

Топологоэксергетический подход при исследовании эксергетической эффективности способов соединения элементов физико-технологических систем (часть 1)

ДОЛГОПОЛОВ И.С., ТУЧИН В.Т., КРАВЕЦ О.А.

Днепродзержинский государственный технический университет

В статье представлен топологоэксергетический подход при исследовании эксергетической эффективности последовательного, параллельного, смешанного и с рециклом соединений элементов ФТС с учетом их конструктивно-технологических параметров. Рассмотрены основные критерии определения эксергетической эффективности и приведены их функциональные зависимости.

У статті представлено топологоэксергетичний підхід при дослідженні эксергетичної ефективності послідовного, паралельного, змішаного та з рециклом з'єднань елементів ФТС з урахуванням їх конструктивно-технологічних параметрів. Розглянуто загальні критерії визначення эксергетичної ефективності та наведено їх функціональні залежності.

In paper presents topology-exergy approach at research exergy efficiency consecutive, parallel, mixed and with return a flow of substance to system connections of elements depending of their constructive - technological parameters. The basic criteria of definition exergy of efficiency are considered and their functional dependences are given.

Введение. Энергетические структуры современных физико-технологических систем (ФТС) характеризуются сложной конфигурацией и использованием энергий различной физической природы [1-8]. Поэтому изучение взаимосвязей энергетических структур и математическое моделирование эксергетических взаимодействий в таких системах является актуальным для дальнейшего совершенствования их эксергетической эффективности при решении задач анализа и синтеза ФТС. В любой макро - ФТС применяются элементарные способы соединения элементов: последовательное, параллельное, последовательно – параллельное, соединение с рециклом и т.д. С помощью преобразований сложная ФТС может быть представлена как структура с элементарными способами соединения элементов.

В работах [9-11] представлены аналитические зависимости, позволяющие получить уравнение обобщенного эксергетического к.п.д. системы. Для определения этого показателя необходимо знание эксергетического к.п.д. каждого элемента системы, а также отношение располагаемой эксергии на каждом элементе к эксергии, подводимой к системе. Метод расчета эксергетической эффективности сложных систем, предложенный проф. Никольшиным В.Р. [9], основан на разработанном обобщенном уравнении эксергетического к.п.д. системы с учетом эксергетического к.п.д. каждого элемента и степени влияния этого элемента на общую эксергетическую эффективность рассматриваемой системы. Метод реализован с помощью сигнальных графов.

В работах [12,13] рассмотрены аналитические зависимости эксергетической эффективности схем с элементарными способами соединения элементов. При этом для определения эксергетической эффективности схем необходимо знание коэффициентов передачи эксергетических потоков, являющихся функцией локальных эксергетических характеристик каждого элемента.

В рассмотренных [9 – 13] подходах не отражено влияние конструктивно - технологических параметров элементов технической системы на её эксергетическую эффективность.

Постановка задачи. Цель работы:

1) разработка на базе топологоэксергетического метода математических моделей, позволяющих оценить эксергетическую эффективность элементарных схем соединения элементов ФТС (последовательного, параллельного, смешанного, с рециклом) с учетом конструктивно-технологических параметров элементов на основании использования обобщенной эксергодиссипативной функции и элементной базы метода; 2) описание эксергетических взаимосвязей для различных соединений теплообменников в зависимости от их конструктивно-технологических параметров и определение эксергетической эффективности этих ФТС.

Методика решения. Сформулируем основные принципы решения задачи и допускаемые ограничения:

1. Принимаем, что элементы анализируемых ФТС – это объекты с сосредоточенными параметрами. Это ограничение дает возможность использовать теорему Телледжена, сформулированную для топологоэксергетического метода анализа и синтеза ФТС в [1,2].

2. При анализе энергетической эффективности предполагается, что исследуемые ФТС содержат только диссипаторы эксергии, обозначаемые в дальнейшем, как $R_i^?$ (верхний индекс «?» показывает тип диссипатора - эксергетический, нижний индекс «i» указывает на порядковый номер диссипатора).

Эксергетическая эффективность ФТС с диссипаторами при последовательном, параллельном, смешанном соединении элементов и схем с рециклом определяется на основании обобщенной эксергодиссипативной функции (ОЭДФ) [3] и критериев эффективности, полученных на её основе.

Обобщенная эксергодиссипативная функция ОЭДФ может быть представлена уравнением:

$$\text{ОЭДФ} = \text{ОЭДФ}_{\text{пол}} + \text{ОЭДФ}_{\text{д}} = E_{\text{вх}} - E_{\text{вых}} \quad (1)$$

где $\text{ОЭДФ}_{\text{пол}}$ - полезные затраты эксергии в обобщенной эксергодиссипативной функции; $\text{ОЭДФ}_{\text{д}}$ - диссипативная составляющая в обобщенной эксергодиссипативной функции; $E_{\text{вх}}$ - эксергия потока на входе в ФТС; $E_{\text{вых}}$ - эксергия потока на выходе ФТС.

ОТД – критерий, характеризующий отношение ОЭДФ ФТС к эксергии на входе в систему:

$$\text{ОТД} = \frac{\text{ОЭДФ}_{\text{полл}}}{E_{\text{вх}}} + \frac{\text{ОЭДФ}_{\text{л}}}{E_{\text{вх}}}, \quad (2)$$

Если ОЭДФ ФТС отнести к эксергии использованной в системе $E_{\text{вх}} - E_{\text{вых}}$, то получим

$$\frac{\text{ОЭДФ}_{\text{полл}}}{E_{\text{вх}} - E_{\text{вых}}} + \frac{\text{ОЭДФ}_{\text{л}}}{E_{\text{вх}} - E_{\text{вых}}} = \eta_e + \eta_{\text{пот}} \quad (2 \text{ а})$$

где η_e - эксергетический к.п.д. ФТС;

$\eta_{\text{пот}}$ - диссипативный коэффициент ФТС.

Последовательное соединение элементов ФТС. Схема ФТС с последовательным соединением элементов и ее топологоэксергетическая структура связи показана на рис. 1.

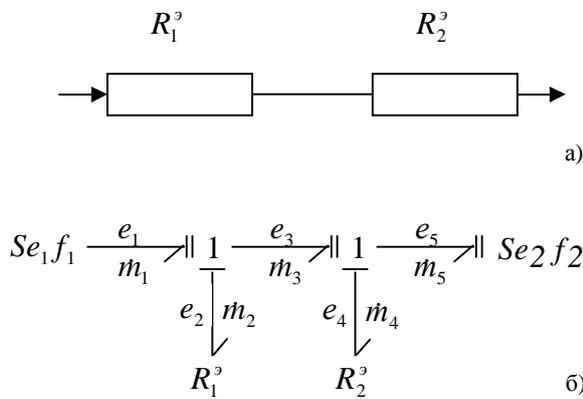


Рис. 1. Схема последовательного соединения ФТС (а) и ее топологоэксергетическая структура связи (б).

Исходя из топологоэксергетической структуры связи рис. 1 (б), на основе формализованной процедуры вывода уравнений [2,3,5] получим систему уравнений для этой ФТС:

$$\left. \begin{aligned} e_1 \cdot \dot{m}_1 - e_2 \cdot \dot{m}_2 - e_3 \cdot \dot{m}_3 &= 0 \\ e_2 &= \dot{m}_2^2 \cdot R_1^3 \\ e_1 - e_2 - e_3 &= 0 \\ \dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3 & \\ e_3 \cdot \dot{m}_3 - e_4 \cdot \dot{m}_4 - e_5 \cdot \dot{m}_5 &= 0 \\ e_4 &= \dot{m}_4^2 \cdot R_2^3 \\ e_3 - e_4 - e_5 &= 0 \\ \dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m}_5 & \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Задачей анализа является определение диссипативных свойств ФТС. Поэтому рассматриваем частный случай, когда ОЭДФ содержит только диссипативную составляющую ОЭДФ_д,

$$\text{ОЭДФ}_{\text{д}} = e_1 \cdot \dot{m}_1 - e_5 \cdot \dot{m}_5 = \dot{m}_1^2 (R_1^3 + R_2^3) \quad (4)$$

Для отражения потерь доли эксергии относительно введенной эксергии в ФТС применен критерий ОТД, т.е. отношение обобщенной эксергодиссипативной функции к потоку эксергетической мощности на

входе в ФТС. В рассматриваемом случае критерий ОТД имеет вид:

$$\text{ОТД} = \frac{\text{ОЭДФ}_{\text{д}}}{e_1 \cdot \dot{m}_1} = \frac{\dot{m}_1^2 \cdot (R_1^3 + R_2^3)}{e_1 \cdot \dot{m}_1} = \frac{\dot{m}_1^2 \cdot (R_1^3 + R_2^3)}{e_1 \cdot \dot{m}_1} \quad (5)$$

Определим показатель $\eta_{\text{вых}}$, характеризующий отношение эксергетической мощности на выходе из ФТС к эксергетической мощности на ее входе:

$$\eta_{\text{вых}} = \frac{e_5 \cdot \dot{m}_5}{e_1 \cdot \dot{m}_1} \quad (6)$$

Получим аналитическое выражение $e_5 \cdot \dot{m}_5$ из системы уравнений (3):

$$e_5 \cdot \dot{m}_5 = e_1 \cdot \dot{m}_1 - \dot{m}_2^2 \cdot R_1^3 - \dot{m}_4^2 \cdot R_2^3 = e_1 \cdot \dot{m}_1 - (\dot{m}_2^2 \cdot R_1^3 + \dot{m}_4^2 \cdot R_2^3) \quad (7)$$

Анализ уравнения (7) показывает, что в схеме с последовательным соединением R - элементов общая диссипируемая эксергетическая мощность равна сумме мощностей, диссипируемых на отдельных R - элементах ФТС.

Подставив (7) в (6) и учитывая равенство массовых расходов во всех элементах ФТС при последовательном соединении, получим:

$$\eta_{\text{вых}} = 1 - \frac{\dot{m}_1^2 \cdot R_1^3}{e_1 \cdot \dot{m}_1} - \frac{\dot{m}_1^2 \cdot R_2^3}{e_1 \cdot \dot{m}_1} = 1 - \frac{\dot{m}_1^2 \cdot (R_1^3 + R_2^3)}{e_1 \cdot \dot{m}_1} \quad (8)$$

$$1 - \frac{\dot{m}_1}{e_1} \cdot (R_1^3 + R_2^3)$$

В соответствии с уравнением (8) диссипация эксергии в этой ФТС прямо пропорциональна сумме диссипаторов, квадрату массового расхода потока на входе и обратно пропорциональна произведению удельной эксергии на массовый расход.

Параллельное соединение элементов ФТС. Схема параллельного соединения диссипаторов и ее топологоэксергетическая структура связи представлены на рис. 2. В схеме соединения элементов изображенной на рис. 2 а эксергетические потоки имеют узел разделения потоков в точке «а» и узел слияния потоков в точке «б». В соответствии с формализмом топологоэксергетического метода [2,3,5] в топологоэксергетической структуре связей (рис. 2 б) эти узлы отражены соответственно -10- (узел разделения мощности с одинаковыми обобщенными усилениями), -01- (узел слияния мощности с общим обобщенным усилением), -1- (узел общего потока), $R_{\text{см}}^3$ - диссипатор, смещения потоков.

На основании топологоэксергетической структуры связи (рис. 2 б) по методике, приведенной выше для последовательного соединения элементов, получена система уравнений для параллельного соединения элементов.

Из этой системы уравнений определена диссипативная составляющая обобщенной эксергодиссипативной функции ОЭДФ_{дп} для параллельного соединения элементов:

$$\text{ОЭДФ}_{\text{дп}} = e_1 \cdot \dot{m}_1 - e_{10} \cdot \dot{m}_{10} = \dot{m}_2^2 \cdot R_2^3 + \dot{m}_3^2 \cdot R_1^3 + \dot{m}_9^2 \cdot R_{\text{см}}^3 = \dot{m}_1^2 \cdot R_{\text{см}}^3 + \dot{m}_2^2 \cdot R_2^3 + \dot{m}_3^2 \cdot R_1^3 \quad (9)$$

Критерий ОТД_п определяется как

$$\text{ОТД}_{\text{п}} = \frac{\text{ОЭДФ}_{\text{дп}}}{e_1 \cdot \dot{m}_1} = \frac{\dot{m}_2^2 \cdot R_2^3 + \dot{m}_3^2 \cdot R_1^3 + \dot{m}_1^2 \cdot R_{\text{см}}^3}{e_1 \cdot \dot{m}_1} \quad (10)$$

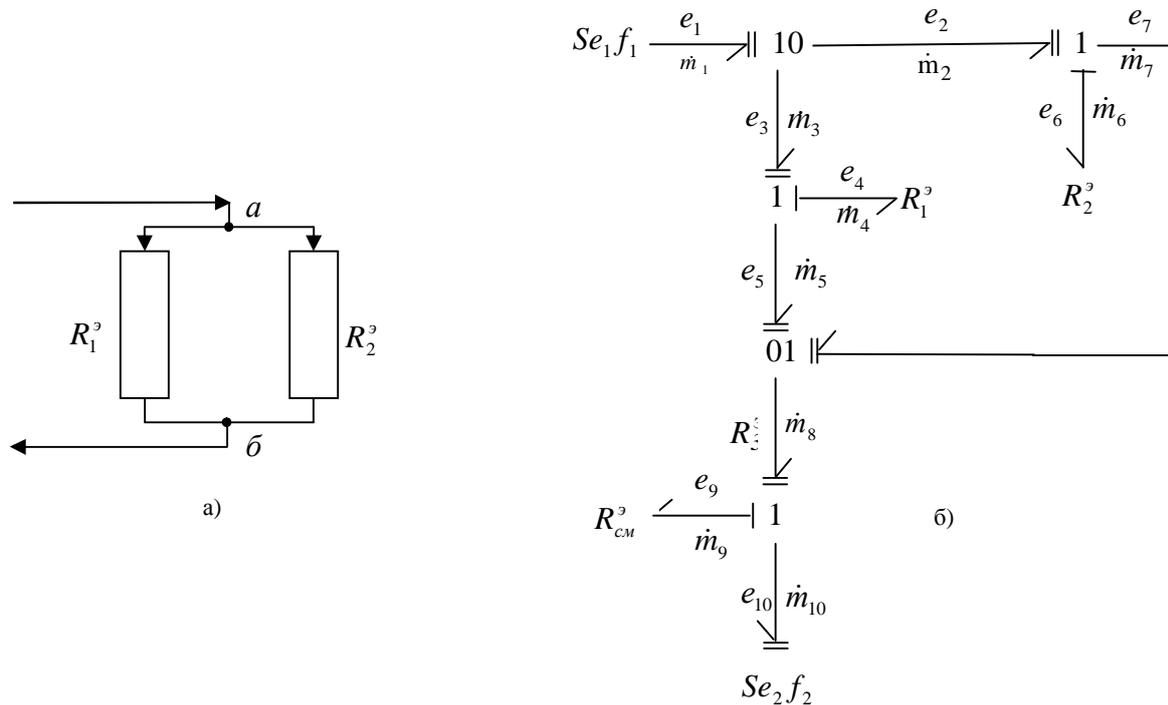


Рис. 2. Схема параллельного соединения диссипаторов (а) и топологоэксергетическая структура связи (б)

Показатель $\eta_{\text{выхП}}$, характеризующий отношение эксергетической мощности на выходе из ФТС к эксергетической мощности на входе в этом случае примет вид:

$$\eta_{\text{выхП}} = 1 - \frac{\dot{m}_2^2 \cdot R_2^3 + \dot{m}_3^2 \cdot R_1^3 + \dot{m}_1^2 \cdot R_{\text{см}}^3}{e_1 \cdot \dot{m}_1} = 1 - \frac{(\dot{m}_1 - \dot{m}_3)^2 \cdot R_2^3}{e_1 \cdot \dot{m}_1} - \frac{(\dot{m}_1 - \dot{m}_2)^2 \cdot R_1^3}{e_1 \cdot \dot{m}_1} - \frac{\dot{m}_1^2 \cdot R_{\text{см}}^3}{e_1 \cdot \dot{m}_1} \quad (11)$$

Сопоставим правые части уравнений (8) и (11), где представлены аналитические выражения диссипации эксергии на элементах R_1^3 и R_2^3 при последовательном и параллельном соединениях.

Если принять, что величина $R_{\text{см}}^3$, определяющая диссипацию потоков при смешении, выбирается такой, чтобы соответствовать минимальным необратимым потерям в ФТС, т.е. в идеальном случае $R_{\text{см}}^3 \rightarrow 0$, то при числовых значениях диссипаторов R_1^3 и R_2^3 таких же, как и в ФТС, представленной на рис.1, в рассматриваемой ФТС (рис.2) наблюдается меньшая диссипация эксергии.

Смешанное соединение элементов ФТС. Схема данного вида соединения представлена на рис 3 (а), ее топологоэксергетическая структура связи на рис 3 (б).

На основании топологоэксергетической структуры связи (рис. 3) получена система уравнений, из которой определены значения составляющих ОЭДФ для этой схемы соединения элементов.

Обобщенная эксергодиссипативную функция рассматриваемой системы:

$$\text{ОЭДФ}_{\text{дсм}} = e_1 \cdot \dot{m}_1 - e_{12} \cdot \dot{m}_{12} = \dot{m}_1^2 \cdot R_1^3 + \dot{m}_5^2 \cdot R_2^3 + \dot{m}_8^2 \cdot R_3^3 + \dot{m}_{11}^2 \cdot R_{\text{см}}^3 \quad (12)$$

Учитывая соотношения между обобщенными потоками для этой схемы, обобщенную эксергодиссипативную функцию можно представить уравнением (13):

$$\text{ОЭДФ}_{\text{дсм}} = \dot{m}_1^2 \cdot R_1^3 + (\dot{m}_1 - \dot{m}_5)^2 \cdot R_2^3 + (\dot{m}_1 - \dot{m}_8)^2 \cdot R_3^3 + \dot{m}_1^2 \cdot R_{\text{см}}^3 \quad (13)$$

Критерий $\text{ОТД}_{\text{см}}$ для этого соединения элементов имеет вид:

$$\text{ОТД}_{\text{см}} = \frac{\dot{m}_1^2 \cdot R_1^3 + (\dot{m}_1 - \dot{m}_5)^2 \cdot R_2^3 + (\dot{m}_1 - \dot{m}_8)^2 \cdot R_3^3 + \dot{m}_1^2 \cdot R_{\text{см}}^3}{e_1 \cdot \dot{m}_1} \quad (14)$$

Показатель $\eta_{\text{выхСМ}}$, характеризующий отношение эксергетической мощности на выходе из ФТС к эксергетической мощности на входе представлен зависимостью:

$$\eta_{\text{выхСМ}} = \frac{e_{12} \cdot \dot{m}_{12}}{e_1 \cdot \dot{m}_1} = 1 - \frac{\dot{m}_1^2 \cdot (R_1^3 + R_{\text{см}}^3)}{e_1 \cdot \dot{m}_1} - \frac{(\dot{m}_1 - \dot{m}_5)^2 \cdot R_2^3}{e_1 \cdot \dot{m}_1} - \frac{(\dot{m}_1 - \dot{m}_8)^2 \cdot R_3^3}{e_1 \cdot \dot{m}_1} \quad (15)$$

Структура правой части зависимости (15) соответствует суммарной структуре правых частей уравнений (8) и (11). Из (15) следует, что в этой схеме соединения элементов можно получить меньшую диссипацию эксергии, чем в схеме с последовательным соединением диссипаторов R_1^3 , R_2^3 и R_3^3 при условии, что входные потоки \dot{m}_1 равны в обоих случаях. Таким образом, на величину эффективности ФТС оказывает влияние как термодинамическое совершенство каждого процесса системы, так и структурные связи между отдельными элементами, т.е. топология ФТС.

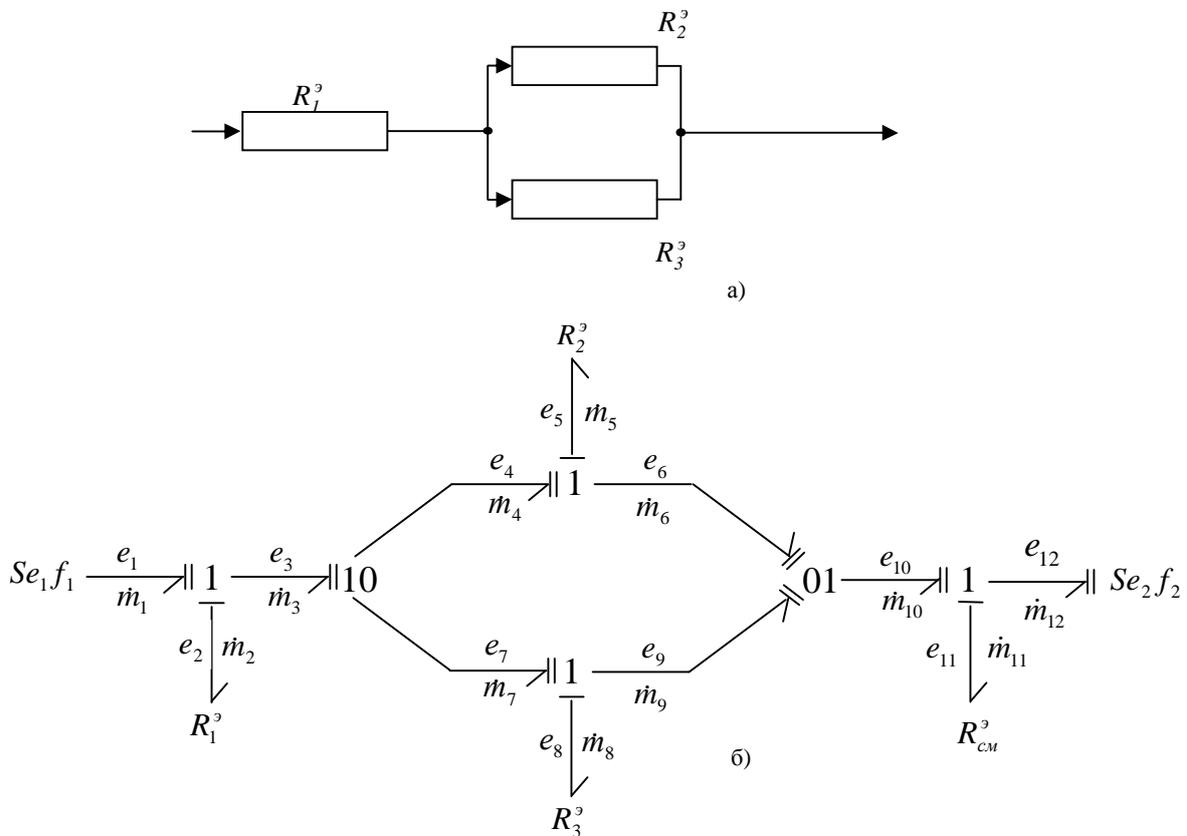


Рис. 3. Схема смешанного соединения диссипаторов (а) и ее топологоэксергетическая структура связи (б)

Соединение элементов с рециклом.

Схема соединения элементов с рециклом и ее топологоэксергетическая структура связи представлены на рис. 4.

В схеме с рециклом диссипатор $R_{см}^3$ характеризует диссипацию эксергии при смешении потоков разной эксергетической мощности в области ввода рециркулирующего потока.

Из системы уравнений, полученной на основании топологоэксергетической структуры связи (рис. 4 б), определены обобщенная эксергодиссипативная функция схемы соединения элементов с рециклом и показатели диссипативных свойств этой ФТС.

Обобщенная эксергодиссипативная функция этой схемы соединения элементов ФТС представлена уравнением (16)

$$\begin{aligned} \text{ОЭДФ} = \text{ОЭДФ}_D = e_1 \cdot \dot{m}_1 - e_6 \cdot \dot{m}_6 = \\ = \dot{m}_3^2 \cdot R_1^3 + \dot{m}_4^2 \cdot R_2^3 + \dot{m}_9^2 \cdot R_3^3 + \dot{m}_{10}^2 \cdot R_{см}^3 \end{aligned} \quad (16)$$

Учитывая соотношения между обобщенными потоками, критерий ОТД_p в этой схеме соединений элементов приобретает вид:

$$\text{ОТД}_p = \frac{\dot{m}_2^2 \cdot (R_1^3 + R_2^3 + R_{см}^3) + \dot{m}_9^2 \cdot R_3^3}{e_1 \cdot \dot{m}_1} \quad (17)$$

Показатель $\eta_{\text{выхР}}$, характеризующий отношение эксергетической мощности на выходе из ФТС к эксергетической мощности на входе в рассматриваемую физико-технологическую систему в этом случае примет вид:

$$\eta_{\text{выхР}} = \frac{e_6 \cdot \dot{m}_6}{e_1 \cdot \dot{m}_1} = 1 - \frac{\dot{m}_2^2 \cdot (R_1^3 + R_2^3 + R_{см}^3) + \dot{m}_9^2 \cdot R_3^3}{e_1 \cdot \dot{m}_1} \quad (18)$$

Долю возвращаемой эксергетической мощности обозначим $\beta = \frac{e_7 \cdot \dot{m}_7}{e_5 \cdot \dot{m}_5}$. Так как $e_7 = e_5$, то

$\dot{m}_7 = \dot{m}_5 \cdot \beta$, тогда, если учесть, что $\dot{m}_5 = \dot{m}_2$, получим:

$$\eta_{\text{выхР}} = 1 - \frac{\dot{m}_2^2 \cdot (R_1^3 + R_2^3 + R_{см}^3)}{e_1 \cdot \dot{m}_1} - \frac{\dot{m}_2^2 \cdot \beta^2 \cdot R_3^3}{e_1 \cdot \dot{m}_1} \quad (19)$$

Для учета влияния конструктивных и технологических параметров ФТС для приведенных уравнений необходимо получить аналитические выражения диссипаторов эксергетических потоков и указать значения технологических параметров на границах системы.

Пример топологоэксергетического моделирования физико-технологических систем и анализа их энергетического совершенства при последовательном и параллельном соединениях элементов водо-водяных теплообменников рассмотрен во второй части работы.

Выводы

Показано применение топологоэксергетического подхода при анализе энергетической эффективности типовых схем соединения элементов потоковых физико-технологических систем. Использование обобщенной эксергодиссипативной функции ФТС, критериев, основанных на её применении, обобщенных пере-

