

УДК 66.01.011

ОПТИМАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ СЛОЖНЫХ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ СИСТЕМ

© 2023 г. В. А. Налетов^а, *, М. Б. Глебов^а, Л. В. Равичев^а, А. Ю. Налетов^а

^а Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

*e-mail: jacen23@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.12.2022 г.

После доработки 30.12.2022 г.

Принята к публикации 11.01.2023 г.

Для оптимальной организации сложных химико-технологических систем (ХТС) в статье применены положения “организмического” подхода общей теории систем с позиции теории информации. Показано, что реализация организмического подхода позволяет представить задачу оптимальной организации ХТС как многоуровневую оптимизационную процедуру, подразумевающую согласованное функционирование элементов системы на макроуровне в совокупности с повышением их эффективности на микроуровне с целью достижения синергетических эффектов или эмерджентности в системе. В результате повышения организованности ХТС объективно повышаются степень “макроскопичности или целостности” объекта, а также показатели его энергетической автономности. В работе представлены критерии организованности, характеризующие оптимальную дифференциацию функций ХТС между элементами и подсистемами, используемые при проектировании новых схемных решений. На примере разработки новой химико-технологической системы по выделению диоксида углерода из дымовых газов была доказана возможность достижения синергетических показателей энергоэффективности.

Ключевые слова: общая теория систем, организмический подход, теория информации, эмерджентность, иерархическая структура, энтропия, закон, критерии организованности, элементное усложнение системы, эксергетический КПД

DOI: 10.31857/S0040357123020070, **EDN:** EJAUGQ

ВВЕДЕНИЕ

Австрийский биолог Карл Людвиг фон Бергаланфи справедливо считается основоположником общей теории систем. В основу его научной парадигмы был положен “организмический” подход к организации сложных объектов, к которым Бергаланфи относит биологические, социальные и сложные технические системы [1]. Особенностью вышеперечисленных сложных объектов является наличие в них иерархической структуры, подразумевающей, что их организация должна рассматриваться как на микро, так и на макроуровне. При этом, ученый полагал, что все виды сложных систем должны обладать общими законами их организации и эволюционного развития. Поэтому для их описания возможно использовать законы природы.

Один из основных постулатов организмического подхода Бергаланфи заключается в том, что исследование отдельных частей (элементов или органов) сложной системы не дает возможности понять ее свойств как единого целого, которые

позволяют достигать синергетических эффектов или “эмерджентности”.

Среди известных законов, который описывает общие свойства организации и эволюции сложных систем, можно выделить эволюционный закон усложнения или системной организации организмов Карла Францевича Рулье [2]. Суть вышеуказанного закона К.Ф. Рулье сводится к следующему: “Историческое развитие живых организмов (а также всех природных систем) приводит к усложнению их организации путем нарастающей дифференциации (разделения) функций и органов (подсистем), выполняющих эти функции” [3]. Там же отмечается, что этот закон обладает всеобщностью и применим ко всем природным, социальным и техническим системам в силу изоморфизма законов природы.

По мнению известного ученого Норберта Винера такие аналогии вполне обоснованы. В своей монографии “Я – математик” ученый, широко применяя к решению практических задач методы современной математики, в то же время призы-

вал математике учиться у самой природы: “Природа, в широком смысле этого слова, может и должна служить не только источником задач, решаемых в моих исследованиях, но и подсказывать аппарат, пригодный для их решения” [4].

Подобные научные идеи были высказаны последователем В.И. Вернадского академиком Никитой Николаевичем Моисеевым о необходимости согласованного с Биосферой технологического развития или “коэволюции” в целях сохранения цивилизации [5], что также указывает на возможность использования в качестве методологической основы организации сложных, в том числе технических систем законов эволюции живой материи.

Примерами сложных технических систем являются неоднородные химико-технологические системы (ХТС), которые были выбраны в качестве объекта исследования в данной работе и в которых материальные и энергетические превращения находятся в неразрывной связи. При этом в них также наблюдается усложнение в виде увеличения количества элементов, необходимых для достижения целевых показателей технологии.

Целью данной статьи является рассмотрение тенденций в организации ХТС как объекта с иерархической структурой в контексте организмического подхода общей теории систем и разработка критериев ее оптимальной организации в процессе элементного усложнения при создании новых ХТС.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Согласно закону К.Ф. Рулье всем живым организмам свойственна самоорганизация путем “разумной” дифференциации функций между элементами (органами), что приводит к их устойчивости и уникальным показателям эффективности.

В сложных технических системах самоорганизация, имеющая место в живой материи, уступает место оптимальной организации, которую можно описать с позиции теории информации, являющейся одним из направлений в общей теории систем [1]. Это связано с тем, что энтропия информации по своему физическому смыслу является мерой порядка или организации, что принципиально отличает ее от других видов энтропии, а информационный подход от других подходов.

В работе [6] авторы представили термодинамические модели, отображающие существо процесса оптимальной организации на микро и макроуровнях в ХТС как системе с иерархической структурой с позиции информационного подхода.

Было показано, что оптимальная организация на микроуровне связана с решением информационной задачи по уменьшению исходной неупорядоченности, которое отражает функционирование

химико-технологического процесса, а на макроуровне — с максимизацией макроэнтропии, обеспечивающей оптимальное согласование элементов в рамках единой ХТС. При этом доминирующую роль в оптимальной организации ХТС играет макроэнтропия, связанная в технологическом аспекте с выбором режимов работы элементов и топологией системы. В основе двухуровневой задачи по оптимальной организации ХТС лежат три начала термодинамики: первое, второе и нулевое, которые методически объединены в рамках разрабатываемых критериев организованности.

В обоснование цели исследования рассмотрим ХТС как объект с иерархической структурой, энтропия которой должна иметь двухуровневую природу.

В работе [7] приводится значение энтропии системы, содержащей как макро, так и микроскопическую составляющие применительно к произвольной системе с иерархической структурой:

$$S_{\text{сист}} = \gamma_m S_m + (1 - \gamma_m) S_{\mu}, \quad (1)$$

где $S_{\text{сист}}$ — энтропия системы; γ_m и S_m — доля и собственно макроэнтропия системы; $(1 - \gamma_m)$ и S_{μ} — доля и собственно микроэнтропия системы.

Организмическому подходу в эволюции сложных систем свойственны следующие объективные тенденции:

— увеличение доли (вклада) и собственно макроэнтропии в общей энтропии системы;

— уменьшение доли (вклада) и собственно микроэнтропии в общей энтропии системы. При этом полностью исключить микроэнтропию невозможно.

Эти тенденции с очевидностью приводят к увеличению степени макроскопичности или целостности объекта.

Рассмотрим пример неоднородной химико-технологической системы, содержащей для простоты процесс химического превращения и элементы энергетического звена (сжатие, теплообмен и т.д.) и представим энтропию информации этой системы, выделив в ней общие и специфические термодинамические характеристики.

При этом роль общей термодинамической характеристики выполняет внутренняя энергия, зависящая от температуры, изменение которой сопровождает все без исключения технологические процессы, а в качестве специфической термодинамической характеристики выступает химический потенциал.

Если допустить такое представление заданной ХТС, то тогда ее энтропию информации можно представить в виде:

$$H_c = \sum_i n_i H_{Mi} + (1 - \sum_i n_i) H_{\mu}. \quad (2)$$

В этом выражении первое слагаемое представляет макроэнтропию, отображающую распределение функций ХТС между элементами энергетического звена, а второе — произведение весового коэффициента или вклада целевого химического превращения на его микроэнтропию.

При этом весовые коэффициенты процессов или макрохарактеристики в информационном подходе учитывают в вероятностном виде удаленность среднего уровня энергии процесса по отношению к уровню ХТС как единого целого в виде выражения:

$$n_i = \exp\left(-\frac{\Delta\bar{U}_i}{RT_0}\right), \quad (3)$$

где $\Delta\bar{U}_i = \bar{U}_i - U_0 = l_{\min,i}$ — средний термодинамический уровень преобразования, равный минимальной работе, необходимой для того, чтобы обратимым образом привести энергетический уровень i -го процесса к уровню отсчета; U_0 — нулевой уровень отсчета, RT_0 — уровень энергии ХТС как единого целого (может быть принят равным уровню окружающей среды).

В работе [6] было показано, что величина среднего термодинамического уровня преобразования отражает значение внутренней или полной энергии для замкнутой термодинамической системы, на котором должна решаться соответствующая информационная задача, поскольку любое преобразование информации должно рассматриваться в условиях изоэнергетичности.

Рассмотрим слагаемые выражения (2) по аналогии с представленными выше тенденциями энтропии системы согласно (1) и дадим им технологическую интерпретацию.

Тенденцию для макроуровня описания ХТС можно представить следующим образом — увеличение доли и собственно макроэнтропии в энтропии информации системы, которое математически записывается так:

$$\sum_i n_i H_{Mi} = -\sum_i n_i \ln n_i \rightarrow \max. \quad (4)$$

Это условие, как было показано в работе [6], соответствует оптимальному согласованию процессов энергетического звена в системе в соответствии с нулевым началом термодинамики, которое приводит к минимизации притоков свободной энергии в систему извне за счет максимальной эффективности использования внутренних энергоресурсов системы. В силу этого условие (4) не требует комментариев.

Одной из тенденций для микроуровня описания ХТС будет уменьшение доли микроэнтропии в энтропии информации системы

$$\left(1 - \sum_i n_i\right) \rightarrow 0. \quad (5)$$

Это условие для процесса химического превращения означает, что в оптимально организованной системе предпочтение имеют те целевые процессы, которые располагаются на высоких термодинамических уровнях, поскольку согласно (3) с повышением среднего уровня энергии весовой коэффициент целевого превращения уменьшается.

Другая тенденция на микроуровне — уменьшение собственно микроэнтропии, в пределе до нуля, ограничена, поскольку это означало бы отсутствие в системе целевого процесса превращения вещества. Кроме того, надо учесть, что весовой коэффициент или доля микроэнтропии согласно (5) в наибольшей степени влияет на микросоставляющую энтропии системы в силу ее экспоненциальной зависимости от среднего уровня целевого превращения. Таким образом, данная объективная тенденция в оптимальной организации ХТС на микроуровне в технологическом аспекте будет сопровождаться максимальным запасом внутренней энергии в системе, а в случае ее рекуперации — максимальной выработкой вторичных энергоресурсов, что в совокупности с тенденцией макроэнтропии приведет не только к повышению степени макрокопичности или целостности ХТС, но также к повышению степеней ее энергетической автономности и как следствие к повышению устойчивости и управляемости, что в целом подтверждает обоснованность применения организмического подхода в соответствии с эволюционным законом усложнения К.Ф. Рулье.

В обоснование этого рассмотрим численный пример и поясним условие (5) путем сравнения трех коммерческих способов газификации твердого топлива, осуществляемых в газогенераторах.

Газификация твердого топлива является высокотемпературным процессом, в котором при использовании различных газифицирующих агентов можно получить синтез-газ и переработать его в синтетические жидкие топлива.

В табл. 1 наряду с температурными режимами процессов представлены их весовые коэффициенты, а также количества вторичного пара, получаемого в парогенераторах, установленных в отделе газификации, и показатели энергоэффективности (эксергетические КПД) способов по данным работы [8].

Как следует из табл. 1, с уменьшением весового коэффициента процесса возрастает количество выработанного пара и увеличивается его эксергетический КПД.

Оптимальная организация ХТС в соответствии с законом усложнения К.Ф. Рулье подразумевает, как отмечено во введении, оптимальную дифференциацию функций системы между ее элементами и подсистемами.

На рис. 1 представлены основные варианты дифференциации функций, имеющие место в ХТС.

Таблица 1. Сравнение весовых коэффициентов с запасами вторичной энергии и энергоэффективностью способов газификации

Параметры (характеристики)	Способ Лурги	Способ Винклера	Способ Копперс–Тотцек
$T_{\text{нач}}, \text{ К}$	298	298	298
$T_{\text{кон}}, \text{ К}$	1198	1233	1773
Выработка вторичного силового пара (9.0 МПа, 535°C), кг/ч	3206.1	2970.0	4856.6
Весовой коэффициент, n	0.00125	0.00148	4.4×10^{-5}
Эксергетический КПД, %	78–80	68–72	86–92

Примечание: мольный расход синтез-газа в весовых коэффициентах приведен к единому масштабу.

В ряде случаев возможно объединение вышеуказанных вариантов дифференциации функций системы между ее элементами и подсистемами.

Методика оптимальной дифференциации функций в процессах разделения сырья на потоки продуктов, а также между потоками в процессах теплообмена представлены в работе [9].

Принимая во внимание, что ХТС, отражающие структуру современных химических производств, имеют достаточно большое количество элементов, рассмотрим вариант оптимальной дифференциации функций системы по мере ее элементного усложнения.

Впервые попытка теоретически обосновать выбор критериев элементного усложнения системы была представлена в работе [10].

В качестве метода был использован эксергоэкономический подход, который также называют термоэкономическим.

При этом было показано, что в задачах оптимизации возможно не использовать общий эксергоэкономический критерий, а применять локальные критерии усложнения системы, которые отражают процесс увеличения количества элементов. Рассмотрим пример вывода критериев усложнения с позиции эксергоэкономического подхода.

На рис. 2 представлена система, состоящая из трех зон диссипации эксергии, отображающих

ХТС, содержащую 3 последовательно соединенных однопоточных элемента.

В качестве критерия оптимизации был принят эксергоэкономический критерий в виде:

$$R = C_0 E_0 + K_1 + K_2 + K_3. \quad (6)$$

Неразрывность потоков эксергии от зоны к зоне учитывалась на основании следующих ограничений:

$$\begin{aligned} E_1 &= \varepsilon_1(E_0; u_1); \quad E_2 = \varepsilon_2(E_1; u_2); \\ E_3 &= \varepsilon_3(E_2; u_3); \quad K_i = k_i(E_i; u_i), \quad i = \overline{1, 3}. \end{aligned} \quad (7)$$

Поиск оптимального решения функции (6) с учетом ограничений типа равенств (7) осуществлялся на основании метода неопределенных множителей Лагранжа.

Собственно множители Лагранжа по физическому смыслу совпадают со стоимостями единиц эксергии промежуточных потоков или потока продукта, поэтому именно они являются критериями оптимизации, отражающими процесс элементного усложнения ХТС.

Система необходимых условий экстремума функции Лагранжа приводит к выражениям для множителей Лагранжа, которые, следуя целям эксергоэкономического подхода, необходимо минимизировать:

$$\lambda_1 = \frac{C_0}{\partial E_1 / \partial E_0}, \quad (8)$$

**Рис. 1.** Основные варианты дифференциации функций в ХТС.

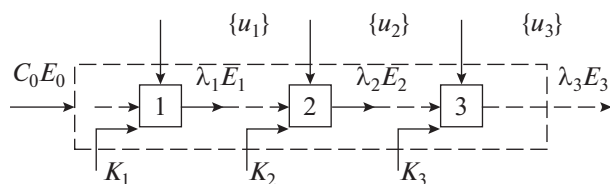


Рис. 2. К выводу эксергоэкономических критериев усложнения ХТС. Обозначения: $\{u_i\}$ – параметры организации процессов или произвольные управляющие параметры (например, расход топлива, коэффициент избытка воздуха и др.); C_0, E_0 – стоимость единицы входной эксергии и входная эксергия; λ_i – множители Лагранжа – стоимости единицы эксергии выходных потоков, подлежащие определению; E_i – эксергии выходных потоков; K_i – неэнергетические затраты или амортизация.

$$\lambda_2 = \frac{C_0}{\frac{\partial E_1}{\partial E_2} \frac{\partial E_2}{\partial E_1}} + \frac{\frac{\partial K_1}{\partial E_1}}{\frac{\partial E_1}{\partial E_2} \frac{\partial E_2}{\partial E_1}}, \quad (9)$$

$$\lambda_3 = \frac{C_0}{\frac{\partial E_1}{\partial E_2} \frac{\partial E_2}{\partial E_3} \frac{\partial E_3}{\partial E_1}} + \frac{\frac{\partial K_2}{\partial E_2}}{\frac{\partial E_1}{\partial E_2} \frac{\partial E_2}{\partial E_3} \frac{\partial E_3}{\partial E_1}}. \quad (10)$$

Однако подобный теоретический подход не нашел практического применения в силу следующих причин.

Во-первых, уравнения (8)–(10) могут быть представлены только для однопоточных процессов. Для более сложных процессов, в которых имеют место процессы разделения исходного сырья на потоки продуктов, необходимо дополнительно использовать экспертные методы распределения неэнергетических затрат между потоками продуктов, в силу чего полученные выводы не будут обладать общностью и объективностью.

Во-вторых, и это главное, критерии усложнения в виде множителей Лагранжа, начиная со второго, имеют неопределенности в части частных производных капитальных затрат по эксергиям поскольку они относятся к разным областям знания.

Однако надо отметить, что сам теоретический подход к выводу критериев усложнения с позиции эксергоэкономики был оригинальным.

Представим решение аналогичной задачи в терминах информационного подхода, воспользовавшись идеей вывода критериев усложнения ХТС с позиции эксергоэкономики, для системы на рис. 2.

Напомним, что согласно постулатам информационного подхода информация априори связана с технологическими потоками, поскольку каждому технологическому потоку ставится в соответствие поток информационный, поэтому сколько информационных потоков столько и информа-

ционных задач, подлежащих решению, каждая из которых решается независимо.

В качестве исходного критерия организованности запишем энтропию информации системы в виде:

$$H_C = \sum_j n_j H_j^{\text{BX}}, \quad (11)$$

где n_j – весовой коэффициент, учитывающий в вероятностном виде долю энтропии информации каждого элемента в системе; H_j^{BX} – энтропия информации j -го элемента, рассчитанная по его входным параметрам.

Поиск оптимума критерия (11) осуществляется с учетом ограничений типа равенств:

$$\begin{aligned} H_j^{\text{ВЫХ}} &= h_j^{\text{ВЫХ}}(H_j^{\text{BX}}; U_j), \quad j = \overline{1, 3}, \\ H_1^{\text{ВЫХ}} &= f_2^1 H_2^{\text{BX}}, \quad H_2^{\text{ВЫХ}} = f_3^2 H_3^{\text{BX}}, \end{aligned} \quad (12)$$

где f_2^1, f_3^2 – функции связи по каналам 1–2 и 2–3 соответственно (от элемента к элементу); U_j – произвольные управляющие параметры, например, параметры организации процессов.

Для поиска аналитических зависимостей также воспользуемся методом неопределенных множителей Лагранжа и представим функцию Лагранжа:

$$\begin{aligned} L = \sum_j n_j H_j^{\text{BX}} &+ \lambda_1 [f_2^1 H_2^{\text{BX}} - h_1^{\text{ВЫХ}}(H_1^{\text{BX}}; U_1)] + \\ &+ \lambda_2 [f_3^2 H_3^{\text{BX}} - h_2^{\text{ВЫХ}}(H_2^{\text{BX}}; U_2)] + \\ &+ \lambda_3 [H_3^{\text{ВЫХ}} - h_3^{\text{ВЫХ}}(H_3^{\text{BX}}; U_3)]. \end{aligned} \quad (13)$$

Запишем выражения частных производных функции Лагранжа по параметрам $U_1, U_2, U_3, H_1^{\text{BX}}, H_2^{\text{BX}}, H_3^{\text{BX}}$ и приравняем их к нулю.

$$\frac{\partial L}{\partial U_1} = \frac{\partial}{\partial U_1} \left[\sum_j n_j H_j^{\text{BX}} - \lambda_1 h_1^{\text{ВЫХ}} \right] = 0, \quad (14)$$

$$\frac{\partial L}{\partial U_2} = \frac{\partial}{\partial U_2} \left[\sum_j n_j H_j^{\text{BX}} - \lambda_2 h_2^{\text{ВЫХ}} \right] = 0, \quad (15)$$

$$\frac{\partial L}{\partial U_3} = \frac{\partial}{\partial U_3} \left[\sum_j n_j H_j^{\text{BX}} - \lambda_3 h_3^{\text{ВЫХ}} \right] = 0, \quad (16)$$

$$\frac{\partial L}{\partial H_1^{\text{BX}}} = \frac{\partial}{\partial H_1^{\text{BX}}} \left[\sum_j n_j H_j^{\text{BX}} - \lambda_1 h_1^{\text{ВЫХ}} \right] = 0, \quad (17)$$

$$\frac{\partial L}{\partial H_2^{\text{BX}}} = \frac{\partial}{\partial H_2^{\text{BX}}} \left[\sum_j n_j H_j^{\text{BX}} + \lambda_1 f_2^1 H_2^{\text{BX}} - \lambda_2 h_2^{\text{ВЫХ}} \right] = 0, \quad (18)$$

$$\frac{\partial L}{\partial H_3^{\text{BX}}} = \frac{\partial}{\partial H_3^{\text{BX}}} \left[\sum_j n_j H_j^{\text{BX}} + \lambda_2 f_3^2 H_3^{\text{BX}} - \lambda_3 h_3^{\text{ВЫХ}} \right] = 0. \quad (19)$$

Вычислим множители Лагранжа из уравнений (17)–(19), принимая во внимание, что они содержат меньше неопределенных величин.

Опуская промежуточные выкладки, получим выражения для критериев элементного усложнения рассматриваемой системы в виде:

$$\lambda_1 = \frac{n_1 K_1}{\eta_{T1}}, \quad (20)$$

$$\lambda_2 = n_2 \frac{K_2}{\eta_{T2}} + n_1 \frac{K_1 K_2}{\eta_{T1} \eta_{T2}} \frac{\bar{T}_2}{\bar{T}_1} \frac{\Delta \Gamma_1^{\text{ВЫХ}}}{\Delta \Gamma_2^{\text{ВХ}}}, \quad (21)$$

$$\lambda_3 = n_3 \frac{K_3}{\eta_{T3}} + n_2 \frac{K_2 K_3}{\eta_{T2} \eta_{T3}} \frac{\bar{T}_3}{\bar{T}_2} \frac{\Delta \Gamma_2^{\text{ВЫХ}}}{\Delta \Gamma_3^{\text{ВХ}}} + n_1 \frac{K_1 K_3}{\eta_{T1} \eta_{T2} \eta_{T3}} \frac{\bar{T}_3}{\bar{T}_1} \frac{\Delta \Gamma_1^{\text{ВЫХ}}}{\Delta \Gamma_3^{\text{ВХ}}}. \quad (22)$$

Все величины, входящие в выражения (17)–(19), выражаются через параметры технологических потоков, в силу чего они, в отличие от критериев усложнения в эксергоэкономике, имеют не только объективный характер, но и практическую применимость [11].

При этом, воспользовавшись аналогией содержания, можно считать, что полученные множители Лагранжа имеют смысл “стоимости” (безразмерная величина) единицы информации, где в качестве меры стоимости принимается элементарная упорядочивающая операция. В силу идентичности смысловых трактовок множителей Лагранжа, полученных на основе информационного и эксергоэкономического подходов, можно заключить, что оптимальная организация системы будет характеризоваться минимальными значениями множителей Лагранжа, которые представляют критерии элементного усложнения ХТС и будут определять условия оптимальной дифференциации функций системы между ее элементами.

В обоснование возможности достижения синергетических свойств или эмерджентности в оптимально организованной ХТС рассмотрим пример.

ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Представленный методический аппарат по оптимальной дифференциации функций системы между элементами на основании критериев

усложнения, дополненный вариантами дифференциации функций между потоками в процессах теплообмена, был использован при разработке энергоблока тригенерации по улавливанию и выделению диоксида углерода из очищенных дымовых газов.

Структура энергоблока тригенерации основана на интеграции цикла Ренкина на низкокипящем рабочем теле с холодильным циклом среднего давления, подобным циклу Гейландта.

Назначение энергоблока тригенерации заключается в глубокой утилизации остаточной теплоты дымовых газов, прошедших очистку от оксидов серы и азота, а также в глубоком улавливании из них диоксида углерода и выделении его в виде товарного продукта (твердой углекислоты) с одновременной выработкой электроэнергии и холода.

Параметры энергоблока тригенерации по получению электроэнергии, холода и товарного диоксида углерода были унифицированы для широкого диапазона концентраций диоксида углерода в дымовых газах (от 6 до 11 об. % в расчете на влажный газ), что характерно для объектов энергетики, нефтегазохимии и коксохимии и других, использующих различные виды газообразного, жидкого или твердого топлив.

Рассмотрим один из этапов оптимальной организации энергоблока тригенерации с применением критериев усложнения на примере выбора структуры и рабочего тела подсистемы цикла Ренкина.

Были рассмотрены три варианта структуры цикла Ренкина: без регенератора, с регенератором и с гипотетическим регенератором. Отличие цикла с регенератором в том, что остаточная теплота после турбины используется в регенераторе для подогрева рабочего тела после насоса для повышения энергоэффективности цикла. В цикле с гипотетическим регенератором последний перенесен из цикла Ренкина в интегрируемую с ним подсистему холодильного цикла. В качестве критерия оптимизации был выбран критерий 3-го уровня усложнения согласно (22).

В табл. 2 представлены значения критерия усложнения 3-го уровня согласно (22).

Данные значения получены при одной и той же температуре дымовых газов на выходе из цикла в расчете на реализуемость всех альтернатив

Таблица 2. Сравнение оптимальных решений

Вариант структуры цикла Ренкина	Оптимальное рабочее тело	Значение критерия 3-го уровня – λ_3
Без регенератора	<i>n</i> -пентан	2.215×10^{11}
С регенератором	Изопентан	6.31×10^7
С гипотетическим регенератором	Метан	4.49×10^7

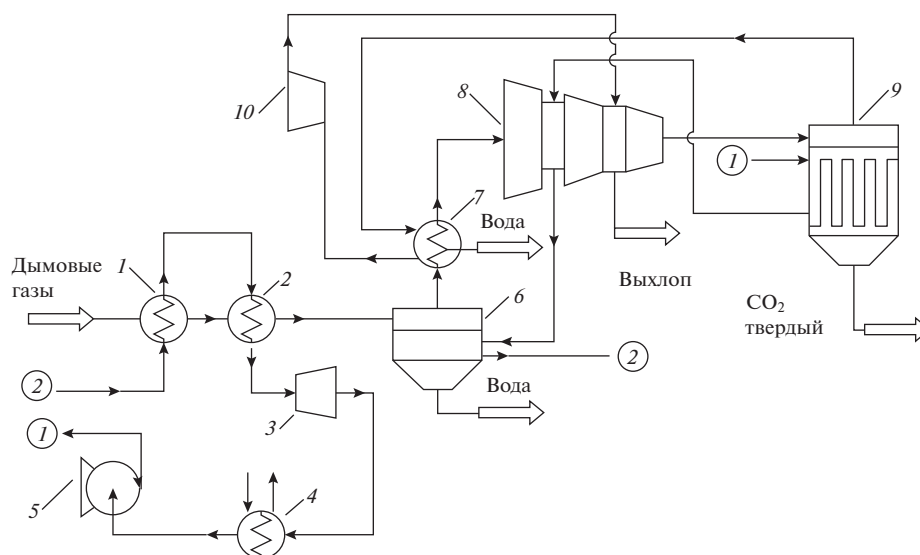


Рис. 3. Технологическая схема энергоблока тригенерации (потоки, обозначенные цифрами в кружочках, объединены). Обозначения: 1 — испаритель; 2 — пароперегреватель; 3 — паровая турбина; 4 — конденсатор; 5 — насос; 6 — парциальный конденсатор (удаление воды); 7 — промежуточный теплообменник; 8 — трехступенчатый компрессор с промежуточным охлаждением; 9 — десублиматор; 10 — газовая турбина.

ных вариантов цикла Ренкина с рабочими телами от метана до пентана, включая некоторые их изомеры. Как следует из данных табл. 2, оптимальным решением является структура цикла Ренкина с гипотетическим регенератором и рабочим телом метаном. Однако, если использовать в качестве рабочего тела метан, то температуру дымовых газов на выходе из цикла Ренкина можно существенно понизить, повысив при этом расход метана в цикле Ренкина, что неосуществимо для *n*-пентана или изопентана. В этом случае значение критерия для метана будет существенно ниже, чем приведенное в табл. 2.

Разработанное техническое решение оптимально организованного энергоблока тригенерации представлено на рис. 3.

Дадим оценку энергоэффективности полученного технического решения на основе эксергетических показателей — эксергетического КПД.

Для этого проведем анализ значений эксергетического КПД двух вариантов:

Вариант 1 — оценка эксергетического КПД технологической системы, состоящей из последова-

тельно объединенных подсистем: подсистема 1 (цикл Ренкина) и подсистема 2 (холодильный цикл);

Вариант 2 — оценка эксергетического КПД разработанного энергоблока тригенерации (оптимально организованная система).

Результаты расчетов, представленные в работе [12], систематизированы в табл. 3.

Как следует из табл. 3, эксергетический КПД для системы с последовательно объединенными подсистемами меньше наименьшего значения эксергетического КПД подсистемы, тогда как для оптимально организованной ХТС эксергетический КПД больше наибольшего значения эксергетического КПД подсистемы, что указывает на синергетический эффект, достигаемый в энергоблоке тригенерации.

Принимая во внимание, что разработка подобных технических решений относится к общей нише проектов по улавливанию и захоронению диоксида углерода, проведем дополнительную оценку энергоблока тригенерации на основе используемого в мировой практике единого критерия в виде удельного выброса CO_2 на единицу мощности ($\text{кг CO}_2/\text{МВт}$) [13, 14].

Таблица 3. Сравнение эксергетических КПД вариантов решений

Эксергетический КПД, %			
система с последовательно объединенными подсистемами			энергоблок тригенерации
Подсистема 1	Подсистема 2	Система	
70.63	50.31	35.53	73.56

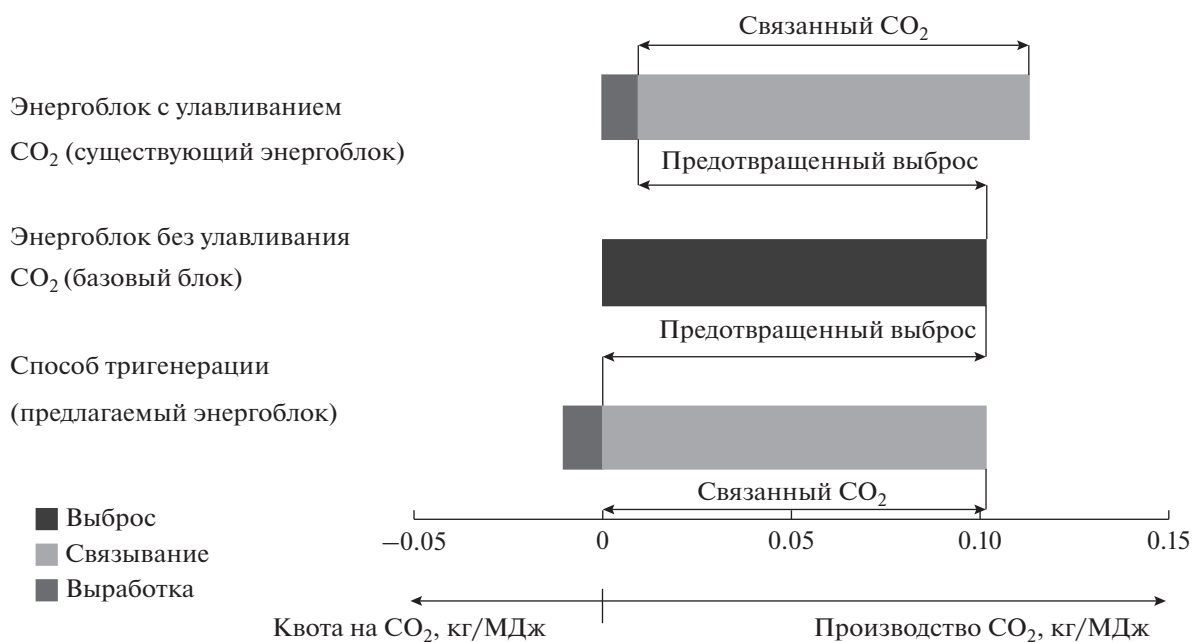


Рис. 4. Сравнение существующих современных энергоблоков с улавливанием диоксида углерода из дымовых газов с разработанным энергоблоком тригенерации.

Для сравнения достигнутых показателей разработанного энергоблока тригенерации с современными установками в качестве прототипа выберем гипотетическую установку идентичной мощности, включив в нее лучшие показатели ведущих мировых компаний: BP Exploration, Statoil Hydro, RWE, Linde, BASF, Mitsubishi Heavy Industries, Chevron, Texaco и ряда других, а именно: максимальную достигаемую степень улавливания диоксида углерода из дымовых газов при минимально возможных энергетических затратах на реализацию этого процесса.

В силу этого в прототипе были приняты: степень улавливания — 92% и энергозатраты на улавливание — 10% от мощности основной промышленной установки, которая является источником диоксида углерода.

На рис. 4 представлены результаты сравнения технических решений (в качестве базового блока для сравнения приведен энергоблок без улавливания диоксида углерода — в центре).

Энергоблоки, приведенные на графиках рис. 4, имели одну и ту же мощность — 40 МВт.

Средний график представляет собой базовый энергоблок или установку без улавливания диоксида углерода.

При этом для зарубежного аналога (верхний график) увеличение энергозатрат на процесс улавливания на 10% означает соответствующий дополнительный выброс CO_2 (график смещается

вправо по отношению к базовому блоку — средний график). Степень улавливания, принятая равной 92%, на верхнем графике соответствует связанному CO_2 .

Для разработанного энергоблока тригенерации (нижний график) смещение его влево соответствует приобретенной квоте CO_2 , которая может быть получена в результате выработки дополнительной электроэнергии в энергоблоке тригенерации.

По данным сравнительного анализа (рис. 4) можно сделать вывод, что решение комплекса проблем в multifunctional установках три- и полигенерации является целесообразным, а разработанный процесс получения товарного диоксида углерода в энергоблоке тригенерации превосходит лучшие зарубежные аналоги.

ВЫВОДЫ

Оптимальная организация сложных технических объектов с иерархической структурой, к которым относятся химико-технологические системы, должна рассматриваться на микро- и макроуровнях.

Обе тенденции, основанные на объединении трех начал термодинамики: первого, второго и нулевого, приводят к повышению показателей макроскопичности (целостности), энергоэффективности, автономности, устойчивости и управляемости, что подтверждает целесообразность использования для оптимальной организации

ХТС организмического подхода общей теории систем, основанного на изоморфизме законов природы.

Среди известных законов природы, который позволяет подойти к описанию общих принципов организации и эволюции сложных систем, можно выделить эволюционный закон усложнения организации организмов К.Ф. Рулье. При этом согласно закону Рулье усложнение и организация ХТС должна быть связана с оптимальной дифференциацией ее функций между элементами и подсистемами, что определяет согласованность их функционирования.

Количественный аппарат оптимальной организации сложных технических системах связан с информационным описанием процессов, поскольку энтропия информации, введенная К. Шенноном, характеризует процесс упорядочивания, то есть по физическому смыслу является мерой порядка.

С позиции информационного подхода возможно представить решение задачи по оптимальной дифференциации функций системы в процессе ее элементного усложнения и получить соответствующие критерии организации ХТС, имеющие смысл стоимости единицы информации, которые по аналогии с подобными критериями в эксергоэкономическом подходе, необходимо минимизировать.

На численном примере в ходе разработки оптимально организованного энергоблока тригенерации по улавливанию диоксида углерода из очищенных дымовых газов было показано, что использование информационных критериев, реализующих организмический подход в соответствии с законом усложнения К.Ф. Рулье, обладает преимуществами, как в методическом, так и в практическом планах для решения задач цифрового проектирования эффективных химических производств.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

S	энтропия
H	энтропия информации
γ	вклад (доля)
n	весовой коэффициент (вклад или доля) в информационном подходе
$\bar{U}$	средний уровень энергии, кДж/кмоль
R	мольная газовая постоянная, кДж/кмоль К
T	температура, К
E	эксергия, кДж/ч или кДж/год
K	неэнергетические затраты в эксергоэкономике или фактор затрат на организацию процесса в информационном подходе

λ	множитель Лагранжа или критерий оптимизации
$\{U\}$	управляющие воздействия (параметры организации процесса)
f	функция связи
η	КПД
$\Delta\Gamma$	статистический вес

ИНДЕКСЫ

сист	система
м	макроскопический
μ	микроскопический
i	номер состояния, процесса, преобразования
э	эквивалентный
0	нулевой (на входе)
Δ	изменение
вх	входное значение
вых	выходное значение
т	термодинамический

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bertalanffy L. von. General system theory: Foundation, development, application. N.-Y. 1968. 289 p.
2. Рулье К.Ф. Избранные биологические произведения. М.: Изд-во АН СССР. 1954. 78 с.
3. Реймерс Н.Ф. Природопользование. Словарь-справочник. М.: Мысль. 1990. 637 с.
4. Винер Н. Я — математик. М: Наука. 1964. 356 с.
5. Моисеев Н.Н. Алгоритмы развития. М.: Наука. 1987. 302 с.
6. Налетов В.А., Колесников В.А., Глебов М.Б. Термодинамические основы системного информационного подхода к организации сложных технологических объектов // Теорет. основы хим. технологии. 2020. Т. 54. № 2. С. 1–10 [Naletov V.A., Kolesnikov V.A., Glebov M.B. Thermodynamic Foundations of an Information-Based Systems Approach to Designing Complex Engineering Objects. Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2020. V. 54 (3). P. 456–464. <https://doi.org/10.1134/S0040579520020128>].
7. Кобозев Н.И. Исследование в области термодинамики процессов информации и мышления. М.: МГУ. 1971. 194 с.
8. Дигуров Н.Г., Китайнер А.Г., Налетов А.Ю., Скудин В.В. Проектирование и расчет аппаратов технологии горючих ископаемых. М.: Химия. 1993. 278 с.
9. Налетов В.А., Гордеев Л.С., Глебов М.Б., Налетов А.Ю. Информационно-термодинамический принцип организации химико-технологических систем // Теорет. основы хим. технологии. 2011. Т. 45. № 5. С. 541–549. [Naletov V.A., Gordeev L.S., Glebov M.B., Naletov A.Y. Information-Thermodynamic Principle of the Organization of Chemical Engineering Systems //

- Theor. Found. of Chemical Engineering. 2011. V. 45. № 5. P. 631–639.
<https://doi.org/10.1134/S0040579511050289>].
10. *El-Sayed Y.M., Evans R.B.* Thermoeconomics and the design of heat systems // Trans. ASME, J. Eng. Power. 1969. V. 92. P. 27–34.
 11. *Налетов В.А., Глебов М.Б., Налетов А.Ю.* Цифровое проектирование оптимально организованных химических производств. Теория и практика. Часть 1. Теория. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2021. 172 с.
 12. *Naletov V.A.* Exergy Analysis of Commercial Carbon Dioxide Production from Flue Gases in a Trigeneration Power Plant // Coke and Chemistry. 2019. V. 62. № 10. P. 481–488.
 13. *Herzog H.* An Introduction to CO₂ separation and capture technologies // Cambridge, Mass.: MIT Energy Laboratory. 1999. 8 p.
 14. *Herzog H., Meldon J., Hatton A.* Advanced Post-Combustion CO₂ Capture // Clean Air Task Force Report. USA. 2009. 37 p.