ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ

Р 1323565.1.002 — 2017

Статистические методы

ИЛЛЮСТРАЦИИ ПОЛНОГО ФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА С ЧЕТЫРЬМЯ ФАКТОРАМИ

(ISO/TR 29901:2007, Selected illustrations of full factorial experiments with four factors, MOD)

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2017

Предисловие

1 ПОДГОТОВЛЕНЫ Открытым акционерным обществом «Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем» (АО «НИЦ КД») на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии международного документа, указанного в пункте 4

2 ВНЕСЕНЫ Техническим комитетом по стандартизации ТК 125 «Применение статистических методов»

3 УТВЕРЖДЕНЫ И ВВЕДЕНЫ В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10 августа 2017 г. № 862-ст

4 Настоящие рекомендации являются модифицированными по отношению к международному документу ISO/TR 29901:2007 «Избранные иллюстрации полного факторного эксперимента с четырьмя факторами» (ISO/TR 29901:2007 «Selected illustrations of full factorial experiments with four factors», MOD), путем внесения технических отклонений, указанных во введении к настоящим рекомендациям.

Наименование настоящих рекомендаций изменено относительно наименования указанного международного документа для приведения в соответствие с ГОСТ Р 1.5—2012 (пункт 3.5)

5 ВВЕДЕНЫ ВПЕРВЫЕ

Правила применения настоящих рекомендаций установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящим рекомендациям публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящих рекомендаций соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (www.gost.ru)

© Стандартинформ, 2017

Настоящие рекомендации не могут быть полностью или частично воспроизведены, тиражированы и распространены в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины и определения 2
4 Обозначения и сокращения 2
5 Общее описание планов полного факторного эксперимента 3
6 Описание приложений А—Е 5
Приложение А (справочное) Эксперимент с брусками припоя 7
Приложение В (справочное) Прямая почтовая рассылка в ходе маркетинговой кампании 14
Приложение С (справочное) Использование тактильной кнопки 21
Приложение D (справочное) Оптимизация состава ПВХ 29
Приложение Е (справочное) Генетические алгоритмы анализа последовательности ДНК 37
Библиография 44

Введение

В настоящих рекомендациях установлен один конкретный статистический метод (полный факторный эксперимент с четырьмя факторами, план эксперимента типа 2^4) и соответствующие общие положения (что соответствует подходу, принятому в международном сообществе), а также детально рассмотрено пять различных ситуаций применения данного плана эксперимента. Описание полного факторного эксперимента сконцентрировано на общности всех планов эксперимента типа 2^4. Более общее рассмотрение полного факторного эксперимента проводят для произвольного числа факторов, но в настоящих рекомендациях количество факторов было выбрано равным четырем. В приложениях приведены пять иллюстраций планов эксперимента типа 2^4, в качестве примеров основной структуры эксперимента, а также особенностей конкретного применения этого плана. В каждом примере предложен по крайней мере один подход к решению проблемы, которую обычно решают методом «Шесть сигм». Таким образом, по крайней мере один из пяти примеров может быть применен в организациях, сотрудники которых прошли обучение методологии «Шесть сигм». Каждый из пяти примеров разработан и проанализирован с помощью программных средств обработки данных. Изложение материала лишено математических деталей, такие детали могут быть получены из многочисленных книг по разработке и анализу планирования экспериментов (см. библиографию).

В настоящих рекомендациях исключен раздел «Нормативные ссылки» примененного международного документа.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ

Статистические методы

ИЛЛЮСТРАЦИИ ПОЛНОГО ФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА С ЧЕТЫРЬМЯ ФАКТОРАМИ

Statistical methods. Illustrations of the full factorial experiment with four factors

Дата введения — 2018—12—01

1 Область применения

В настоящих рекомендациях приведено описание этапов анализа и применения полного четырехфакторного эксперимента 2^4, а также примеры, относящиеся к пяти различным вариантам применения данной методологии.

В зависимости от особенностей применения, эксперимент может содержать более четырех факторов.

Примечание 1 — В каждом из пяти приведенных примеров применены необходимые средства разработки эксперимента. Отмечены другие составляющие общности примеров (например, цель изучения, два уровня факторов, переменная(ые) отклика, факторы, воздействующие на отклик). Некоторые примеры имеют явно выраженные характерные особенности, такие как наличие или отсутствие возможности повторения, центральные точки, взаимодействие, или вид переменных отклика. Каждый пример характеризуется своей сферой применения, такой как маркетинг, программное обеспечение, промышленное производство, телекоммуникации и химическая обработка.

Примечание 2 — В настоящих рекомендациях выбор четырех факторов с двумя уровнями (в стороне от центральных точек) был сделан заранее. Кроме того детальная разработка планов поверхностей отклика, как и последующее дополнение существующих планов, исключено из настоящих рекомендаций, хотя их использование прослеживается в некоторых примерах. Также в рекомендациях не рассматриваются планы по Тагучи и блочные планы.

Примечание 3 — Полный факторный эксперимент часто используют отдельные сотрудники организации (называемые специалистами «черного пояса» или «зеленого пояса»), применяющие методологию «Шесть сигм». Эта методология с поиском решения проблем и непрерывным улучшением. Полный факторный эксперимент с четырьмя факторами — один из многих планов эксперимента, применяемых организациями, внедряющими методологию «Шесть сигм», до настоящего времени не рассмотренных в международных стандартах ИСО.

2 Нормативные ссылки

В настоящих рекомендациях использована нормативная ссылка на [1].

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений, если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного положения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

Издание официальное

3 Термины и определения

В настоящих рекомендациях применены термины по [1], а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **дисперсионный анализ ANOVA** (analysis of variance, ANOVA): Метод статистического анализа данных, разделяющий общую вариацию набора данных на имеющие смысл компоненты, связанные с конкретными источниками вариации.

3.2 **биномиальное распределение** (binomial distribution): Распределение вероятностей дискретной случайной величины с функцией вероятностей

$$P(X = x) = \frac{n!}{x!(n-x)} p^x (1-p)^{n-x},$$

где $x = 0,1,\ldots,n$ с параметрами $n = 1,2,\ldots,$ и $0 < p < 1$.

3.3 **блок** (block): Множество экспериментальных единиц, обладающих большей однородностью, чем множество всех экспериментальных единиц.

3.4 **центральная точка** (centre point): Вектор заданных уровней факторов в виде (a_1 ,a_2, ..., a_k) где каждое a_i равное 0 означает кодированные уровни факторов.

3.5 **матрица плана** (design matrix): Матрица со строками, означающими индивидуальные обработки (возможно измененные в соответствии с предполагаемой моделью), которые могут быть расширены выведенными уровнями других функций от уровней факторов (взаимодействие, квадратичные члены и т. д.).

3.6 **фактор** (factor): Предсказывающая переменная, варьируемая с целью определения ее влияния на отклик.

3.7 **полный факторный эксперимент** (full factorial experiment): Эксперимент, состоящий из всех возможных обработок, образованных двумя или более факторами, каждый из которых изучают на двух или более уровнях.

3.8 **взаимодействие** (interaction): Ситуация, когда проявленное влияние одного фактора на отклик зависит от других факторов, одного или более.

3.9 **уровень** (level): Потенциальная установка, значение или назначение фактора.

3.10 **нормальное распределение** (normal distribution): Распределение вероятностей непрерывной случайной величины с функцией плотности вероятностей

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)}{2\sigma^2}\right\},$$

где $-\infty < x < \infty$ и параметр $-\infty < \mu < \infty$ и $\sigma > 0$.

3.11 **предсказывающая переменная** (predictor variable): Переменная, которая может помочь объяснить результат эксперимента.

3.12 **рандомизация** (randomization): Процесс, используемый для назначения обработок экспериментальным единицам, такой, чтобы для каждой экспериментальной единицы вероятность назначения определенной обработки была одинаковой.

3.13 **реплика** (replication): Выполнение эксперимента более одного раза для данного набора предсказывающих переменных.

3.14 **план с расщепленной делянкой** (split-plot design): План, в котором группа экспериментальных единиц или делянка с одним и тем же вариантом главного фактора, расщеплена таким образом, что внутри каждого варианта этого фактора можно исследовать еще дополнительные главные факторы.

4 Обозначения и сокращения

В настоящих рекомендациях использованы следующие обозначения и сокращения:

y	—	отклик;
A, B, C, D	—	факторы;
AB, AC, AD, BC, BD, CD	—	двухстороннее взаимодействие;
ABC, ACD, BCD	—	трехстороннее взаимодействие;

ABCD — четырехстороннее взаимодействие;

+1/−1 — верхняя и нижняя установки;

2^4 — четыре фактора, где каждый фактор имеет два уровня;

σ — стандартное отклонение.

5 Общее описание планов полного факторного эксперимента

5.1 Обзор структуры примеров четырех-факторных экспериментов, представленных в приложениях А—Е

В настоящих рекомендациях представлены общие принципы разработки, внедрения и анализа планов двухуровневых полных факторных экспериментов, а также примеры (см. приложения А—Е) пяти различных применений таких планов. Каждый из пяти примеров структурирован в соответствии с этапами разработки плана эксперимента, представленными в таблице 1.

Таблица 1 — Основные этапы разработки плана эксперимента

1	Установление общих целей эксперимента
2	Описание отклика (откликов)
3	Составление перечня факторов, которые могут влиять на отклик(и)
4	Выбор плана «полного» факторного эксперимента
5	Анализ результатов — Числовые сводки и графическое отображение
6	Представление результатов
7	Подтверждение результатов

5.2 Общие цели эксперимента

Причины проведения эксперимента могут быть различными. Основная мотивировка проведения эксперимента должна быть обоснована и согласована со всеми сторонами, принимающими участие в разработке, внедрении и анализе эксперимента. Могут иметь место второстепенные цели, связанные с полным факторным экспериментом.

Окончательный результат эксперимента может быть использован для непосредственного воздействия на уровни фактора или получения предсказывающей модели, что предписывают некоторые детали анализа.

5.3 Отклики

Измеримый выход или результат измерений связан с целью эксперимента. Исследуемый отклик может включать максимизацию (если большие значения являются предпочтительными), минимизацию (если меньшие значения являются предпочтительными) или достижение целевого значения (если предпочтительными являются значения близкие к целевым). Отклик (обозначаемый далее y) должен быть непосредственно связан с целью эксперимента. В некоторых ситуациях необходимо определение некоторого набора характеристик (откликов), хотя, как правило, рассматривают один отклик, связанный с экспериментом. Для целей, представленных в данных рекомендациях, в каждом примере рассмотрен один отклик, хотя имеют место случаи, где должно быть рассмотрено несколько откликов.

5.4 Факторы, влияющие на отклик

Отклик может зависеть некоторым неизвестным образом от разнообразных, возникающих или устанавливаемых для его получения условий. Допускается связь данных условий с контролируемыми факторами эксперимента, которые могут быть непрерывными (температура, концентрация) или дискретными (две линии сборки, два поставщика, два способа упаковки и т. д.). Для экспериментов 2^4 в настоящем документе упрощен процесс разработки плана эксперимента путем выделения двух уровней для каждого варьируемого в эксперименте фактора. Для дискретных факторов с двумя возможными установками, уровни фактора как раз являются этими двумя установками. Для непрерывных факторов

существует возможность выбора двух конкретных значений. В некоторых случаях этими установками могут быть: значение, полученное из предшествующего опыта или предполагаемое значение. В других случаях, двумя установками могут быть номинальные скорректированные значения, полученные из прошлого опыта. В любом случае установки должны быть подвергнуты анализу на предмет того, являются ли они приемлемыми для применения. Установку уровней непрерывных факторов полезно проводить при участии в эксперименте эксперта в соответствующей области.

На отклик могут воздействовать некоторые дополнительные факторы, но они могут быть признаны менее значимыми, чем, выбранные четыре фактора или их контроль может быть слишком сложным или дорогостоящим. Факторы должны быть установлены независимо друг от друга. Однако, возможна ситуация в которой существует взаимное влияние факторов (установка одного фактора влияет на то, как второй фактор воздействует на отклик).

5.5 «Полный» факторный план

Классический план состоит из шестнадцати обработок, полученных путем рассмотрения всех комбинаций из четырех факторов при двух уровнях каждого. В таблице 2 представлена основная схема, имеющая для удобства понимания стандартный порядок строк. В каждой строке таблицы представлен один набор экспериментальных условий, в которых отклик получает определенное значение. Четыре фактора обозначены как A, B, C и D. Для каждого фактора уровень «–1» является «нижней» установкой или одним из двух уровней, если фактор категориальный. Уровень «+1» является «верхней» установкой или вторым из двух уровней, если фактор категориальный. Столбец, озаглавленный «*y*» заполняют полученными в эксперименте значениями отклика.

Эксперимент должен быть проведен 16 раз при четком соблюдении заданных условий. В таблице 2 приведен пример случайного порядка следования экспериментальным условиям. Не следует использовать стандартный порядок следования этим условиям (например, возрастающий тренд значений отклика *y* может быть рассмотрен как влияние на отклик фактора D). Последние два столбца таблицы содержат сокращенные имена для обозначения 16 обработок. Первое имя описывает обработки с помощью знаков «+» или «–», при этом уровни факторов заданы в соответствии с порядком следования факторов ABCD. Второе имя состоит из букв нижнего регистра, соответствующих высокому уровню фактора. Имя, состоящее из четырех факторов, имеющих нижний уровень, условно обозначено «(1)», чтобы избежать имени, состоящего из пустого множества символов.

Таблица 2 — Общая схема плана полного факторного эксперимента 2^4

Номер строки	A	B	C	D	*y*	Порядок выбора обработки	Имя обработки	Альтернативное имя обработки
1	–1	–1	–1	–1	y_1	6	– – – –	(1)
2	+1	–1	–1	–1	y_2	14	+ – – –	a
3	–1	+1	–1	–1	y_3	4	– + – –	b
4	+1	+1	–1	–1	y_4	11	+ + – –	ab
5	–1	–1	+1	–1	y_5	9	– – + –	c
6	+1	–1	+1	–1	y_6	2	+ – + –	ac
7	–1	+1	+1	–1	y_7	3	– ++ –	bc
8	+1	+1	+1	–1	y_8	1	+ + + –	abc
9	–1	–1	–1	+1	y_9	8	– – – +	d
10	+1	–1	–1	+1	y_{10}	13	+ – – +	ad
11	–1	+1	–1	+1	y_{11}	7	– + – +	bd
12	+1	+1	–1	+1	y_{12}	10	+ + – +	abd
13	–1	–1	+1	+1	y_{13}	15	– – + +	cd
14	+1	–1	+1	+1	y_{14}	16	+ – + +	acd
15	–1	+1	+1	+1	y_{15}	5	– + + +	bcd
16	+1	+1	+1	+1	y_{16}	12	+ + + +	abcd

В ситуации, где все четыре фактора непрерывные (количественные) могут быть выбраны дополнительные «центральные» точки. Уровни центральных точек получают как средние точки двух уровней каждого фактора. Включение центральных точек облегчает статистический анализ отклика, путем использования в качестве ориентира вариабельности отклика в центральных точках.

В ситуации, где варьирование уровней некоторого фактора является дорогостоящим или сложным для выполнения, эксперимент может быть проведен «блоками», где один блок используют для каждого уровня трудно исследуемого фактора.

Последняя ситуация имеет отношение к репликам условий плана. Многократные реплики каждой экспериментальной серии позволяет использовать статистический анализ для оценки общей внутренней изменчивости.

5.6 Анализ результатов. Числовая сводка и графическое отображение

После завершения эксперимента, обозначенные в таблице 2 отклики y_i, заменяют значениями, полученными в эксперименте. Многие существующие пакеты статистической обработки данных позволяют облегчить понимание результатов эксперимента. Интерес вызывает определение воздействия каждого из четырех факторов на отклик. Таким образом, оценивают главные эффекты факторов A, B, C и D также как и их взаимодействие:

- двухстороннее: AB, AC, AD, BC, BD, CD;
- трехстороннее: ABC, ABD, ACD, BCD;
- четырехстороннее: ABCD.

В дополнение к фактическим оценкам, рекомендуется расположить упорядоченные в убывающем порядке оценки эффектов на диаграмме Парето. Для обнаружения существенных эффектов, эффекты могут быть нанесены на график нормальной или полунормальной вероятности. Ошибка опыта может быть оценена непосредственно. В зависимости от включения центральных точек или реплик, также определяют стандартную ошибку воздействий. При отсутствии прогонов эксперимента, ошибка опыта может быть оценена косвенно в предположении о том, что трехсторонние и четырехсторонние взаимодействия пренебрежимо малы. При анализе результатов эксперимента также рассматривают графики эффектов, графики взаимодействий и графики остатков. Сказанное выше проиллюстрировано в приложениях A—E.

5.7 Представление результатов

Часто, целью эксперимента является разработка предсказывающей модели, используемой для исследования альтернативных настроек факторов. Во многих пакетах статистической обработки данных используют для анализа контурные графики. Кроме того, для предсказывающей модели требуется предварительное определение оптимальных настроек. Предсказывающая модель представляет собой функцию (обычно линейную) оцененных эффектов и возможных взаимодействий. Дополнительные математические модели могут включать в себя анализ остатков (остаток вычисляют как прогнозируемое значение минус полученное значение).

5.8 Подтверждение результатов

Последующие эксперименты могут подтвердить пользу проведения 2^4 эксперимента в разных условиях. Естественным дополнением эксперимента может быть определение настроек факторов для улучшения представления отклика.

6 Описание приложений A—E

6.1 Сравнение и сопоставление примеров

В приложениях A—E представлены пять различных примеров полных факторных экспериментов 2^4. Каждый из пяти примеров содержит этапы, представленные в таблице 1 и версию стандартного плана эксперимента 2^4, представленную в таблице 2.

6.2 Краткое представление эксперимента

В таблице 3 приведено краткое представление примеров, детально рассмотренных в приложениях, а также указаны особенности каждого примера.

Таблица 3 — Краткое представление примеров, рассмотренных в приложениях A—E

Приложение	Наименование эксперимента	Специфические особенности
A	Эксперимент с брусками припоя	Композиция дискретных и непрерывных факторов; повторения; важные двусторонние взаимодействия
B	Прямая почтовая рассылка в ходе маркетинговой кампании	Пропорциональность переменной отклика; биномиально распределенные стандартные ошибки
C	Эксперимент с тактильной кнопкой	Центральные точки; кривизна отклика
D	Оптимизация состава ПВХ	Расщепленные делянки; центральные точки; контурные графики
E	Генетические алгоритмы	Отсутствие необходимости рандомизации; установки для предварительных исследований; реплики; воздействие рассеяния

Приложение А
(справочное)

Эксперимент с брусками припоя[1)]

А.1 Общие сведения

Материал, применяемый при пайке (припой) может быть выпущен в различных формах. Одна из обычных форм — бруски твердого припоя. Бруски, поступающие в продажу, имеют массу 0,5 кг, 1,0 кг и 2,0 кг.

А.2 Основная цель эксперимента

Изготовление брусков припоя было перенесено на новую площадку, что, впоследствии привело к тому, что на нижней стороне брусков образовалось большое количество изъязвлений (небольших ямок и неровностей поверхности бруска). Данная ситуация породила многочисленные претензии потребителей, полагающих, что внешний вид поверхности бруска обусловлен несоответствующим стандартам качеством припоя. Количество обнаруженных изъязвлений на одном бруске припоя в среднем составляло 30 единиц.

Используемый материал в течение нескольких месяцев был подвергнут различным однофакторным экспериментам, ни один из которых не привел к таким улучшениям, которые позволили бы считать проблему претензий потребителей решенной. Было принято решение разработать и провести эксперимент, позволяющий выявить факторы, влияющие на возникновение дефекта и организовать управление процессом так, чтобы минимизировать количество изъязвлений на поверхности бруска припоя.

А.3 Описание процесса

Бруски припоя производят путем заполнения расплавленным припоем специальных форм, выбираемых в соответствии с требуемой массой изготовляемого бруска.

Заготовки для припоя сначала расплавляют в электрической печи при температуре около 290 °С. Далее, жидким припоем заполняют специальный «чайник» из которого затем припой разливают в нужные формы. Чайник похож на кухонный чайник, но снабжен дополнительными носиками, что дает возможность одновременного заполнения нескольких форм.

При отливке брусок переворачивают, его нижнюю часть формируют в последнюю очередь, таким образом, она является верхней, подверженной атмосферному воздействию поверхностью. Формы располагают в ряд на столе с интегрированной системой водоохлаждения, которая может быть как включенной, так и выключенной. Перед отливкой формы могут быть «закопчены». Для этого наносят слой углерода ацетиленокислородной горелкой.

После короткого периода, в течение которого бруски затвердевают, их извлекают из формы, укладывают и упаковывают.

А.4 Переменная отклика

А.4.1 Выбор переменной

В качестве переменной отклика выбрано среднее арифметическое количества изъязвлений, обнаруженных на поверхности брусков припоя. Цель исследований состоит в минимизации количества изъязвлений.

А.4.2 Измерение отклика

В каждом прогоне эксперимента было произведено приблизительно 160 брусков припоя. При каждом прогоне эксперимента подсчитывают количество изъязвлений на каждом бруске и определяют среднее арифметическое количества изъязвлений на данном бруске. Это значение является результатом прогонки эксперимента.

А.4.3 Связь отклика с целью эксперимента

Среднее арифметическое количества изъязвлений на бруске непосредственно связано с целью эксперимента.

А.5 Факторы, влияющие на отклик

А.5.1 Описание каждого варьируемого фактора (непрерывного или дискретного)

Факторы, варьируемые в эксперименте, выбраны в соответствии со сведениями, предоставленными операторами процесса производства брусков припоя и техническим персоналом. Этими факторами являются:

A: температура отливки расплавленного припоя;

B: включенная или отключенная система водоохлаждения;

C: скорость наполнения расплавленным припоем формы для изготовления бруска;

D: наличие или отсутствие предварительной «закопченности» формы для заливки расплавленным припоем.

Для данных четырех факторов, где каждый фактор имеет два уровня, был разработан и проведен эксперимент.

Фактор А является фактором, для которого может быть установлено любое значение. Фактор С теоретически может варьироваться как непрерывная переменная. Однако, на практике фактор С описывают как категориальный фактор, при этом считают, что скорость принадлежит одной из двух категорий: «нормальная» или «максимальная».

[1)] Пример представлен Cookson Electronics (Fry's Metals Glasgow).

Два других фактора являются категориальными. Фактор B — водоохлаждение может принимать значения «включена» или «выключена». Фактор D — наличие или отсутствие предварительной «закопченности» формы может принимать значения «есть» или «нет».

А.5.2 Выбор уровней (связанных с объемом определяемого воздействия)

Используемые в эксперименте факторы и связанные с ними уровни представлены в таблице А.1.

Таблица А.1 — Факторы и связанные с ними уровни

Фактор	Уровень 1	Уровень 2
A: Температура отливки	260	320
B: Система водоохлаждения	выключена	включена
C: Скорость наполнения формы	нормальная	максимальная
D: «Закопченность» формы	нет	есть

В качестве температур отливки выбраны температуры, являющиеся экстремальными в процессе производства брусков припоя. Процесс отбора температур происходил при участии технического персонала и специалистов по металлургии.

Уровни других факторов были рассмотрены как дискретные, например, «вкл.» или «выкл.».

До проведения эксперимента, не было известно, имеют ли выбранные факторы какое-либо воздействие на отклик, и, таким образом, данный эксперимент может рассматриваться как «исследовательский анализ». Представленное заключение технических экспертов состоит в том, что выбранные факторы весьма вероятно, связаны с откликом и выбранные уровни температуры отливки достаточно широки для того, чтобы вызвать изменение отклика.

А.5.3 Другие известные, но не учитываемые факторы (в виду проблем с их контролем или обоснованностью рассмотрения)

Другие факторы, которые могли быть рассмотрены, но не включены в эксперимент, представлены в таблице А.2.

Таблица А.2 — Факторы, не включенные в эксперимент

Фактор	Причина, по которой фактор не включен в эксперимент
Температура воздуха	Температура воздуха признана не имеющей значительного влияния на отклик, производство не имеет системы контроля температуры воздуха, данный фактор трудно управляем
Влажность	Фактор признан несущественным, производство не имеет системы кондиционирования воздуха, поэтому фактором невозможно управлять
Чистота воздуха	Атмосфера внутри производственных помещений задымлена и данным фактором невозможно управлять
Оператор	В процессе принимает участие только один оператор, включение в эксперимент нескольких операторов признано несущественным
День	Фактор признан несущественным для данного эксперимента

А.6 Полный факторный план

А.6.1 Матрица плана (стандартный порядок, порядок проведения)

Выбранный план является планом полного факторного эксперимента, что позволяет рассматривать все взаимодействия. В таблице А.3 представлена матрица плана.

Таблица А.3 — Матрица плана

A: Температура отливки, °C	B: Система водоохлаждения	C: Скорость наполнения формы	D: «Закопченность» формы	Стандартный порядок	Порядок проведения
320	включена	максимальная	нет	8	1
320	выключена	максимальная	нет	6	2
260	включена	максимальная	нет	7	3
260	включена	нормальная	нет	3	4
260	включена	максимальная	есть	15	5

Окончание таблицы А.3

A: Температура отливки, °С	B: Система водо-охлаждения	C: Скорость наполнения формы	D: «Закопченность» формы	Стандартный порядок	Порядок проведения
260	выключена	нормальная	нет	1	6
260	включена	нормальная	есть	11	7
260	выключена	нормальная	есть	9	8
260	выключена	максимальная	нет	5	9
320	включена	нормальная	есть	12	10
320	включена	нормальная	нет	4	11
320	включена	максимальная	есть	16	12
320	выключена	нормальная	есть	10	13
320	выключена	максимальная	нет	2	14
260	выключена	максимальная	есть	13	15
320	выключена	максимальная	есть	14	16

Порядок обработок в эксперименте был случайным, полученный порядок отражен в столбце, озаглавленном «Порядок проведения». В столбце «Стандартный порядок» задано положение конкретной комбинации факторов в матрице плана для четырех факторов с двумя уровнями.

А.6.2 Центральные точки

Для данного эксперимента центральные точки не были выбраны, что частично обусловлено тем, что три из четырех факторов являются категориальными (бинарными) факторами, делающими расположение центральных точек неудобным.

А.6.3 Реплики и повторения

Особенности производственного процесса не позволили выделить время на более чем 16 экспериментальных обработок. Таким образом, ни одна из обработок не была дублирована. Однако, при одной обработке было изготовлено около 160 брусков припоя, что обеспечило многократные повторения.

Повторения важны для учета неопределенности измерений и повышения надежности анализа. В данном случае подходящим решением было рассмотрение среднего количества изъязвлений. В других случаях, подходящим решением может быть среднеквадратическое отклонение при повторениях для каждой реплики. Повторения дают информацию о факторах, которые могут влиять на вариабельность процесса.

А.7 Анализ результатов

А.7.1 Анализ экспериментальных данных

Результаты эксперимента представлены в таблице А.4. Анализируемый отклик — среднее количество изъязвлений на одном бруске припоя. Данные были обработаны программой MINITAB™ [2)]

Таблица А.4 — Результаты эксперимента

A: Температура отливки, °С	B: Система водо-охлаждения	C: Скорость наполнения формы	D: «Закопченность» формы	Стандартный порядок	Порядок прогонов	Среднее число изъязвлений на брусок припоя
320	включена	максимальная	нет	8	1	85,1
320	выключена	максимальная	нет	6	2	77,9
260	включена	максимальная	нет	7	3	89,1
260	включена	нормальная	нет	3	4	87,7
260	включена	максимальная	есть	15	5	92,2
260	выключена	нормальная	нет	1	6	100,4
260	включена	нормальная	есть	11	7	84,7

[2)] MINITAB™ торговое имя продукции у Minitab Inc. Данная информация предоставлена для удобства пользователей данного документа и не означает, что данный продукт имеет маркировку ИСО. В этих же целях может быть использован другой продукт с помощью которого можно достигать эквивалентного результата.

Окончание таблицы А.4

A: Температура отливки, °C	B: Система водоохлаждения	C: Скорость наполнения формы	D: «Закопченность» формы	Стандартный порядок	Порядок прогонов	Среднее число изъязвлений на брусок припоя
260	выключена	нормальная	есть	9	8	75,4
260	выключена	максимальная	нет	5	9	84,5
320	включена	нормальная	есть	12	10	15,3
320	включена	нормальная	нет	4	11	80,6
320	включена	максимальная	есть	16	12	8,1
320	выключена	нормальная	есть	10	13	1,0
320	выключена	максимальная	нет	2	14	84,8
260	выключена	максимальная	есть	13	15	87,6
320	выключена	максимальная	есть	14	16	2,3

Принято решение анализировать только взаимодействия первого порядка, например, анализировать AB вместе с основными воздействиями. Поэтому, взаимодействия более высокого порядка первоначально считали незначительными и неважными (что впоследствии было подтверждено).

А.7.2 Оценка эффектов

Оцененные эффекты и коэффициенты для среднего количества изъязвлений					
Элемент	Эффект	Коэфф.	SE	T	P
Постоянная		66,04	1,606	41,14	0,000
Температура отливки (град Цельсия)	-43,31	-21,66	1,606	-13,49	0,000
Система водоохлаждения	3,61	1,81	1,606	1,13	0,312
Скорость заполнения формы	-0,39	-0,19	1,606	-0,12	0,909
«Закопченность» формы	-40,44	-20,22	1,606	-12,59	0,000
Температура отливки (град Цельсия)	2,16	1,08	1,606	0,67	0,531
Система водоохлаждения					
Температура отливки (град Цельсия)*	-1,69	-0,84	1,606	-0,53	0,622
«Закопченность» формы					
Система водоохлаждения (град Цельсия)*	-34,99	-17,49	1,606	-10,90	0,000
«Закопченность» формы					
Система водоохлаждения Скорость заполнения формы	1,94	0,97	1,606	0,60	0,573
«Закопченность» формы	4, 89	2,44	1,606	1,52	0,188
Скорость заполнения формы «Закопченность» формы	3,84	1,92	1,606	1,20	0,286
S = 6,42204 R-S_q = 98,94 % R-Sq(adj) =96,81%					
Анализ дисперсии среднего числа изъязвлений					
Источник	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Основные воздействия	4	14097,5	14097,5	3524,36	85,45	0,000
Двухсторонние взаимодействия	6	5096,1	5096,1	849,34	20,59	0,002
Остаточная ошибка	5	206,2	206,2	41,24		
Сумма	15	19399,7				

Рисунок А.1 — Оцененные эффекты и результаты анализа ANOVA

Результаты, представленные на рисунке А.1, указывают на значимые главные эффекты (температура отливки и «закопченность» формы), а также на взаимодействие двух данных факторов.

График вероятности, представленный на рисунке А.2, также указывает на значимые факторы.

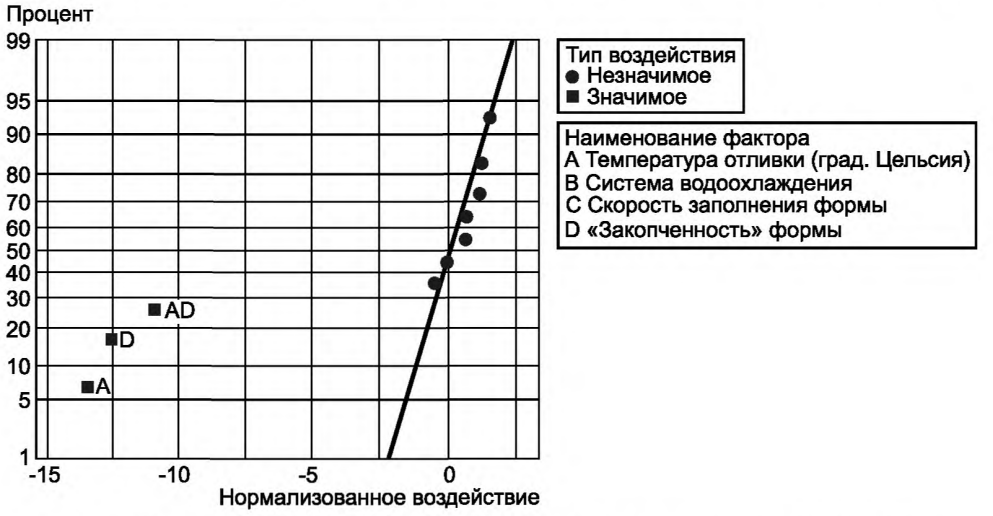


Рисунок А.2 — График нормальной вероятности для нормализованных воздействий

Объем воздействий и их значимость можно увидеть на диаграмме Парето (см. рисунок А.3)

А.7.3 Диаграмма Парето

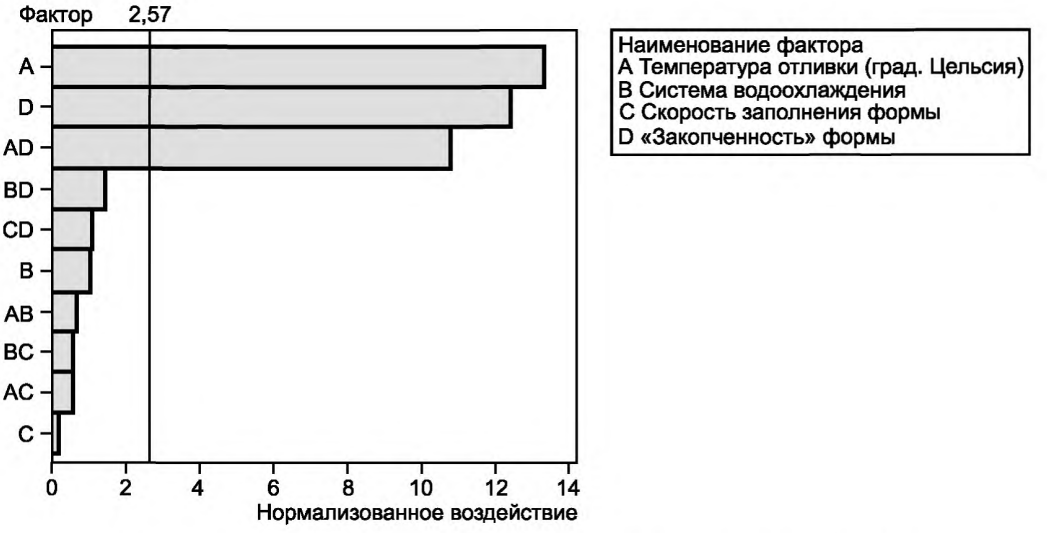


Рисунок А.3 — Диаграмма Парето для нормализованных воздействий

Вертикальная линия на диаграмме Парето указывает на точку, в которой эффект должен быть рассмотрен как значимый (уровень 0,05). Это соответствует тому, что факторы A, D и их взаимодействие оказывают значительное воздействие на появление изъязвлений. На графике показан нормализованный эффект. Это означает, что реальный эффект нормализован в статистическом смысле.

А.7.4 Оценка ошибки опыта и стандартной ошибки эффектов

В настоящих рекомендациях рассмотрены только двухфакторные взаимодействия. Степени свободы не учитываемых взаимодействий (ABC, ABD, ACD, BCD и ABCD) приписаны остаточной ошибке. Таким образом, число степеней свободы в таблице, представленной на рисунке А.1, для остаточной ошибки указано 5. При учете всех взаимодействий, число степеней свободы остаточной ошибки является нулем, что препятствует любому применению статистического анализа в данном эксперименте.

Стандартную ошибку вычисляют с использованием общеизвестной формулы $\sigma_e / \sqrt{n}$. Для остаточной ошибки оценка σ_e может быть найдена путем извлечения квадратного корня скорректированного значения среднего квадрата (Adj MS), например $\sqrt{41,24}$ или 6,422. Так как каждый уровень для каждого фактора встречается восемь раз в эксперименте, стандартная ошибка может быть вычислена как $6,422/\sqrt{8}$ или 2,271.

А.8 Представление результатов — Графики главных эффектов

График главных эффектов, представленный на рисунке А.4, указывает на то, что температура отливки должна быть на уровне 320 °С и форма должна иметь соответствующие характеристики для снижения объема изъязвлений.

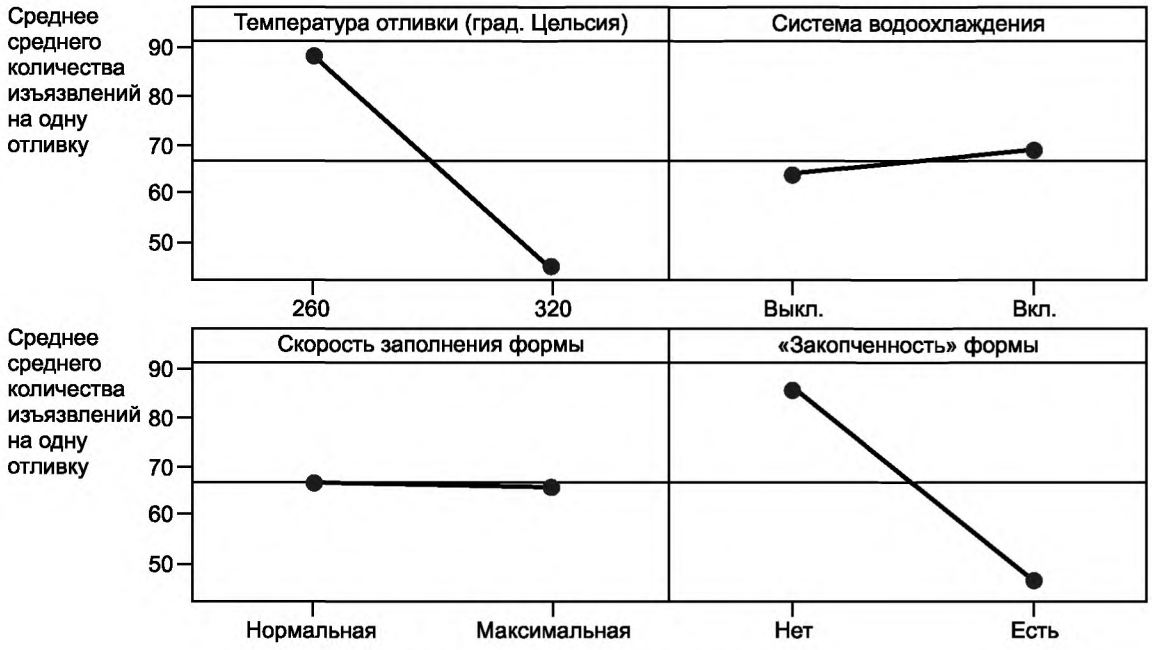


Рисунок А.4 — График главных воздействий

На рисунке А.5 представлен график взаимодействия двух факторов. Отмеченное взаимодействие температуры отливки и «закопченности» формы свидетельствует о том, что для уменьшения количества изъязвлений следует выбирать более «высокие» установки данных факторов.

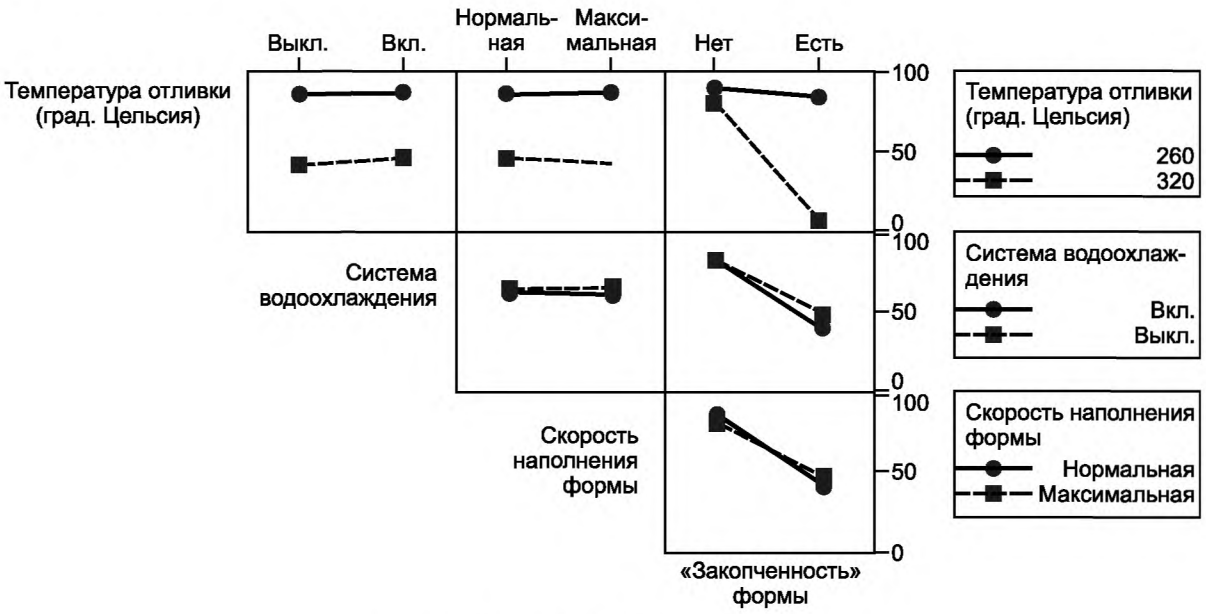


Рисунок А.5 — График главных эффектов

А.9 Рекомендации по оптимизации на основе представленных результатов

Представленный анализ результатов показывает, что температура отливки должна быть 320 °С и «закопченность» формы должна минимально влиять на отклик. Были важны и другие факторы и их взаимодействие. Поэтому, было решено запустить процесс с уровнями, показанными в таблице А.5.

Таблица А.5 — Условия процесса

Фактор	Уровень
A: Температура отливки, °С	320
B: Система водоохлаждения	выключена
C: Скорость наполнения формы	нормальная
D: «Закопченность» формы	есть

А.10 Подтверждение результатов

Процесс выполнен с уровнями, представленными в таблице А.5. В результате данных действий изъязвления не были обнаружены.

Единственным недостатком проведения процесса в данных уровнях были признаки окисления бруска припоя вследствие высокой температуры отливки. Окисление было выражено как некоторое «пожелтение» брусков, вместо обычного яркого блеска. Требовался последующий эксперимент, где температура была бы ниже 320 °С, но появление изъязвлений было бы минимально возможным.

Приложение В
(справочное)

Прямая почтовая рассылка в ходе маркетинговой кампании[3)]

В.1 Общие положения

Материал для прямой почтовой рассылки при проведении маркетинговой кампании может быть представлен в виде разнообразных стилей упаковки с различными текстовыми и графическими сигнальными метками, что необходимо для получения высокой доли ответов. Ранее, организация проводила небольшие кампании, при проведении которых варьировался только один параметр упаковки. Было принято решение провести кампанию, в которой одновременно рассматривается более одного фактора с разными уровнями.

В.2 Основная цель эксперимента

Целью эксперимента является максимизация темпов журнальной подписки, на основе прямой почтовой рассылки.

В.3 Описание процесса

Обычно почтовую рассылку осуществляют при наличии обращений приблизительно 400000 потенциальных подписчиков. Фактически почтовая упаковка может иметь различный дизайн и другие особенности, ведущие к увеличению доли ответивших. В рамках данного исследования организация-учредитель решила произвести рассылку 40000 пакетов. Саму рассылку производила третья сторона (субподрядчик), специализирующаяся на сборке данной упаковки.

В.4 Отклик

В.4.1 Выбор переменной

Откликом является количество людей (в процентах), оформивших и оплативших подписку (кредитной картой или чеком).

В.4.2 Измерение отклика

Каждая комбинация содержимого пакета составляет 2500 рассылок. Было учтено, каким подписчикам, какие пакеты были разосланы.

В.4.3 Связь отклика с целью эксперимента

Ожидаемый процент отклика составляет приблизительно 2 %. Кроме того, желательно наличие возможности четкого обнаружения увеличения количества откликов до 0,5 % и достаточно большой вероятности обнаружения возрастания количества откликов на 0,25 %. Ожидаемое количество откликов тесно связано с целью эксперимента, с учетом того, что разные виды упаковки имели приблизительно одну и ту же стоимость. Дополнительно, среди положительно ответивших подписчиков, экспериментаторов интересовала доля подписчиков, оплативших подписку немедленно, не откладывая подписки на более поздний срок.

В.5 Факторы, влияющие на отклик

В.5.1 Описание каждого варьируемого фактора (непрерывного или дискретного)

Варьируемые в рамках эксперимента факторы, были определены на основе анализа возможных улучшений кампании и повышения дохода, проведенного организацией, осуществляющей рассылку. Этими факторами являются:

A: наличие/отсутствие вставки «Действуй сейчас/Плати сегодня»;

B: дополнительная возможность оплаты кредитной картой (предпочтительнее, чем оплата только персональным чеком);

C: наличие/отсутствие усиливающих формулировок;

D: наличие/отсутствие на внешнем конверте фраз с легкой профанацией.

Для каждого из данных факторов рассмотрены два уровня.

В.5.2 Выбор уровней (связанных с объемом определяемого воздействия)

Факторы, используемые в эксперименте и связанные с ними уровни, представлены в таблице В.1.

[3)] Данный пример рассмотрен в статье J. Ledolter, J. Swersey «Using a Fractional Factorial Design to Increase Direct Mail Response», (2006) Quality Engineering, 18, с. 469—475 и приведен с разрешения издателя American Society of Quality.

Таблица В.1 — Факторы и связанные с ними уровни

Фактор	Уровень 1	Уровень 2
A: Вставка «Действуй сейчас»	не вставлена	вставлена
B: Оплата	чек	чек и карта
C: Усиливающие формулировки	не упоминаются	«горячие факты»
D: Профанация	нет	легкая профанация

В.5.3 Другие известные, но не учитываемые факторы (наличие проблем с их управляемостью или обоснованностью рассмотрения)

Факторы, рассмотренные, но не включенные в эксперимент, представлены в таблице В.2.

Таблица В.2 — Другие рассмотренные факторы, не включенные в эксперимент

Фактор	Причина, по которой фактор не включен в эксперимент
Вложение наклейки на бампер	Привлекательная, но дорогостоящая наклейка на бампер, содержащая упоминание о журнале, могла побудить некоторых потенциальных подписчиков благоприятно ответить кампании. Размер наклейки на бампер влияет на отправку пакета по почте и на почтовые затраты. При вложении наклейки существенных улучшений кампании не ожидалось.
Гарантии возврата денег	Был рассмотрен гарантированный возврат денег за часть подписки или за всю подписку. Данный фактор предполагает пораженческие установки, поэтому отвергнут. Более того, возврат денег прямо связан с убытками организации
Персональное обращение	Изготовление упаковки, содержащей обращение к клиенту по имени, гораздо дороже. Компенсацией затрат в данном случае может быть очень высокие значения отклика от клиентов, что является рискованным

В.6 Полный факторный план

В.6.1 Матрица плана (стандартный порядок, порядок проведения)

Выбран полный факторный план, позволяющий исследовать все взаимодействия.

План представлен в таблице В.3.

Таблица В.3 — Матрица плана

A: Вставка «Действуй сейчас»	B: Оплата	C: Усиливающие формулировки	D: Профанация	Стандартный порядок
не вставлена	чек	не упоминаются	нет	1
вставлена	чек	не упоминаются	нет	2
не вставлена	кредитная карта	не упоминаются	нет	3
вставлена	кредитная карта	не упоминаются	нет	4
не вставлена	чек	«горячие факты»	нет	5
вставлена	чек	«горячие факты»	нет	6
не вставлена	кредитная карта	«горячие факты»	нет	7
вставлена	кредитная карта	«горячие факты»	нет	8
не вставлена	чек	не упоминаются	легкая профанация	9
вставлена	чек	не упоминаются	легкая профанация	10
не вставлена	кредитная карта	не упоминаются	легкая профанация	11
вставлена	кредитная карта	не упоминаются	легкая профанация	12
не вставлена	чек	«горячие факты»	легкая профанация	13

Окончание таблицы В.3

A: Вставка «Действуй сейчас»	B: Оплата	C: Усиливающие формулировки	D: Профанация	Стандартный порядок
вставлена	чек	«горячие факты»	легкая профанация	14
не вставлена	кредитная карта	«горячие факты»	легкая профанация	15
вставлена	кредитная карта	«горячие факты»	легкая профанация	16

Подгруппы из 2500 адресатов были выбраны случайным образом из выборки, состоящей из 40000 адресатов. Значительные усилия были направлены на то, чтобы субподрядчик правильно составлял отправляемые пакеты.

В.6.2 Центральные точки

Центральные точки не были выбраны для данного эксперимента, так как переменные исследования — категориальные. Более того, отклик может быть определен как биноминальная случайная величина с номинальной долей ответивших, составляющей 2 %, таким образом, может быть дана оценка неопределенности.

В.6.3 Реплики и повторения

В соответствии с В.4.2, каждая рассылка с определенным набором уровней факторов была проведена для 2500 адресатов.

В.7 Анализ результатов

В.7.1 Анализ результатов эксперимента

Результаты эксперимента представлены в таблице В.4. Они были обработаны с помощью программы JMP[4)].

Т а б л и ц а В.4 — Результаты эксперимента

A: Вставка «Действуй сейчас»	B: Оплата	C: Усиливающие формулировки	D: Профанация	Стандартный порядок	Доля отклика %
не вставлена	чек	не упоминаются	нет	1	2,08
вставлена	чек	не упоминаются	нет	2	2,52
не вставлена	кредитная карта	не упоминаются	нет	3	2,36
вставлена	кредитная карта	не упоминаются	нет	4	2,12
не вставлена	чек	«горячие факты»	нет	5	2,12
вставлена	чек	«горячие факты»	нет	6	2,52
не вставлена	кредитная карта	«горячие факты»	нет	7	1,96
вставлена	кредитная карта	«горячие факты»	нет	8	2,64
не вставлена	чек	не упоминаются	легкая профанация	9	2,40
вставлена	чек	не упоминаются	легкая профанация	10	2,76
не вставлена	кредитная карта	не упоминаются	легкая профанация	11	3,24
вставлена	кредитная карта	не упоминаются	легкая профанация	12	3,04
не вставлена	чек	«горячие факты»	легкая профанация	13	2,36
вставлена	чек	«горячие факты»	легкая профанация	14	3,12

[4)] JMP — торговая марка продукции, поставляемой SAS Inc. Данная информация предоставлена для удобства пользователей данного документа и не означает, что данный продукт имеет маркировку ИСО. В этих же целях может быть использован другой продукт с помощью которого можно достигать эквивалентного результата.

Окончание таблицы В.4

A: Вставка «Действуй сейчас»	B: Оплата	C: Усиливающие формулировки	D: Профанация	Стандартный порядок	Доля отклика %
не вставлена	кредитная карта	«горячие факты»	легкая профанация	15	2,64
вставлена	кредитная карта	«горячие факты»	легкая профанация	16	3,20

Все эффекты могли быть оценены, так как имеется независимая оценка ошибки, основанная на биноминальном отклике. Каждый эффект был оценен ка отклик, полученный на верхнем уровне, минус отклик на нижнем уровне. Таким образом, средний отклик составляет 2,57 %, стандартная ошибка каждого оцененного эффекта составляет $\sqrt{[4(2,57)(100-2,57)/40000]} = 0,158\%$ z-отношение представляет собой эффект, деленный на стандартную ошибку для каждого случая. Выражение «Prob>|z|» означает то, что вероятность стандартной нормальной величины больше z и меньше минус z.

Сводка результатов, представленная в таблице В.5, показывает значимость факторов A и D и маргинальное взаимодействие AC. Коэффициенты получены с помощью программы JMP, а результаты сохранены в таблице данных. z-отношение и Prob>|z| подсчитаны с использованием соответствующих формул.

Т а б л и ц а В.5 — Оценка воздействий

Элемент	Коэффициент	Воздействие	Стандартная ошибка	z-отношение	Prob > |z|
A	0,172 5	0,345	0,158	2,18	0,029
B	0,082 5	0,165	0,158	1,04	0,297
A*B	–0,072 5	–0,145	0,158	–0,92	0,359
C	0,002 5	0,005	0,158	0,03	0,975
A*C	0,127 5	0,255	0,158	1,61	0,107
B*C	–0,042 5	–0,085	0,158	–0,54	0,591
A*B*C	0,082 5	0,165	0,158	1,04	0,297
D	0,277 5	0,555	0,158	3,51	0,000
A*D	0,012 5	0,025	0,158	0,16	0,874
B*D	0,102 5	0,205	0,158	1,30	0,195
A*B*D	–0,022 5	–0,045	0,158	–0,28	0,776
C*D	–0,017 5	–0,035	0,158	–0,22	0,825
A*C*D	0,017 5	0,035	0,158	0,22	0,825
B*C*D	–0,052 5	–0,105	0,158	–0,66	0,507
A*B*C*D	–0,037 5	–0,075	0,158	–0,47	0,636

В дополнение график вероятности на рисунке В.1 показывает потенциально значимые факторы. Однако значимость основана на отдельных вычислениях, не относящиеся к биноминальному отклику.

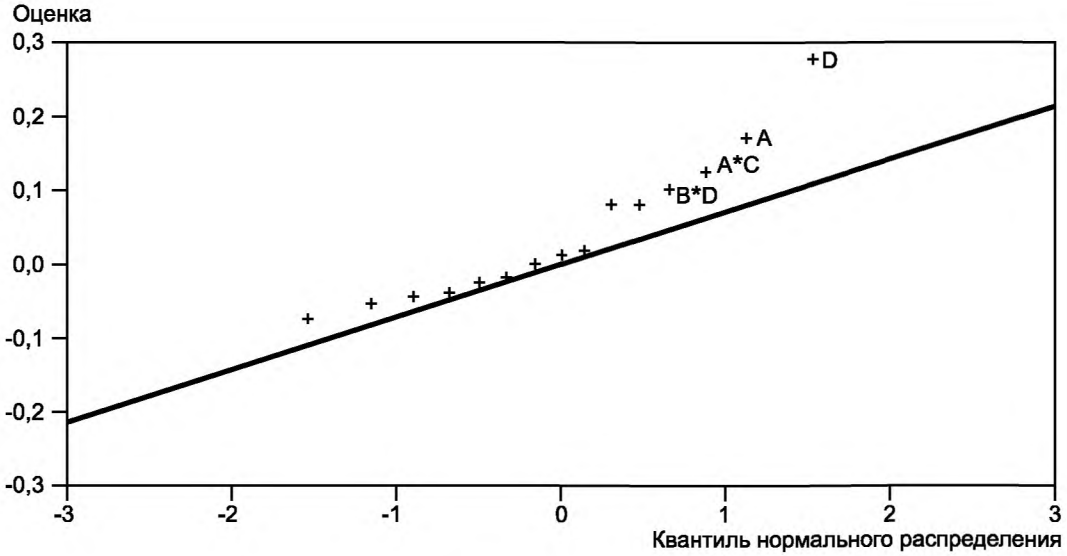


Рисунок В.1 — График вероятности

В.7.2 Диаграмма Парето эффектов

Сравнительный объем эффектов показан на диаграмме Парето (см. рисунок В.2).

Элемент	Оценка
D	0,2775000
A	0,1725000
A*C	0,1275000
B*D	0,1025000
A*B*C	0,0825000
B	0,0825000
A*B	-0,0725000
B*C*D	-0,0525000
B*C	-0,0425000
A*B*C*D	-0,0375000
A*B*D	-0,0225000
A*C*D	-0,0175000
C*D	-0,0175000
A*D	-0,0125000
C	-0,0025000

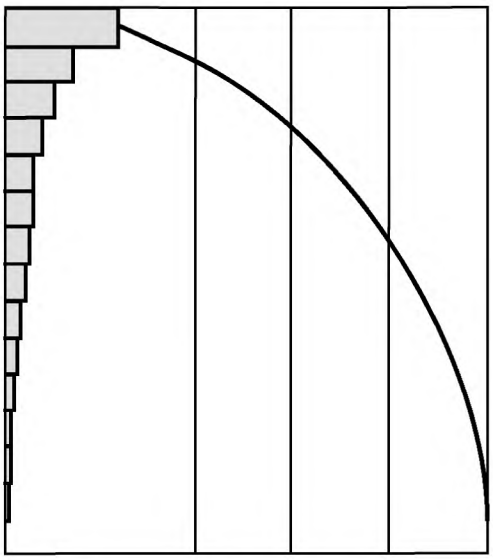


Рисунок В.2 — Диаграмма Парето

В.7.3 Оценка ошибки опыта и стандартной ошибки для эффектов

Каждый эффект оценен как среднее арифметические разности откликов на высоком и нижнем уровнях. Таким образом, в целом отклик составил 2,57 %, стандартная ошибка каждого оцененного эффекта составила $\sqrt{[4(2,57)(100-2,57)/40000]} = 0,158\ \%$.

В.8 Представление результатов на графиках эффектов

Относительные наклоны линий на рисунке В.3 согласованы со значимостью факторов (D, A, B и C).

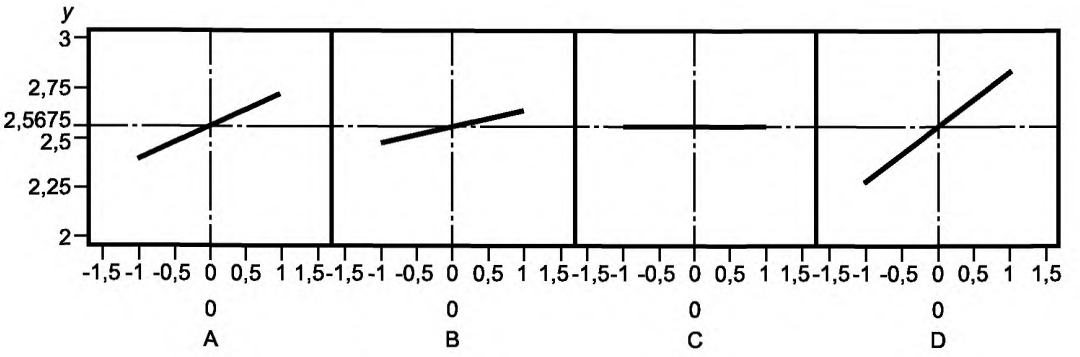


Рисунок В.3 — Графики эффектов

На рисунке В.4 представлены графики взаимодействий факторов. Взаимодействие обнаружено между факторами А («действуй сейчас») и фактором С (усиливающие формулировки).

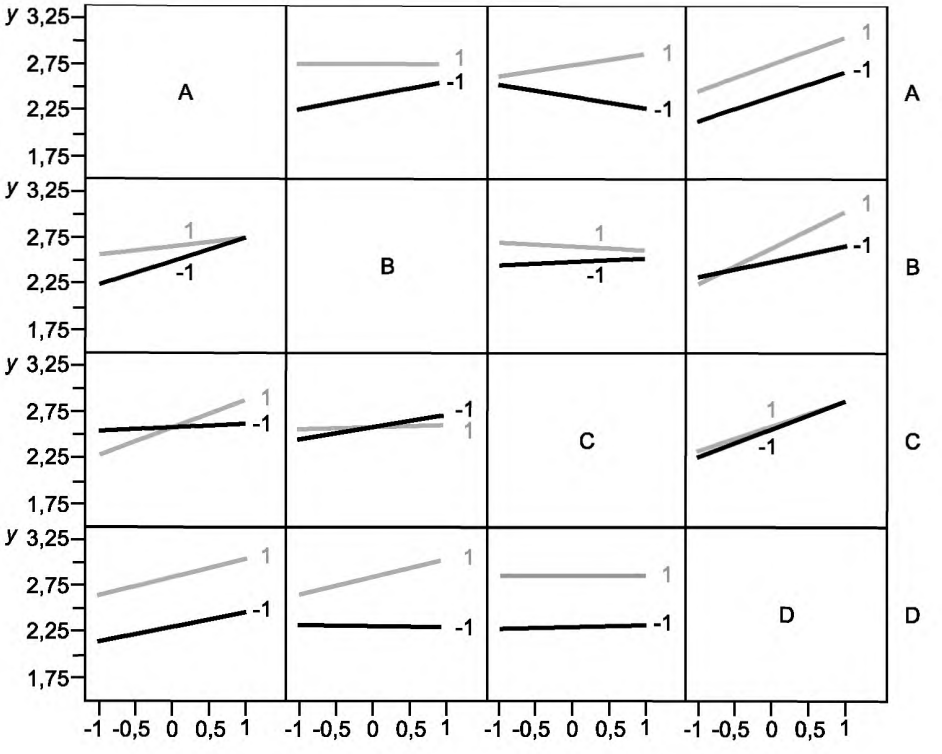


Рисунок В.4 — Графики взаимодействий

В.9 Рекомендации по оптимизации, основанные на полученных результатах

Предпочтительные уровни факторов для будущих рассылок представлены в таблице В.6

Т а б л и ц а В.6 — Предпочтительные уровни факторов

Фактор	Уровень
A: Вставка «Действуй сейчас»	вставлена
B: Оплата	чек и карта
C: Усиливающие формулировки	«горячие факты»
D: Профанация	легкая профанация

Несмотря на то, что фактор В не показал статистически значимого влияния (интенсивность подписки возросла приблизительно на 0,165 %), обнаружено, что количество людей, пожелавших оплатить картой, но не оплативших упало с 10 % до 5 %.

В.10 Подтверждение результатов

Опыт последующих почтовых рассылок подтвердил преимущество добавления возможности оплаты кредитной картой к оплате чеком.

Приложение С
(справочное)

Использование тактильной кнопки[5)]

С.1 Общие сведения

Тактильная кнопка (кнопка, чувствительная к касанию) является необходимым элементом продукции, предназначенной для обслуживания беспроводной связи, например, двухсторонних радиоприемников или сотовых телефонов. Неисправная работа тактильной кнопки ведет к неудовлетворенности и жалобам потребителей. Основная цель эксперимента состояла в улучшении работы тактильной кнопки двухстороннего радиоприемника путем оптимизации характеристик ее компонент на основе использования статистических методов.

С.2 Основная цель эксперимента

Целью эксперимента является достижение хорошего качества работы аварийной тактильной кнопки. Выбор цели основан на большом количестве жалоб потребителей.

С.3 Описание процесса

При нажатии кнопки на клавиатуре поршень кнопки надавливает на металлический купол. Когда усилие нажатия превышает силу приведения в действие купола, воздействующая сила снижается и возникает так называемая возвратная сила. Соотношение данных двух сил называется отношением щелчка и используется в качестве меры тактильности. Электрические связи между компонентами системы появляются в интервале между воздействием силы приведения в действие и возникновением возвратной силы.

Потребитель на основе собственного опыта ожидает появления «щелчка» при нажатии тактильной кнопки. Тактильность важна тем, что позволяет пользователю получить обратную связь об активации кнопки. При плохой работе тактильной кнопки пользователь не получает физической обратной связи о том, что кнопка приведена в действие и пытается получить ее с помощью других средств, что нежелательно в критической ситуации решения задачи.

С.4 Отклик

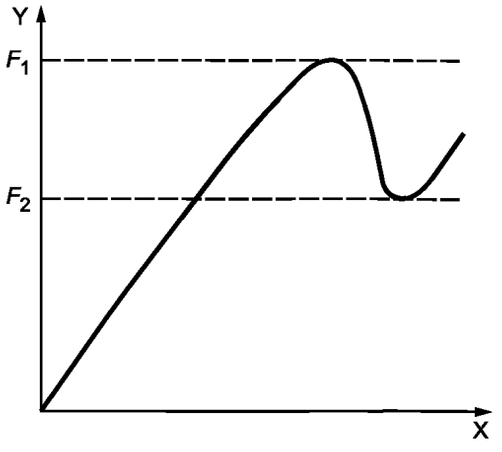
С.4.1 Выбор переменной

Характеристикой работы тактильной кнопки является «отношение щелчка» (в процентах) $[(F_1 - F_2) / F_1]$ 100 %, где F_1 — сила приведения в действие, выраженная в граммах силы (гс)[6)];

F_2 — возвратная сила, выраженная в граммах силы (гс).

С.4.2 Измерение отклика

Для измерения F_1 и F_2 при помощи механического поршня надавливают на кнопку, и по результатам строят график кривой силы. Первый максимум на графике (см. рисунок С.1) соответствует силе приведения в действие, следующий за этой точкой минимум соответствует возвратной силе.



X — перемещение в миллиметрах (мм); Y — сила в граммах силы (гс)

Рисунок 1 — Кривая силы

5) Данный пример предоставлен Motorola (Penang Engineering Group).

6) 1 гс = 9,806 65 × 10^{-3} N.

С.5 Факторы, влияющие на отклик

С.5.1 Описание каждого варьируемого фактора

Факторы, варьируемые в эксперименте, были выбраны на основе на данных, предоставленных техническим персоналом. Такими факторами являются:

A: прочность пластиковой кнопки;

B: ширина отверстия;

C: сила приведения в действие металлического колпачка;

D: длина поршня.

Был проведен четырехфакторный эксперимент, где каждый фактор имел два уровня:

- фактор A: мера прочности кнопки, более высокий уровень — прочная;
- фактор B: ширина отверстия под металлическим куполом, которая позволяет ему опускаться и подниматься;
- фактор C: сила, требуемая для опускания колпачка;
- фактор D: длина поршня, расположенного под каждой клавишей клавиатуры.

С.5.2 Выбор уровней (в зависимости от определяемого эффекта)

Непрерывные факторы, варьируемые в эксперименте, и связанные с ними уровни представлены в таблице 1.

Таблица С.1 — Непрерывные факторы и связанные с ними уровни

Фактор	Уровень 1	Уровень 2
A: прочность пластиковой кнопки	40	80
B: ширина отверстия	0,6	1,8
C: сила приведения в действие металлического колпачка	120	200
D: длина поршня	0,7	1

С.5.3 Другие известные, но не учитываемые факторы (с учетом их контролируемости или обоснованности)

Другие факторы, которые могли бы быть рассмотрены, но не включены в эксперимент, представлены в таблице С.2.

Таблица С.2 — Другие факторы

Фактор	Причина исключения
Площадь поверхности кнопки	Площадь поверхности кнопки заранее определена командой разработчиков на основе отзывов потребителей

С.6 План полного факторного эксперимента

С.6.1 Матрица плана (стандартный порядок, порядок выполнения)

Выбран полный факторный эксперимент, позволяющий рассмотреть все взаимодействия факторов. Были добавлены три центральные точки для определения кривизны и оценки чистой ошибки.

План представлен в таблице С.3.

Порядок обработок был случайным, столбец, озаглавленный «Порядок проведения» отражает последовательность обработок в эксперименте. Столбец, озаглавленный «Стандартный порядок» устанавливает место конкретной обработки в матрице плана с четырьмя факторами и двумя уровнями. Три центральные точки были умышленно «разбросаны» в последовательности обработок с целью внесения изменений в ходе эксперимента.

Таблица С.3 — Матрица плана

Центральная точка	Блоки	A: Прочность пластиковой кнопки	B: Ширина отверстия	C: Сила приведения в действие	D: Длина поршня	Стандартный порядок	Порядок проведения
1	1	40	0,6	120	0,7	1	1
1	1	80	1,8	120	1	12	2
0	1	60	1,2	160	0,85	19	3
1	1	80	1,8	200	0,7	8	4

Окончание таблицы С.3

Центральная точка	Блоки	A: Прочность пластиковой кнопки	B: Ширина отверстия	C: Сила приведения в действие	D: Длина поршня	Стандартный порядок	Порядок проведения
0	1	60	1,2	160	0,85	17	5
1	1	40	1,8	120	1	11	6
1	1	40	0,6	200	0,7	5	7
1	1	40	1,8	120	0,7	3	8
1	1	40	1,8	200	1	15	9
1	1	80	1,8	200	1	16	10
1	1	40	0,6	120	1	9	11
1	1	80	0,6	200	0,7	6	12
1	1	80	1,8	120	0,7	4	13
1	1	40	1,8	200	0,7	7	14
1	1	80	0,6	120	1	10	15
1	1	80	0,6	120	0,7	2	16
1	1	40	0,6	200	1	13	17
1	1	80	0,6	200	1	14	18
0	1	60	1,2	160	0,85	18	19

С.6.2 Центральные точки

К исходному плану эксперимента добавлены три центральные точки.

С.6.3 Реплики и повторения

Так как в план были включены три центральные точки, не было необходимости добавления в план других точек. Центральные точки обеспечивают оценку чистой ошибки.

С.7 Анализ результатов

С.7.1 Данные эксперимента и их анализ

Результаты эксперимента представлены в таблице С.4. Они были получены с помощью программы MINITAB™ [7)].

Таблица С.4 — Результаты эксперимента

Центральная точка	Блоки	A: Прочность пластиковой кнопки	B: Ширина отверстия	C: Сила приведения в действие	D: Длина поршня	Стандартный порядок	Порядок прогона	Отклик
		40	0,6	120	0,7	1	1	24,76
1	1	80	1,8	120	1	12	2	27,17
0	1	60	1,2	160	0,85	19	3	33,24
1	1	80	1,8	200	0,7	8	4	33,55
0	1	60	1,2	160	0,85	17	5	33,27
1	1	40	1,8	120	1	11	6	18,01
1	1	40	0,6	200	0,7	5	7	19,55
1	1	40	1,8	120	0,7	3	8	35,07
1	1	40	1,8	200	1	15	9	17,16
1	1	80	1,8	200	1	16	10	32,78

[7)] Данная информация предоставлена для удобства пользователей данного документа и не означает, что данный продукт имеет маркировку ИСО. В этих целях может быть использован другой продукт с помощью которого можно достигать эквивалентного результата.

Окончание таблицы С.4

Центральная точка	Блоки	A: Прочность пластиковой кнопки	B: Ширина отверстия	C: Сила приведения в действие	D: Длина поршня	Стандартный порядок	Порядок прогона	Отклик
1	1	40	0,6	120	1	9	11	22,38
1	1	80	0,6	200	0,7	6	12	39,77
1	1	80	1,8	120	0,7	4	13	27,95
1	1	40	1,8	200	0,7	7	14	20,37
1	1	80	0,6	120	1	10	15	27,23
1	1	80	0,6	120	0,7	2	16	21,56
1	1	40	0,6	200	1	13	17	19,22
1	1	80	0,6	200	1	14	18	36,79
0	1	60	1,2	160	0,85	18	19	32,58

Первоначальное предположение состояло в том, что взаимодействия первого порядка, например AB, будут анализировать вместе с основными эффектами. Таким образом, взаимодействия высшего порядка приняты во внимание как важные и значимые. Позже, используя центральные точки для оценки чистой ошибки, было подтверждено, что взаимодействия третьего и четвертого порядка не являются статистически значимыми.

С.7.2 Оценка эффектов

На рисунке С.2 показано, что существуют значимые различия основных факторов (например, прочность пластмассовой кнопки), а также взаимодействие между прочностью пластмассовой кнопки и силой приведения в действие. Результаты также отражают нелинейность и значимое несоответствие модели (см. С.9).

График вероятности (см. рисунок С.3) отражает значимость факторов.

Сокращенная модель включает прочность пластмассовой кнопки и силу приведения в действие металлического колпачка, также для подтверждения значимости этих факторов может быть пересмотрено их взаимодействие.

Оценки эффектов и коэффициенты откликов (в кодированных единицах)

Элемент	Эффект	Коэфф.	SE коэфф	T	P
Постоянная		27,495	1,119	24.56	0,000
Прочность пластиковой кнопки	8,785	4,392	1,220	3,60	0,007
Ширина отверстия	0,100	0,050	1,220	0,04	0,968
Сила приведения в действие	1,883	0,941	1,220	0,77	0,462
Длина поршня	-2,730	-1,365	1,220	-1,12	0,296
Прочность пластиковой кнопки Ширина отверстия	-1,075	-0,537	1,220	-0,44	0,671
Прочность пластиковой кнопки Сила приведения в действие	7,863	3,931	1,220	3,22	0,012
Прочность пластиковой кнопки Длина поршня	3,015	1,508	1,220	1,24	0,252
Ширина отверстия Сила приведения в действие	-2,968	-1,484	1,220	-1,22	0,258
Ширина отверстия Длина поршня	-2725	-1,362	1,220		
Сила приведения в действие Длина поршня	0,907	0,454	1,220		

S = 4?87905 R = Sq = 78,83 R - Sq(adj) = 52,37

Анализ дисперсии отклика (в кодированных единицах)

Источник	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Основные воздействия	4	352,732	352,732	88,183	3,70	0,054
Двухсторонние взаимо-действия	6	356,480	356,480	59,413	2.50	0,115
Остаточная шибка	8	190,441	190,441	23,805		
Кривизна	1	109,131	109,131	109,131	9,40	0,018
Недостаток подгонки	5	81,006	81,006	16,201	106.52	0,009
Чистая ошибка	2	0,304	0,304	0,152		
Сумма	18	899,653				

Рисунок С.2 — Соответствие факторов: сопоставление отклика и факторов

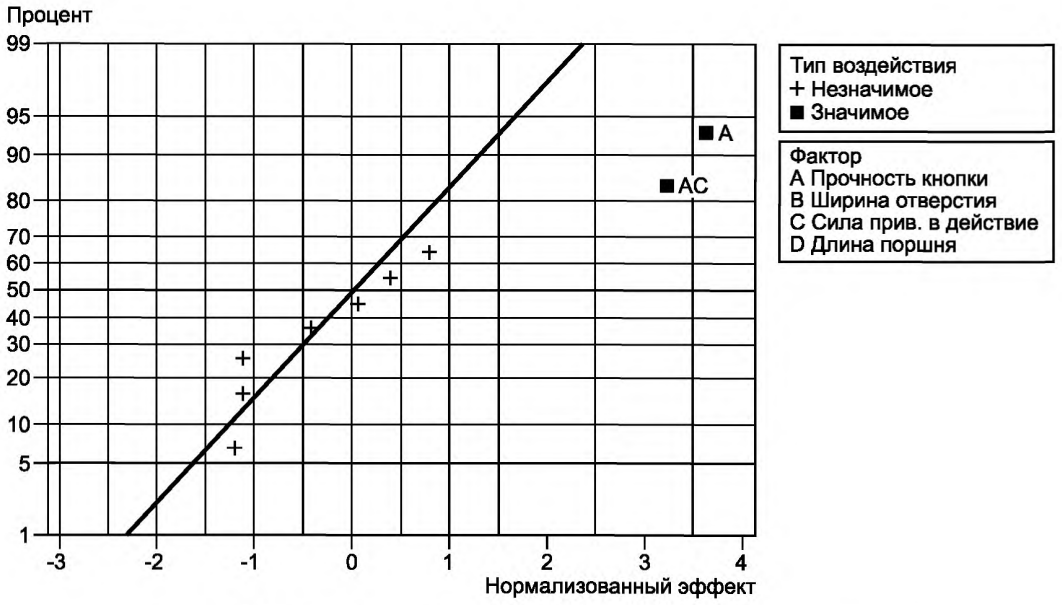


Рисунок С.3 — График вероятности для нормализованных воздействий

С.7.3 — Диаграмма Парето для эффектов

Объем эффектов и их значимость могут быть рассмотрены с помощью диаграммы Парето (см. рисунок С.4).

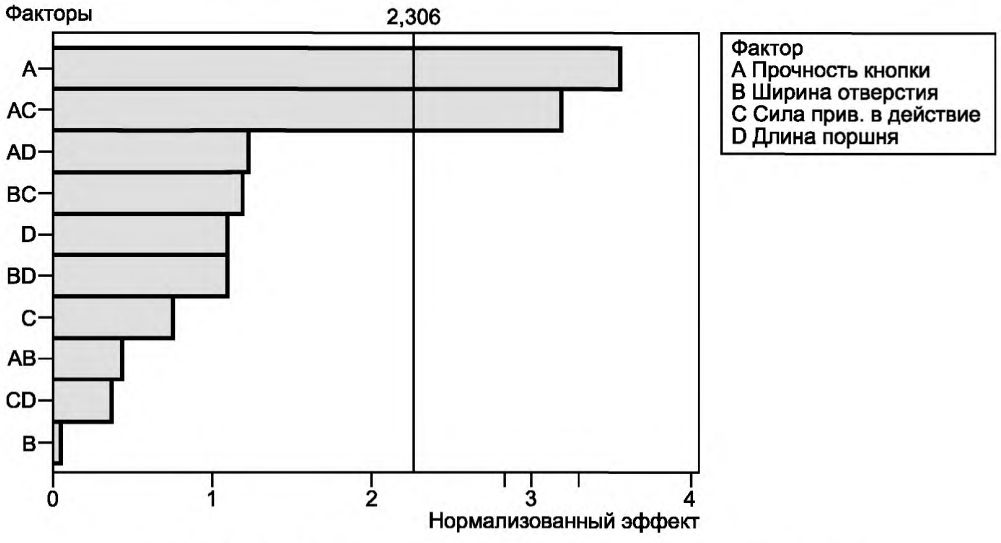


Рисунок С.4 — Диаграмма Парето для нормализованных эффектов

Вертикальная линия на диаграмме Парето указывает на точку, выше которой величина эффекта является значимой. Диаграмма подтверждает, что фактор А и взаимодействие между факторами А и С значимо влияют на тактильность кнопки. На графике показаны «нормализованные» эффекты. Это означает, что реальный эффект нормализован в статистическом смысле.

С.7.4 Оценка экспериментальной ошибки и стандартной ошибки эффектов

Как упомянуто выше, рассмотрены только двухфакторные взаимодействия. Таким образом, число степеней свободы не учитываемых взаимодействий (ABC, ABD, ACD, BCD и ABCD) учтено только при оценке остаточной ошибки. Две степени свободы центральных точек также включены в остаточную ошибку. Таким образом, число степеней свободы для остаточной ошибки в сводной таблице ANOVA равно восьми.

Стандартная ошибка эффектов определена по формуле $\sigma_e / \sqrt{n}$. Оценка σ_e может быть получена как корень квадратный из значения скорректированного среднего квадрата остаточной ошибки, например, $\sqrt{23,805}$ или 4,879. Так как каждый уровень каждого фактора встречался в эксперименте восемь раз, стандартная ошибка найдена как $4,879 / \sqrt{8}$, т. е. 1,725.

С.8 Представление результатов — график эффектов

На рисунках С.5, С.6 представлены графики эффектов.

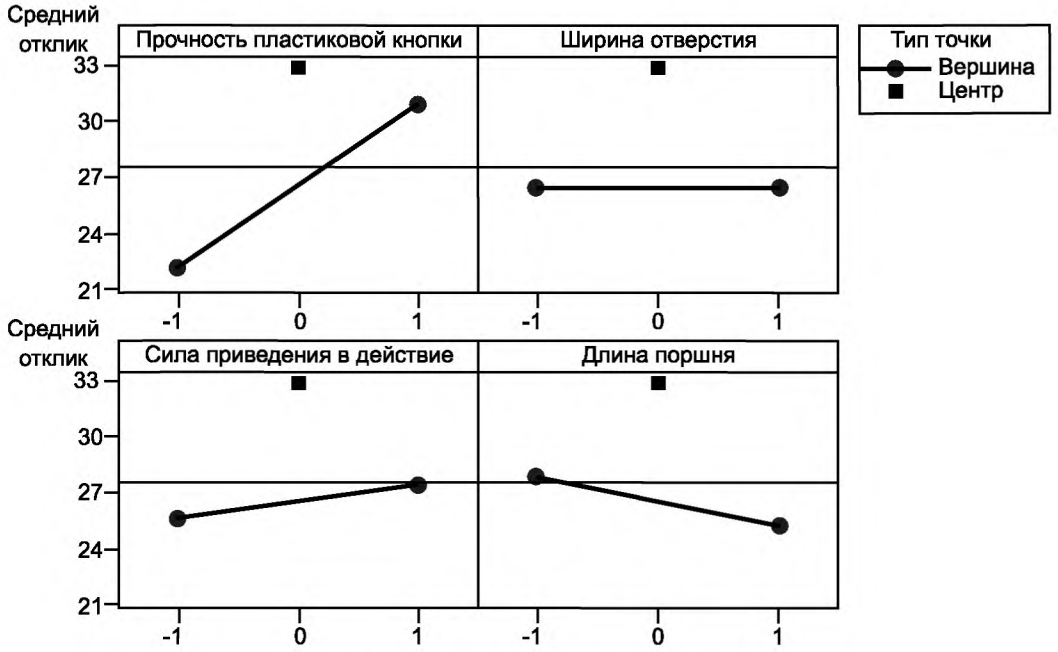


Рисунок С.5 — График основных эффектов

С.9 Представление результатов. Рекомендации по оптимизации

Представленный выше анализ показывает наличие кривизны, т. е. в модель должны быть включены квадратичные члены. Рекомендуется строить поверхность отклика, используя два фактора: 1) прочность пластиковой кнопки и 2) силу приведения в действие.

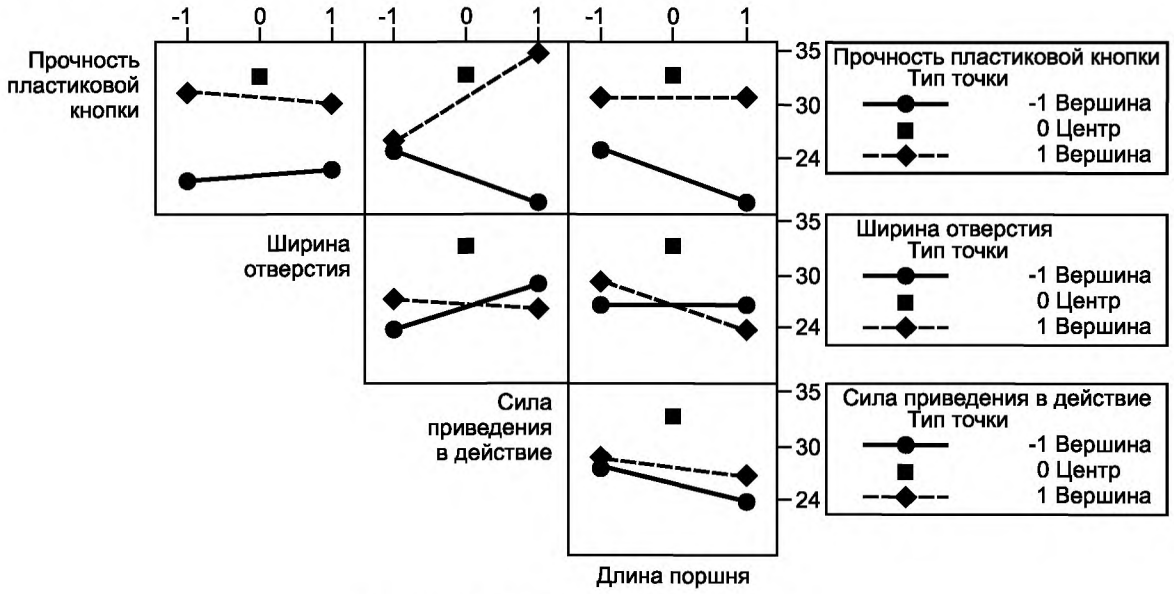


Рисунок С.6 — График взаимодействий

На рисунке С.7 показано, что значения остатков лежат по одну сторону от нуля. Это свидетельствует о наличии кривизны модели.

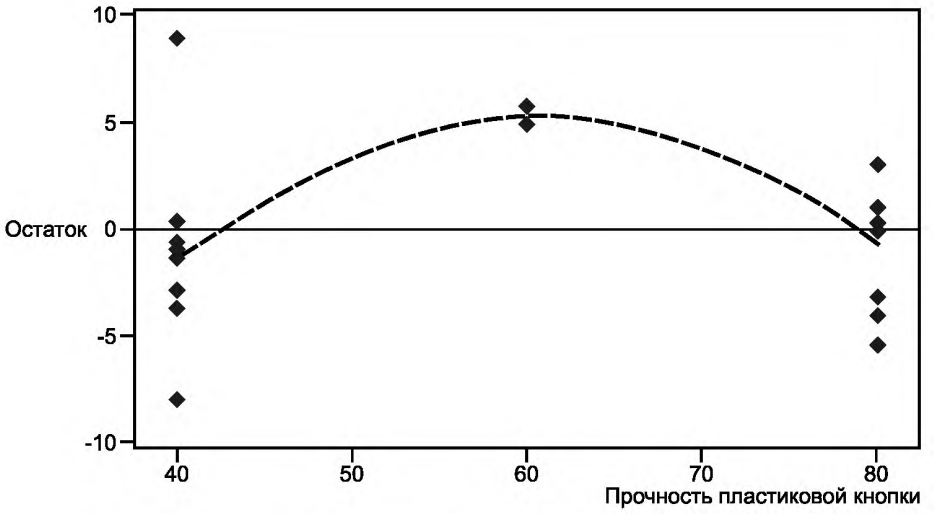


Рисунок С.7 — Остатки по отношению к прочности пластиковой кнопки

С.10 Подтверждение результатов

После построения поверхности отклика должен быть проведен эксперимент, подтверждающий результаты

Приложение D
(справочное)

Оптимизация состава ПВХ[8)]

D.1 Общие положения

Вещества, улучшающие технологические свойства и облегчающие производство составляющих ПВХ, изменяют физические свойства пластмассы. Технология изготовления ПВХ изменяется в зависимости от целей применения, оборудования, типов компонент и используемой загрузки. С учетом особенностей потребительских требований, организация—изготовитель предлагает новый, усовершенствованный материал, требующий некоторых изменений в технологии изготовления ПВХ. Один из изготовителей веществ, улучшающих технологические свойства ПВХ, переключился на изготовление нового материала с уменьшенной загрузкой вспомогательных веществ. Он сообщает, что применение нового материала ведет к ухудшению условий обработки.

D.2 Основная цель эксперимента

Организация-изготовитель принимает решение о проведении эксперимента, воспроизводящего опыт потребителя. Сначала для изготовления нового материала был использован тот же самый технологический процесс и те же условия, что и для старого. Экспериментальные факторы варьировались вблизи этих условий, таким образом, анализ эксперимента состоял в поиске оптимальных параметров и условий процесса производства.

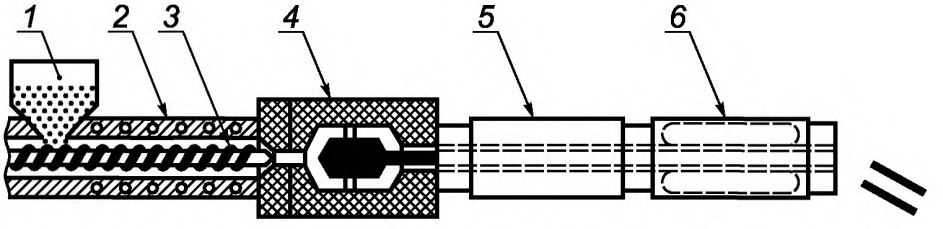
D.3 Описание процесса

Стандартный состав пеноматериалов, используемый потребителем, содержит компоненты (в гранулированной форме), представленные в таблице D.1.

Таблица D.1 — Компоненты (в гранулированной форме)

Компонент	Количество
Суспензионная смола ПВХ	100
Антикоагулянт	2—4
Лубрикант	2
Вспомогательные вещества	4—8
Пенообразователь	0,5—1,5
Наполнитель	5—20

Компоненты тщательно смешивают и полученную массу помещают в прессовочную воронку, как показано на рисунке D.1. Материал непрерывно подается вперед при помощи вращающегося шнека внутри нагретого цилиндра. Размягченная пластмасса поступает через фильеру в холодную воду, где происходит ее затвердевание. См. рисунок D.1.



1 — воронка; *2* — цилиндр; *3* — шнек; *4* — фильера; *5* — холодная вода; *6* — гусеничная лента

Рисунок D.1 — Получение ПВХ

Температура в четырех зонах цилиндра экструдора должна быть различной. Точно неизвестно какой набор температур влияет на потребительские качества ПВХ. Было принято решение исследовать два различных набора температур (при этом один набор является более гладким, чем другой) и диапазон, соответствующий большинству условий эксплуатации.

[8)] Пример предоставлен Rohm и Haas, European Laboratories.

D.4 Отклик

D.4.1 Выбор переменной отклика

В данном эксперименте было исследовано большое количество откликов. Ниже представлен наиболее важный отклик — коэффициент расширения.

D.4.2 Измерение переменной отклика

Коэффициент расширения является мерой разбухания. Его вычисляют как отношение диаметра экструдированного стержня к диаметру фильера. Лучшим значением отношения является наиболее высокое, оно указывает, что из расплавленного ПВХ легче формировать сложные формы.

D.4.3 Связь отклика с целью эксперимента

Коэффициент расширения непосредственно связан с целью эксперимента — разработкой состава ПВХ, устойчивого по отношению к проблемам производства.

D.5 Факторы, влияющие на отклик

D.5.1 Описание каждого варьируемого фактора (дискретного или непрерывного)

В данном эксперименте исследованы четыре фактора:

A: тип вспомогательного вещества (старое или новое) — старое вспомогательное вещество было базовым веществом, к которому было добавлено новое вещество;

B: загрузка вспомогательных веществ;

C: загрузка пенообразователя;

D: набор температур в цилиндре экструдера.

Эксперимент проведен для четырех факторов, каждый из которых имел два уровня.

D.5.2 Выбор уровней (связанных с величиной определяемого эффекта)

Используемые факторы и их уровни представлены в таблице D.2.

Таблица D.2 — Факторы и их уровни

Фактор	Тип фактора	Уровень 1	Уровень 2
A: загрузка пенообразователя	непрерывный	1,6	2,0
B: тип вспомогательных веществ	дискретный	старые	новые
C: загрузка вспомогательных веществ	непрерывный	4	6
D: набор температур	дискретный	возрастающий (135/165/190/160°C)	ровный (150/170/180/160°C)

Уровни для загрузки пенообразователя установлены в виде 1,6[9)] частей на сто частей смолы и 2,0 части на сто частей смолы, обрамляющих текущий уровень 1,8 частей на сто частей смолы, используемый для старого продукта. Эти уровни рассмотрены как крайние значения, которые встречаются в процессе производства.

Установленными уровнями вспомогательных веществ являются 4 и 6 частей на сто частей — рекомендуемый уровень для старых вспомогательных веществ. Известно, что новые вспомогательные вещества более эффективны, таким образом, они требуются в меньшем количестве.

Каждая комбинация факторов A, B и C представляет собой уникальное сочетание. Таких сочетаний может быть восемь. Два образца каждого сочетания протестированы при разных наборах температур. Таким образом, назначен план расщепленной делянки.

Для данного эксперимента априорно известно, что три фактора (A, B и C) могут воздействовать на отклик. Достоверные априорные данные о влиянии на отклик фактора D отсутствовали.

D.5.3 Другие факторы, не исследованные в силу трудностей их контроля и обоснованности

Другими факторами являются: загрузка ПВХ, антикоагулянт, лубрикант и наполнитель (конкретный для конкретного потребителя); данные факторы не варьировались.

D.6 План полного факторного эксперимента

D.6.1 Матрица плана (стандартный порядок, порядок прогона)

Выбран полный факторный эксперимент, что позволяет исследовать все взаимодействия. Матрица плана содержит 16 возможных обработок из полного факторного эксперимента и восемь дополнительных обработок для центральных точек.

---

9) Частей на сто частей смолы, сокращенно ЧСС.

Таблица D.3 — Матрица плана

Загрузка пенообразователя	Тип вспомогательных веществ	Загрузка вспомогательных веществ	Температурный профиль	Стандартный порядок	Порядок проведения	Обработка (полная схема)	Выборка	Центральные точки (ЦТ)
1,6	старый	6	возрастающий	5	1	5	1	
2	старый	4	возрастающий	2	2	2	1	
1,8	новый	5	возрастающий	18	3	11	1	ЦТ
2	новый	4	возрастающий	4	4	4	1	
1,6	новый	6	возрастающий	7	5	7	1	
1,8	новый	5	возрастающий	22	6	12	1	ЦТ
1,8	старый	5	возрастающий	21	7	10	1	ЦТ
1,6	старый	4	возрастающий	1	8	1	1	
1,6	новый	4	возрастающий	3	9	3	1	
1,8	старый	5	возрастающий	17	10	9	1	ЦТ
2	новый	6	возрастающий	8	11	8	1	
2	старый	6	возрастающий	6	12	6	1	
1,6	старый	4	ровный	9	13	1	2	
1,6	старый	6	ровный	13	14	5	2	
1,8	новый	5	ровный	24	15	12	2	ЦТ
1,6	новый	4	ровный	11	16	3	2	
2	новый	6	ровный	16	17	8	2	
2	старый	6	ровный	14	18	6	2	
2	старый	4	ровный	10	19	2	2	
1,8	старый	5	ровный	23	20	10	2	ЦТ
2	новый	4	ровный	12	21	4	2	
1,8	старый	5	ровный	19	22	9	2	ЦТ
1,8	новый	5	ровный	20	23	11	2	ЦТ
1,6	новый	6	ровный	15	24	7	2	

Все сочетания разделены на две выборки. Для одной выборки установлен ровный набор температур, для другой — возрастающий. Столбец, озаглавленный «Обработка» содержит номер обработки. Столбец, озаглавленный «выборка» содержит номер выборки, в которую попадает данная обработка.

Для проведения эксперимента применен план расщепленной делянки. Имелось два класса экспериментальных единиц. Один класс, представляющий собой «сочетания» или «полную схему», был использован для контроля трех факторов (загрузка пенообразователя, тип вспомогательных веществ и загрузка вспомогательных веществ) и их сочетаний; другой класс представлял собой «выборку», используемую для контроля фактора набора температур и всех взаимодействий с факторами полной схемы.

Так как варьирование температуры было трудноосуществимо, все выборки тестировались сначала при ровном наборе температур, а затем при возрастающем наборе температур.

Таким образом, эксперимент не был полностью случайным. В столбце, озаглавленном «Порядок проведения», отражен порядок следования обработок в эксперименте. В столбце, озаглавленном «Стандартный порядок», указано место конкретной обработки в матрице плана для четырех факторов, где каждый фактор имеет два уровня.

D.6.2 Центральные точки

Центральная точка выбраны для каждого типа вспомогательных веществ, для него выполнена реплика, давая, таким образом, четыре дополнительных обработки. Эти обработки вошли в две выборки, которые были протестированы при разных наборах температур. Центральные точки имеют номера от девятого до двенадцатого, при этом загрузка пенообразователя установлена на уровне 1,8, а загрузка вспомогательных веществ на уровне 5.

D.6.3 Реплики и повторения

Для каждой из 24 обработок взято по пять образцов (стержней), для каждого образца вычислен коэффициент расширения, таким образом, было обеспечено пять повторений для каждой конкретной обработки.

В данном случае повторения важны как для снижения неопределенности измерений, так и для сглаживания эффектов неоднородности сочетаний. Среднее арифметическое коэффициента расширения для пяти повторений выбрано в качестве отклика. Вычислено стандартное отклонение результатов для повторений, которое использовано для мониторинга с целью контроля путем получения сравнительных оценок.

Для каждой комбинации центральных точек были сделаны две реплики, и вычислен коэффициент расширения. Получено и проанализировано среднее арифметическое коэффициента расширения.

D.7 Анализ результатов

D.7.1 Анализ экспериментальных данных

Результаты эксперимента представлены в таблице D.4. Для обработки использовано программное средство JMP[10)].

D.7.2 Оценка эффектов (полная модель)

Сначала определены значимые эффекты для полной модели. Результаты представлены в таблице D.5.

Таблица D.4 — Результаты эксперимента

Загрузка пенообразователя	Тип вспомогательных веществ	Загрузка вспомогательных веществ	Температурный профиль	Стандартный порядок	Порядок проведения	Обработка (полная схема)	Выборка	Коэффициент расширения
1,6	старый	6	возрастающий	5	1	5	1	2,778
2	старый	4	возрастающий	2	2	2	1	2,379
1,8	новый	5	возрастающий	18	3	11	1	2,96
2	новый	4	возрастающий	4	4	4	1	2,67
1,6	новый	6	возрастающий	7	5	7	1	2,995
1,8	новый	5	возрастающий	22	6	12	1	2,89
1,8	старый	5	возрастающий	21	7	10	1	2,65
1,6	старый	4	возрастающий	1	8	1	1	2,38
1,6	новый	4	возрастающий	3	9	3	1	2,73
1,8	старый	5	возрастающий	17	10	9	1	2,63
2	новый	6	возрастающий	8	11	8	1	3,185
2	старый	6	возрастающий	6	12	6	1	2,68
1,6	старый	4	ровный	9	13	1	2	2,385
1,6	старый	6	ровный	13	14	5	2	2,732
1,8	новый	5	ровный	24	15	12	2	2,88
1,6	новый	4	ровный	11	16	3	2	2,515
2	новый	6	ровный	16	17	8	2	3,05
2	старый	6	ровный	14	18	6	2	2,55
2	старый	4	ровный	10	19	2	2	2,25
1,8	старый	5	ровный	23	20	10	2	2,46
2	новый	4	ровный	12	21	4	2	2,567
1,8	старый	5	ровный	19	22	9	2	2,545
1,8	новый	5	ровный	20	23	11	2	2,87
1,6	новый	6	ровный	15	24	7	2	2,891

[10)] JMP — торговое имя продукции, поставляемой SAS Inc. Данная информация предоставлена для удобства пользователей данного документа и не означает, что данный продукт имеет маркировку ИСО. В этих же целях может быть использован другой продукт, с помощью которого можно достигать эквивалентного результата.

Таблица D.5 — Полная модель — Испытание фиксированных эффектов

Факторы и их комбинации	Nparm[a]	DF[b]	DFDen[c]	F-отношение	Prob > F
загрузка пенообразователя	1	1	4	0,0569	0,8232
тип вспомогательных веществ	1	1	4	96,5105	0,0006
загрузка вспомогательных веществ	1	1	4	90,0849	0,0007
температурный профиль	1	1	8	23,2088	0,0013
загрузка пенообразователя *[1] тип вспомогательных веществ	1	1	4	5,7937	0,0738
загрузка пенообразователя * загрузка вспомогательных веществ	1	1	4	0,4587	0,5354
загрузка вспомогательных веществ * температурный профиль	1	1	8	0,4305	0,5302
тип вспомогательных веществ * загрузка вспомогательных веществ	1	1	4	0,8680	0,4043
тип вспомогательных веществ * температурный профиль	1	1	8	0,1028	0,7567
загрузка вспомогательных веществ * температурный профиль	1	1	8	0,0167	0,9003
загрузка пенообразователя * тип вспомогательных веществ * загрузка вспомогательных веществ	1	1	4	2,5377	0,1864

[a] Nparm — количество параметров.
[b] DF — количество степеней свободы.
[c] DFDen — знаменатель для вычисления числа степеней свободы.

Так как использована структура расщепленной делянки, в модель введено два члена, описывающих ошибки по одному на каждый класс экспериментальных единиц. Для полной модели член, описывающий ошибку, связан с полной схемой (учитывающей факторы A, B, C и их взаимодействие) и имеет 4 степени свободы: 12 общих минус 8, использованных для оценки полной схемы эффектов. Член, описывающий ошибку, также учитывает подсхему (фактор D и его взаимодействие с полной схемой) имеет 8 степеней свободы: 24 общих, из которых 8 использовано в оценке полной схемы и 8 использовано для подсхемы. Данная информация представлена в таблице D.5, в столбце «DFDen».

В таблице D.5 низкие значения Prob > F (также называемые *p*-значения) указывают на значимые эффекты. Три основных эффекта (тип вспомогательных веществ, загрузка вспомогательных веществ, набор температур) являются значимыми. Взаимодействие (загрузка пенообразователя * тип вспомогательных веществ) с достаточно низкими *p*-значениями (0,0738) также исследованы. Другие эффекты, за исключением загрузки пенообразователя, участвующие во взаимодействиях исключены из модели.

D.7.3 Оценка эффектов: редуцированная модель

Окончательная модель получена после удаления незначимых составляющих. Соответствующие результаты представлены в таблице D.6, в таблице D.7 представлены результаты для редуцированной модели.

Таблица D.6 — Редуцированная модель: итоговая сводка

Коэффициент детерминации (*R*-квадрат)	0,979001
Скорректированный коэффициент детерминации	0,973168
Среднеквадратичная ошибка	0,046022
Средний отклик	2,692583
Наблюдения	24

Таблица D.7 — Редуцированная модель: испытание фиксированных эффектов

Факторы и их комбинации	Nparm[a]	DF[b]	DFDen[c]	F-отношение	Prob > F
Загрузка пенообразователя	1	1	7	0,0506	0,8284
Тип вспомогательных веществ	1	1	7	85,9033	<,0001

[1] Здесь и далее в таблицах D.5, D.7 и D.8 символ «*» обозначает комбинацию факторов.

Окончание таблицы D.7

Факторы и их комбинации	Nparm[a]	DF[b]	DFDen[c]	F-отношение	Prob > F
Загрузка вспомогательных веществ (4, 6)	1	1	7	80,1840	<,0001
Температурный профиль	1	1	11	29,8592	0,000 2
Загрузка пенообразователя * тип вспомогательных веществ	1	1	7	5,1569	0,0574

D.7.4 Оценка эффектов факторов и их стандартных ошибок

Оценки для каждого фактора и соответствующих стандартных ошибок представлены в таблице D.8. Как показывают значения оценок, загрузка вспомогательных веществ и тип вспомогательных веществ обладают значимыми эффектами. Новые вспомогательные вещества повышают коэффициент расширения, таким образом, позволяя использовать их в меньшем количестве. Более высокий набор температур также увеличивает коэффициент расширения.

Т а б л и ц а D.8 — Оценки факторов

Исследуемый объект	Оценка	Стандартная ошибка	DFDen[c]	*t*-отношение	Prob > [t]
Свободный член уравнения регрессии	2,6925833	0,017011	7	158,28	<,0001
Загрузка пенообразователя	−0,004688	0,020834	7	−0,22	0,8284
Тип вспомогательных веществ [старые]	−0,157667	0,017011	7	−9,27	<,0001
Загрузка вспомогательных веществ (4, 6)	0,1865625	0,020834	7	8,95	<,0001
Набор температур профиль [возрастающий]	0,0513333	0,009394	11	5,46	0,0002
Загрузка пенообразователя * тип вспомогательных веществ [старые]	−0,047313	0,020 834	7	−2,27	0,0574

D.8 Представление результатов. Графики эффектов

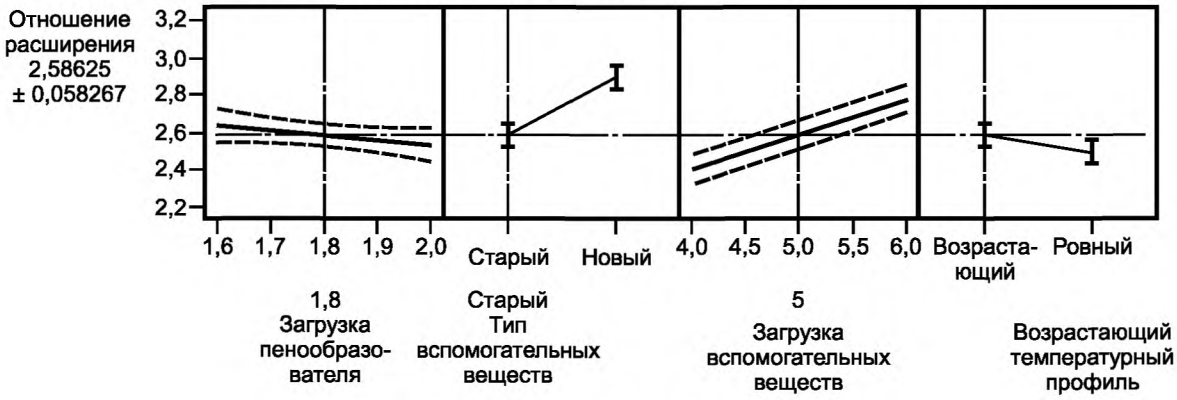


Рисунок D.2 — Графики эффектов

Относительный наклон линий на рисунке D.2 соответствует значимости факторов (B, C, D).

На рисунке D.3 представлен график взаимодействий факторов A и C (загрузка пенообразователя и тип вспомогательных веществ). На графике показаны как слабые взаимодействия, так и то, что новые вспомогательные вещества более эффективны при большем количестве пенообразователя.

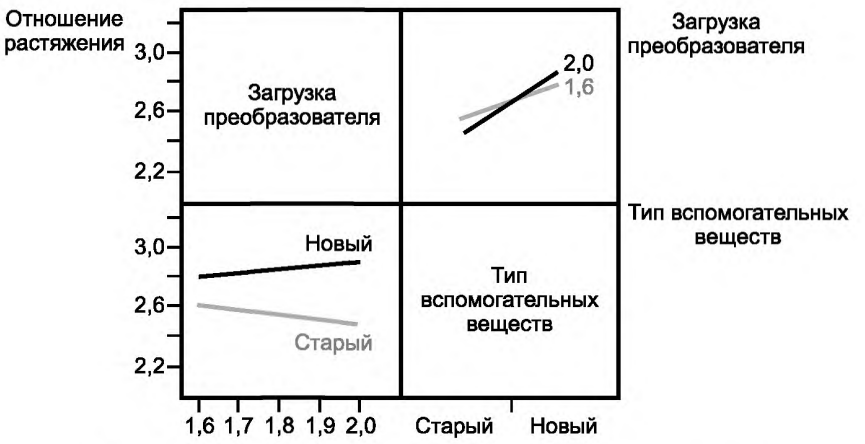


Рисунок D.3 — График взаимодействий. Набор температур

D.9 Представление результатов. Рекомендации по оптимизации

В соответствии с представленным выше анализом, новые вспомогательные средства более эффективны, чем старые, и возрастающий набор температур профиль максимизирует коэффициент расширения. Принято решение запустить процесс с установками, представленными в таблице D.9.

Таблица D.9 — Установки для подтверждающего эксперимента

Фактор	Уровень
A: загрузка пенообразователя	2
B: тип вспомогательных веществ	новые
C: загрузка вспомогательных веществ	4,48
D: набор температур	возрастающий

В соответствии с рисунком D.4, при данных уровнях факторов, установленная модель дает оценку среднего значения коэффициента расширения 2,83 ± 0,09. Это не является максимальным прогнозируемым значением коэффициента расширения, но ограничения на отклик не позволяют улучшить это значение.

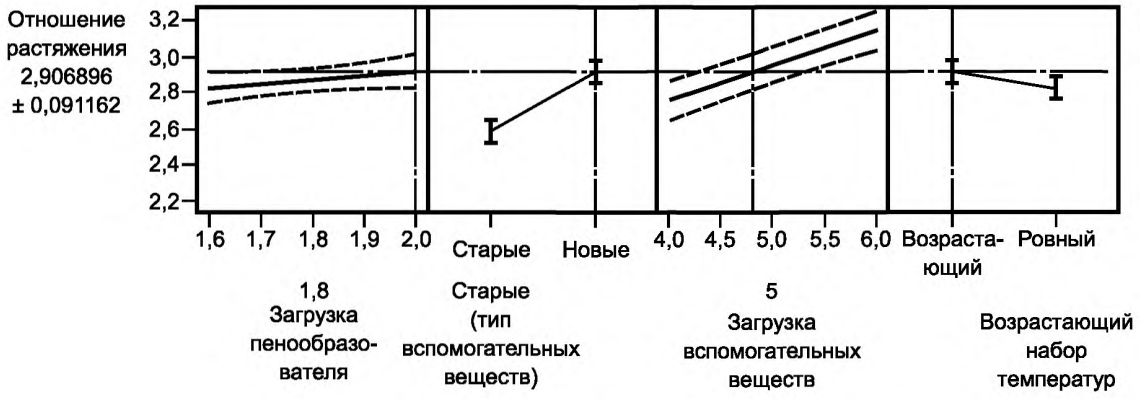


Рисунок D.4 — Прогнозирование коэффициента расширения

Контурные графики, представленные на рисунке D.5, показывают изменения отклика, получаемые при варьировании пользователем уровней значимых факторов.

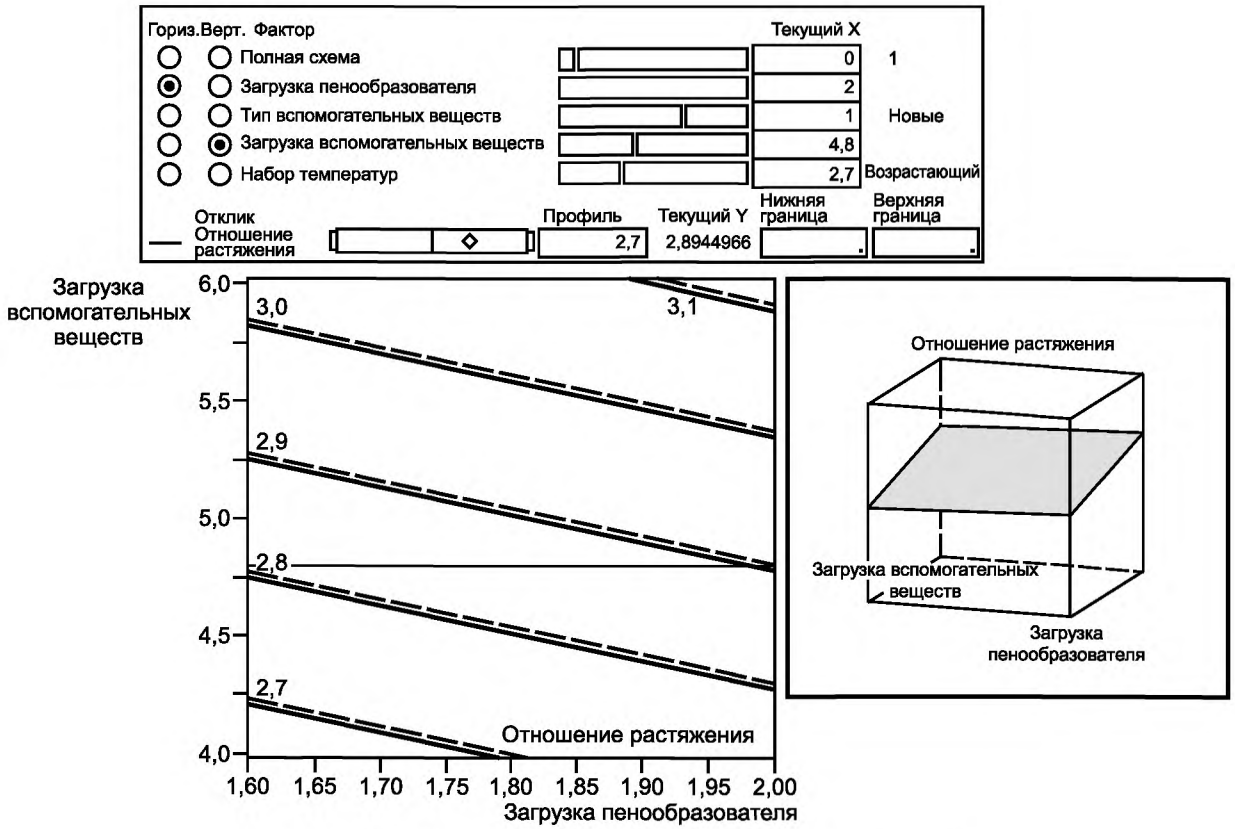


Рисунок D.5 — Контурный график для коэффициента расширения

D.10 Подтверждение результатов

Рекомендуемые установки подтверждены в дополнительном эксперименте, при этом полученное значение оценки коэффициента расширения накрыло доверительный интервал.

Таким образом, возможны использование меньшего количества новых вспомогательных веществ, чем старых вспомогательных веществ и оптимизация условий процесса производства.

Приложение Е
(справочное)

Генетические алгоритмы анализа последовательности ДНК[11)]

Е.1 Общие положения

Генетические алгоритмы успешно используют в решении задачи сборки упорядоченной последовательности ДНК небольшой длины. Генетические алгоритмы представляют собой схему выбора оптимальных условий, содержащую стохастический компонент для генерации возможных улучшений решения задачи. Работа данных алгоритмов может быть повышена путем тщательного определения параметров настройки.

Е.2 Основная цель эксперимента

В данном эксперименте предполагалось, что использование определенных установок позволит собирать нити ДНК большой длины. Более конкретно, цель эксперимента состоит в определении установок параметров настройки для решения задачи сборки ДНК длиной 10000 азотистых оснований (далее — оснований), в дальнейшем для сборки ДНК длиной 35000 оснований.

Е.3 Описание процесса

Исследуемые нити молекулы ДНК имеют длину 40000 — 400000 оснований. Однако, нить, длиной более 1000 пар оснований, обычно сложно поддаются точной сборке. Поэтому, длинные молекулы ДНК разбивают на небольшие части (фрагменты), более поддающиеся управляемой сборке. Однако, преимущества сборки короткой нити порождают новую проблему — при сборке фрагментов в одну последовательность обнаружено, что фрагмент содержит только свою последовательность оснований, но не содержит информации о своем исходном местоположении, ориентации и скрученности. Для расположения фрагментов молекулы ДНК в исходную нить, должен быть применен особый вид генетического алгоритма (эвристического вычислительного алгоритма оптимизации). В общих чертах задачу решают следующим образом — создают популяцию перестановок фрагментов нити молекулы ДНК и генерируют решение с помощью операторов параметризации. Для определения качества решения используют значение функции приспособленности, получаемое на основе 1000000 испытаний. Решение данной проблемы было уже известно, но идея состояла в определении установок, ускоряющих решение данной проблемы. Оптимальные значения параметров установок затем были применены к задаче сборки ДНК, где длина нити составляет 35000 оснований, не имеющей до сих пор приемлемого решения.

Е.4 Отклик

Е.4.1 Выбор переменной

Откликом является значение функции приспособленности, которое определяет работу алгоритма по 1000000 испытаний.

Е.4.2 Измерение переменной отклика

Значение переменной отклика является непосредственным результатом работы имитационной программы.

Е.4.3 Связь отклика с целью эксперимента

Отклик отражает скорость, с которой генетический алгоритм достигает успеха в решении задачи. В конечном счете, конкретные установки значений параметров приводят к общему решению задачи. Значение, к которому сходится решение задачи, должно, в итоге, иметь биологический смысл и быть найдено за приемлемый промежуток времени.

Е.5 Факторы, влияющие на отклик

Е.5.1 Описание каждого варьируемого фактора (непрерывного или дискретного)

Факторы, варьируемые в эксперименте, выбраны экспертом по генетическим алгоритмам (специалистом в области компьютерных наук). Этими факторами стали:

A: интенсивность инверсий;

B: интенсивность мутаций;

C: интенсивность транспозиций;

D: интенсивность перехлеста.

Все выбранные факторы являются непрерывными.

[11)] Данный пример описан в статье Rebecca J. Parsons и Mark E. Johnson «Genetic Algorithms for DNA Sequencing», American Journal of Mathematical and Management Sciences, 17, 1997, с. 369—396, и опубликован с разрешения издателя — American Sciences Press, Inc., Columbus, Ohio.

Е.5.2 Выбор уровней (имеющих отношение к определяемому воздействию)

Изучаемые факторы и связанные с ними уровни представлены в таблице Е.1.

Таблица Е.1 — Факторы и связанные с ними уровни

Фактор	Уровень 1	Уровень 2
A: интенсивность инверсий	0,38	0,28
B: интенсивность мутаций	0,14	0,04
C: интенсивность транспозиций	0,38	0,28
D: интенсивность перехлеста	0,5	0,3

Выбранные значения вписываются в обычные границы для данных значений. Значения, соответствующие уровням выбраны экспертом после обсуждения задачи со статистиком.

Е.5.3 Выбор уровней (связанных с определенным эффектом)

Другие факторы, которые могли бы быть рассмотрены, но не включены в эксперимент, представлены в таблице Е.2.

Таблица Е.2 — Факторы, не включенные в эксперимент

Фактор	Обоснование исключения
Объем популяции	Количество решений, получаемых от поколения к поколению, дает общее время вычисления. Объем популяции не зависит от настраиваемых параметров. Объем популяции и количество поколений определяют весь объем вычислений.

Е.6 План полного факторного эксперимента

Е.6.1 Матрица плана

Выбран полный факторный эксперимент, следовательно, были учтены все взаимодействия.

План эксперимента представлен в таблице Е.3.

Таблица Е.3 — Матрица плана эксперимента

A: Интенсивность инверсий	B: Интенсивность мутаций	C: Интенсивность транспозиций	D: Интенсивность перехлеста	Стандартный порядок	Порядок проведения
0,38	0,14	0,38	0,5	1	1
0,28	0,14	0,38	0,5	2	9
0,38	0,04	0,38	0,5	3	10
0,28	0,04	0,38	0,5	4	2
0,38	0,14	0,28	0,5	5	11
0,28	0,14	0,28	0,5	6	3
0,38	0,04	0,28	0,5	7	4
0,28	0,04	0,28	0,5	8	12
0,38	0,14	0,38	0,3	9	13
0,28	0,14	0,38	0,3	10	5
0,38	0,04	0,38	0,3	11	6
0,28	0,04	0,38	0,3	12	14
0,38	0,14	0,28	0,3	13	7
0,28	0,14	0,28	0,3	14	15
0,38	0,04	0,28	0,3	15	16
0,28	0,04	0,28	0,3	16	8

В данном случае нет необходимости в случайном порядке проведения обработок, так как каждая обработка приводит к большому количеству симуляций в ходе эксперимента. Генератор случайных последовательностей был признан приемлемым.

Принятый порядок проведения был выбран для облегчения анализ после проведения эксперимента после первых восьми обработок. Следующие восемь обработок были полными репликами. Вычислительная обработка восьми прогонов занимает несколько дней, таким образом, решать возникающие проблемы, можно с помощью допустимого промежуточного анализа.

Е.6.2 Центральные точки

На данном этапе эксперимента центральные точки не использованы.

Е.6.3 Реплики и повторения

Каждая комбинация настраиваемых параметров была выполнена дважды.

Е.7 Анализ результатов

Е.7.1 Экспериментальные данные и их анализ

Результаты эксперимента представлены в таблице Е.4. Они получены с помощью программного средства JMP[12)].

Таблица Е.4 — Результаты эксперимента

A: Интенсивность инверсий	B: Интенсивность мутаций	C: Интенсивность транспозиций	D: Интенсивность перехлеста	Стандартный порядок	Значение приспособленности
0,38	0,14	0,38	0,5	1	45281
0,28	0,14	0,38	0,5	2	43892
0,38	0,04	0,38	0,5	3	46739
0,28	0,04	0,38	0,5	4	45565
0,38	0,14	0,28	0,5	5	43439
0,28	0,14	0,28	0,5	6	44798
0,38	0,04	0,28	0,5	7	43866
0,28	0,04	0,28	0,5	8	44250
0,38	0,14	0,38	0,3	9	48891
0,28	0,14	0,38	0,3	10	49191
0,38	0,04	0,38	0,3	11	52495
0,28	0,04	0,38	0,3	12	52671
0,38	0,14	0,28	0,3	13	50393
0,28	0,14	0,28	0,3	14	50492
0,38	0,04	0,28	0,3	15	53107
0,28	0,04	0,28	0,3	16	53116
0,38	0,14	0,38	0,5	17	44207
0,28	0,14	0,38	0,5	18	43950
0,38	0,04	0,38	0,5	19	46755
0,28	0,04	0,38	0,5	20	45589
0,38	0,14	0,28	0,5	21	44438
0,28	0,14	0,28	0,5	22	43026
0,38	0,04	0,28	0,5	23	45830
0,28	0,04	0,28	0,5	24	49906
0,38	0,14	0,38	0,3	25	49173
0,28	0,14	0,38	0,3	26	51601
0,38	0,04	0,38	0,3	27	52193

[12)] JMP — торговое имя продукции, поставляемой SAS Inc. Данная информация предоставлена для удобства пользователей данного документа и не означает, что данный продукт имеет маркировку ИСО. В этих же целях может быть использован другой продукт, с помощью которого можно достигать эквивалентного результата.

Окончание таблицы Е.4

A: Интенсивность инверсий	B: Интенсивность мутаций	C: Интенсивность транспозиций	D: Интенсивность перехлеста	Стандарт-ный порядок	Значение приспособленности
0,28	0,04	0,38	0,3	28	52378
0,38	0,14	0,28	0,3	29	51618
0,28	0,14	0,28	0,3	30	52212
0,38	0,04	0,28	0,3	31	49795
0,28	0,04	0,28	0,3	32	52261

Все эффекты определены и оценены с учетом реплик.

Е.7.2 Определение эффектов

Результаты, представленные на рисунке Е.1, показывают, что фактор D (интенсивность перехлеста) и фактор B (интенсивность мутаций) обладали высокой значимостью, а также не имеют значимых взаимовлияний. Ни интенсивность инверсий, ни интенсивность транспозиций не показали значимого влияния на значение функции приспособленности. Представленный график нормальной вероятности для эффектов (см. рисунок Е.2) также это подтверждает.

Дисперсионный анализ

Источник	DF	Сумма квадратов	Средний квадрат	F-отношение
Модель	15	356378836	23758589	11,9979
Ошибка	16	31683680	1980230	Prob > F
Итог	31	388062516		< 0001*

Оценки параметров

Элемент	Оценка	Стандартная ошибка	t-отношение	Prob>|t|
Пересечение	48222,438	248,7613	193,85	< 0001*
A	208,6875	248,7613	0,84	0,4139
B	934?8125	248,7613	3,76	0,0017*
A*B	101,0625	248,7613	0,41	0,6899
C	61,75	248,7613	0,25	0,8071
A*C	264,75	248,7613	1,06	0,3030
B*C	-202,625	248,7613	-0,81	0,4273
A*B*C	292,375	248,7613	1,18	0,2571
D	3126,75	248,7613	12,57	<0001*
A*D	182,375	248,7613	0,73	0,4741
B*D	-32	248,7613	-0,13	0,8992
A*B*D	-137,625	248,7613	-0,55	0,5877
C*D	213,3125	248,7613	0,86	0,4038
A*C*D	-259,8125	248,7613	-1,04	0,3118
B*C*D	-254,6875	248,7613	-1,02	0,3212
A*B*C*D	-33,0625	248,7613	-0,13	0,8959

Рисунок Е.1 — Оценки эффектов

Наклонная линия отражает псевдо стандартную ошибку длины для оцениваемой популяции.
Горизонтальная линия соответствует среднеквадратической ошибкой (RMSE), вычисляемой по остаткам.

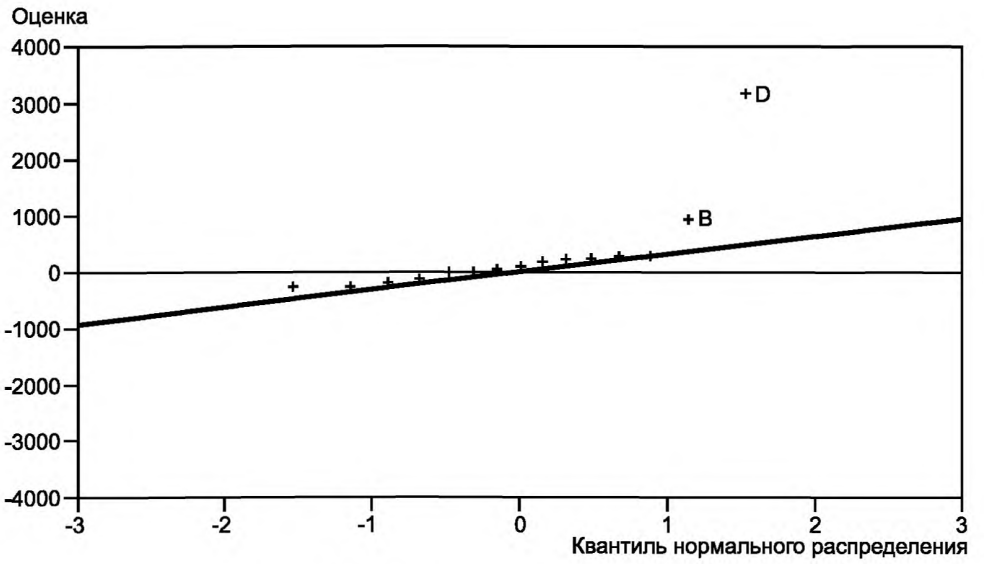


Рисунок Е.2 — График нормальной вероятности

Е.7.3 Диаграмма Парето для воздействий (см. рисунок Е.3)

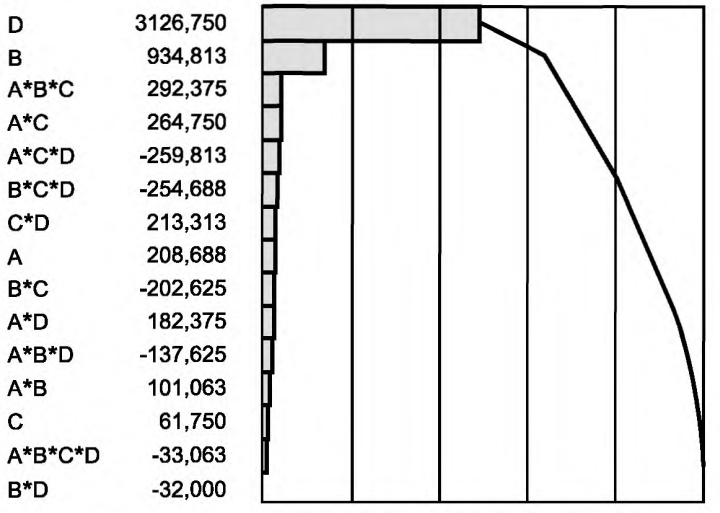


Рисунок Е.3 — Диаграмма Парето эффектов

Е.7.3.1 Оценка экспериментальной и стандартной ошибок для эффектов

Стандартная ошибка для эффектов составила 248,7613.

Е.8 Представление результатов. Графики эффектов

Относительный наклон линий на рисунке Е.4 согласуется со значимостью факторов D и B.

На рисунке Е.5 представлен график взаимодействий между факторами. Не отмечено значимых взаимодействий между факторами, так как все линии на графиках близки к параллельным.

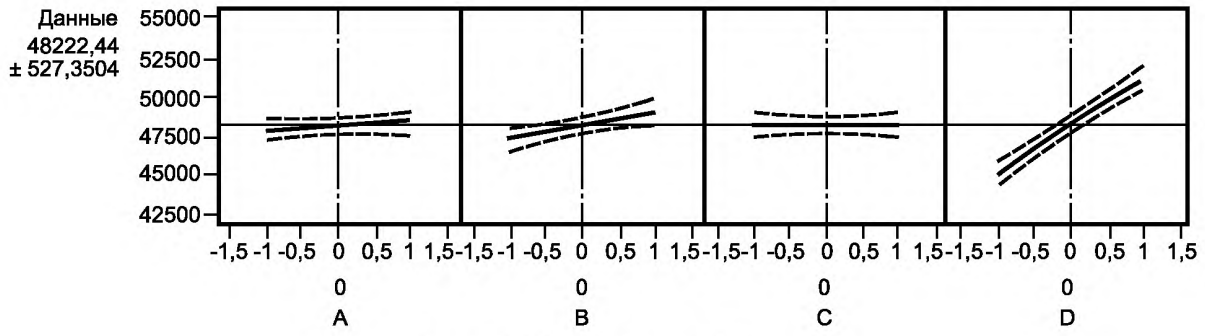


Рисунок Е.4 — Графики эффектов

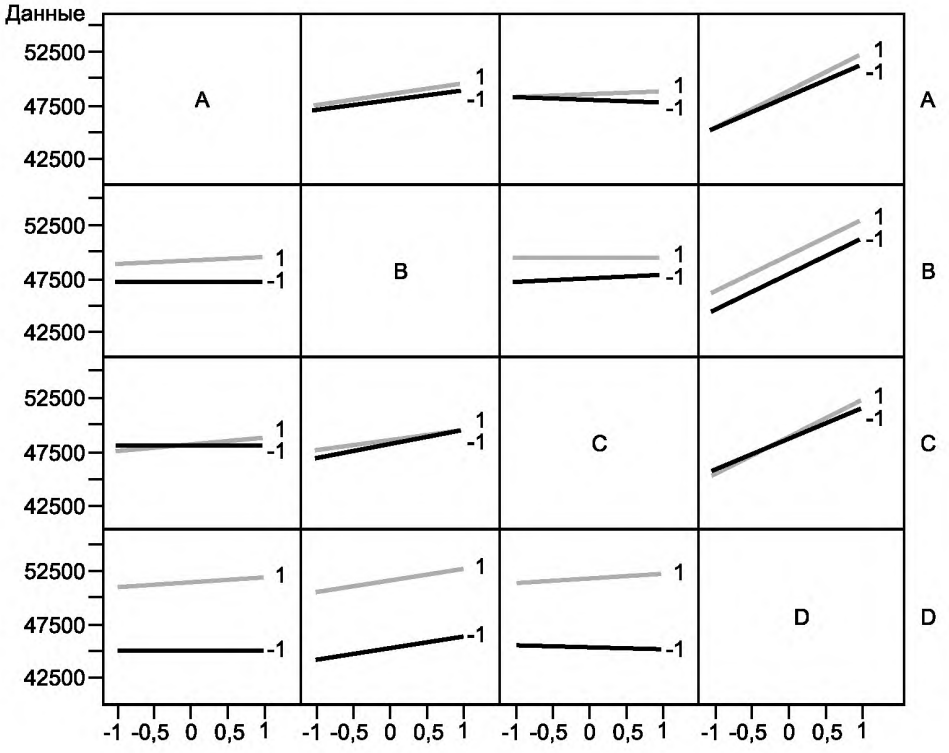


Рисунок Е.5 — График взаимодействия факторов

Е.9 Представление результатов. Рекомендации по оптимизации

Предпочтительные уровни факторов, полученные в результате эксперимента, представлены в таблице Е.5.

Т а б л и ц а Е.5 — Предпочтительные уровни

Фактор	Уровень
A: интенсивность инверсий	+1 (0,28)
B: интенсивность мутаций	+1 (0,28)
C: интенсивность транспозиций	−1 (0,38)
D: интенсивность перехлеста	+1 (0,30)

Уровни для B и D получены из оценок эффектов. Несмотря на то, что факторы A и C имеют меньшую значимость, чем главные эффекты, реплики показывают небольшую вариабельность в значениях функции приспособленности для верхнего уровня A и нижнего уровня C.

Е.10 Подтверждение результатов

Полный факторный эксперимент выявил два параметра настройки, которые имеют наибольшее воздействие на эффективность генетического алгоритма. Был проведен еще эксперимент, который уточнил значения оптимальных параметров настройки. В частности, основной план при интенсивности мутаций 3,2 % и интенсивности перехлеста 26,8 % определил достаточно плоскую область в пространстве значений функции приспособленности, что облегчает дальнейшие исследования параметра объема популяции. После достижения улучшений в решении задачи сборки нити ДНК средней длины, была рассмотрена и практически решена задача сборки длинной нити ДНК.

Библиография

[1] Рекомендации Р 50.1.040 Статистические методы. Планирование экспериментов. Термины и определения

УДК 658.562.012.7:65.012.122:006.354 ОКС 03.120.30 Т59

Ключевые слова: эксперимент, фактор, уровень, отклик, план, матрица плана, факторный эксперимент, влияние фактора

БЗ 9—2017/113

Редактор *И.В. Львова*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *С.И. Фирсова*
Компьютерная верстка *Е.О. Асташина*

Сдано в набор 15.08.2017. Подписано в печать 07.09.2017. Формат 60×84 1/8. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 5,58. Уч.-изд. л. 5,02. Тираж 22 экз. Зак. 1620.
Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Издано и отпечатано во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 123001 Москва, Гранатный пер., 4.
www.gostinfo.ru info@gostinfo.ru