DOI: 10.18411/vntr2020-155-1

УДК:519.24: 66.095.262-911.48

ИНФОРМАЦИОННО – СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ МНОГОУРОВНЕВЫХ И РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ РЕАЛЬНО ДОСТУПНОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ПРИМЕРЕ ПРОЦЕССА СУСПЕНЗИОННОЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ СТИРОЛА

© Валерий Николаевич Богатиков[1], Владимир Иванович Ерофеев[2], Александр Владимирович Иляхинский[2], Александр Геннадиевич Лопатин[3]

[1]Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тверской государственный технический университет» (ТвГТУ), Тверь, Россия

[2]Институт проблем машиностроения РАН - филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук", Нижний Новгород, Россия

[3]Новомосковский институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева» (Новомосковский институт РХТУ им. Д.И. Менделеева), Новомосковск, Россия

ilyahinsky-aleks@bk.ru

Аннотация *Обеспечение безаварийной работы любого промышленного объекта связано с контролем его состояния, позволяющим выбрать рациональные управляющие воздействия обеспечивающие нормальные условия эксплуатации технологического процесса. В работе рассматривается подход к решению задачи оценки состояния сложного динамического промышленного процесса на основе применения новой информационной технологии для целей прогнозирования внештатных и предаварийных ситуаций.*

Ключевые слова: *суспензионная полимеризация, стирол, статистическая модель, распределение Дирихле, энтропия, самоорганизация.*

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-07-00914).

INFORMATION AND STATISTICAL METHOD FOR INVESTIGATION OF PROCESSES OF MULTILEVEL AND DISTRIBUTED INDUSTRIAL SYSTEMS UNDER CONDITIONS OF REALISTICALLY ACCESSIBLE INFORMATION BY EXAMPLE OF STYRENE SUSPENSION POLYMERIZATION PROCESS

© V.N. Bogatikov[1], V.I. Erofeev[2], A.V. Ilyahinsky[2], A.G. Lopatin[3]

[1]Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Tver State Technical University" (TvSTU), Tver, Russia

[2]*Institute of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences - a branch of the Federal State Budgetary Scientific Institution "Federal Research Center Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences", Nizhny Novgorod, Russia*
[3]*Novomoskovsky Institute (branch) of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "D.I. Mendeleev Russian University of Chemistry and Technology" (Novomoskovsky Institute of Russian State Technical University named after D.I. Mendeleev), Novomoskovsk, Russia*
ilyahinsky-aleks@bk.ru

Abstract. *Ensuring accident-free operation of any industrial facility is associated with its condition control, which allows you to choose rational control actions that ensure normal operating conditions of the technological process. The paper considers the approach to solving the problem of assessing the state of a complex dynamic industrial process based on the application of new information technology for the purpose of forecasting emergency and pre-emergency situations.*
Keywords*: styrene suspension polymerization, statistical model, Dirichlet distribution, entropy, self-organization.*

Acknowledgements. *The research was supported by Russian Foundation for Basic Research, project no. 20-07-00914.*

Введение. Обеспечение безаварийной работы любого промышленного объекта связано с контролем (диагностикой) за его состоянием, позволяющим выбрать рациональные управляющие воздействия обеспечивающие нормальные условия эксплуатации технологического процесса. В настоящее время существует достаточно много различных моделей и методов для оценки состояний технологических процессов полученных в основном эмпирическим путем как результат последовательности наблюдений и имеющих, как правило, качественно-описательный характер. Однако широкое применение этих методов сдерживается, с одной стороны, сложностью реальных процессов и с другой - недостаточным развитием теории отдельных аспектов механики сплошной среды [1]. В последнее десятилетие получил распространение подход, основанный на том, что диагностируемый объект химической технологии есть многоуровневая иерархически организованная система, которая должна описываться в рамках нелинейной механики и неравновесной термодинамики [2]. В рамках этой методологии технологический процесс рассматривается как открытая, сильнонеравновесная система, в которой протекают неравновесные локальные структурные превращения. Их самоорганизация, в заданных граничных условиях обуславливает формирование диссипативных структур, эволюция которых определяет характер химического процесса. Поэтому, естественно, представляет научный и практический интерес рассмотрение состояния технологических процессов с применением теоретико-вероятностных методов на основе принципов неравновесной термодинамики, метода диссипативных структур и структурно- информационных критериев эволюции сложных химических, физико-химических и биологических систем.

Математическая модель. Сложный характер взаимодействия элементов химических превращений, диффузионного переноса вещества и тепла, межатомного тепла и массопереноса, механического перемешивания, изменения агрегатного состояния вещества, влияние на их состояние множества плохо контролируемых внешних факторов приводит к тому, что эти процессы обнаруживают вероятностную природу и могут быть представлены статистической моделью (образом) в виде распределения вероятностей [3-5]. Такое представление, согласно предложенной Клодом Шенноном [6] термодинамической концепции информации, позволяет рассматривать процессы, протекающие в анализируемой системе, с позиции термодинамики и одного из важнейших ее понятий - энтропии

Однако выбор распределения вероятностей в качестве модели изучаемого процесса или природного явления без понимания механизма изучаемого явления не гарантирует адекватности выбранной статистической модели состоянию исследуемого объекта или природного явления. Поэтому выбор распределения вероятностей в качестве модели процессов, лежащих в основе функционирования системы, должен осуществляться с системных позиций, когда исследуемый объект как система включается в процесс исследования при соблюдении следующих основных процедур системного анализа (рисунок 1):

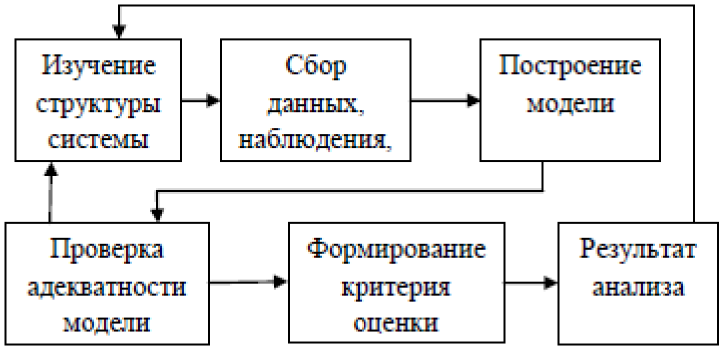

Рис. 1. Процедуры системного анализа

- изучение структуры системы, анализ её компонентов, выявление взаимосвязей между отдельными элементами;
- сбор данных о функционировании системы, исследование информационных потоков, наблюдения и эксперименты над анализируемой системой;
- построение моделей;
- проверка адекватности моделей,
- формирование критериев;
- реализация выбора и принятие решений;
- внедрение результатов анализа.

Или в известной формулировке В.В. Налимова о выборе распределения вероятностей в качестве статистической модели: «Выбор распределения должен базироваться, прежде всего, на понимании механизма изучаемого явления»[7].

Распределение как модель изучаемого явления должно быть информационно эквивалентно объекту исследования путем соблюдения следующих условий [8, 9]:

- распределение, выбранное в качестве статистической модели, должно быть определено на ограниченном интервале;
- энтропия распределения должна состоять из отвечающего второму закону термодинамики производства энтропии и характеризующего процессы взаимодействия с внещней средой потока энтропии;

- распределения, определенные на одномерных симплексах, должны допускать переход к распределению, определенному на многомерном симплексе.

Следует отметить, что определенное на неограниченном интервале, нормальное распределение, как статистическая модель исследуемого процесса, предполагает наличие у исследуемого объекта физических свойств, параметры которых стремятся к неограниченно большой или малой величине. Очевидно, что таких свойств нет.

Было показано [10], что, если состояние объекта отражает результат совместной реализации n-1 независимых процессов x_j, протекающих со скоростями (интенсивностями) v_j и противоположного им по смыслу процесса, протекающего со скоростью v_n, то статистическая модель, информационно эквивалентная объекту любой природы и степени сложности, может быть представлена распределением Дирихле. Функция плотности вероятности этого распределения, определенная на k-мерном симплексе, равна

$$D(x_1,\dots,x_k)=\frac{\Gamma(\alpha_n)}{\prod_{i=1}^{n}\Gamma(v_i)}\prod_{j=1}^{k}x_j^{v_j-1}\left(1-\sum_{j=1}^{k}x_j\right)^{v_n-1}. \qquad (1)$$

Здесь $0\le\sum x_j\le 1;\ v_j\ge 0,\dots,v_n\ge 0;\ \sum v_j=\alpha_n;\ n=k+1.$

Энтропия распределения Дирихле, определенная как

$$H=-\int_x \varphi(x)\log_\alpha \varphi(x)dx \quad , \qquad (2)$$

может быть представлена в виде суммы

$$H(D)=H_i(v_i,\dots,v_n)+H_e(a_n), \qquad (4)$$

в которой слагаемое

$$H_i(v_1,\dots,v_n)=\ln\prod\nolimits_{i=1}^{n}\Gamma(v_i)-\sum\nolimits_{i=1}^{n}(v_i-1)\psi(v_i) \qquad (5)$$

представляет собой, производство энтропии, обусловленное протеканием необратимых процессов, а слагаемое

$$H_e(a_n)=-\ln\Gamma(a_n)+(a_n-n)\psi(a_n) \qquad (6)$$

характеризует поток энтропии, отвечающий за процессы взаимодействия с внешней средой путем обмена веществом или энергией. Здесь в (1), (5) и (6) $\Gamma(x)$ – гамма-функция, а $\psi(x)=\frac{d}{dx}\ln\Gamma(x)$ – логарифмическая производная гамма-функции. Поскольку распределение (1) полностью определено скоростями независимых процессов v_i, то представленная им статистическая модель инвариантна не только к виду напряженно-деформированного состояния, но и типу процессов, определяющих состояние трибосопряжения. При $n\ge 3$ поток энтропии (6) может принимать как положительные, так и отрицательные значения, что в терминах модели распределения Дирихле позволяет рассматривать $H_e(a_n)<0$ как одно из условий самоорганизации [11] и может свидетельствовать о процессах упорядочения в зоне контактного взаимодействия в результате возникновения метастабильных дефектных фаз. Следует отметить, что возможность представления энтропии распределения Дирихле в виде суммы производства и меняющего знак потока выгодно отличает его от получивших широкое распространение моделей, построенных, например, на основе нормального распределения, гамма-распределения и распределения Пуассона, для которых такое представление невозможно [9,10].

Модель - распределение Дирихле полностью определена, если известны и определены параметры формы, имеющие смысл скоростей независимых процессов. Однако, исследование любого объекта не ограничивается его компактным каноническим описанием. Чаще всего в качестве основной задачи стоит определение закономерностей, которым подчинены состояния, свойства и поведение объекта исследования при действии внешних факторов. К числу фундаментальных параметров любой статистической модели, которым могут быть поставлены в соответствие известные физические характеристики, относятся: математическое ожидание, второй центральный момент, коэффициент вариации, коэффициент асимметрии и показатель эксцесса [3, 12]. Кроме этого в их число входит универсальная функция состояния - информационная энтропия [13]. Показано [9], что фундаментальные параметры статистической модели распределение Дирихле, характеризующие состояние и свойства исследуемой реальной системы могут быть определены как:

1. Математическое ожидание (здесь и далее $i = 1,\ldots,k$)

$$\bar{x}_i = \frac{v_i}{\alpha_n} \tag{7}$$

характеризует относительную скорость i-го процесса – пространственно - временная характеристика i-го процесса.

2. Второй центральный момент

$$\mu_{2(i)} = \int (x_i - \bar{x}_i)^2 D(x_1,\ldots,x_k)dx_1,\ldots,dx_k = \frac{v_j(\alpha_n - v_i)}{\alpha_n^2(\alpha_n + 1)} \tag{8}$$

представляет собой энергетическую характеристику i-го процесса, обладающую свойствами доли свободной энергии, связанной с этим процессом.

3. Коэффициент вариации

$$K_i = \frac{\mu_{2(i)}^{1/2}}{\bar{x}_i} = \left(\frac{\alpha_n - v_i}{v_i(\alpha_n + 1)}\right)^{1/2} \tag{9}$$

характеризует уровень флуктуаций, связанных с i-м процессом.

4. Коэффициент асимметрии

$$\beta_{3(i)} = \frac{\mu_{3(i)}}{\mu_{2(i)}^{3/2}} = \frac{2(\alpha_n - 2v_i)(\alpha_n + 1)^{1/2}}{(\alpha_n + 2)v_i^{1/2}(\alpha_n - v_i)^{1/2}} \tag{10}$$

характеризует меру отклонения от состояния равновесия скоростей i – ых процессов.

5. Показатель эксцесса (островершинности)

$$\beta_{2(i)} = \frac{\mu_{4(i)}}{\mu_{2(i)}^2} = \frac{3(\alpha_n + 1)\left[2(\alpha_n - 2v_i)^2 + v_i(\alpha_n - v_i)(\alpha_n + 2)\right]}{(\alpha_n + 2)(\alpha_n + 3)v_i(\alpha_n - v_i)} \tag{11}$$

характеризует меру упорядоченности свойств объекта, связанную с реализацией i – го процесса.

6. Показатель асимметрии

$$\beta_{1(i)} = \beta_{3(i)}^2 \quad (12)$$

можно рассматривать как меру энергии, потребной для отклонения от состояния равновесия продуктов реализации i-го процесса.
7. Смешанный показатель эксцесса,

$$\beta_{2ij} = \frac{(\alpha_n+1)\{\alpha_n^3+(\alpha_n-6)[v_i v_j - v_i(\alpha_n - v_j) - v_j(\alpha_n - v_i)]\}}{(\alpha_n+2)(\alpha_n+3)v_i v_j} \quad (13)$$

характеризующий связь между скоростями процессов i и j, являющимися составной частью модели Дирихле. Следует отметить, что данный показатель, в отличие от коэффициента корреляции, позволяет оценивать связь между процессами вне зависимости от того, нормально или приближенно нормально совместное распределение пары i и j.

Анализ процесса суспензионной полимеризации стирола. В качестве примера применения распределения Дирихле при изучении процесса суспензионной полимеризации стирола. Суспензионная полимеризация стирола проводилась в полимеризаторе объемом 10 м^3, снабженого импеллерными мешалками. Обороты мешалки регулируются тиристорным приводом от 10 до 80 об/мин.
Анализ состояния процесса полимеризации проводился по параметрам, приведенным в таблице 1.

Таблица 1

Параметры процесса суспензионной полимеризации

Регистрируемые параметры	$M \pm \sigma$	
	20.12.2010	21.12.2010
1.Температура воды на входе в полимеризатор	87.1 ± 20.4	84.1 ± 24.3
2.Температура массы стирола в полимеризаторе	94.1 ± 8.5	93.1 ± 9.5
3.Температура воды на выходе из полимеризатора	86.7 ± 17.9	83.2 ± 20.0
4. Давление массы стирола в полимеризаторе	4.6 ± 0.6	4.6 ± 0.7
5. Ток нагрузки мешалки	18.1 ± 0.3	18.2 ± 0.3

Характер изменения параметров приведен на рисунках 2 и 3.

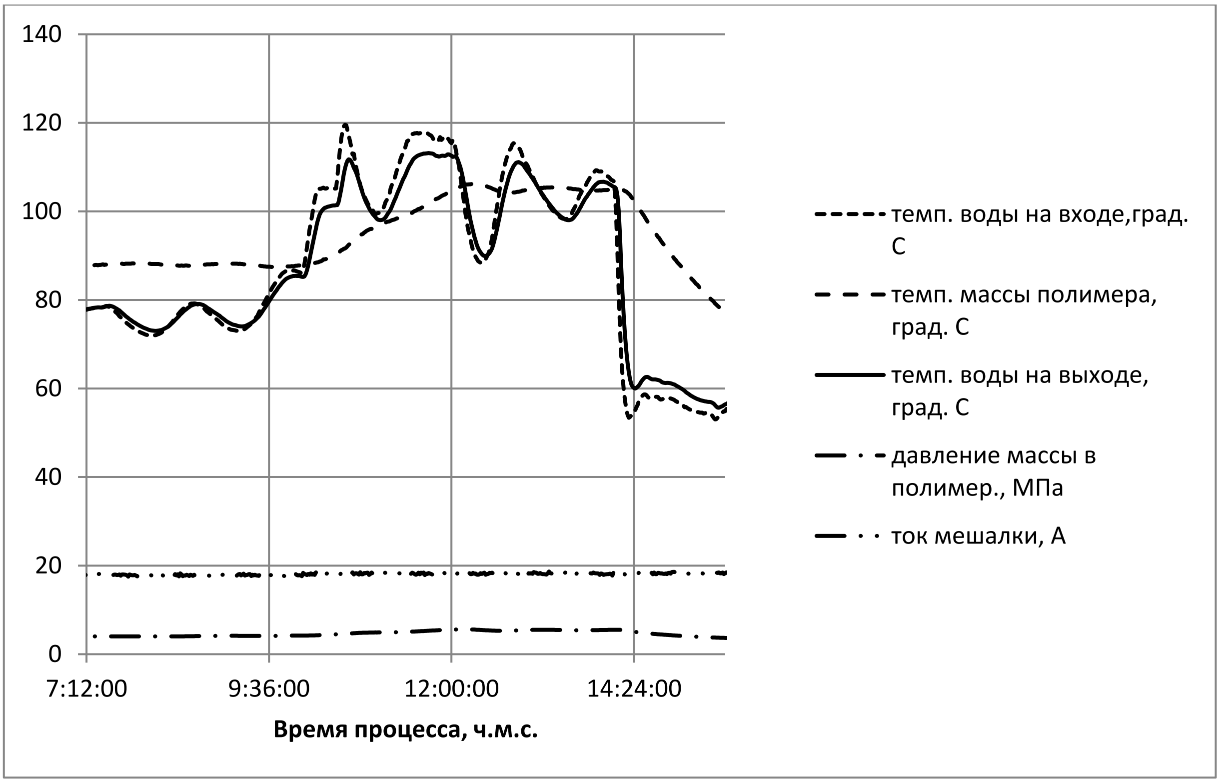

Рис.2. Характер изменения регистрируемых параметров для периода наблюдения 20.12.2010.

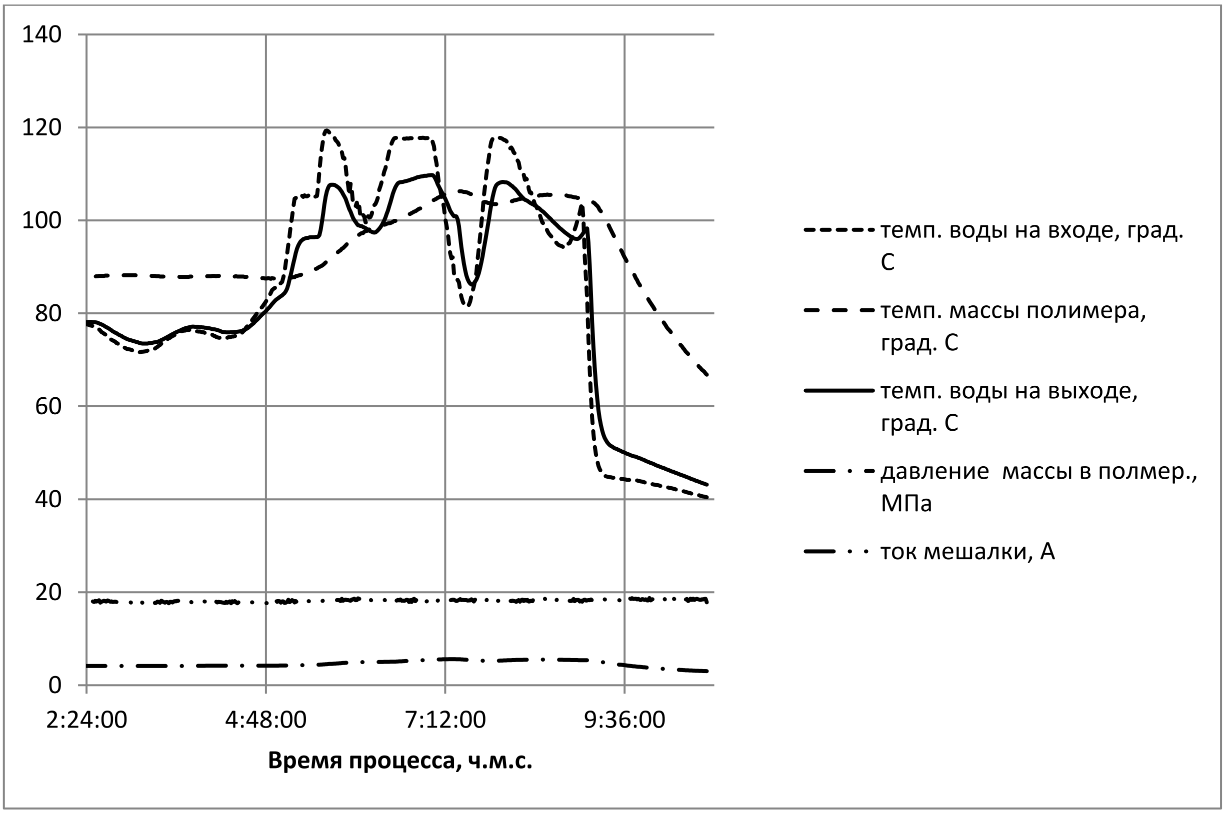

Рис.3. Характер изменения регистрируемых параметров для периода наблюдения 21.12.2010.

В качестве информативных параметров состояния металлического реактора (процесса суспензионной полимеризации) на всём протяжении синтеза в условиях постоянства температуры и числа оборотов мешалки были выбраны энтропия пятимерного распределения Дирихле (4–6) и смешанный показатель эксцесса пятимерной модели Дирихле (13). При анализе последовательности наблюдений регистрируемых параметров в качестве информативных параметров состояния были использованы энтропия одномерного распределения Дирихле (бета-распределения) в (1)-(6) n=2 и параметр самоорганизации регистрируемого сигнала

$$K_c = \frac{\sum Q^i_{D-}}{\sum Q^i_{D+}}, \tag{14}$$

В (14) $\sum Q^i_{D-}$ суммарное количество Q, выявленных в анализируемом числовом ряде зарегистрированного сигнала моделей Дирихле i - ой размерности, имеющих отрицательное значение внешней (потока) энтропии, а $\sum iQ^i_{D+}$ суммарное количество моделей Дирихле, имеющих положительное значение внешней энтропии.

В таблице 2 приведены средние значения внешней энтропии He (6), внутренней энтропии Hi (5) и энтропии H (4) пятимерного распределения Дирихле, отражающие состояние процессов полимеризации по пяти анализируемым параметрам за наблюдаемые периоды времени (20.12.2010 и 21.12.2010) и вероятности того, что выборки взяты из генеральных совокупностей, имеющих одно и тоже значение среднего (TTEST)

Таблица 2

Среднее значение энтропии пятимерного распределения Дирихле

	He	Hi	H
20.12.2010	5.91	-57.32	-51.41
21.12.2010	3.96	-46.62	-42.66
TTEST	0.007	0.061	0.086

На рисунке 4 приведено графическое отображение средних значений указанных выше энтропий.

Как видно из приведенного рисунка 4 и следует из таблицы 1 средние значения внешней, внутренней и суммарной энтропии для циклов полимеризации для периодов наблюдения 20.12.2010 и 21.12.2010 отличаются друг от друга. Состояние полимеризатора для периода наблюдения 20.12.2010 характеризуется большим отклонением от состояния равновесия для необратимых процессов $\left(\left|H_i\right|_{цикл1} > \left|H_i\right|_{цикл2} \right)$ и большим взаимодействием с окружающей средой $\left((H_t)_{wbrk1} > (H_e)_{цикл2} \right)$. При этом следует отметить, что различие величин внешних энтропий для периодов наблюдения 20.12.2010 и 21.12.2010 значимо с уровнем значимости $\alpha < 0.01$. Для значений внутренних и суммарных значений энтропий различие значимо с $\alpha < 0.1$.

Рис. 4. Графическое отображение значений энтропии пятимерного распределения Дирихле.

Таблица 3

Нормированные значения смешанного показателя эксцесса пятимерной модели Дирихле

	1-2	1-3	1-4	1-5	2-3	2-4	2-5	3-4	3-5	4-5
20.12.2010	10.5	16.7	10.5	9.5	10.3	8.3	7.3	10.2	9.4	7.2
21.12.2010	11.7	23.5	12.0	11.4	8.0	6.5	5.5	8.3	7.5	5.7

Как следует из данных приведенных в таблице 3 процессы полимеризации периодов наблюдения 20.12.2010 и 21.12.2010 отличаются связью между регистрируемыми параметрами. Так если для периода наблюдения 20.12.2010 преобладает связь между параметрами 2-3, 2-4, 2-5, 3-4, 3-5, то для периодов наблюдения 21.12.2010 преобладает связь 1-2, 1-3, 1-4, 1-5.

В таблице 4 приведены средние значения внешней энтропии Не (6), внутренней энтропии Hi (5) и энтропии Н (4) одномерного распределения Дирихле (бета-распределения) для каждого из пяти анализируемых параметров за наблюдаемый период времени для первого и второго циклов.

Таблица 4

Средние значения энтропии бета-распределения регистрируемых параметров процесса полимеризации

Регистрируемые параметры	20.12.2010			21.12.2010		
	He	Hi	H	He	Hi	H
1.Температура воды на входе в полимеризатор	3.86	-9.59	-5.73	1.91	-13.43	-11.52
2.Температура массы стирола в полимеризаторе	0.67	-1.43	-0.75	0.53	-1.00	-0.48
3.Температура воды на выходе из полимеризатора	1.62	-5.79	-4.17	3.36	-8.96	-5.60
4.Давление массы стирола в полимеризаторе	0.72	-1.33	-0.61	0.67	-1.36	-0.68
5.Ток нагрузки мешалки	7.94	-8.33	-0.40	7.63	-7.98	-0.35

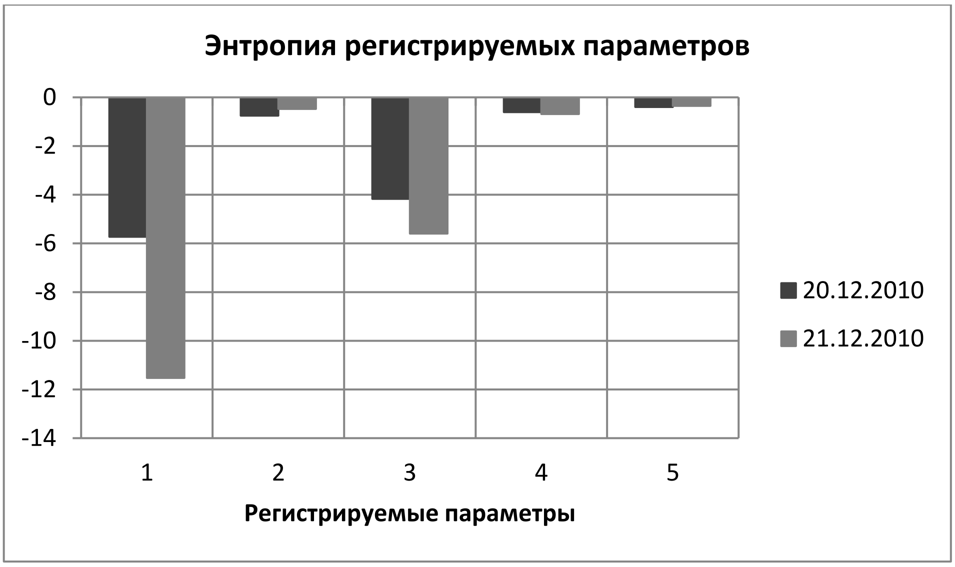

Рис.5. Средние значения суммарной энтропии H (табл. 4) бета-распределения регистрируемых параметров

На рисунке 5 приведено графическое отображение средних значений суммарной энтропии бета-распределения регистрируемых за время наблюдений параметров реактора полимеризации. При практически одинаковых по величине и характеру изменения регистрируемых параметрах (см таблицу1 и рисунки 2 и 3) для периодов наблюдения 20.12.2010 и 21.12.2010 средние значения внешней, внутренней и суммарной энтропий «Температуры воды на входе в полимеризатор», «Температуры массы стирола в полимеризаторе» и «Температура воды на выходе из полимеризатора» значимо отличаются друг от друга с уровнем значимости $\alpha < 0.1$. Средние значения суммарной энтропии параметра «Ток нагрузки мешалки» для периодов наблюдения 20.12.2010 и 21.12.2010 значимо отличаются друг от друга с $\alpha < 0.1$. Состояние полимеризатора периода наблюдения 21.12.2010 по значению энтропии параметров «Температура массы стирола» и «Ток нагрузки мешалки» находится в более равновесном состоянии (He=-0.48 и -0.35), чем периода наблюдения 20.12.2010 (He=-0.75 и -0.40). По значению энтропии параметра «Давление массы стирола» периоды наблюдения 20.12.2010 и 21.12.2010 не отличаются друг от друга. По значению энтропии параметров «Температура воды» состояние полимеризатора периода наблюдения 20.12.2010 ближе к состоянию равновесия по сравнению с состоянием полимеризатора периода наблюдения 21.12.2010.

Известно [15], что главной задачей управления считается адаптация управляемой системы к требованиям внешней среды. Критерием управляемости анализируемой системы может служить представленное в численном выражении понятие самоорганизация, характеризующее способность сложных систем адаптироваться к изменяющимся условиям. В таблице 5 приведены результаты вычисления параметра самоорганизации для временных рядов регистрируемых параметров металлического реактора процесса полимеризации.

Таблица 5

Значения параметра самоорганизации регистрируемых параметров

	1	**2**	**3**	**4**	**5**
20.12.2010	0.13	0.60	0.15	0.43	3.07
21.12.2010	0.25	0.60	0.30	0.47	2.81

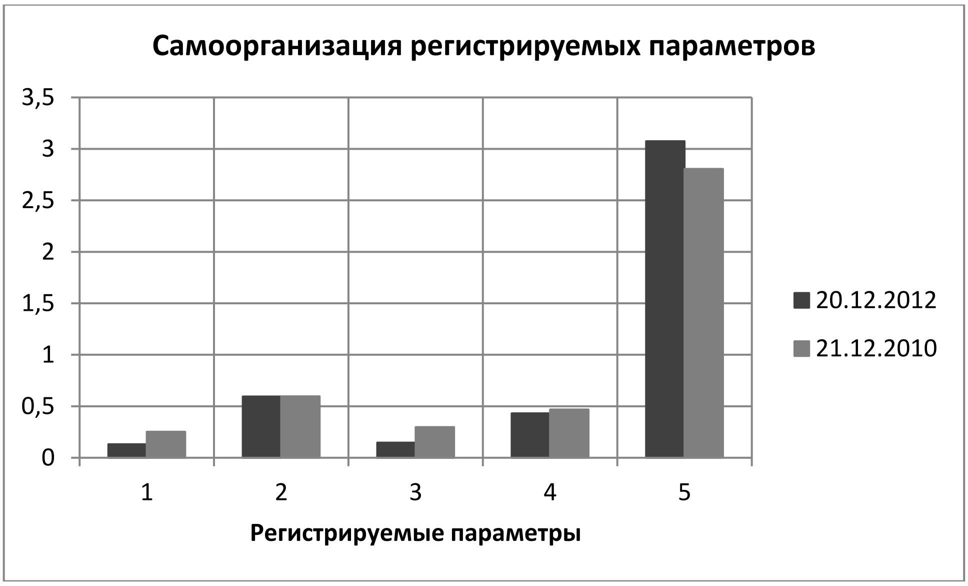

Рис. 6. Параметр самоорганизации.

Как видно из результатов представленных в таблице 5 и на рисунке 1, наибольшей степенью самоорганизации K_c (лучшей управляемостью) обладает пятый регистрируемый параметр «Ток нагрузки мешалки». При этом указанный параметр самоорганизации K_c для периода 20.12.2010 значимо с $\alpha < 0.1$ отличается от параметра самоорганизации для периода наблюдения 21.12.2010.

Расчет диагностического параметра самоорганизации и параметров распределения Дирихле. Оценка закономерностей самоорганизации систем самой разной природы может быть проведена с позиции универсального энтропийного критерия эволюции Гленсдорфа—Пригожина [14], являющегося косвенным следствием второго начала термодинамики неравновесных процессов. Отражением этих процессов является изменение параметров модели, в качестве одного из которых выступает значение (знак) внешней энтропии распределения Дирихле. Методологически результат вычисления численного значения параметра самоорганизации достигается тем, что анализируемый временной ряд объема N значений непрерывно-скользящим методом при шаге смещения на одно значение базовой выборки m разбивается на последовательность выборок m_i, где i = 1,..., N-m. Для каждой выборки m_i определяются выборочные значения среднего

$$\bar{x}_i = \frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m} x_j \,, \tag{15}$$

второго

$$\mu_2 = \frac{1}{m-1}\sum_{j=1}^{m}(x_j - \bar{x}_i)^2 \,, \tag{16}$$

третьего

$$\mu_3 = \frac{m}{(m-1)(m-2)}\sum_{j=1}^{m}(x_j - \bar{x}_i)^3 \tag{17}$$

и четвертого

$$\mu_4 = \frac{(m^2-2m+3)\sum_{j=1}^{m}(x_j-\bar{\chi}_i)^4 - 3m(2m-3)\left(\frac{\sum_{j=1}^{m}(x_j-\bar{\chi}_i)^2}{m}\right)^2}{(m-1)(m-2)(m-3)} \quad (18)$$

центральных моментов и выборочные значения показателя асимметрии $\beta_{1(i)}$ (10) и показателя эксцесса $\beta_{2(i)}$ (11), по которым находят значения суммы параметров формы v_i последовательности бета-распределений (одномерных распределений Дирихле) α_i как

$$\alpha_i = \frac{6(\beta_{2(i)} - \beta_{1(i)} - 1)}{6 + 3\beta_{1(i)} - 2\beta_{2(i)}} \quad (19)$$

В соответствии с правилами информационно-статистической теории, изложенными в [9] проводят свертку следующих друг за другом бета-распределений к последовательности распределений Дирихле, для которых вычисляют значения параметра a_n. Вычисление параметров a_n проводят, используя свойство распределения Дирихле, которое состоит в том [12], что, если $(x_1,...,x_л)$ векторная случайная величина, имеющая k - мерное распределение Дирихле $D(v_1,....v_k;v_{k+1})$, то сумма $x_1+...+x_k$ имеет бета-распределение $Be(v_1+,...+v_k;v_{k+1})$. По значению параметра a_n распределения $Be(v_1+,...+v_k;v_{k+1})$ вычисляют значения показателей асимметрии и островершинности распределений Дирихле как

$$\beta_{3D} = \beta_{3Be} + \frac{2(n-2)(\alpha_n+1)^{0.5}}{(\alpha_n+2)(n-1)^{0.5}} \quad (20)$$

$$\beta_{2D} = \frac{3\alpha_n+2}{2\alpha_n+3}\beta_{3Be} + 3\frac{\alpha_n+1}{\alpha_n+3}, \quad (21)$$

где β_{3be} - показатель асимметрии (16) бета-распределения $Be(v_1+,...,+v_k;v_{k+1})$, а n=(k+1) Для одномерного распределения Дирихле - бета-рапределения n=2. Параметры формы распределения Дирихле определяют, используя выражения [9],

$$v_{iD} = \frac{\alpha_n}{2}\left(1 - \frac{\beta_{3D}(\alpha_n+2)}{(\beta_{3Be}^2(\alpha_n+2)^2+16(\alpha_n+1))^{0.5}}\right) \quad \text{и} \quad v_{(k+1)D} = 1 - \sum_{1}^{k} v_{iD} \quad (22)$$

При $\alpha_n > 0$ и $v_{iD} > 0$ вычисляют значение внешней энтропии распределений Дирихле (1.10) каждой из размерностей. По количеству распределений Дирихле в анализируемой выборке N, имеющих положительное и отрицательное значение внешней энтропии определяется значение параметра самоорганизации K_c (14).

Выводы. Проведенное исследование показало, что применения распределения Дирихле при изучении в условиях реально доступной информации процесса суспензионной полимеризации позволяет рассматривать процессы, протекающие в анализируемой системе, с позиции структурно-информационных критериев на основе принципов неравновесной термодинамики. Полученные результаты дают основание предложить новые диагностические признаки сложных химических систем параметр самоорганизации, энтропию и смешанный показатель эксцесса распределения Дирихле. Эти показатели могут быть основой способа принятия решения позволяющего выбрать рациональные управляющие воздействия, обеспечивающие нормальные условия эксплуатации технологического процесса, предупреждающие возможные отказы и снижающие до минимума непредвиденные достижения объектом контроля предельных режимом эксплуатации.

Список литературы

1. Кафаров В.В. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов. – М.: Наука, 1976. - 500 с.
2. Кафаров В.В. Системный анализ процессов химической технологии. Энтропийный и вариационный методы неравновесной термодинамики в задачах химической технологии / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов, Э.М, Кольцова. – М.: Наука, 1988. -367 с.
3. Хан Г. Статистические модели в инженерных задачах / Г. Хан, С Шапиро. - М.: Мир, 1989. - 344 с.
4. А. Н.Лебедев. Вероятностные методы в инженерных задачах : справочник / Лебедев А. Н., Куприянов М. С., Недосекин Д. Д. и др. - СПб. : Энергоатомиздат, 2000. - 333 с.
5. Сквайрс Дж. Практическая физика/Дж. Сквайрс. - М.: Мир, 1964. - 300 с.
6. Claude E Shannon, Warren Weaver The Mathematical Theory of Communications - University of Illinois Press, 1949. – 144 p.
7. Налимов В.В. В кн.: Хан Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах [Текст] / В.В. Налимов. – М.: Мир, 1969. – С. 5-6.
8. Шеннон К. Имитационное моделирование – искусство и наука / К. Шеннон. – М.: Мир, 1978. – 424 с.
9. Середа, Ю. С. Проблемы информационно-статистической теории / Ю. С. Середа. - Н.Новгород: ООО "Типография "Поволжье", 2007. - 356 с.
10. Иляхинский А.В. Статистические модели в задачах зондирования / А.В. Иляхинский, Ю.С. Середа // Известия ВУЗов, Радиофизика. – 1989. - Т. 32, № 12. - С.1502 - 1505.
11. Пригожин И. Время, структура и флуктуации / И.Пригожин // Успехи физических наук. - 1980. - Т. 131, вып. 2. - С. 185 - 207.
12. Уилкс С. Математическая статистика / С Уилкс. - М.: Наука, 1967. - 632 с.
13. Годман С. Теория информации / С. Годман. – М.: Изд. иностранной литературы, 1957. – 448 с.
14. Пригожин И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур (Послесловие) / И. Пригожин, Д. Кондеруди. – М.: Мир, 2002.
15. Саридис Дж. Самоорганизующиеся стохастические системы управления / Дж. Саридис. — М.: Наука, 1980. - 400 с.

Дата поступления: 30 июля 2020 г.