1 + 0,14y_2 + 0,44y_3 &\leq 189030 \\
 0,4y_1 + 0,15y_2 + 0,45y_3 &\leq 256710 \\
 y_1 &\geq 0 \\
 y_2 &\geq 0 \\
 y_3 &\geq 0
 \end{aligned}$$

Минимальные затраты на накопление запасов $f(z)=9901$ при $\alpha=0$ и $\lambda=0$ при условии использования второго резервуара получены с помощью программы POFLPP. Из таблицы №2 это случай 1А – значение модели GEG равно 10067, тогда как BSAM 11177, результат применения параметрического α -уровневого метода λ -продолжения задачи нечеткого линейного программирования на 9% лучше усовершенствованного плана GEG.

Выводы

Итак, результатом данной работы является сравнение существующей усовершенствованной модели оптимального планирования производства пива с параметрическим α -уровневым методом продолжения задачи нечеткого линейного программирования (ПНЛП). На примере приводятся доказательства эффективности данной модели по сравнению с использованной ранее моделью (GEG) на основе смешанного представления дискретно-непрерывного времени и структуры непосредственного предшествования. Данный подход ПНЛП также позволяет использовать нечетко заданные входные параметры представимые в виде треугольных нечетких чисел.

ЛИТЕРАТУРА

1. Georgios P. Georgiadis, Apostolos P. Elekidis, Michael C. Georgiadis., 2021. Optimal production planning and scheduling in breweries. 125. 204–22.
2. Baldo, T.A., Santos, M.O., Almada-Lobo, B., Morabito, R., 2014. An optimization approach for the lot sizing and scheduling problem in the brewery industry. *Comput. Ind. Eng.* 72 (1), 58–71.
3. Шаталова А.Ю. Нечеткое моделирование в задачах оптимального инвестирования в условиях неопределенности / Шаталова А.Ю., Лебедев К.А. // Монография / Москва, 2020.
4. *BusinesStat*. Готовые обзоры рынков [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://businesstat.ru>, свободный. — Загл. с экрана. — Яз. рус., англ.
5. Матвеев М.Г. Анализ и решение задач выбора с параметрической нечеткостью / М.Г. Матвеев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование» (Вестник ЮУрГУ ММП). 2015. Т. 8, № 4. С. 14-29.
6. Учебный курс. Экономика для студентов. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://profmeter.com.ua/communication/learning/course/course8/lesson187/>, свободный. — Загл. с экрана. — Яз. рус., англ.

© Шаталова Алевтина Юрьевна (ayshatalova@fa.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»