

Введение Современный подход к анализу, синтезу и оптимизации энергопреобразующих систем базируется на эксергоэкономике [1], которая объединяет термодинамический анализ и экономическую теорию. Получило развитие целое научное направление – прикладная термодинамика. Прикладная термодинамика в настоящее время представляет собой сочетание трех научных дисциплин: термодинамики, тепломассообмена и экономики, объединенных общим названием термоэкономика (или эксергоэкономика). Термоэкономика в классификации М. Moran и А. Bejan рассматривается как главная дисциплина среди основных дисциплин прикладной термодинамики. Гибридизация термодинамики и экономики позволила системно подойти к решению таких практически важных вопросов как формирование эксергетической стоимости продукта энергопреобразующей системы, нахождение «слабых мест» в ее технологической схеме и определение технически возможного предела повышения эффективности каждого элемента. В последние годы усилиями ведущих специалистов мировой школы прикладной термодинамики, таких как Дж. Тсатсаронис, А. Валеро, получил дальнейшее развитие метод структурного анализа энергопреобразующих систем [1, 2], основы которого были заложены Ю. Байером, В. М. Бродянским, М. В. Сориным. В современной прикладной термодинамике структурный анализ является одним из этапов проведения термоэкономической диагностики и оптимизации. В статье впервые предпринята попытка классифицировать существующие известные подходы к проведению структурного анализа. Обозначены наиболее актуальные вопросы развития метода применительно к анализу, диагностике и оптимизации парокompрессионных термотрансформаторов. Проведен структурный термодинамический анализ парокompрессионной холодильной машины (ХМ). Структурный термодинамический анализ энергопреобразующих систем В настоящее время эффективность элементов термотрансформаторов в ряде случаев достигла своего «технического предела», при котором совершенствование конструкций отдельных элементов установки уже существенно не сказывается на повышении эффективности всей системы. Между тем, возможности улучшения структуры их технологических схем еще далеко не исчерпаны. Последнее требует глубокого изучения особенностей межэлементных связей в технологических схемах парокompрессионных холодильных машин и теплонасосных установок. Как известно [3], неэффективность одного элемента энергопреобразующей системы может быть связана с другим элементом, входящим в состав общей технологической схемы. Эксергетические потери достаточно условно отнесены к определенному элементу схемы любого термотрансформатора. Существование структурных связей в технологических схемах энергопреобразующих систем отмечал еще В.С. Мартыновский в работе [4]: «Если только одно звено будет необратимо, это может привести к худшим последствиям для всего цикла, чем необратимость

двух звеньев. Точнее, необратимость одного из звеньев может быть уменьшена необратимостью другого». Подобный эффект в энергопреобразующих системах не парадокс, а является типичным проявлением интегративных свойств системы [5]. В этой связи развитие методов термодинамического анализа ведется в направлении изучения структуры системы и взаимосвязей между ее компонентами [6]. Ниже предложена классификация основных подходов к проведению структурного термодинамического анализа термотрансформаторов. Первый подход базируется на установлении аналитических зависимостей между эксергетическим КПД η_e всей системы и эксергетическими КПД η_{ej} элементов, входящих в ее состав. Этот подход нашел развитие в работах В.М. Бродянского и М. В. Сорины [3, 7, 8]. Для технологических схем с последовательным соединением без промежуточных отводов эксергии связь между эксергетическим КПД системы и КПД ее элементов может быть установлена с помощью соотношения [3, 7] . (1) Для параллельного соединения элементов можно использовать следующее уравнение связи . (2) Следует отметить, что использование уравнения (2) предусматривает при вычислении q_i и η_{ei} отключение транзитной эксергии. Аналитическая зависимость между η_e и η_{ei} предложена в работе [8] , (3) где q_i – эксергетический вес элемента (доля затрат эксергии в элементе), характеризующий влияние элемента на систему в целом. , где q_{pi} и q_{pri} – доля первичной и преобразованной эксергии в элементе; q_n – доля немонотонно-убывающей составляющей затрат в системе. Аналитический подход к структурному анализу в настоящее время фактически не развивается, что связано в первую очередь с трудностью учета транзитной эксергии в элементах. Определение транзитной эксергии допускает множество трактовок [3, 8]. При этом транзитная эксергия в одном случае трактуется как эксергия потока вещества, не изменившего состав или интенсивные параметры, в другом случае под транзитом понимаются «сквозные» эксергетические потоки, связанные с теплотой или работой. С учетом транзита эксергии КПД системы представлен в виде следующего выражения [8] , (4) где $E_{транз}$ – транзитная эксергия. Второй подход является теоретико-графовым, основан на составлении обобщенного уравнения связи эксергетического КПД η_e с КПД каждого элемента η_{ej} , а также степени влияния элемента системы на общую эксергетическую эффективность. Подход предусматривает разделение элементов технологической схемы на основные, т.е. имеющие термодинамически полезное действие и вспомогательные – не имеющие такового действия. Наибольшее развитие метод получил в работах Л. П. Андреева и В. Р. Никульшина [9]. Структура технологической схемы описывается соответствующей матрицей инцидентий. Подход предполагает использование сигнальных графов [10]. Аналитическая зависимость для эксергетического КПД имеет следующий вид [9] . (5) Уравнение (5) не является универсальным и позволяет учесть только частный случай, когда внешние потоки подводят к одним элементам (i), а

внутренние к другим (j). Между тем, существует еще один случай соединения, когда к одному и тому же элементу подводятся как внутренние потоки, так и внешние потоки эксергии и такие схемы среди энергопреобразующих систем очень распространены. Третий подход основан на представлении структуры технологической схемы энергопреобразующей системы в виде ориентированного графа, который формируется на основе термодинамической направленности процессов в энергопреобразующей системе. Связь между термодинамической эффективностью элементов и эффективностью системы в целом устанавливается с помощью записи Лагранжиана. Метод получил развитие в работах Г. В. Ноздренко [11]. Энергопреобразующей установке вместе с взаимосвязями с окружающей средой ставится в соответствие ориентированный граф. (6) Множество вершин (I) графа отображает элементы установки и внешней среды, а множество дуг J – ветви связи между элементами. Для каждого i -го элемента задается множество входов потоков эксергии, а также множество выходов потоков. С каждой дугой из элемента i в элемент k , связана величина потока эксергии по ветви. Эксергия E_{ij} в начале и в конце ветви одинакова. Множество (I) делится на несколько непересекающихся множеств. При этом I_1 – соответствует источникам топлива, I_2 – технологической схеме, I_3 – энергопотребителям. Элемент рассматривается как многомерный технологический оператор, где с k -м энергоносителем по k -ой ветви подводится определенное количество эксергии (7) и отводится с j -м энергоносителем j – ой ветви связи некоторое количество эксергии. (8) Данный подход целесообразно использовать при структурном анализе сложных энергопреобразующих систем состоящих из агрегатов различного функционального назначения (когенерационные схемы), в которых важно управлять процессами распределения нагрузки между агрегатами. Четвертый подход к структурному анализу, названный топологоэксергетическим, нашел отражение в работах И. С. Долгополова [12]. Этот подход позволяет получить системную картину влияния конструктивно-технологических параметров элементов на эксергетическую эффективность установки применительно к различным схемам соединения ее элементов. Для этого вводится обобщенная эксергодиссипативная функция, характеризующая все виды потерь в системе. С учетом типа соединения элементов (диссипаторов) составляется тополого-эксергетическая структурная схема, которая имеет узлы разделения потоков эксергии и узлы слияния потоков. Обобщенная эксерго-диссипативная функция может быть представлена как [12], (9) где $OЭДФ_{пол}$ – полезные затраты эксергии в обобщенной эксергодиссипативной функции; $OЭДФ_{д}$ – диссипативная составляющая в обобщенной эксерго-диссипативной функции; $E_{вх}$ – эксергия потока на входе; $E_{вых}$ – эксергия потока на выходе технической системы. Критерий, характеризующий отношение $OЭДФ$ к подведенной эксергии, (10) Недостатком такого подхода, на наш взгляд, является то, что каждый раз для учета влияния некоторого

технологического или конструктивного параметра, необходимо получать аналитическое выражение для диссипаторов эксергетических потоков. Пятый подход базируется на вычислении коэффициентов структурных связей, с помощью которых можно выявить в установке наиболее существенные факторы, варьирование которыми позволяет отыскать оптимальное структурное решение, и в итоге выйти на так называемую термоэкономическую оптимизацию установки. При определении коэффициентов структурных связей возможны два подхода. В первом случае они определяются на основе вычисления эксергетических потерь в элементах ED_k и в системе в целом SED_k . Этот коэффициент был предложен Ю. Байером [8], (11) где x_k – параметр, влияющий на величину потерь от необратимости. Во втором случае вычисляются потоки эксергии, связанные с элементом и определяется значение эксергетического КПД. Такого вида структурный коэффициент предложен Г. К. Костенко [3]. (12)

Условие $y = idem$ означает, что никаких изменений в системе, кроме тех, которые вызваны варьированием he_i , не производится. В отличие от структурного коэффициента rk_i , который зависит от эксергетических потерь, имеющих очень сложные связи, структурный коэффициент zi_k значительно легче вычисляется, поскольку связь между he и he_i устанавливается проще. Особенность метода заключается в варьировании параметров процессов воздействующих на эксергетические потери в системе. При этом возможно как последовательное изменение потерь в элементах схемы, так и выборочное изменение, при допущении об отсутствии потерь эксергии в ряде элементов. Анализ значений позволяет выделить так называемые «зависимые» эксергетические потери, вызывающие дополнительное потребление эксергии, связанной с «топливом» в других элементах. Если $z_i > 0$, то уменьшение подведенной к системе эксергии «топлива» больше, чем уменьшение эксергетических потерь в элементе схемы, таким образом, рассматриваемый элемент целесообразно оптимизировать, поскольку в схеме имеется определенный резерв для повышения ее термодинамической эффективности за счет изменения эксергетических потерь в одном или нескольких элементах. Если $z_i < 0$, тогда уменьшение эксергии «топлива» системы меньше, чем уменьшение эксергетических потерь в элементе. Уменьшение потерь от необратимости в одном элементе схемы компенсируется увеличением потерь в других элементах. Таким образом, полезно использовать возможности повышения термодинамической эффективности конкретного элемента входящего в рассматриваемую схему уже нельзя, поскольку для нее характерна высокая жесткость структурных связей между элементами. В этом случае при оптимизации системы должен быть выбран, либо другой варьруемый параметр элемента, либо другой элемент. При повышении эффективности системы не зависит от изменения варьруемого параметра. С помощью структурных коэффициентов можно выявить системные закономерности проявления потерь

от необратимости в технологических схемах энергопроеобразующих систем. В [13, 14] нами установлено, что с увеличением сложности технологической схемы термотрансформатора возрастает жесткость структурных связей, что делает их более устойчивыми к влиянию термогидравлической необратимости в цикле. Шестой подход предусматривает некую идеализацию термодинамических процессов. При проведении анализа процесс в одном рассматриваемом элементе схемы представляется идеальным, в котором мысленно «устраняются» эксергетические потери, далее производится пересчет термодинамических параметров установки, после чего оценивается вклад эксергетических потерь в рассматриваемом элементе в общие потери в системе. В этом направлении развития структурного термодинамического анализа большую роль сыграли работы В. М. Бродянского, А. В. Троценко, М. В. Сорины и Ю. В. Синявского [3, 7, 15, 16]. Учитывая тот факт, что изменение потерь эксергии в элементе приводит к изменению приводной эксергии системы DE, далее оценивается влияние потери в каждом элементе в зависимости от места его в схеме на величину DE [3, 7] , (13) где – произведение эксергетических КПД элементов от первого по ходу потока эксергии до (k -1)-го. Неэквивалентность эксергетических потерь в различных элементах схемы определяется значениями эксергетических КПД предшествующих рассматриваемому элементов и учитывается коэффициентом преобразования эксергии d [3] . (14) В качестве критерия для сравнения эффективности подобных и неподобных компонентов, входящих в состав одной схемы, а также различных схем используются относительные потери эксергии [1, 3] . (15) Для установления связи между изменением ED,k и изменением SED,k, необходимо классифицировать потери. При этом выделяется набор переменных, характеризующих вид потери в рассматриваемом элементе (технические или собственные). Исключаемая потеря определяется причиной возникновения необратимости [16]. Если для переменных, отражающих технические потери (гидравлические сопротивления, минимальный температурный напор, теплотери с поверхности компрессора и т. д.), теоретически возможно установить их максимальные и минимальные значения, базируясь на опыте эксплуатации и проектирования, то для переменных, отражающих собственные потери, это очень сложно, а зачастую, и просто невозможно выделить как сами переменные, так и диапазон их варьирования. Например, равенство нулю потерь в дросселе фактически означает изменение технологической схемы установки. Кроме того, устранение эксергетических потерь в одном элементе приводит к уменьшению необходимой эксергии на входе в систему при условии заданной производительности установки. Учитывая неэквивалентность эксергетических потерь в различных элементах, установить такую связь достаточно сложно. При анализе методом исключения потерь нельзя оценить, как другие параметры процесса реагируют на исключение какой-либо потери в элементе. К примеру, устранение гидравлических сопротивлений по тракту испарителя холодильной

машины обязательно скажется на значении минимального температурного напора. Седьмой подход предполагает углубленный эксергетический анализ, учитывающий влияние в технологической схеме экзогенной и эндогенной, устранимой и неизбежной составляющих деструкции эксергии. Предложен Дж. Тсатсаронисом и А. Валеро независимо друг от друга, в дальнейшем развит в работах Ц. Торреса, Т. В. Морозюк [2, 17]. Эндогенная деструкция эксергии ED,kEN связана исключительно с несовершенством k -го элемента схемы. При расчете ED,kEN предполагается, что все остальные взаимосвязанные с ним элементы являются «идеальными», т. е. в них отсутствуют потери от необратимости. Экзогенная часть деструкции эксергии ED,kEX , возникающая в том же k -ом компоненте зависит от наличия необратимостей в других компонентах схемы. Так, к примеру, при анализе процесса сжатия в холодильном компрессоре следует учитывать, что деструкция эксергии в нем зависит не только от индикаторного КПД компрессора, определяющего только эндогенную часть ED,kEN , но и от величины минимальных температурных напоров в испарителе и конденсаторе, а также уровня потерь давления в гидравлическом контуре хладагента, которые по отношению к компрессору определяют экзогенную составляющую деструкции ED,kEX . Или другой пример, чем более необратимым будет процесс сжатия в компрессоре, тем больше будет деструкция эксергии в конденсаторе. В этом случае минимальный температурный напор и гидравлические сопротивления в конденсаторе будут определять эндогенную часть ED,kEN , а индикаторный КПД компрессора – экзогенную ED,kEX . В общем случае, уменьшая значение эндогенной части деструкции эксергии (т. е. усовершенствуя элемент) снижается и экзогенная часть деструкции эксергии в других элементах схемы. Если $ED,kEN > ED,kEX$, то анализируемый элемент схемы, является достаточно совершенным [17]. При $ED,kEN < ED,kEX$ – элемент термодинамически несовершенен. В случае $ED,kEN = ED,kEX$, то имеет место эффект взаимовлияния потерь в смежных элементах. Как эндогенная, так и экзогенная составляющие деструкции эксергии подразделяются на неизбежную ED,kUN и устранимую ED,kAV части [1]. Без выделения неизбежной и устранимой составляющей деструкции нельзя выявить причину изменения характеристик ХМ в случае использования, к примеру, нового хладагента. Как известно [16], собственные (неизбежные) потери формируются не причинами необратимости, а их проявлением в элементе, поэтому учет их сложен. Для анализа устранимой ED,kAV , и неизбежной ED,kUN деструкции эксергии, а также нахождения ED,kEN и ED,kEX в элементе используется термодинамическая идеализация процессов. В работе [18] предложен метод построения так называемых гибридных циклов. По сути, метод построения гибридных циклов, является обратным методу устранения потерь, указанному выше. При построении гибридных циклов все процессы, кроме рассматриваемого процесса должны быть идеализированы. Анализ потерь в

реальном, гибридном и теоретическом цикле позволяет найти долю потерь эксергии каждого элемента схемы в потерях эксергии одного рассматриваемого элемента. Число гибридных циклов должно быть равно числу элементов в схеме ХМ. Недостатком метода построения гибридных циклов, является игнорирование структуры схемы при идеализации процессов. Для элементов имеющих собственные потери некорректно строить идеальный процесс. Например, идеальный процесс изоэнтропного расширения может быть построен только в том случае, если в схеме ХМ имеется детандер. В случае наличия дросселя в схеме удельная холодопроизводительность в цикле должна быть меньше на величину, необходимую для компенсации собственных потерь. Для усложненных схем, включающих регенеративный теплообменник, многократное дросселирование, промежуточные сосуды построение гибридных циклов проблематично. Существует и другой подход к определению эндогенной и экзогенной составляющей деструкции эксергии в элементах термотрансформаторов авторами работы [18] он назван инженерным. По результатам нескольких натурных экспериментов или многовариантных расчетов при варьировании некоторого определяющего параметра в элементе строится графическая зависимость, которая показывает, как изменение эксергетических потерь в других взаимосвязанных элементах схемы сказывается на суммарных потерях в системе. Предполагается, что полученная зависимость линейная и описывается регрессионным уравнением, где s^o ED, kEN . При этом задается постоянным эксергетический КПД рассматриваемого элемента $= const$, т. е. эндогенная часть деструкции эксергии является функцией. В действительности величина зависит от изменения потерь эксергии в других элементах (гидравлические сопротивления, неравновесный теплообмен). Недостатком инженерного подхода, является отсутствие связи с термодинамическим циклом. Для усовершенствования системы важно знать, влияние какой именно необратимости в элементе больше сказывается на эндогенной, а какой на экзогенной составляющей деструкции эксергии, а это можно определить только путем термодинамического анализа цикла. Структурный термодинамический анализ водоохлаждающей ХМ В настоящей работе представилось целесообразным усовершенствовать инженерную методику определения эндогенной и экзогенной деструкции эксергии применительно к структурному термодинамическому анализу водоохлаждающей ХМ. Известно [3, 8], что эксергетические КПД элементов взаимосвязаны между собой сложными нелинейными зависимостями, поэтому при изменении режима работы одного элемента изменяются КПД остальных элементов. Таким образом, использование инженерного подхода к вычислению ED, kEN и ED, kEX требует проведения многовариантных расчетов при постоянном эксергетическом КПД k -го компонента, когда все остальные параметры изменяются. При этом каждый раз должен варьироваться параметр, определяющий процесс в

рассматриваемом компоненте, а само значение КПД должно находиться методом разделения в системе эксергетических потоков по качественному признаку «продукт» и «топливо» элемента, что излишне перегружает сам анализ. При ограниченной исходной информации относительно степени влияния КПД каждого процесса на эффективность всей системы нами предлагается следующая схема расчета ED_{kEN} и ED_{kEX} . Для определения ED_{kEN} и ED_{kEX} в k -м элементе методом линейной регрессии были получены зависимости между КПД всех элементов ХМ, суммарными потерями в системе и потерями в остальных элементах, исключая потери в рассматриваемом k -ом элементе. Далее по полученным зависимостям, фиксируя значения всех КПД, определены значения при варьируемых для k -го элемента и построены линейные зависимости от , соответствующие рассматриваемым режимам. Таким образом, мы дважды воспользовались методом линейной регрессии, вначале для получения зависимости , а затем для нахождения коэффициентов уравнения для каждого режима. Значения эксергетических КПД в этом случае могут быть получены на основе энтропийно-циклового метода анализа с использованием известного уравнения , где N_{km} – мощность привода компрессора. На рис. 1 представлены зависимости от для испарителя, компрессора и конденсатора при заданных температурах перегрева в испарителе. Точками на рисунках обозначены исходные данные для анализа, полученные нами в работе [19] для чиллера холодопроизводительностью 15,5 кВт при варьировании перегрева в испарителе $DT_{пер}$. а б в Рис. 1 - Зависимости от для: а) испарителя: б) компрессора; в) конденсатора 1 – $DT_{пер}=5$ К; 2 – $DT_{пер}=7,5$ К; 3 – $DT_{пер}=10$ К; 4 – $DT_{пер}=12,5$ К; 5 – $DT_{пер}=15$ К Анализ результатов расчета позволил сделать вывод, связанный с понятиями об эндогенной ED_{kEN} и экзогенной ED_{kEX} составляющей деструкции эксергии. При изменении показателя процесса в рассматриваемом элементе, в остальных элементах схемы изменяется только экзогенная часть, в то время как в нем самом, происходит изменение как ED_{kEN} так и ED_{kEX} . Установлено, что значительная часть деструкции эксергии в компрессоре 50 , 57 % преимущественно связана с неэффективностью смежных элементов схемы. Для конденсатора экзогенная составляющая деструкции эксергии составляет 25 , 30 %. Более 95 % деструкции эксергии в испарителе составляет эндогенная ее часть. Выводы Метод структурного термодинамического анализа, является мощным инженерным инструментарием для поиска рациональных режимов проектируемых систем термотрансформации, а также для выявления и реализации резервов повышения термодинамической эффективности систем находящихся в эксплуатации и подлежащих реконструкции. Основное направление развития структурного метода – функциональный анализ на основе термодинамического моделирования с установлением взаимосвязей между составляющими эксергетических потерь в элементах термотрансформатора.