

**РОЛЬ МОДИФИКАЦИЙ И КОМПОНЕНТНОСТИ СЫРЬЯ С ТОЧКИ
ЗРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОТХОДООБРАЗОВАНИЯ**

Представлены данные о способах подавления отходообразования в источнике возникновения, технологическом процессе. Делая ссылку на положение о термодинамическом двуединстве в технологическом процессе, основанного, в том числе, на исследованиях И. Пригожина, предлагается утвердить содержание смысла сырья, используемого в технологическом процессе как многокомпонентную субстанцию, подлежащую определенному энергетическому воздействию. Показано, что неравновесная самоорганизация компонентных переходов сырья связана с резким уменьшением обратимой части энтропии системы за счет перераспределения с необратимой ее частью. Возможности перехода от необратимости к обратимости могут представлять интерес с точки зрения процессов отходообразования, как отказ от термодинамического двуединства в технологических процессах инженерными методами, именно потому что с этими процессами тесно соотносится особенность преобразования той части сырья, которая затем приобретает необходимые свойства товарной продукции, и которые изначально программируются в этой технологии, с наперед заданным энергетическим воздействием. В работе утверждается, что многокомпонентность сырья является причиной того, что производственная система изначально находится в состоянии термодинамического неравновесия относительно части таких компонентов. В работе расширены знания относительно соотношений термодинамических потоков и сил для различных способов преобразования веществ, представленные впервые И. Пригожиным. Выполнение условия $d_e S \rightarrow 0$ и $(dS/d\tau) \rightarrow (d_i S/d\tau)$ есть приведение производственной системы к конечному равновесию за счет ликвидации процессов отходообразования и замены их процессами таких преобразований, которые приводят к появлению новой товарной продукции в рамках одного и того же технологического процесса. В работе рассматривается случай, когда обратимая часть энтропии системы минимальна, но больше чем необратимая ее часть. Показана такая возможность только в том случае, если изменение состояния каждого компонента сырья достигается минимальным воздействием определенного типа энергии. При этом показаны условия, при которых распределение компонентов сырья между полученной продукцией и отходами носит характер нормального. Существует объяснение того, что именно единообразное энергетическое воздействие является причиной термодинамического двуединства, когда разные компоненты сырья соотносятся с разными реакциями, придающими одним из них состояние свойств продукции, а другим – состояние свойств отхода. Показано, что качественное энергетическое воздействие в рамках единой производственной системы – основа того, что каждый компонент сырьевой базы найдет своего функционального оператора. Поэтому термодинамическое двуединство в технологическом процессе может быть разорвано в пользу сильного неравновесия только применением других источников энергии, которые будут технологически адаптированы к компонентной (в идеале, всей) структуре сырьевой базы этого процесса.

Ключевые слова: производственный процесс, отходы, энергия, компонентность, термодинамическое двуединство, термодинамическая необратимость, неравновесность, энтропия системы.

* д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

В.С. Волошин. *Роль модифікацій і компонентності сировини з точки зору технологічних процесів відходоутворення.* Представлені дані про способи пригнічення відходоутворення в джерелі виникнення, технологічному процесі. Роблячи посилання на положення про термодинамічну двоєдність в технологічному процесі заснованого, в тому числі, на дослідженнях І. Пригожина, пропонується затвердити зміст сенсу сировини, використовуваної в технологічному процесі як багатокомпонентну субстанцію, що підлягає певному енергетичному впливу. Показано, що нерівноважна самоорганізація компонентних переходів сировини пов'язана з різким зменшенням оборотної частини ентропії системи за рахунок перерозподілу з незворотною її частиною. Можливості переходу від незворотності до оборотності можуть представляти інтерес з точки зору процесів відходоутворення, як відмова від термодинамічної двоєдності в технологічних процесах інженерними методами, саме тому, що з цими процесами тісно співвідноситься особливість перетворення тієї частини сировини, яка потім набуває необхідних властивостей товарної продукції, і які спочатку програмуються в цій технології, з наперед заданим енергетичним впливом. У роботі стверджується, що многокомпонентність сировини є причиною того, що виробнича система спочатку знаходиться в стані термодинамічної нерівноваги щодо частини таких компонентів. В роботі розширені знання щодо співвідношень термодинамічних потоків і сил для різних способів перетворення речовин, представлені вперше І. Пригожиним. Виконання умови $d_e S \rightarrow 0$ і $(dS/d\tau) \rightarrow (d_i S/d\tau)$ є приведення виробничої системи до кінцевої рівноваги за рахунок ліквідації процесів відходоутворення і заміни їх процесами таких перетворень, які призводять до появи нової товарної продукції в рамках одного і того ж технологічного процесу. В роботі розглядається випадок, коли оборотна частина ентропії системи мінімальна, але більша за необоротну її частину. Показана така можливість тільки в тому випадку, якщо зміна стану кожного компонента сировини досягається мінімальним впливом певного типу енергії. При цьому показано умови, при яких розподіл компонентів сировини між отриманою продукцією та відходами носить характер нормального. Існує пояснення того, що саме однаковий енергетичний вплив є причиною термодинамічної двоєдності, коли різні компоненти сировини співвідносяться з різними реакціями, що додають одним з них стан властивостей продукції, а іншим – стан властивостей відходу. Показано, що якісний енергетичний вплив в рамках єдиної виробничої системи – основа того, що кожен компонент сировинної бази знайде свого функціонального оператора. Тому, термодинамічна двоєдність в технологічному процесі може бути розірвана на користь сильної нерівноваги тільки застосуванням інших джерел енергії, які будуть технологічно пристосовані до компонентної (в ідеалі, всієї) структури сировинної бази цього процесу.

Ключові слова: виробничий процес, відходи, енергія, компонентність, термодинамічна двоєдність, термодинамічна незворотність, нерівновага, ентропія системи.

V.S. Voloshin. *The role of modifications and components of raw materials from the viewpoint of technological processes of waste formation.* The data on the methods of suppressing waste generation in the source of origin, that is the technological process have been presented. Making reference to the provision on thermodynamic dualism in a technological process based, inter alia, on the research made by I. Prigogin, it is proposed to confirm the meaning of the raw materials used in the technological process as a multicomponent substance that is subjected to a certain energy effect. It has been shown that nonequilibrium self-organization of component transitions of the raw materials results from a sharp decrease in the reversible part of the system entropy due to redistribution with its irreversible part. The possibilities of the transition from irreversibility to reversibility may be of interest from the point of view of waste generation processes, such as the rejection of thermodynamic dualism in the technological processes by means of engineering methods, just because these processes are closely related to the distinguish-

ing feature of the transformation of that part of the raw material, which then acquires the necessary properties of the commercial product, and which are initially programmed in this technology, with a predetermined energy impact. The paper argues that it is the multicomponent nature of the raw material that is the reason for the fact that the production system is initially in a state of thermodynamic disequilibrium as related to some of these components. The work expands the knowledge regarding the relationships between the thermodynamic flows and the forces for various methods of substances transformation, first presented by I. Prigozhin. The fulfillment of the condition $d_e S \rightarrow 0$ and $(dS/d\tau) \rightarrow (d_i S/d\tau)$ is the reduction of the production system to final equilibrium by eliminating waste generation processes and replacing them with processes of such transformations, which results in the appearance of new commercial products within the same technological process. The paper considers the case when the reversible part of the entropy of the system is minimal, but larger than its irreversible part. It is only possible if the change in the state of each component of the raw material is achieved by the minimum impact of a certain type of energy. And conditions are shown under which the distribution of the components of the raw material between the resulting product and the waste is normal. There is an explanation of the fact that it is the uniform energy influence that causes the thermodynamic bi-unity, when different components of the raw materials are related to different reactions that impart some of them the state of product properties and the other the state of waste properties. It has been shown that high-quality energy impact within the framework of a single production system is the basis for each component of the raw material base to find its own functional operator. Therefore, the thermodynamic bi-unity in the technological process can be broken in favor of strong disequilibrium only by the use of other energy sources that will be technologically adapted to the component (ideally, the whole) structure of the raw material base of this process.

Keywords: production process, waste, energy, component nature, thermodynamic duality, thermodynamic irreversibility, nonequilibrium, system entropy.

Постановка проблемы. Теоретические исследования, направленные на выявление закономерностей появления отходов в технологических процессах, связаны с основополагающими принципами термодинамики. Покажем, что основные проблемы отходообразования в технологических процессах зависят от двух позиций: компонентность сырья и выбор источника энергии соответствующего качества.

Анализ последних исследований и публикаций. Идея термодинамического двуединства в системах производства товарной продукции, по-видимому, не нова. Ее впервые отобразил в своих работах И. Пригожин [1, 2]. И связана она, главным образом, с условиями сильной неравновесности, в которых находится та часть исходных материалов для переработки и та часть исходной энергии, при помощи которых перерабатываются эти материалы в полезную продукцию. А также с условиями необратимости процессов преобразования отдельных компонентов сырья, не привязывая их к качеству и структуре этих компонентов. Например, при таких явлениях, используемых в технологиях для получения полезной продукции, как диффузия, массоперенос, смешение и разделение компонентов, экстрагирование и экстракция компонентов, температурные изменения, структурные изменения нужных компонентов, фазовые переходы, привлечение пограничных явлений, то есть, там, где появляются градиенты отдельных параметров (концентраций, температур и др.), можно ожидать сильную термодинамическую неравновесность в некоторых вполне определенных областях необратимости [2].

Цель работы: доказательство условий преодоления термодинамического двуединства за счет многокомпонентности сырьевой базы и избирательного энергетического воздействия на нее.

Изложение основного материала. Решение задачи подавления отходов в источнике видится в целенаправленном изменении энтропии структуры компонентов исходных материалов, часть из которых переходит в полезную продукцию, а часть теряется в виде отходов при воздействии одной и той же энергии, приведением ненужных результирующих компонентов в ходе их перевода в сильно неравновесное термодинамическое состояние. При этом в полном соответствии с теоремой И. Пригожина $dS = d_e S + d_i S$ подобная неравновесная самоорга-

низация компонентных переходов связана с сильным уменьшением обратимой части энтропии $d_e S$ за счет перераспределения с необратимой ее частью $d_i S$.

Обратимся к рассуждениям И. Пригожина [2]. Для неизолированных систем справедливо выражение

$$\frac{dS}{d\tau} \leq \frac{d_i S}{d\tau} + \frac{d_e S}{d\tau}, \quad (1)$$

где $d_i S$ – поток энтропии, обусловленный процессами внутри системы; $d_e S$ – обменный поток энтропии, обусловленный внешними процессами.

Отношение $d_e S = 0$ является частным случаем второго начала термодинамики и относится к изолированным системам. С точки зрения производящих систем нас интересуют только неизолированные системы, для которых второе начало в обобщенной форме имеет вид $\frac{d_i S}{d\tau} \geq 0$.

Необратимость процессов, которым соответствует это соотношение, будет соблюдаться пока $d_i S > 0$. Как только будет достигнуто состояние, при котором $d_i S = 0$, система войдет в обратимое состояние, при котором обязательным условием будет $d_e S \neq 0$.

Такой переход от необратимости к обратимости будет представлять интерес с точки зрения процессов отходообразования, как и отказ от термодинамического двуединства в технологических процессах, именно потому, что с этими процессами тесно соотносится особенность преобразования той части сырья, которая затем приобретает необходимые свойства товарной продукции, которые изначально программируются в этой технологии с наперед заданным энергетическим воздействием. В пределе, если бы отсутствовала та часть сырьевых компонентов, из которых при существующем энергетическом воздействии получались измененные по сравнению с исходными материалами отходы, такая производственная система становилась бы сильно необратимой и соответствовала тому состоянию, когда $d_e S \rightarrow 0$, и система становится обратимой и независимой от внешних энергетических воздействий.

Поликомпонентность сырьевых материалов для любого технологического процесса является причиной того, что в системе, которая заранее ориентирована к конечному термодинамическому равновесию, происходят процессы необратимые относительно некоторой, заранее планируемой части компонентов сырья. Именно той их части, которые не могут быть программируемо видоизменены существующими в системе внутренними источниками энергии. И. Пригожин приводит интересную таблицу соотношений термодинамических потоков и сил (в общем виде A_α и X_α), принимающих участие в подобных необратимых процессах. Расширим ее за счет некоторых других способов преобразования веществ, которые имеют место в различных технологических процессах (таблица). Для всех этих явлений легко рассчитывается внутренняя диссипация в виде квадратичной формы $d_i S / d\tau = \sum_\alpha X_\alpha (\sum_l A_{\alpha,l} \cdot X_\alpha)$.

Таблица

Термодинамические потоки и силы в некоторых явлениях, наиболее часто применяемых в технологических процессах (по данным [1] с дополнениями)

№ п/п	Явление	Поток A_α	Сила X_α	Направленность
1	Теплоперенос	Тепловой поток J_t	$\nabla(1/T)$	Вектор
2	Массоперенос	массопоток вещества в единицу времени M_τ	Разность концентраций по массе ΔC_m	Вектор
3	Диффузия	поток массы i -го компонента $J_{d,i}$	$-\nabla(\mu_i / T) - F_i$	Вектор
4	Вязкая диссипация	диссипативная часть тензора давления P	$\nabla v(1/T)$	Тензор

Продолжение таблицы

5	Химические реакции	скорость реакции ρ, ω_ρ	Средство реакции относительно температуры A_ρ / T	Скаляр
6	Электрические взаимодействия	электрический ток I_k	Разность потенциалов $d\Delta\phi_k$	Вектор
...

Заметим, что большая часть этих потоков векторные, однонаправленные, что подчеркивает еще раз преимущественную необратимость таких явлений в технологических процессах и невозможность их применения для функций подавления отходов в источнике возникновения существующими энергетическими воздействиями. Безусловно, открытость любой производственной системы позволяет видоизменять внешнее энергетическое воздействие таким образом, чтобы искусственно направить его на «отходообразующие компоненты» сырьевой базы. Но для этого нужны соответствующие условия, определяемые термодинамическим равновесием системы, которые в конечном итоге будут отвечать состоянию $d_e S \rightarrow 0$ и $\frac{dS}{d\tau} \rightarrow \frac{d_i S}{d\tau}$. Выполнение последнего условия есть приведение производственной системы к конечному равновесию за счет ликвидации процессов отходообразования и замены их процессами таких преобразований, которые приводят к появлению новой товарной продукции в рамках одного и того же технологического процесса.

Существенным здесь является утверждение И. Пригожина о том, что вблизи точки равновесия величина $d_e S \neq 0$ может принимать как положительные, так и отрицательные значения (приток или отток энтропии извне). Но при этом сумма (1) может быть также или положительной, или отрицательной, что характерно только для неизолированных систем.

Конечно же, нас интересует вариант реализации, если $d_e S \neq 0$ и одновременно $|d_e S| > d_i S$. То есть, когда технологический процесс организован таким образом, что осуществляется с понижением общей энтропии:

$$dS / d\tau < 0. \tag{2}$$

Такой случай возможен тогда и только тогда, когда изменение состояния каждого из компонентов сырьевой базы достигается минимальным воздействием определенного типа внутренней энергии или энергии извне без увеличения энтропии собственно системы по вышеуказанному алгоритму. Безусловно, это идеальный конечный результат, обеспечить который далеко не всегда возможно по причине крайней сложности осуществления разрыва термодинамического двуединства в любой производственной системе, которое преодолевается только по некоторым сложным закономерностям. Рассмотрим некоторые из них, по крайней мере, в первом приближении.

Итак, предварительно ссылаемся на [1]: *двуединое нарушение симметрии преобразования некоторыми операторами Λ и Λ' в сопоставимых группах (компонентов) W_τ и W'_τ заключается в том, что одна из них дает возрастание энтропии в одном временном векторе, а другая – в противоположном. Но только одно из этих двух нарушающих симметрию преобразований Λ и Λ' отвечает за объективное развитие системы, в том числе, за одно из сопоставимых состояний W_τ и W'_τ* . Автор подчеркивает, что системы, для которых существуют подобные операторы преобразования Λ и выполняется отбор (в нашем случае можно говорить о компонентном отборе сырьевой базы), можно назвать «внутренне необратимыми».

Функциональный оператор Λ по существу должен влиять на некоторое преобразование плотности ρ исходных параметров и соотноситься с функцией распределения однонаправленной во времени $\tilde{\rho}$ таким образом, чтобы $\Lambda = \tilde{\rho} / \rho$ [1]. Под плотностью будем понимать главную характеристику матрицы распределения компонентов сырьевой базы в период времени $0 \rightarrow \tau$ ради получения компонентов продукционной базы. В равной степени оператор Λ' будет соот-

носятся с распределением плотности компонентов сырья, попадающих в структуру базы отходов $\Lambda' = \tilde{\rho}' / \rho$.

Такая двухступенчатость необратимости характерна для любого производственного процесса, в котором происходят последовательные преобразования компонентов сырьевой базы в полезную продукцию и в отходы. Эмпирическое представление является подтверждением этому. Обратного способа превращения готовой продукции в сырье не существует. Подчеркиваемая автором внутренняя случайность для преобразований типа Λ приобретает логический смысл для любой производственной системы независимо от набора переменных сырьевой или любой другой материальной базы.

Сырьевую базу любого производства представим как некоторую номенклатуру исходных материальных компонентов (C_n), каждый из которых относительно равномерно распределен по системе. Такую номенклатуру легко представить в виде условной квадратной матрицы размера $n \times n$, где n – число компонентов сырьевой базы, а $C_{i,j}[i=1(1)n; j=1(1)n]$ – весовая функция каждого элемента. Каждый из элементов матрицы посредством собственной весовой функции отражает некоторое i, j -е свойство данного компонента. Качественное отличие этих компонентов заключается в том, что одни из них ожидаются в конечном преобразовании в виде полезной продукции, а другие не принимают участия в ее создании.

Попробуем представить процесс продуцирования в виде указанной матрицы, в которой происходит замещение одних компонентов другими на основании некоторого энергетического воздействия (рис. 1). При этом порядок элементов матрицы сохраняется. Изменяется только весовая функция этих элементов. Конечный результат такой трансформации состоит в получении некоторой матрицы $P_{i',j'}$ (из числа $i' \in i$ и $j' \in j$), обозначающей компоненты полезной продукции и $O_{i-i',j-j'}$. Поскольку, как правило, энергия воздействия, применяемая в конкретном технологическом процессе, одновариантна, то и все компоненты сырьевой базы подвергаются единому энергетическому воздействию. Отсюда и однообразие функционалов типа Λ . Плотность Гауссового распределения вероятностей меняется от минимального значения до максимального в ходе производства необходимой продукции. При этом число компонентов, эффективно участвующих в этом процессе производства, минимизируется (см. рис. 1).

В матрице выделим две области Δ и Δ' , для которых существует *единое* энергетическое воздействие. Они отличаются только отношением к этому воздействию. Вероятность перехода компоненты $C_{i,j}$ в состояние готовой продукции равна $R(\tau, C_{i,j}, \Delta) = 1$, а вероятность обратного перехода – $R(\tau, C_{i,j}, \Delta') = 0$. Тогда стандартная траектория из матричной точки $C_{i,j}$ в матричную точку $P_{i',j'}$ дает так называемую вырожденную траекторию, следуемую из известных в стохастической теории свойств цепей Маркова (они приемлемы для макроскопических систем) [1]:

$$R(\tau, (C_{i,j} \rightarrow P_{i',j'}), \Delta) = \begin{cases} 1, & \text{если } C_{i,j} \in \Delta \\ 0, & \text{если } C_{i,j} \notin \Delta \end{cases} \quad (3)$$

и из матричной точки $C_{i,j}$ в матричную точку $O_{i-i',j-j'}$

$$R(\tau, (C_{i,j} \rightarrow O_{i-i',j-j'}), \Delta') = \begin{cases} 1, & \text{если } C_{i,j} \in \Delta' \\ 0, & \text{если } C_{i,j} \notin \Delta' \end{cases} \quad (4)$$

Отсюда следует, что двуединство компонентных трансформаций элементов структурной матрицы отражается условием одновременности $C_{i,j} \in \Delta$ и $C_{i,j} \in \Delta'$ и означает вариабельность как качество системы, определяемое двумя показателями: обособленными свойствами компонентов и качеством энергии, привлеченной в данный технологический процесс.

Именно единообразное энергетическое воздействие является причиной такого двуединства, когда разные компоненты сырья соотносятся с разными реакциями, приводящими одни из

них в состоянии, соответствующее свойствам требуемой продукции, а другие – в состоянии свойств, делающих их отходами. Качественное энергетическое воздействие в рамках единой производственной системы – основа того, что каждый компонент сырьевой базы найдет своего оператора преобразования, в рамках которого $\Delta' \cup \Delta$ и $\Delta' \in \Delta$.

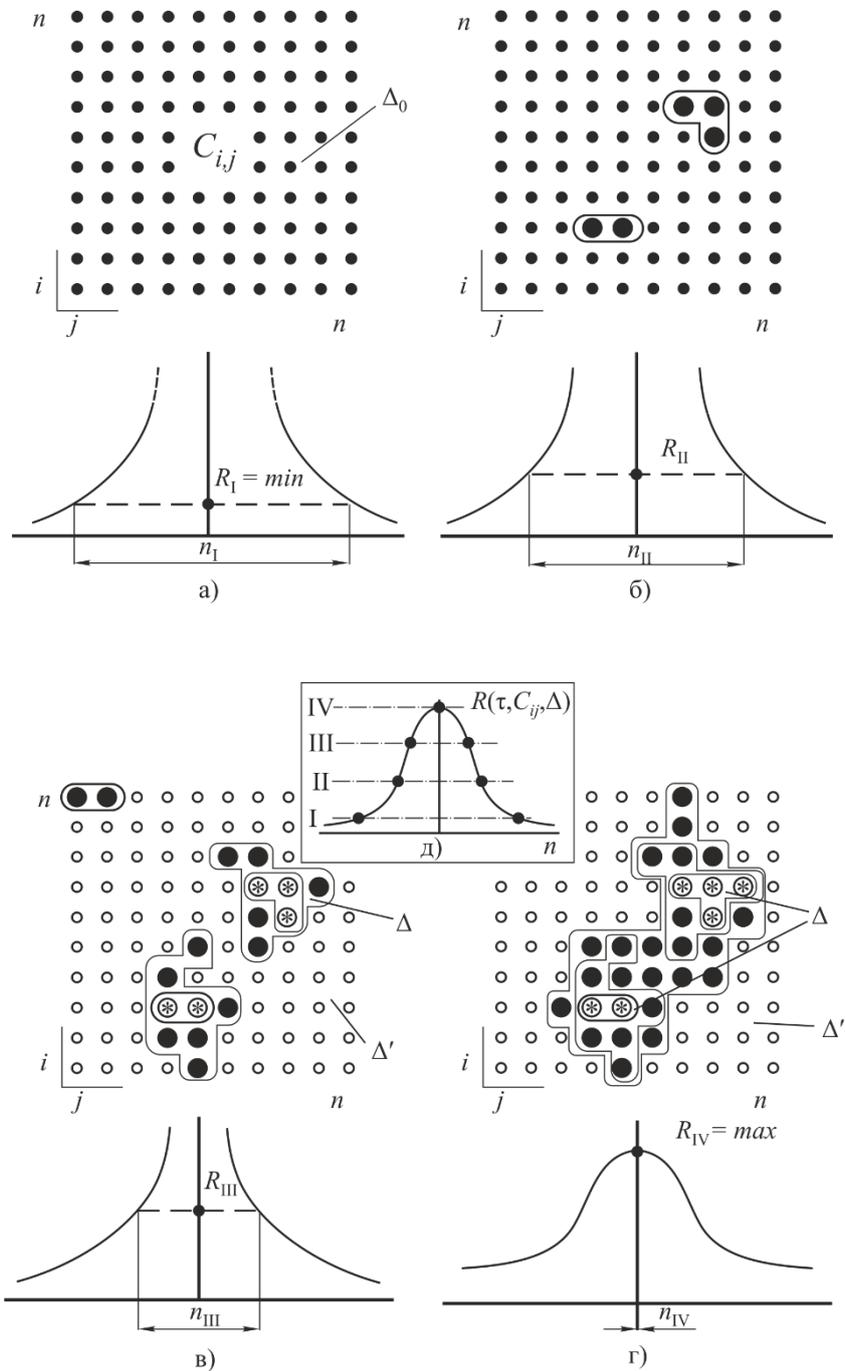


Рис. 1 – Нормальное распределение компонентов сырьевой базы между базами отходов и продукции: \circ – компоненты базы отходов; \bullet – компоненты сырьевой базы; \bullet – переходные компоненты; \otimes – компоненты производственной базы

В моделях И. Пригожина [1] присутствует унитарный оператор $U_{\tau,s}$, отвечающий за формирование динамических подгрупп. При этом особо подчеркивается, что для необратимых процессов разница между операторами U и W заключается именно в их необратимости. Можно

быть уверенными, что эту разницу следует связывать только с источниками энергии в системе таким образом, что подчеркивается преемственность операторов $U_\tau[\rho(\tau)] \rightarrow W_\tau\{e[\rho(\tau)]\}$, где e – некоторый вид энергетического функционала в системе. Такой оператор, в прикладном значении, должен отвечать за согласованность качества энергии и свойств компонентов сырьевой базы технологического процесса.

Параметры состояний $W_o(e)$ и $W_\tau(e)$ таковы, что для каждого функционала $\tilde{\rho}_0 \Lambda \rho_0$ и $\tilde{\rho}_\tau \Lambda \rho_\tau$ должен быть предназначен функционал $\tilde{\rho}_0 W_\tau\{e[\rho(\tau)]\} \tilde{\rho}_\tau$ и $\tilde{\rho}'_0 W_\tau\{e[\tilde{\rho}(\tau)]\} \tilde{\rho}'_\tau$ (рис. 2). Этот своеобразный цикл может быть разорван только при условии появления в системе новых источников энергии. В этом случае состояния $W_\tau^{\Delta'}$ и $W_\tau^{\Delta''}$ для соответствующих фазовых пространств Δ и Δ' (см. рис. 1) будут существенно отличаться в сторону специализации компонентов сырьевой базы под новые адаптированные источники энергии $e[\tilde{\rho}(\tau)]$.

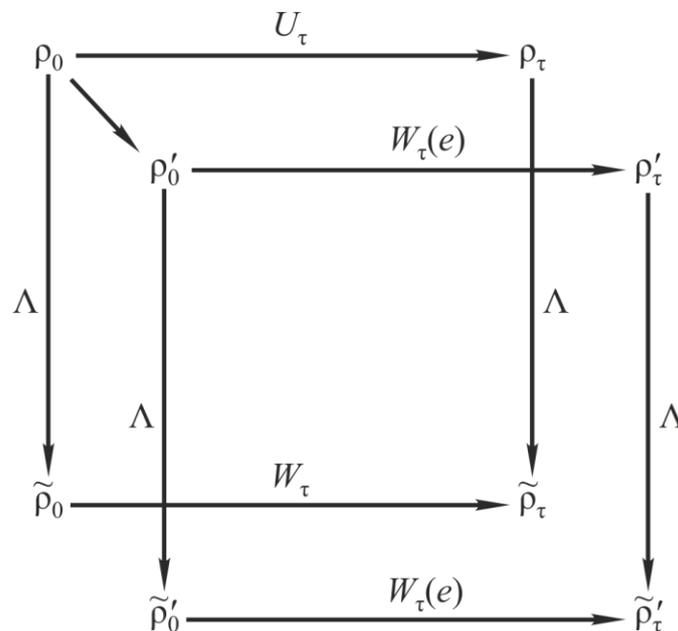


Рис. 2 – Диаграмма функциональных предпочтений распределения плотности компонентов сырьевой базы в условиях необратимости производственных процессов

Выводы

Термодинамическое двуединство в технологическом процессе может быть разорвано в пользу сильного неравновесия только применением других источников энергии, которые будут технологически адаптированы к многокомпонентной (в идеале, всей) структуре сырьевой базы этого процесса, что приведет к выполнению операторного условия $\Lambda = 1$ и $\Lambda' = 0$ при одновременном соответствии условию (2). Если при этом каждый вид энергии будет минимально направлен на преобразование своего компонента сырьевой базы, то такое преобразование компонентов переводит их в разряд сильной неравновесности при отрицательном изменении энтропии. А собственно производственная система полностью переходит в это состояние. При этом на выходе такой системы теоретически не будет оставаться отходов. Актуальным является вопрос о том, существуют ли такие технологии.

Список использованных источников:

1. Пригожин И. От существующего к возникающему. Время и сложность в физических науках / И. Пригожин; под ред. Ю.Л. Климонтовича. – 3-е изд. – М. : КомКнига, 2006. – 296 с.
2. Николис Г. Познание сложного / Г. Николис, И. Пригожин. – М. : Мир, 1990. – 334 с.

References:

1. Prigozhin I. *Ot sushchestvuiushchego k vznikaiushchemu. Vremia i slozhnost' v fizicheskikh naukakh* [From the existing to the arising. Time and Difficulty in the Physical Sciences]. Moscow, KomKniga Publ., 2006. 296 p. (Rus.)
2. Nikolis G., Prigozhin I. *Poznanie slozhnogo* [Knowledge of the complex]. Moscow, Mir Publ., 1990. 334 p. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 15.09.2019