

## СИНЕРГИЗМ И СИНЕРГИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИМЕРОВ

Ю.А. Наумова, доцент

кафедра Химии и технологии переработки эластомеров им. Ф.Ф. Кошелева

МИТХТ им. М.В. Ломоносова, Москва, 119571 Россия

e-mail: [naumova.yulia@mail.ru](mailto:naumova.yulia@mail.ru)

**В** работе отражена эволюция терминов синергизм, синергический эффект, синергическая система. Проведен анализ литературных источников, в которых представлены результаты изучения эффектов синергизма в технологии переработки полимеров. Рассмотрены современные подходы к оценке эффектов синергизма, идентификации, анализу и формированию синергических систем, что позволяет научно обоснованно решать практические задачи рецептуростроения полимерных материалов и выбора параметров технологических процессов их переработки.

**Ключевые слова:** синергизм, синергический эффект, синергические системы, полимер, смеси полимеров, комбинация ускорителей, комбинация наполнителей, планирование эксперимента, граф.

### Введение

Согласно терминологии, представленной в словарях иностранных слов *синергизм* встречается в контексте слова синергия (synergy, synergie). В переводе с греческого синергия (συνεργία) происходит от двух слов σύν – вместе, ἔργον – дело, труд, работа, (воз)действие и обозначает сотрудничество, содействие, помощь, соучастие, сообщничество [1–3].

В настоящее время существует многообразие понятий [4–7], форм синергизма [6, 8], ситуаций, когда возникает этот эффект [9–14], что, в свою очередь, открывает широкое поле исследований в данном вопросе, в том числе в прикладных науках. Целью настоящего обзора является анализ, уточнение понятия и установление видов синергизма в области химии и технологии переработки полимеров.

### 1. Основные понятия и определения

Так что же понимается под синергизмом? Рассмотрим основные этапы эволюции данного термина. Еще Аристотель, говоря о принципах структурного и иерархического строения вещей писал: ...Целое больше, чем сумма своих частей... [15].

Впервые термин синергизм вошел в богословие в XVI веке в период дискуссии между протестантами и католиками по вопросу о спасении [16]. Подобная же дискуссия о благодати и свободе воли происходила еще раньше, в начале V века между блаженным Августином и британским монахом Пелагием, причем их спор был решен аскетом и богословом Св. Иоанном Кассианом с позиции восточной патристики. Св. Иоанном Кассианом было дано первое отчетливое выражение синергии: «В деле спасения нашего участвует и благодать Божия и свободное произволение наше ... оба согласно действуют и в деле спасения нашего равно необходимы» [17]. Позднее идея синергии была детально обоснована в Православии, получив базу в Святом

Писании и догматике [16, 18].

В 1896 г. понятие, аналогичное синергии, ввел Шеррингтон в области нейрофизиологии. Подобная категория встречается в теории локомоторных реакций [5].

В 20-х годах прошлого века начал зарождаться стратегический синергизм в бизнесе и менеджменте, который получил свое мощное развитие в 60-70-х годах прошлого века. Авторами [4, 5] отмечается, что О.А. Ерманский в работе «Теория и практика рационализации», изданной в 1925 г., обосновал принцип организации труда, который гласит: организационная сумма больше арифметической суммы сил ее составляющих, и написал математическое выражение [5]:

$$\sum (a, b, c, \dots, n) > a + b + c + \dots + n. \quad (1)$$

Термин синергизм в то время не встречался в деловой литературе, и все же подразумевалась какая-то сила, дающая дополнительный эффект от соединения некоторых организационных составляющих.

В работах [4, 5] отмечается концепция И. Ансоффа о синергизме, которая зарекомендовала себя как наиболее стойкая (1960 г.) – с этим автором, в основном, связывают обоснование понятия синергетического эффекта («Синергизм и ресурсы», работа «Корпоративная стратегия», 1965 г.). И. Ансофф рассматривает данный эффект, «способный продуцировать уровень выручки интегрированной компании, превышающий сумму аналогичных показателей ее функционирующих по отдельности дивизионов», с помощью уравнения «2+2=5». Он предлагает называть его синергизмом. Синергизм рассматривается как процесс повышения эффективности использования ресурсов.

В этом ключе стоит отметить работы авторов (А.П. Богданов, Р.М. Кантер, К. Барлетт и Х. Итами), предложивших свои концепции синергизма в организации и управлении компаниями [5, 14].

Приблизительно в этот же период благодаря трудам И.Р. Пригожина и его единомышленников оформилась теория диссипативных структур [19, 20]. Наблюдая за химическими процессами, они обнаружили закономерности поведения систем сложных структур при определенных параметрах хаотичности или упорядоченности внутренней и внешней среды в стремлении к усложнению структуры и переходу на следующий уровень развития или эволюции.

В продолжение этих работ в первой половине 70-х гг. прошлого века однокоренной термин «синергетика», как название нового междисциплинарного направления исследований и для обозначения некоторого комплекса естественно-математических наук о процессах самоорганизации в неравновесных условиях в различных средах и системах был впервые введен Германом Хакеном в курсе его лекций, прочитанных в 1969 г. в университете Штутгарта [5, 21]. Синергетика – не единственное научное направление, которое занимается изучением сложных систем. Проблемное поле синергетики центрируется вокруг понятия «сложность», ориентируясь на постижение природы, принципов организации и эволюции последнего [22]. Вместе с тем, используемые в синергетике понятия делают синергетический подход уникальным, причем не только в концептуальном, но и в операциональном плане. В отличие от других научных направлений, обычно возникавших на стыке двух наук, когда одна наука давала новому направлению предмет, а другая – метод исследования, синергетика опирается на сходство математических моделей, изучает сложные («многокомпонентные») системы игнорируя различную природу описываемых ими систем.

Синергетика Хакена – это язык, на котором удобно и естественно описывать жизнь сложных систем и, в частности, явление самоорганизации – спонтанное возникновение структур, а ее понятийный аппарат позволяет рассматривать все происходящее «сверху вниз» – от целого к деталям, а не «снизу вверх» – от деталей к целому, как это принято при редукционистском подходе [23].

При обосновании использования термина синергетика Г. Хакен говорил: «Я назвал новую дисциплину «синергетикой». В ней исследуется совместное действие многих подсистем, в результате которого на макроскопическом уровне возникает структура и соответствующее функционирование» [21, 24, 25].

Возвращаясь к этимологии слова синергизм (синергия), представленной во введении, и интерпретации этого термина рядом авторов [25–32] можно отметить, что большинство существующих ныне учебников, справочников и

словарей обходят неологизм Хакена молчанием. Как отмечают авторы [33], заглянув в энциклопедии последних изданий, мы с вероятностью, близкой к единице, обнаружим в них не синергетику, а «синергизм», определения которого будут представлены в табл. 1. Отсутствие комментариев объясняется, с одной стороны, новизной термина «синергетика», и тем фактом, что это научное направление, занимающееся изучением процессов самоорганизации и возникновения, поддержания, устойчивости и распада структур самой различной природы, еще далеко от завершения, и единой общепринятой терминологии (в том числе и единого названия всей теории) пока не существует. С другой стороны, исследования в новой области ввиду ее специфики ведутся силами и средствами многих современных наук, каждая из которых обладает свойственными ей методами и сложившейся терминологией. Параллелизм и разноречивость в терминологии и системах основных понятий в значительной мере обусловлены также различием в подходе и взглядах отдельных научных школ и направлений и в акцентировании ими различных аспектов сложного и многообразного процесса самоорганизации [33].

Обсуждая общее использование термина синергетика, следует сказать, что этим термином, независимо от учения Г. Хакена, широко пользовался американский архитектор, изобретатель и философ Р.Б. Фуллер [25, 34], определивший синергетику как такое поведение целого, которое не предсказуемо на основе изучения его частей. При этом в качестве примера Р.Б. Фуллер приводил тот факт, что хром-никелевый сплав при своем растяжении демонстрирует прочность, в несколько раз превышающую прочность, которую демонстрирует каждый из его компонентов.

Таким образом, для публикаций [4–14, 16, 17, 22, 25–34] на тему синергетики характерно то, что в них нередко приводятся авторские трактовки принципов синергетики, причем трактовки довольно разнородные. Причиной этого является отсутствие достаточной определенности относительно основоположений синергетики и возникающей отсюда необходимости уточнения статуса излагаемого материала [33].

Сказанное выше в полной мере относится и к определениям синергизма и эффектов синергизма, встречающимся в публикациях [35–88] за последние 40 лет. Повторимся, современная интерпретация термина «синергизм» до настоящего времени носит авторский характер. В табл. 1 приводятся обобщенные данные по результатам анализа определений синергизма, которые представлены в словарях, научных статьях, учебной литературе, Интернет-ресурсах.

Таблица 1. Формулировки и определения синергизма (пункты 1-5 [7]).

Пункт	Автор	Определения
1	[27]	«Для любой системы (технической, биологической или социальной) существует такой набор ресурсов, при котором ее потенциал всегда будет либо существенно больше простой суммы потенциалов, входящих в нее ресурсов (технологий, персонала, компьютеров и т. д.), либо существенно меньше». «Объединяемые части сильно зависят друг от друга и при объединении могут существенно (положительно или отрицательно) повлиять друг на друга в рамках целого. Это называется синергетическим эффектом».
2	[28]	«Любая сложная динамическая система стремится получить максимальный эффект за счет своей целостности; стремится максимально использовать возможности кооперирования для достижения эффектов».
3	[29]	«Свойства организации больше суммы качеств ее составляющих».
4	[30]	«Сумма свойств организованного целого не равна арифметической сумме свойств каждого из его элементов в отдельности; или сумма свойств организационного целого превышает арифметическую сумму свойств каждого из его элементов в отдельности».
5	[31]	«Для любой организации существует такой набор элементов, при котором ее потенциал всегда будет либо существенно больше простой суммы потенциалов, входящих в нее элементов, либо существенно меньше».
6	[4]	Эффект синергизма « $2+2=5$ ». Экономическим базисом синергизма является возможность того, что по результатам совместных усилий нескольких бизнес-единиц итоговый показатель превысит результат их самостоятельной деятельности.
7	[3]	1) совместное и однородное функционирование органов (например, мышц) и систем. 2) комбинированное действие лекарственных веществ на организм, при котором суммированный эффект превышает действие, оказываемое каждым компонентом в отдельности.
8	[88]	Взаимодействие различных биохимических и (или) физиологических процессов (факторов), обуславливающее оптимальный конечный эффект.
9	[32]	Применительно к группам синергизм означает стремление достичь таких результатов, которые не являются «нулевой суммой слагаемых».

В естественнонаучных и технических науках чаще синергизм и эффекты синергизма трактуются согласно рис. 1, представленному ниже:



Рис. 1. Схематичное изображение синергизма, антагонизма и аддитивности свойств [35, 36].

При рассмотрении влияния состава композиции, отличающейся природой и соотношением компонентов, чаще одного целевого назначения (например, смеси полимеров, металлов или поверхностно-активных веществ),

выявление синергизма осуществляется путем сопоставления достигнутых показателей тех или иных свойств композиции относительно аддитивного значения [34–86]. Что касается терминологии, используемой в дальнейшем, то в контексте описания синергизма, его видов и эффектов в литературе встречаются определения: синергический или синергетический эффект, синергическая или синергетическая система [10, 11, 36, 39, 40, 47–54, 66, 68–70, 83, 84–88]. В данном обзоре мы ограничимся анализом синергических систем, для которых численные значения свойств в смесевой композиции находятся выше или ниже аддитивного значения. Анализ таких систем с точки зрения неравновесной термодинамики не входят в задачу нашего исследования.

*Эффект синергизма будем рассматривать как системный эффект, связанный с тем, что система как целостное образование всегда характеризуется набором свойств, превышающих значения, рассчитанные по правилу аддитивности.*

## 2. Эффекты синергизма в технологии переработки полимеров

Одно из направлений поиска литературных данных, отражающих результаты исследований, проводимых в технологии переработки полимеров, было связано с использованием eLIBRARY.ru – российского информационного портала в области науки, технологии и образования. На данной платформе аккумулируются полные тексты и рефераты научных статей и публикаций. При введении ключевых слов поискового запроса «synergetic», «polymer» по позициям – «все типы публикаций» из полученного массива публикаций (451 публикация), были выбраны те, которые непосредственно относятся к вопросам технологии переработки полимеров [55–86].

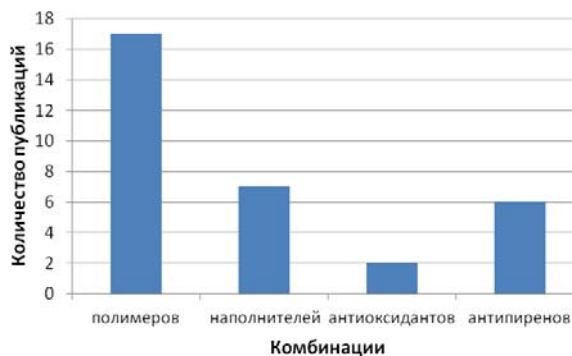


Рис. 2. Виды публикаций по теме поискового запроса «synergetic», «polymer» в технологии переработки полимеров (eLIBRARY.ru).

Рис. 2 отражает общие тенденции в соотношении публикаций, посвященных изучению эффектов синергизма в технологии переработки полимеров, характерные и для всего списка литературных ссылок, приведенных в обзоре. В целом 50% от общего объема публикаций занимают статьи, посвященные изучению влияния соотношений бинарных и тройных систем полимеров на комплекс технологических и эксплуатационных свойств материалов. Остальные 50% относятся к исследованиям влияния комбинаций ингредиентов целевого назначения на показатели полимерных материалов.

## 3. Количественные методы оценки синергических эффектов

Как показал анализ литературы, количественная оценка синергических эффектов осуществляется по двум направлениям. Первое – это определение и сопоставление показателей свойств композиций, содержащих изучаемые компоненты индивидуально и в смеси как при отдельно рассматриваемых соотношениях, так и во всем их диапазоне [10, 11, 36, 49, 51, 54, 58, 65, 79]. Второе – поиск адекватных математических моделей, содержащих параметры, характеризующих эффект синергизма, и построение поверхностей отклика изучаемых

свойств при варьировании состава компонентов смесей и их анализ на предмет выявления особенностей геометрии [36, 39, 40, 46, 52, 53, 69, 70, 72, 73, 83, 84, 87].

При изучении природы возникновения эффекта синергизма и сущности физико-химических процессов, сопровождающих взаимодействие компонентов в комбинации, решении задач оптимизации, несомненно, является целесообразным придерживаться второго направления.

Выражения зависимостей свойств химических систем от состава, выведенные из термодинамических положений или молекулярно-кинетических представлений, приводят к громоздким формулам и редко оправдываются на реальных системах, поэтому зависимость свойств от состава выражают либо в виде эмпирических формул, либо в виде геометрических фигур – линий или поверхностей [20].

При формировании синергических систем целесообразно применять методы физико-химического анализа, разработанные Н.С. Курнаковым [89] и позволяющие интерпретировать результаты эксперимента с использованием ярких пространственных представлений. Решение такой задачи возможно лишь с использованием методов планирования эксперимента, позволяющих количественно оценить величину синергического эффекта [39, 40, 69, 70, 83, 84].

Большое число экспериментальных задач в химии и химической технологии формулируются как экстремальные; к ним относится определение оптимальных условий процесса, оптимального состава композиции и т.д.

Выбор плана определяется постановкой задачи и особенностями объекта. Интересующие исследователя эффекты определяются со значительно меньшей ошибкой, чем та, которая характерна для традиционных методов исследования. Применение методов планирования эксперимента значительно повышает эффективность эксперимента [90].

Применяются диаграммы «состав–свойство» различного вида. В случае двухкомпонентной системы (бинарной), откладывая на оси абсцисс состав, а по оси ординат – исследуемые характеристики, мы получаем простую химическую диаграмму состав–свойство, состоящую из совокупности линий, положение которых определяет состояние системы.

При построении диаграмм состав–свойство для трехкомпонентных систем применяются различные координатные системы. В этом случае широко используется метод изображения, предложенный Гиббсом в 1878 г. [20]. В этом методе сумма количеств  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$  трех компонентов приравняется постоянной величине  $K$  (в частности,  $K=1$ ):

$$x_1+x_2+x_3=K \quad (2)$$

Диаграммы составов представляют собой равнобедренный треугольник, каждая точка треугольника отвечает одному определенному составу тройной системы, и, наоборот, каждый состав представляется одной определенной точкой. Состав может быть выражен в мольных, массовых или объемных долях или в процентах. Вершины треугольника соответствуют индивидуальным компонентам, стороны – двойным системам [89].

Поверхности отклика в многокомпонентных системах имеют, как правило, сложный характер. Для адекватного описания таких поверхностей необходимы полиномы высоких степеней и, следовательно, большое количество опытов. Обычный полином степени  $n$  от  $q$  (количество компонентов) переменных имеет  $C_{q+n}^n$  коэффициентов [23]:

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq q} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq q} b_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i < j < k \leq q} b_{ijk} x_i x_j x_k + \dots + \sum b_{i_1, i_2, \dots, i_n} x_{i_1} x_{i_2} \dots x_{i_n} \quad (3)$$

Впервые задача построения математической модели состав – свойство, включающей все компоненты системы, была решена Шеффе в 1958 г. [91]. Шеффе были предложены симплекс-решетчатые планы, которые позволяют описывать свойства смесей приведенными полиномами, исходя из условия нормированности суммы независимых переменных (2).

С использованием современных программных продуктов (например, программы Table Curve 3D) можно, предварительно сведя задачу к двухфакторной, найти интересующую экспериментатора модель (не обязательно полиномиального характера) с необходимым комплексом критериев качества модели, а затем построить по ней диаграмму состав-свойство.

Для бинарной системы компонентов возможно применение уравнений регрессии следующего вида:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{12} x_1 x_2; \quad (4)$$

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{111} x_1^3 + b_{222} x_2^3 + b_{112} x_1^2 x_2 + b_{122} x_1 x_2^2 + b_{112} x_1^2 x_2; \quad (5)$$

здесь  $x_1$  – содержание первого компонента,  $x_2$  – содержание второго компонента,  $x_1 + x_2 = 1$ ;  $b_i$  – коэффициенты регрессии.

Для тройной системы возможно применение уравнений регрессии:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2; \quad (6)$$

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{111} x_1^3 + b_{222} x_2^3 + b_{333} x_3^3 + b_{112} x_1^2 x_2 + b_{122} x_1 x_2^2 + b_{113} x_1^2 x_3 + b_{133} x_1 x_3^2 + b_{223} x_2^2 x_3 + b_{233} x_2 x_3^2 + b_{123} x_1 x_2 x_3, \quad (7)$$

здесь  $x_1$  – содержание первого компонента,  $x_2$  – содержание второго компонента,  $x_3$  – содержание третьего компонента,  $x_1 + x_2 + x_3 = 1$ ;  $b_i$  – коэффициенты регрессии.

В качестве количественной меры эффекта синергизма в уравнениях (4–7) выступают параметры модели  $b_{12}$ ,  $b_{23}$ ,  $b_{13}$ ,  $b_{112}$ ,  $b_{122}$ ,  $b_{113}$ ,  $b_{133}$ ,  $b_{223}$ ,  $b_{233}$  и  $b_{123}$ , отвечающие за взаимодействие компонентов в смеси [92, 93].

В работе [94] предлагается сочетание методов дисперсионного и регрессионного анализа (латинский квадрат как 1/3 реплика от эксперимента типа  $3^3$ ) с целью установления влияния соотношения компонентов вулканизирующей группы – цистин / сульфенамид Ц / сера на свойства эластомерных материалов на основе натурального каучука. Применение данного подхода позволяет количественно характеризовать совместное влияние двух ускорителей при варьировании содержания вулканизирующего агента – серы.

#### 4. Идентификация, анализ и формирование синергических систем в технологии переработки полимеров

Идентификация. В работе [95] предлагается рассмотрение проявления синергического эффекта на примере анализа тепловых свойств наполненных эластомерных систем. Каучуки характеризуются низкими значениями теплопроводности, что приводит к возникновению существенных градиентов температур внутри изделий (в особенности, массивных) при их термообработке (в первую очередь, вулканизации) и эксплуатации (в частности, в динамических условиях) [96]. Поэтому проблема повышения теплопроводности и температуропроводности эластомерных систем стоит достаточно остро. Повышение данных показателей лимитируется количеством наполнителя, которое может быть введено в резину без ухудшения ее характеристик [97].

На рис. 3 и 4 приведены результаты влияния типа и соотношения наполнителей на температуропроводность резин. В первом случае рассматривается влияние индивидуально и в комбинации трех марок П514, П324 и П234 печного технического углерода для резин на основе каучука СКИ-3 при суммарной дозировке наполнителя 10, 30 и 50 масс.ч. Во втором – варьирование теплофизических характеристик резин на основе СКИ-3, сопряженное с изменением гранулометрического состава порошка алюминия (общая дозировка 100 масс.ч.).

Построение диаграмм состав-свойство осуществлялось с использованием моделей второго и третьего порядка, в состав которых входили параметры, характеризующие эффекты взаимодействия изучаемых компонентов.



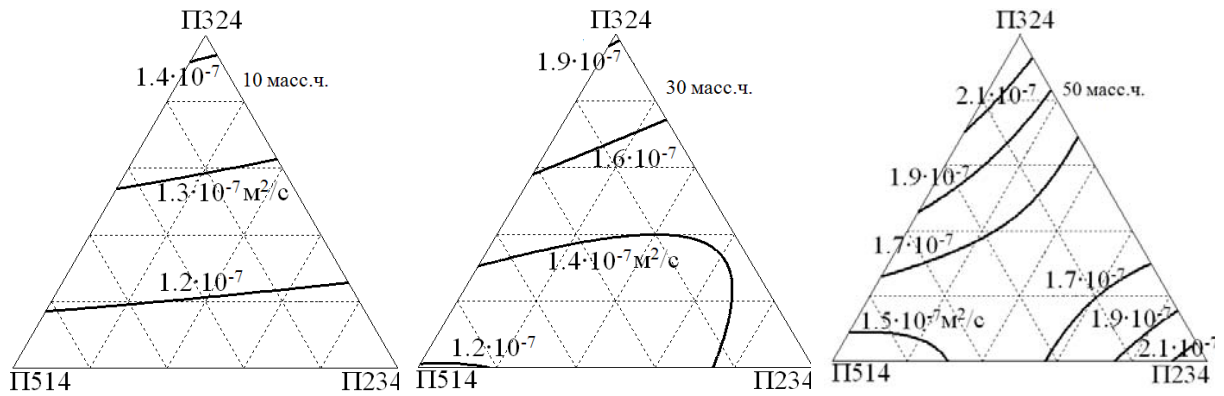


Рис. 3. Зависимость теплопроводности резин от соотношения различных марок технического углерода.

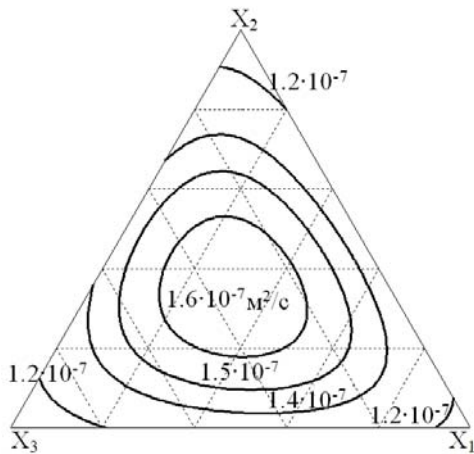


Рис. 4. Зависимость теплопроводности резин от соотношения различных фракций порошка алюминия  
 $(x_1$  – средний диаметр частиц <5 мкм;  
 $x_2$  – средний диаметр частиц 5-15 мкм  
и  $x_3$  – средний диаметр частиц >15 мкм.

Идентификация эффектов синергизма осуществлялась путем изучения поверхностей отклика на предмет наличия экстремумов на сторонах и внутри концентрационного треугольника.

Как видно из рис. 4 при увеличении общего содержания наполнителя наряду с существенным увеличением теплопроводности наблюдается появление бинарных и тройных синергизмов.

Рассматривая изменение геометрии поверхности отклика при переходе от систем с малым содержанием наполнителя к высоконаполненным, можно заключить, что при содержании технического углерода 10.0 масс.ч. на 100.0 масс.ч. каучука изолинии носят линейный характер, отсутствуют экстремальные точки на сторонах треугольника (бинарные системы) и во внутренней области симплекса. При увеличении содержания наполнителя сначала формируется поверхность отклика, характеризующаяся наличием бинарных синергизмов на сторонах. В случае максимального наполнения, поверхность отклика представляет собой, с определенными оговорками, гиперболический параболоид (ги-

перболы при горизонтальном сечении поверхности отклика и параболы – при вертикальном).

В случае использования алюминия различной дисперсности формируется поверхность отклика, представляющая собой эллиптический параболоид, искаженный наличием эффектов взаимодействия третьего порядка. Для всех бинарных систем и для тройной системы наблюдается эффект синергизма, что, вероятно, связано с внедрением мелких частиц в пространство между крупными и образованием совместных структур.

Один из подходов, предлагаемых авторами [98, 99] к анализу эффектов синергизмов заключается в выявлении типов экстремальных точек – эллиптических и гиперболических. Так, при модификации тепловых свойств с помощью «активных» наполнителей реализуется синергический эффект гиперболического типа, что связано с протеканием физико-химических процессов при взаимодействии частицы технического углерода с эластомерной матрицей, например, процессов адсорбции, взаимодействия в межфазном слое, формирования саже-каучукового геля и т.д. Синергический эффект эллиптического типа, более «механический» по своей природе, сопряжен с изменением количества «пятен» контакта частиц при варьировании гранулометрического состава наполнителя. Таким образом, морфологические свойства наполнителя определяют виды эффектов синергизмов, реализуемых в эластомерных материалах.

При анализе эффектов синергизма для более содержательной количественной оценки интенсивности взаимодействия компонентов в смеси предлагается еще два подхода. Первый связан с применением топологических принципов [100–102], второй – с определением численных значений параметров математических моделей, отвечающих за взаимодействие компонентов, и рассмотрением влияния рецептурно-технологических факторов (суммарная дозировка смеси компонентов, температура и продолжительность технологических процессов) на их величину [95].

Применение методов качественной геометрии при исследовании зависимостей свойства от состава, представляющих собой сложные функции многих переменных, предоставляет универсальный подход для установления общих закономерностей, присущих реальным системам и отражающихся на химических диаграммах «состав–свойство» [89]. Получаемая диаграмма состав–свойство представляет замкнутый «комплекс» точек, линий и поверхностей. В целях получения обобщенных решений при анализе диаграмм состав–свойство целесообразно определенному комплексу изолиний поставить в соответствие граф, изображающий тенденции изменения отклика при варьировании состава [100–102].

Используя принципы классификации двумерных сечений поверхностей отклика, изложенные в работах [40, 92, 98], осуществляют анализ диаграмм состав–свойство в случае бинарных и многокомпонентных систем.

В основу такой классификации положено количество и взаимное расположение особых точек поверхности отклика в вершинах квадрата или треугольника (в случае двух и трех переменных), на его сторонах и во внутренней области. Все особые точки поверхности подразделяются на эллиптические, гиперболические и параболические. Поверхность отклика, представляющая собой эллиптический параболоид, имеет место в случае, если квадратичные коэффициенты уравнения регрессии в каноническом виде имеют одинаковые знаки. Центр поверхности – максимум, если коэффициенты отрицательны, минимум, если они положительны. Поверхность отклика – гиперболический параболоид (седло) и в центре поверхности «минимакс», если знаки коэффициентов различны [90]. Эллиптические и гиперболические точки составляют группу простых особых точек, параболические относятся к сложным особым точкам, согласно классификации, принятой в качественной теории дифференциальных уравнений.

Представление диаграмм состав–свойство в виде графов может оказаться полезным при анализе временного тренда геометрических образов.

Возвращаясь к определению численных значений параметров математических моделей, отвечающих за взаимодействие компонентов, как меры синергических эффектов и рассмотрению влияния рецептурно-технологических факторов на их величину обратимся к рис. 5. На графике иллюстрируется динамика изменения шести параметров моделей второго порядка при варьировании общего содержания технического углерода для примера, рассмотренного на рис. 3. Здесь явно наблюдается возрастающее влияние коэффициента бинарного

синергизма  $a_{12}$ , демонстрирующее увеличение взаимодействие компонентов между собой.

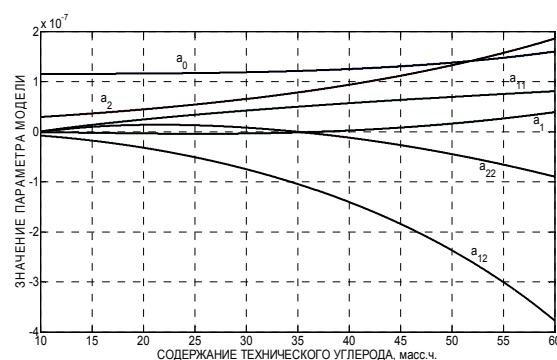


Рис. 5. Зависимость параметров моделей второго порядка от содержания технического углерода.

Формирование синергических систем находится в неразрывной связи с анализом условий возникновения сверхаддитивных значений свойств полимерных композиционных материалов. Оно сопряжено с поиском природы и соотношений компонентов, когда поверхность отклика представляет собой эллиптический или гиперболический параболоид. В последнем случае синергизм формируется в направлении долиной линии седла.

Формирование синергических систем можно рассматривать как эффективный способ оптимизации составов полимерных композиций.

\*\*\*

В.И. Вернадский в своей работе «Очерки по истории современного научного мировоззрения» (1902-1903 г.) писал: «Весьма часто приходится слышать убеждение, не соответствующее ходу научного развития, будто точное знание достигается лишь при получении математической формулы, лишь тогда, когда к объяснению явления и к его точному описанию могут быть приложены символы и построения математики. Это стремление сослужило и служит огромную службу в развитии научного мировоззрения, но привнесено ему оно извне, не вытекает из хода научной мысли».

Выход из этой ситуации состоит в том, чтобы эти «построения математики» заговорили на языке данной науки. Это достигается тогда, когда «математические формулы» не являются абстрактными символами, а имеют физический смысл, присущий данной науке. Количественный анализ явлений синергизма является иллюстрацией такого подхода. А уж с чем трудно спорить, так это с тем, что любые выводы из экспериментальных исследований, не подкрепленные статистическими критериями, могут быть подвергнуты сомнению.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Словарь иностранных слов, вошедших в состав русского языка / под ред. А.Н. Чудинова. СПб: Издание В. И. Губинского, 1910. 676 с.
2. Крысин Л.П. Толковый словарь иноязычных слов. М.: Эксмо, 2008. 944 с.
3. Большая советская энциклопедия: в 30 т. М.: Советская энциклопедия. Т. 23. 1976. 640 с.
4. Кемпбелл Э., Саммерс Лаче. Стратегический синергизм: 2-е изд. СПб.: Питер, 2004. 416 с.
5. Юдин В.В., Щеголева С.А. Стратегический синергизм и синергетика // Вестник Тихоокеанского государственного экономического университета. 2006. № 3. С. 99–109.
6. Ляхов А.В., Крачулова М.В. Понятия и виды синергизма // Экономика промышленности. 2009. Т. 48. № 5. С. 25–30.
7. Муратов А.С., Поварич И.П. Синергизм и эмерджентность: генезис их гармонизации в экономике и управлении // Вестник Кемеровского государственного университета. 2012. № 1. С. 271–275.
8. Панов В.Г., Нагребецкая Ю.В. О понятии синергизма в исследованиях с бинарными факторами // Информатика и системы управления. 2010 № 2. С. 21–25.
9. Антонова Р.А., Балтикова А.А., Брагинский М.Я., Еськов В.В. Идентификация синергизма в биосистемах // Вестник новых медицинских технологий. 2011. Т. 18. № 3. С. 334–335.
10. Семихина Л.П., Семихин Д.В. Способ выявления эффекта синергизма в композиционных деэмульгаторах по низкочастотным диэлектрическим измерениям: пат. 2301253 РФ. № 2 301 253; заявл. 18.01.2006; опубл. 20.06.2007. Бюл. № 10. 5 с.
11. Семихина Л.П. Способ выявления эффекта синергизма в композиционных ингибиторах коррозии по низкочастотным диэлектрическим измерениям: пат. 2416100 РФ. № 2 416 100; заявл. 11.01.2009; опубл. 10.04.11. Бюл. № 17. 5 с.
12. Бураковски Т. Коэффициент синергизма (синергетики) технологий. // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2002. № 1. С. 10.
13. Проценко В.Д. Синергизм биологических и технических систем: автореф. дис. ... докт. биологич. наук. М., 2004. 258 с.
14. Ляхов А.В., Головина А.К. Направления на создание синергетического эффекта и методы управления синергизмом // Экономика промышленности. 2009. Т. 48. № 5. С. 19–27.
15. Философский словарь М.: Политиздат, 1980. 444 с.
16. Хоружий С.С. Православная аскеза – ключ к новому видению человека. Библиотека Веб-Центра «Омега», 2000. 165 с. Режим доступа: <http://lib.eparhia-saratov.ru/books/21h/horuzhy/ascetic/contents.html>
17. Св. Иоанн Кассиан. Собеседование XIII. 10,11 // Писания. Св.-Троицкая Сергиева Лавра. Сергиев Посад: РФМ, 1993. С. 408–410.
18. Синергия. Проблемы аскетики и мистики Православия. Научный сб-к. / Под ред. С.С. Хоружего. М.: «ДИ-ДИК», 1995. 368 с.
19. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. М.: Мир, 1990. 244 с.
20. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. Новый диалог с природой. М.: Едиториал УРСС, 2003. 312 с.
21. Хакен Г. Синергетика. М.: Мир, 1980. 404 с.
22. Филосовский словарь. Режим доступа: <http://www.philosophydic.ru/sinergetika>
23. Герман Хакен о синергетике. [http://inet-life.narod.ru/synergy\\_danil.html](http://inet-life.narod.ru/synergy_danil.html)
24. Синергетике 30 лет. Интервью с профессором Г. Хакеном. Проведено Е.Н. Князевой // Вопросы философии. 2000. № 3. С. 53–61.
25. Вяткин В.Б. Синергетическая теория информации: пояснения и терминологические замечания // Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. Краснодар: КубГАУ, 2012. № 80(06). С. 1–36. Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2012/06/pdf/46.pdf>
26. Арефьев В.А., Лисовенко Л.А. Англо-русский толковый словарь генетических терминов. М.: Изд-во ВНИРО, 1995. 407 с.
27. Смирнов Э.А. Теория организации. М.: ИНФРА-М, 2003. 248 с.
28. Акимова Т.А. Теория организации: уч. пос. для вузов. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. 367 с.
29. Латфуллин Г.Р., Райченко А.В. Теория организации: учебник для вузов. СПб.: Питер, 2003. 400 с.
30. Лафта Дж. К. Теория организации. М.: ТК Велби, Изд-во Проспект, 2003. 416 с.
31. Лапыгин Ю.А. Теория организации. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2007. 311 с.
32. Сангинова М.Ю., Ходжаева М. Синергизм и консенсусное решение // Вестник Таджикского государственного университета права, бизнеса и политики. 2010. № 2. С.28–33.
33. Данилов Ю.А., Б.Б. Кадомцев. Что такое синергетика // в кн. Нелинейные волны. Самоорганизация / Под. ред. А.В. Гапонова-Грехова, М.И. Рабинович. М.: Наука, 1983. С. 5–16.
34. Fuller R.V. Synergetics: explorations in the geometry of thinking. NY: Macmillan Publishing Company, Inc., 1975. 30 p.



35. Salamone J.C. Concise polymeric materials encyclopedia. NY: CRC Press, 1999. 1706 p.
36. Кимельблат В.И. О синергизме механических характеристик смесей полиолефинов // Вестник Казанского технического университета. 2011. № 14. С. 313–316.
37. Lee M.S., Chen S.A. Synergism on Tensile Properties of Injection Molded Polybutene-1 / Polypropylene Blends // Polymer engineering and science. 1993. V. 33. № 11. P. 686–699.
38. Ellis C.L., Barry C.M. A Study of the Synergism of Poly(Vinyl Chloride) Polyether-Ester Blends // Journal of vinyl and additive technology. 1996. V. 2. № 4. P. 326–329.
39. Наумова Ю.А., Агаянц И.М., Люсова Л.Р. Закономерности формирования синергических систем при создании рецептур резин // Сб. тезисов докл. VIII Российской научно-практич. конф. «Сырье и материалы для резиновой промышленности». М.: НИИШП, 2001. С. 233–234.
40. Наумова Ю.А. Синергические системы растворителей для адгезионных композиций на основе хлоропреновых каучуков: дис. ... канд. тех. наук. М., 2001. 205 с.
41. Musin I.N., Sukhanov P.P., Kimelblat V.I. Investigation of Polyolefines Synergetic Blends by the Impulse NMR Method // Russian polymer news. 2002. V. 7. № 3. P. 20–26
42. Ramiro J., Eguiazabal J.I., Nazabal J. Synergistic mechanical behaviour and improved processability of poly(ether imide) by blending with poly(trimethylene terephthalate) // Polym. Adv. Technol. 2003. V. 14. P. 129–136.
43. Кимельблат В.И., Мусин И.Н. Свойства смесевых полиолефиновых композиций и пути улучшения их эксплуатационных характеристик. Казань: изд-во Казанского гос. технол. ун-та, 2006. 104 с.
44. Wang B.B., Wei L.X., Hu G.S. Synergetic Toughness and Morphology of Poly(propylene)/Nylon 11/Maleated Ethylene-Propylene Diene Copolymer Blends // Journal of Applied Polymer Science. 2008. V. 110. P. 1344–1350.
45. Li B., Zhang X., Zhang Q. Synergistic Enhancement in Tensile Strength and Ductility of ABS by Using Recycled PETG Plastic // Journal of Applied Polymer Science. 2009. V. 113. P. 1207–1215.
46. Третьякова Н.А., Ходакова С.Я., Люсова Л.Р., Наумова Ю.А., Агаянц И.М., Кузнецов А.С. Создание тепло-, маслостойких клеевых композиций для резинокордных изделий // Каучук и резина. 2012. № 4. С. 27–30.
47. Кузнецов В.М. Синергизм комбинации ПАВ и его определение на основе дисперсности гербицидной эмульсии // Башкирский химический журнал. 2012. Т.19. № 1. С. 61–64.
48. Здоренко Н.М., Алябьева Т.М., Кормош Т.М. Об эффекте синергизма комплексной добавки в каолиновых и глинистых суспензиях // Огнеупоры и техническая керамика. 2012. № 4-5. С. 64–66.
49. Юрецкая Т.В., Перекупка А.Г. Влияние порядка смешения компонентов на эффективность и синергизм композиций ингибиторов АСПО // Нефтяное хозяйство. 2010. № 1. С. 103–107.
50. Мухутдинов Э.А., Мухутдинов А.А. Влияние структуры кристаллов и частотных характеристик диафена ФП и ДФФП на их синергизм // Каучук и резина. 2007. № 3. С. 7–12.
51. Семихина Л.П., Москвина Е.П., Кольчевская И.В. Явление синергизма в смесях поверхностно-активных веществ // Вестник Тюменского государственного университета. 2012. № 5. С. 85–91.
52. Новокшенов В.В., Мусин И.Н., Кимельблат В.И. Синергизм в смесях ПП/ЭПК // Структура и динамика молекулярных систем. Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет. 2009. С. 158.
53. Новокшенов В.В., Мусин И.Н., Кимельблат В.И. Синергизм упруго-прочностных показателей термопластичных полиолефинов, модифицированных бутадиен-нитрильным каучуком // Структура и динамика молекулярных систем. Йошкар-Ола: Изд-во Марийского государственного технического университета. 2008. Ч. 3. С. 207–210.
54. Овчинникова Т. Создание условий для эффекта синергизма на предприятиях алкогольной промышленности Воронежской области // Практический маркетинг. 2007. № 5 С. 26–29.
55. Okamoto Y., Hasegawa Y., Yoshino F. Urethane/acrylic composite polymer emulsions // Progress in Organic Coatings. 1996. T. 29. № 1-4. P. 175–182.
56. Pendyala V.N.S., Xavier S.F. Prediction of a synergistic blend composition range based on polymer-solvent interactions // Polymer. 1997. T. 38. № 14. P. 3565–3572.
57. Al-Salah H.A. Polymer compatibility enhancement via ion-ion and ion-dipole interactions: ternary blends of polyurethane, poly(vinyl chloride) and poly(styrene-co-maleic anhydride) // Polymer Bulletin. 1998. T. 40. № 4-5. P. 477–484.
58. Weidisch R., Michler G.H., Fischer H., Arnold M., Hofmann S., Stamm M. Mechanical properties of weakly segregated block copolymers: 1. synergism on tensile properties of poly(styrene-b-n-butylmethacrylate) diblock copolymers // Polymer. 1999. T. 40. № 5. P. 1191–1199.
59. Erina N.A., Prut E.V. Synergism of the elastic modulus of poly(propylene)-high-density poly(ethylene) blends // Polymer Science. Series A. 2000. T. 42. № 2. P. 183–188.
60. Van Aert H.A.M., Van Steenpaal G.J.M., Nelissen L., Lemstra P.J., Liska J., Bailly C. Reactive compatibilization of blends of poly(2,6-dimethyl-1,4-phenylene ether) and poly(butylene terephthalate) //

Polymer. 2001. Т. 42. № 7. P. 2803–2813.

61. Diaz M.F., Barbosa S.E., Capiati N.J. Polyethylene-polystyrene grafting reaction: effects of polyethylene molecular weight // Polymer. 2002. Т. 43. № 18. P. 4851–4858.

62. Куликов Д.А., Сахарова Л.А., Индейкин Е.А. Исследование ограниченно совместимых полимер-олигомерных композиций методом дифференциально-сканирующей калориметрии // Лакокрасочные материалы и их применение. 2007. № 7-8. С. 86–94.

63. Lim E., Jung B.J., Chikamatsu M., Azumi R., Yase K., Do L.M., Shim H.K. Synergistic effect of polymer and oligomer blends for solution-processable organic thin-film transistors // Organic Electronics. 2008. Т. 9. № 6. P. 952–958.

64. Baohua Wei, Jinping Qu, Xu Gang. Synergetic effect on PP/MEPDM blends under vibration force field in tri-screw dynamic mixing extruder // Journal of Reinforced plastics and composites. 2009. Т. 28. № 14. P. 1705–1712.

65. Loos J., Bonnet M., Petermann J. Morphologies and mechanical properties of syndiotactic polypropylene (SPP)/ polyethylene (PE) blends // Polymer. 2000. Т. 41. № 1. С. 351–356.

66. Лоскутова Ю.В., Прозорова И.В., Юдина Н.В. Улучшение структурно-реологических свойств высокопарафинистой нефти с помощью химических реагентов и вибрационной обработки // Химия и технология топлив и масел. 2011. № 5. С. 21–23.

67. Haq M., Burgueño R., Mohanty A.K., Misra M. Bio-based polymer nanocomposites from upe/eml blends and nanoclay: development, experimental characterization and limits to synergistic performance // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2011. Т. 42. № 1. С. 41–49.

68. Новокшенов В.В., Мусин И.Н., Кимельблат В.И. Оптимизация свойств маслостойких термопластичных эластомерных композиций // Пластические массы. 2009. № 3. С. 24–27.

69. Новокшенов В.В., Мусин И.Н., Кимельблат В.И. Зависимость свойств смесей ПП/ЭПК от состава композиции и характеристик полимеров Пластические массы. 2009. № 5. С. 7–10.

70. Новокшенов В.В., Глухов В.В., Волков И.В., Мусин И.Н., Кимельблат В.И. Зависимость свойств смесей ПП/ЭПК от состава композиции и молекулярных характеристик полимеров // Вестник Казанского технологического университета. 2009. № 4. С. 198–205.

71. Li Zh., Guo Sh., Song W., Hou B. Effect of interfacial interaction on morphology and mechanical properties of PP/POE/BaSO<sub>4</sub> ternary composites // Journal of Materials Science. 2003. Т. 38. № 8. P. 1793–1802.

72. Cross R. Synergistic combinations of thermally conductive fillers in polymer matrices // Microelectronics International. 1996. Т. 13. № 3. P. 27–29.

73. Silva G.G., Marzana B.E., Bruns R.E. A statistically designed study of ternary electrolyte polymer material (PEO/LiClO<sub>4</sub>/ethylene carbonate) // Journal of Materials Science. 2000. Т. 35. № 18. P. 4721–4728.

74. Peeterbroeck S., Alexandre M., Nagy J.B., Pirlot C., Fonseca A., Moreau N., Philippin G., Delhalle J., Mekhalif Z., Sporken R., Beyer G., Dubois Ph. Polymer-layered silicate-carbon nanotube nanocomposites: unique nanofiller synergistic effect // Composites Science and Technology. 2004. Т. 64. № 15 SPEC. ISS. P. 2317–2323.

75. Kuennen T. Hybrid «synergy» fibers show crack-fighting potential // Concrete Products. 2001. Т. 104. № 3. P. 82–84.

76. Haibao Lu, Yanju Liu, Jihua Gou, Jinsong Leng, Shanyi Du. Synergistic effect of carbon nanofiber and carbon nanopaper on shape memory polymer composite // Applied Physics Letters. 2010. Т. 96. № 8. P. 084102-3.

77. Zhang S.M., Lin L., Deng H., Gao X., Zhang Q., Fu Q., Bilotti E., Peijs T. Synergistic effect in conductive networks constructed with carbon nanofillers in different dimensions // Express Polymer Letters. 2012. Т. 6. № 2. P. 159–168.

78. Гороховатский Ю.А., Бурда В.В., Карулина Е.А., Карулина О.А. Перспективный упаковочный материал на основе композитных полимерных пленок с бинарным наполнителем // Научное мнение. 2013. № 3. С. 212–217.

79. Zaharescu T., Jipa J.S., Podina C. Degradation of ethylene - propylene elastomers in the presence of phenolic antioxidants part ii. oxygenated products distribution // Journal of Materials Science Letters. 1998. Т. 17. № 9. P. 709–712.

80. Verdu J., Rychly J., Audouin L. Synergism between polymer antioxidants - kinetic modelling // Polymer Degradation and Stability. 2003. Т. 79. № 3. P. 503–509.

81. Sinturel C., Lemaire J., Gardette J.L. Photooxidation of fire retarded polypropylene - iii. mechanism of has inactivation // European Polymer Journal. 2000. Т. 36. № 7. P. 1431–1443

82. Bertalan G., Marosi G., Anna P., Ravadits I., Csontos I., Toth A. Role of interface modification in filled and flame-retarded polymer systems // Solid State Ionics. 2001. Т. 141-142. P. 211–215.

83. Баженов С.В., Наумов Ю.В. Бинарные и тройные синергетические смеси антипиренов-наполнителей в полимерных композициях // Пожарная безопасность. 2005. № 5. С. 32–36.

84. Баженов С.В. Механизм и синергетический эффект огнезащиты хлорсодержащих полимеров комплексными антипиренами на основе смеси оксидов и гидроксидов металлов //

Пожарная безопасность. 2005. № 3. С. 38–44.

85. Kandare E., Chigwada G., Wang D., Wilkie C.A., Hossenlopp J.M. Probing synergism, antagonism, and additive effects in poly(vinyl ester) (PVE) composites with fire retardants // *Polymer Degradation and Stability*. 2006. Т. 91. № 6. Р. 1209–1218.

86. Хаширова С.Ю., Сапаев Х.Х., Виндижева А.С., Мусов И.В., Микитаев А.К. Поливинилхлоридный пластикат с повышенной огнестойкостью // *Научно-технические технологии*. 2012. Т. 13. № 1. С. 27–30.

87. Schabbach L.M., Fredel M.C., Hotza D. Three-component lead borosilicate frit // *American Ceramic Society Bulletin*. 2001. Т. 80. № 7. Р. 57–63.

88. Арефьев В. А., Лисовенко Л. А. *Англо-русский толковый словарь генетических терминов* / Науч. ред. Л. И. Патрушев. М.: Изд-во ВНИРО, 1995. 407 с.

89. Курнаков Н.С. *Введение в физико-химический анализ*. Л.: Изд. АН СССР, 1940. 562 с.

90. Кафаров В.В. *Методы кибернетики в химии и химической технологии*. М: Химия, 1985. 448 с.

91. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. *Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии*. М.: Высшая школа, 1978. 319 с.

92. Каблов В.Ф., Агаянц И.М. *Информационные технологии в разработке и производстве эластомерных материалов*. Волгоград: Изд. ВолгГТУ. 2009. 409 с.

93. Агаянц И.М. *Азы статистики в мире химии*. М.: Изд. МИТХТ, 2012. 441 с.

94. Kamoun M., Nassour A., Nelles M. The effect of novel binary accelerator system on properties of vulcanized natural rubber // *Hindawi Publishing Corporation. Advances in Materials Science and Engineering*. 2009. V. 2009. Article ID916467. 7 P. Режим доступа: <http://www.hindawi.com/journals/amse/2009/916467>

95. Агаянц И.М., Наумова Ю.А. Создание эффекта синергизма как инструмента формирования эластомерных систем с заданными свойствами // *Промышленное производство и использование эластомеров* 2013. № 2. С. 23–34.

96. Лукомская А.И., Баденков П.Ф., Кеперша Л.Н. *Тепловые основы вулканизации резиновых изделий*. М.: Химия. 1972. 360 с.

97. Годовский Ю.К. *Теплофизика полимеров*. М.: Химия. 1982. 280 с.

98. Жаров В.Т., Серафимов Л.А. *Физико-химические основы дистилляции и ректификации*. Л.: Химия. 1975. 240 с.

99. Пуанкаре А. *Избранные труды*. Том II. Топология: пер. с фр. М.: Наука, 1972. С. 457–807.

100. Оре О. *Теория графов*: пер с англ. М.: Наука, 1980. 336 с.

101. Татт У. *Теория графов*: пер. с англ. М.: Мир. 1988. 424 с.

102. Харари Ф. *Теория графов*: пер. с англ. М.: Едиториал, 2003. 296 с.

## SYNERGISM AND SYNERGIC EFFECTS IN POLYMER'S PROCESSING TECHNOLOGY

**Yu.A. Naumova<sup>@</sup>**

*M.V. Lomonosov Moscow State University of Fine Chemical Technologies, Moscow, 119571 Russia*

<sup>@</sup> *Corresponding author e-mail: naumova\_yulia@mail.ru*

*The work deals with the terms synergism and synergic systems evolution. The analysis of literature sources in which the results of synergic effects study in polymer's technology are presented, is carried out.*

*Modern approaches to estimate synergic effects, identification, analysis and synergic systems forming are reviewed, and that allows scientifically-based solving the practical receipt-building tasks of polymer materials and their processing technological processes parameters choice.*

**Key words:** *synergism, synergic effect, synergic systems, polymer, polymer blends, accelerator combination, filler combination, experiment planning, graph.*