

## РЕДАКЦИОННЫЙ КОММЕНТАРИЙ К СТАТЬЕ

Статья посвящена актуальной для российского здравоохранения теме – обеспечению информационно-аналитической поддержки принятия и реализации решений по управлению эффективностью терапевтических процедур (ЭТП). Эта проблематика важна не только для стационарных медицинских учреждений, но и при амбулаторном лечении; при лечении пациентов на дому. Обоснована целесообразность организации контроля ЭТП в три этапа с использованием распределенных баз данных. Подробно описана функциональность и программно-технические средства, используемые для решения рассматриваемых в статье задач.

Однако в отношении работы целесообразно отметить следующее. 1) Авторы ориентируют изложение на использование терапевтических процедур, связанных с медикаментозными воздействиями. Однако в рамках терапии возможно применение и физиотерапевтических методов, а также комбинирование использования медикаментозных средств и физиотерапии. 2) Применяемый авторами термин «эффективность» возможно не совсем удачный, т.к. обычно под эффективностью понимается отношение результатов к затратам. В тоже время о затратах в статье речь вообще не идет. Поэтому, возможно, лучше было бы говорить о «результативности» терапевтических процедур. 3) В работе практически не отражены следующие вопросы: запаздывания реакций организма на медикаментозные препараты; возможность синергетических эффектов при воздействии на организм совокупности препаратов. 4) При оценках ЭТП следовало бы также в явной форме сказать о необходимости учета не только прямых эффектов, достигаемых за счет использования лекарственных препаратов, но и побочных отрицательных (негативных) эффектов от их применения. 5) В библиографическом списке к статье (17 позиций) имеется всего одна иноязычная работа, она посвящена дистанционному мониторингу состояния пациентов. Между тем по рассматриваемым в статье направлениям исследований в зарубежной научной периодике есть, вероятно, достаточно много работ.

УДК 658.512.2 + 004.424.45

**МЕТОД ПОИСКОВОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ  
НА ОСНОВЕ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКОГО ПОДХОДА:  
МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ ДЕЙСТВИЯ**

*Статья поступила в редакцию 19.11.2017, в окончательном варианте – 21.02.2018.*

**Яковлев Алексей Андреевич**, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, 28,  
доктор технических наук, профессор, e-mail: yaa\_777@mail.ru

**Сорокин Вадим Сергеевич**, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленин, 28,  
аспирант, e-mail: s.o.g.o.k.i.n@mail.ru

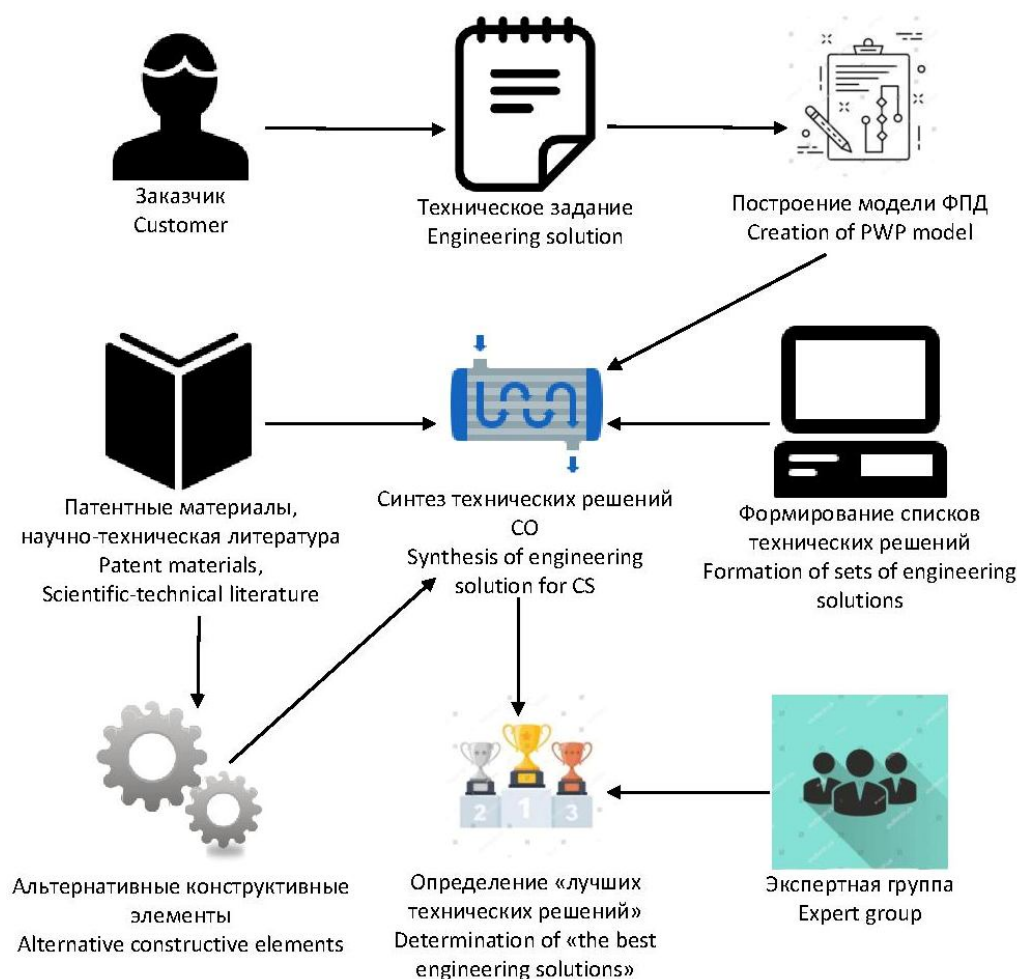
**Мишустина Светлана Николаевна**, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина 28,  
старший преподаватель, e-mail: svt4656@mail.ru

**Крылов Евгений Геннадьевич**, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина 28,  
доцент, e-mail: app@vstu.ru

Описан метод поискового конструирования, включающий в себя следующие этапы. 1) Построение модели физического принципа действия (ФПД) системы охлаждения (СО) на основе ее вербального описания. 2) Выбор принципа действия проектируемой СО. 3) Получение матрицы технических решений для проектируемой СО. 4) Формирование на основе этой матрицы множества возможных технических решений СО в виде функционально совместимых конструктивных элементов – путем выявления элементарных функций, связанных с вершинами и ребрами модели ФПД. 5) Определение наиболее перспективных вариантов для конструктивной реализации СО методом экспертных оценок, адаптированным для используемого подхода к проектированию. В рамках проведенного исследования выделена предметная область для предлагаемого метода; уточнена модель ФПД для рассматриваемой СО. Сформирована и представлена в виде блок-схемы методика составления модели ФПД, которая определяет последовательность и порядок действий при построении моделей. Она состоит из двух последовательно выполняемых циклов с постуловием, охваченных структурой «альтернатива с одним действием». Определены и представлены в виде реляционных таблиц основные структуры данных для системы информационной поддержки поискового конструирования. Сюда относятся следующие описания: характерных точек графа ФПД; истоков и стоков рабочего тела; потоков рабочего тела; взаимодействий между рабочим телом и объектами окружения.

**Ключевые слова:** поисковое конструирование, физический принцип действия, ориентированный граф, техническое решение, поддержка принятия решений, система охлаждения, рабочее тело, реляционная таблица, структура данных, цикл с постуловием

## Графическая аннотация (Graphical annotation)



**METHOD OF COOLING SYSTEMS SEARCH DESIGNING  
ON THE BASE OF ENGINEERING AND PHYSICAL APPROACH:  
PHYSICAL PRINCIPLES OF ACTION MODELLING**

*The article was received by editorial board on 19.11.2017, in the final version – 21.02.2018.*

**Yakovlev Aleksey A.**, Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

Doc. Sci. (Engineering), Professor, e-mail: yaa\_777@mail.ru

**Sorokin Vadim S.**, Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

post-graduate student, e-mail: s.o.r.o.k.i.n@mail.ru

**Mishustina Svetlana N.**, Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

Senior Lecturer, e-mail: svt4656@mail.ru

**Krylov Yevgeniy G.**, Volgograd State Technical University, 28 Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation,

Associate Professor, e-mail: app@vstu.ru

The article describes the search designing method, including the following stages. 1) Designing a physical principle model (PPM) on the base of verbal description of the scheme 2) Choosing principle of projected cooling system (CS). 3) Getting matrix of technical solutions for projected CS. 4) Forming a number of possible technical solutions for CS in the

form of interoperable designing elements on the base of the matrix by the way of revealing elementary functions, connected with peaks and ribs of the model of physical principle. 5) Defining the most perspective variants for constructive implementing of CS by the way of expert estimation, adapted for the used method of projecting. Within the conducted research the data domain for the offered method is selected; the PPD model for considered CS is specified. The technique of compilation of the PPD model, which defines the sequence and an operations procedure in case of creation of models, is created and presented in the flowchart form. It consists of two sequentially executed cycles with a postcondition embraced by structure "alternative with one action". The main data structures for the system of information support for search designing are defined and presented in the form of relational tables. It includes the descriptions of the following objects: characteristic points of the PPD graph; sources and sinks of the working body; flows of a working body; interactions between the working body and surrounding objects.

**Keywords:** search designing, physical principle, oriented graph, technical solution, decision making support, cooling system, working medium, relation table, data structure, cycle with tail condition

**Введение.** В данной статье рассматриваются вопросы, относящиеся к начальным стадиям проектирования систем охлаждения (СО), которые включают определение структуры будущего устройства и состава функциональных элементов для его последующей конструктивной реализации в виде чертежей. Этот наиболее творческий и ответственный этап проектирования, во многом определяющий качество будущего изделия, называют поисковым конструированием (ПК).

Главными задачами ПК являются следующие: получение как можно большего числа альтернативных вариантов построения системы; выбор из них наиболее эффективного для последующей реализации. Традиционный подход заключается в выборе в качестве прототипа схемы СО и подборе для нее конструктивных элементов (КЭ). Такой подбор осуществляется методом проб и ошибок. Это связано с тем, что многие КЭ оказываются функционально несовместимыми, а определить такую несовместимость может только сам проектировщик в процессе самостоятельного анализа. На практике это ограничивает число вариантов для сравнения и заставляет усомниться в оптимальности выбора лучшего из них, так как огромное множество потенциально возможных вариантов выпадает из рассмотрения.

Поэтому теоретическая проработка методологии начальных этапов проектирования СО, позволяющая автоматизировать этот процесс, является актуальной задачей. Однако соответствующие вопросы в существующей литературе рассмотрены достаточно фрагментарно, что и делает целесообразным их более глубокую разработку. Решение указанной задачи позволит повысить производительность и качество труда проектировщика на этапе ПК.

**Недостатки существующих методов проектирования технических систем.** Среди всего многообразия методов проектирования технических систем наибольшую перспективу имеют те, в основу которых положены определенные модели физического принципа действия (ФПД). Такие модели, как правило, представляются в виде ориентированных графов. К ним относятся: веполюсный анализ [12] в рамках теории решения изобретательских задач [13, 19]; комбинаторный метод поиска принципов действия [2]; энерго-информационный метод [23, 25–26]; функционально-физический метод ПК [6, 9, 18, 21].

Основной проблемой при использовании данных методов является то, что в них затруднен переход от структуры устройства в виде модели ФПД к его конструктивной реализации, поскольку в этих методах не учитываются перемещения рабочего тела в пространстве и осуществление физических взаимодействий во времени, а именно: это характерно для большинства СО.

В работах [5, 10, 11] рассмотрены основные положения и область применения инженерно-физического метода ПК преобразователей энергии. Его главное преимущество заключается в использовании новой модели ФПД, позволяющей на основе принципов феноменологической термодинамики выявить функции КЭ. Затем путем проведения информационного поиска в научно-технической литературе, патентных материалах, специализированных базах данных и других источниках появляется возможность сформировать матрицу возможных ТР для дальнейшей конструктивной проработки наиболее перспективных вариантов. Как показал анализ, теоретические положения инженерно-физического метода могут быть успешно использованы для проектирования СО, основным функциональным элементом которых, так же как и в преобразователях энергии является рабочее тело.

В связи с этим конкретной целью исследования, представленного в настоящей статье, является повышение производительности труда конструкторов, занимающихся проектированием СО; улучшение качества получаемых ими ТР путем создания научно-обоснованного специализированного метода синтеза ТР для СО с жидким и газообразным рабочим телом.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели необходимо: 1) определить предметную область метода; 2) провести адаптацию модели ФПД инженерно-физического метода к данному классу технических систем; 3) разработать методику синтеза модели ФПД на основе вербального описания схемы и принципа действия проектируемой СО. А также: 4) разработать методику синтеза ТР на ос-

нове модели ФПД; 5) разработать программное приложение для автоматизация процедур синтеза ТР. В данной статье рассматривается последовательное решение первых трех задач из этого перечня. Остальные задачи будут рассмотрены в последующей статье.

**Определение предметной области метода.** Для решения данной задачи были рассмотрены частные [4] и общие классификации СО [1, 3]. Это позволило выделить предметную область данного метода. Она распространяется на СО с рабочим телом, находящимся в газообразном и/или жидком состоянии. Наиболее характерными представителями таких технических систем являются парокompрессионные [16], парожеткорные [24], абсорбционные [7, 8], газовые [14], воздушные холодильные установки [15]; системы тонкого распыления; испарительные, вакуумно-испарительные, вакуумно-барботажные и многие другие СО, применяемые в разных областях техники, науки, здравоохранения и пр. Особого внимания заслуживают СО электронно-вычислительных устройств летательных аппаратов (бортовой аппаратуры), к которым предъявляются повышенные требования по надежности (вероятности безотказной работы) и производительности. В связи с этим, в таких СО используются наиболее продуктивные и перспективные ТР и передовые идеи. В частности, существуют идеи и, связанные с ними разработки, в которых используется принцип «погружного однофазного прямого нагнетания струйного охлаждения» [22]. Согласно данному подходу, охлаждение электронных компонентов осуществляется за счет микроструи хладоносителя диаметром 1 мм, подаваемой непосредственно на заднюю поверхность IGBT-проводника, то есть в наиболее нагретые области компонента. Устранение локальных участков температуры позволяет повысить охлаждающую способность устройства путем тепловой однородности на больших площадях.

Встроенные системы охлаждения электронных компонентов позволяют существенно повысить объемную теплоотдачу электронных устройств [20]. В частности встроенные непосредственно в чип или микросхему микроканалы способствуют достижению более интенсивных локальных и глобальных тепловых потоков, поскольку теплоотвод осуществляется в непосредственной близости от источников тепла. Такие технологии положительно зарекомендовали себя для охлаждения компонентов военных самолетов и космических кораблей.

В работе [17] рассматривается компактная парокompрессионная система охлаждения электронных устройств, оснащенная небольшим масляным компрессором R-134a и струйным радиатором, который объединяет испаритель и расширительное устройство в единый блок. Как показала практика, такие СО имеют стабильные показатели холодопроизводительности и термодинамические характеристики: температуры нагретой поверхности, падение коэффициента теплопередачи, тепловое сопротивление системы. Коэффициент холодопроизводительности такой холодильной установки увеличивается с ростом охлаждающей способности, оправдывая ее применение при больших тепловых нагрузках.

Однако, несмотря на всю специфику устройства и особенностей работы таких технических систем, рабочее тело при их функционировании также находится в жидком или газообразном состоянии. Следовательно предлагаемый метод проектирования распространяется и на СО подобных типов.

**Адаптация модели ФПД инженерно-физического метода к рассматриваемому классу технических систем.** Несмотря на широкую область применения в СО используется небольшое количество физических явлений (эффектов). К ним относятся фазовые переходы (кипение, испарение, конденсация, сублимация, плавление), дросселирование газов и жидкостей, адиабатическое расширение и расширение с совершением внешней работы, вихревой эффект, абсорбция газов и десорбция газов из растворов, эжекция [1, 3].

В работах [5, 10, 11] описаны основные принципы разработки модели ФПД. Их основу составляет граф ФПД, состоящий из двух типов вершин (характерные точки и объекты окружения) и двух типов дуг (дуги-потоки и дуги-взаимодействия). Каждому физическому явлению на графе соответствует определенная топологическая структура из характерных точек и дуг обоих типов.

Для физических явлений, лежащих в основе работы СО, автором были разработаны их представления на графе ФПД. Например, охлаждение за счет кипения хладагента на графе представляется следующими узлами (рис. 1). Процесс кипения, происходящий при подводе тепла от внешнего источника, показан на рисунке 1,а. На рисунке 1,б показан тот же процесс без подвода тепла. В первом случае кипение проходит при постоянной температуре, а во втором – температура хладагента понижается, за счет затрат энергии на фазовый переход. Аналогичным образом на графе модели ФПД представляются процессы испарения, конденсации, сублимации и плавления.

На рисунке 2,а показано представление процесса дросселирования газа, основанное на резком снижении его давления после прохождения через суженное отверстие (вентиль, дроссель). На рисунке 2,б показан процесс дросселирования жидкостей. Так как температура кипения жидкости зависит от давления, то жидкость, имея определенную температуру и поступая в область низкого давления, оказывается перегретой по отношению к условиям этой области. Происходит вскипание жидкости с образованием сухого насыщенного пара. Это отражается на графе показом дуги, обозначающей фазовое превращение жидкости.

Графическое представление процессов расширения газа с совершением внешней работы показано на рисунке 3,а. Адиабатическое расширение газа – процесс, протекающий без теплообмена между рабочим телом (газом) и окружающей средой представлено на рисунке 3,б.

На рисунке 4 в виде графа показан вихревой эффект Ранка-Хильша [1], который создается с помощью специального устройства – вихревой трубы. В результате происходит разделение теплого и холодного воздуха в закрученном потоке.

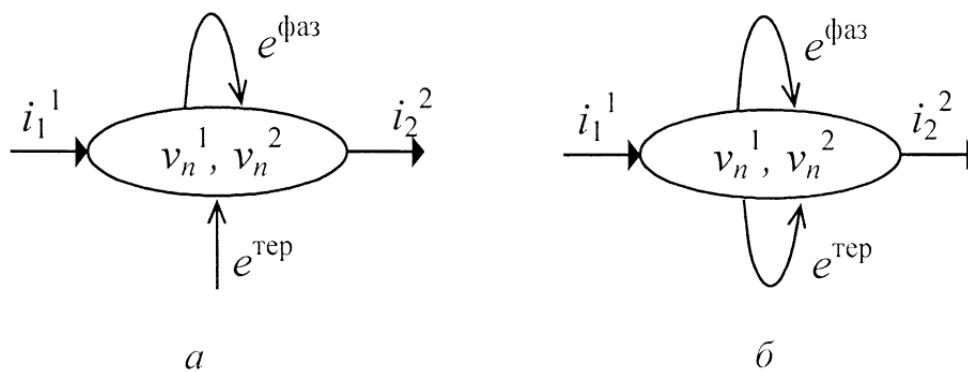


Рисунок 1 – Графическое представление процесса кипения:  $v_n^1, v_n^2$  – хладагент в жидком и газообразном состоянии соответственно;  $i_1^1$  – поток жидкого хладагента;  $i_2^2$  – поток газообразного хладагента;  $e^{\text{фаз}}$  – фактор экстенсивности, сопряженный с фазовой формой движения;  $e^{\text{тер}}$  – фактор экстенсивности, сопряженный с термической формой движения

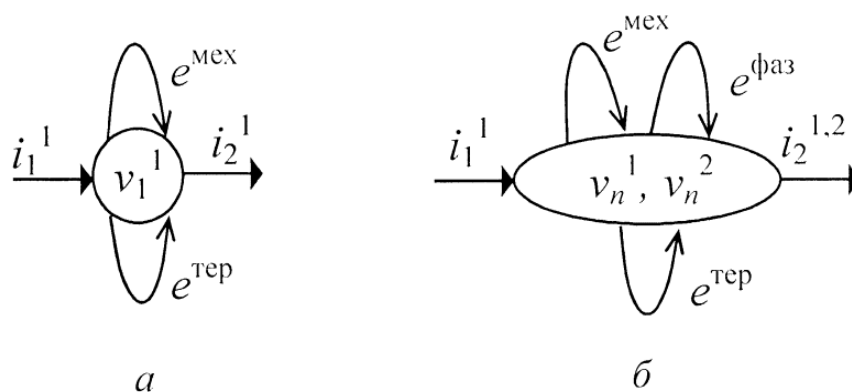


Рисунок 2 – Графическое представление процессов дросселирования газа и жидкостей

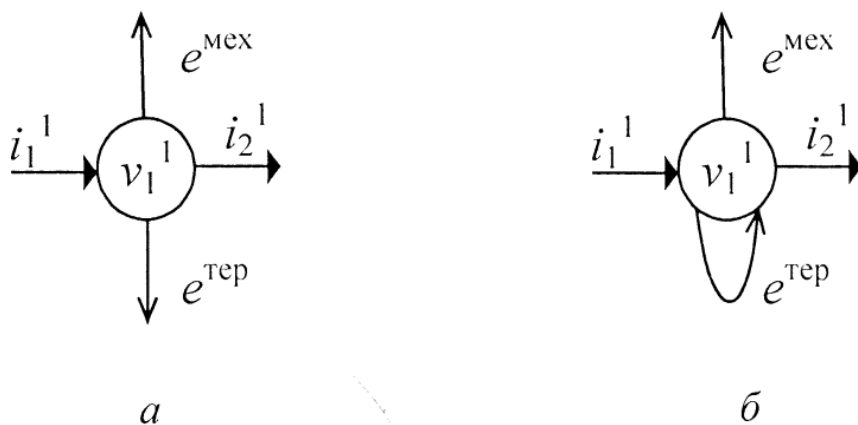


Рисунок 3 – Графическое представление процессов расширения газа

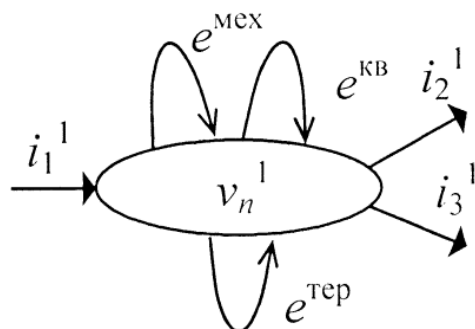


Рисунок 4 – Графическое представление эффекта Ранка-Хильша:  $v_n^1$  – газ в вихревой трубе;  $i_1^1$  – поток сжатого газа в сопловом вводе вихревой трубы;  $i_2^1$  – горячий поток газа;  $i_3^1$  – холодный поток газа;  $e^{мех}$  – фактор экстенсивности, сопряженный с механической формой движения;  $e^{тер}$  – фактор экстенсивности, сопряженный с термической формой движения;  $e^{кв}$  – фактор экстенсивности, сопряженный с кинетической (вращения) формой движения

Принципиальная схема эжектора и графическое представление процессов, происходящих в нем, показано на рисунке 5. Рабочая среда (газ или пар высокого давления) выходит из сопла 1 (вершина  $v_1^1$ ) и поступает в камеру смешения 2 (вершина  $v_2^1$ ). Сюда же поступает из всасывающей камеры 3 подлежащая сжатию подсосываемая среда (газ или пар низкого давления). Из камеры смешения смесь этих двух сред поступает в диффузор 4, в котором кинетическая энергия струи переходит в потенциальную энергию струи с повышением давления.

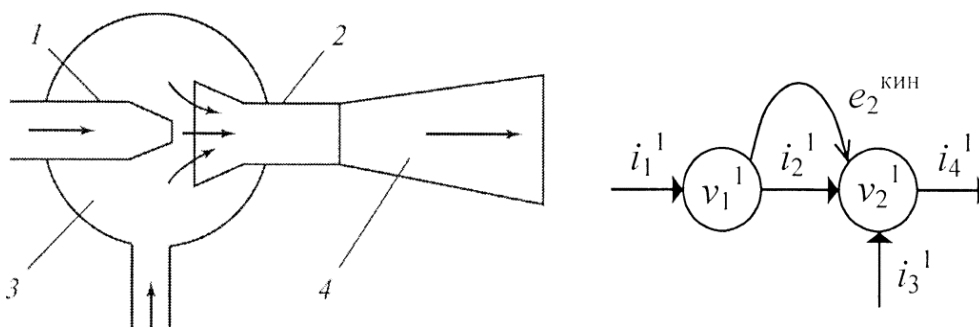


Рисунок 5. Графическое представление физических процессов в эжекторе:  $v_1^1$  – рабочая среда в сопле эжектора;  $v_2^1$  – рабочая и подсосываемая среда в камере смешения;  $i_1^1$  – входной поток рабочей среды;  $i_2^1$  – поток рабочей среды, выходящей из сопла;  $i_3^1$  – поток подсосываемой среды;  $i_4^1$  – выходной поток рабочей среды;  $e^{кин}$  – фактор экстенсивности, сопряженный с кинетической формой движения

Все взаимодействия рабочего тела с объектами окружения приводят к изменению его энергии. Однако их функции в технической системе могут существенно различаться. В СО главными объектами окружения являются теплодатчики и теплоприемники, термическое взаимодействие с которыми приводит к повышению и понижению температуры рабочего тела.

Для осуществления этих главных процессов необходимы и другие взаимодействия. Они нужны для изменения параметров рабочего тела и его перемещения между характерными точками. По функциональному назначению объекты окружения для СО можно разделить на шесть групп:

- теплодатчики (ТО);
- теплоприемники (ТП);
- объект с функцией изменения параметров рабочего тела (ПРТ);
- объект с функцией транспортирования рабочего тела (ТРТ);
- истоки рабочего тела (ИРТ);
- стоки рабочего тела (СРТ).

Все объекты окружения могут находиться на разных уровнях иерархии.

Такие представления физических явлений позволяют разрабатывать модели ФПД для самых различных СО – согласно положениям, изложенным в работах [5, 10, 11]. На рисунке 6 в качестве примера приведена принципиальная схема бромид литиевой абсорбционной холодильной машины, а на рисунке 7 показана разработанная для нее модель ФПД. Описание вершин и дуг графа модели ФПД (характерных точек, объектов окружения, потоков хладагента и взаимодействий) приведены в таблице.

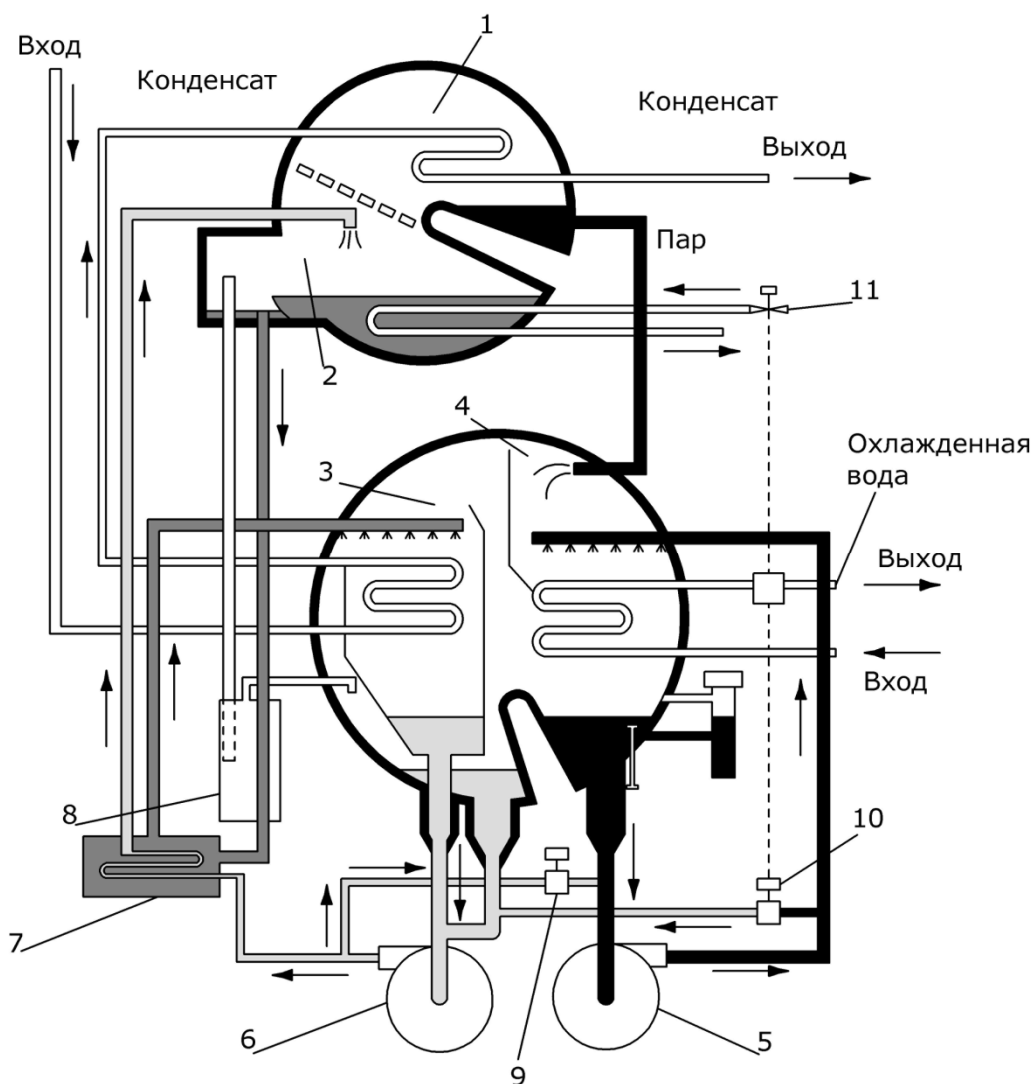


Рисунок 6 – Схема бромид литиевой абсорбционной холодильной машины [3]: 1 – конденсатор; 2 – генератор; 3 – абсорбер; 4 – испаритель; 5 – насос хладагента; 6 – насос раствора; 7 – теплообменник; 8 – теплообменник; 9 – низкоровневый клапан контроля наполнения; 10 – клапан защиты цикла; 11 – клапан управления вместимости

Таблица 1 – Описание элементов модели ФПД бромид литиевой абсорбционной холодильной машины

Обозначение элемента	Тип вершины или дуги	Семантическое описание
ИРТ <sub>1</sub>	Исток рабочего тела	Источник тепла (горячая вода, пар, газ, выхлопные газы, смешанные источники тепла и т.п.)
ИРТ <sub>2</sub>	То же	Конденсат, охлаждающая вода и т.п.
ИРТ <sub>3</sub>	-//-	Охлаждаемая вода
СРТ <sub>1</sub>	Сток рабочего тела	Котельная, атмосфера, ТЭЦ и т.п.
СРТ <sub>2</sub>	То же	Атмосфера
СРТ <sub>3</sub>	-//-	Гидравлический контур холодильной камеры
ТО <sub>1</sub>	Теплодатчик	Источник тепла
ТО <sub>2</sub>	То же	Холодильная камера
ТРТ <sub>1</sub>	Транспортер рабочего тела	Механический привод насоса хладагента
ТРТ <sub>2</sub>	То же	Механический привод насоса раствора
$v_1^1, v_1^2, v_1^3$	Характерная точка	Водяной пар ( $v_1^1$ ) и раствор бромид лития ( $v_1^3$ ) в воде ( $v_1^2$ ) в генераторе
$v_2^1, v_2^2$	То же	Водяной пар ( $v_2^1$ ) и вода ( $v_2^2$ ) в конденсаторе
$v_3^1, v_3^2$	-//-	Пар и вода в регулирующем вентиле
$v_4^1, v_4^2$	-//-	Пар и вода в испарителе
$v_5^2$	-//-	Вода в рабочей камере насоса хладагента

Продолжение таблицы 1

$v_6^1, v_6^2, v_6^3$	--/	Водяной пар ( $v_6^1$ ) и раствор бромида лития ( $v_6^3$ ) в воде ( $v_6^2$ ) в абсорбере
$v_7^2, v_7^3$	--/	Раствор бромида лития ( $v_7^3$ ) в воде ( $v_7^2$ ) в рабочей камере насоса раствора
$v_8^2, v_8^3$	--/	Раствор бромида лития ( $v_8^3$ ) в воде ( $v_8^2$ ) в холодном контуре теплообменника
$v_9^1, v_9^3$	--/	Водяной пар и бромид лития в горячем контуре теплообменника
$v_{10}^1, v_{10}^3$	--/	Водяной пар и бромид лития в регулирующем вентиле
$w_1$	--/	Жидкость в охлаждающем контуре
$w_2$	--/	Жидкость в охлаждающем контуре
$t_1$	--/	Горячая вода, пар, газ, выхлопные газы, смешанные источники тепла в нагревателе
$s_1$	--/	Охлаждаемый хладагент в гидравлическом контуре холодильной камеры
$i_1^1$	Маршрутная дуга	Поток водяного пара в конденсатор
$i_2^2$	То же	Поток воды в регулирующий вентиль
$i_3^{1,2}$	--/	Поток пара и воды в рабочую камеру испарителя
$i_4^2$	--/	Поток воды в насос хладагента
$i_5^2$	--/	Поток воды в рабочую камеру испарителя
$i_6^1$	--/	Поток водяного пара в абсорбер
$i_7^{2,3}$	--/	Поток раствора бромида лития ( $i_7^3$ ) в воде ( $i_7^2$ ) в насос раствора
$i_8^{2,3}$	--/	Поток раствора бромида лития ( $i_8^3$ ) в воде ( $i_8^2$ ) в холодный контур теплообменника

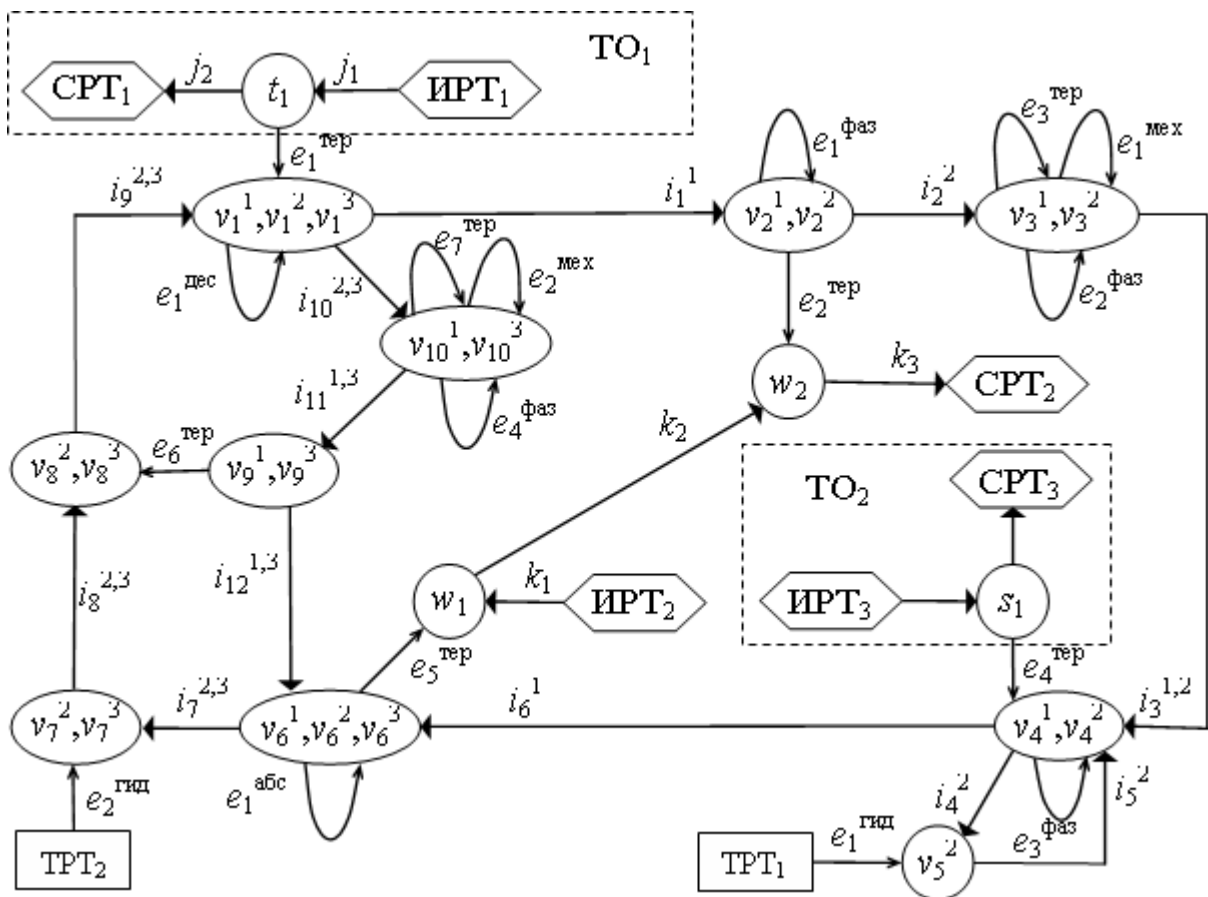


Рисунок 7 – Граф модели ФПД бромид литиевой абсорбционной холодильной машины

**Разработка методики синтеза моделей ФПД.** Авторским коллективом статьи были разработаны аналогичные модели ФПД для газовой криогенной машины, работающей по обратному циклу Стирлинга, турбохолодильной машины, парожеткортной и пароконтпрессионной холодильных установок, а также многих других СО. Это продемонстрировало продуктивность инженерно-физического подхода для рассматриваемого класса технических систем и позволило выявить ключевые принципы и закономерности построения моделей ФПД.



Порядок построения моделей ФПД показан в виде блок-схемы на рисунке 8. Она состоит из двух последовательно выполняемых циклов с постусловием, охваченных структурой «альтернатива с одним действием». Наличие циклов с постусловием предполагает, что каждая процедура, входящая в тело данного цикла, должна быть выполнена хотя бы один раз. Данная структура методики полностью соответствует принципам структурного программирования. Это обуславливает возможность ее реализации в виде интерактивной информационно-поисковой системы поддержки принятия решений в рамках САПР СО.

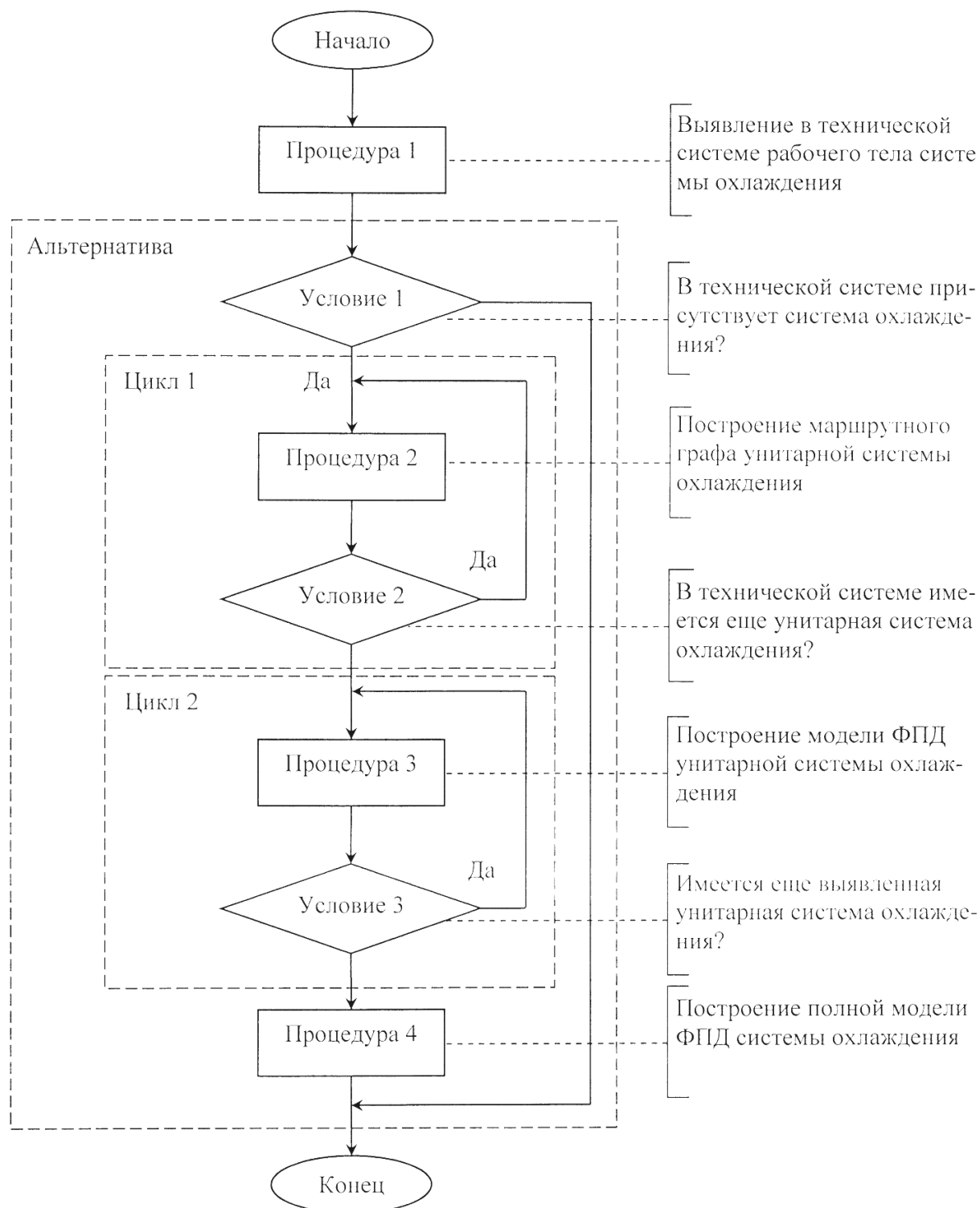


Рисунок 8 – Последовательность выполнения процедур методики построения модели ФПД

Для каждой характерной точки графа ФПД рассматриваемой системы охлаждения делаются записи в реляционной таблице  $A1$  со структурой

$$S_{A1} = \{a_1^1, a_1^2, a_1^3, a_1^4, a_1^5\}, \quad (1)$$

где  $a_1^1$  – порядковый номер кортежа реляционной таблицы;  $a_1^2$  – обозначение характерной точки графа ФПД;  $a_1^3$  – семантическое описание вершины;  $a_1^4$  – описание состояний хладагента в характерной точке;  $a_1^5$  – обозначение унитарной СО.

Для каждого истока и стока рабочего тела создаются записи в реляционной таблице  $A2$  со схемой

$$S_{A2} = \{a_2^1, a_2^2, a_2^3, a_2^4, a_2^5\}, \quad (2)$$

где  $a_2^1$  – порядковый номер кортежа реляционной таблицы;  $a_2^2$  – обозначение объекта окружения;  $a_2^3$  – тип объекта окружения;  $a_2^4$  – семантическое описание объекта окружения;  $a_2^5$  – обозначение унитарной СО.

Выявляются потоки хладагента, связывающие вершины графа ФПД и для каждого потока делаются записи в реляционной таблице  $A3$  со схемой

$$S_{A3} = \{a_3^1, a_3^2, a_3^3, a_3^4\}, \quad (3)$$

где  $a_3^1$  – порядковый номер кортежа реляционной таблицы;  $a_3^2$  – обозначение дуги на графе;  $a_3^3$  – семантическое описание дуги;  $a_3^4$  – обозначение унитарной СО.

Описание взаимодействий, осуществляемых в характерных точках унитарной СО, осуществляется в формуляре реляционной таблицы  $A4$  со схемой

$$S_{A4} = \{a_4^1, a_4^2, a_4^3, a_4^4, a_4^5, a_4^6\}, \quad (4)$$

где  $a_4^1$  – порядковый номер кортежа реляционной таблицы;  $a_4^2$  – обозначение фактора экстенсивности;  $a_4^3$  – обозначение объекта окружения или характерной точки, являющегося источником фактора экстенсивности;  $a_4^4$  – обозначение объекта окружения или характерной точки, являющегося приемником фактора экстенсивности;  $a_4^5$  – семантическое описание дуги;  $a_4^6$  – обозначение унитарной системы охлаждения.

**Научная новизна исследования.** Расширена область применения инженерно-физического метода на новый класс технических систем – системы охлаждения с жидким и газообразным рабочим телом путем уточнения смыслового содержания компонентов графовой модели ФПД, а также разработки алгоритмов ее построения и синтеза технических решений.

В данной статье представлены следующие результаты, составляющие научную новизну исследования.

1) Разработаны топологические схемы для единообразного представления на графе ФПД физических процессов и явлений, лежащих в основе работы СО. К ним относятся фазовые переходы (кипение, испарение, конденсация, сублимация, плавление), дросселирование газов и жидкостей, адиабатическое расширение и расширение с совершением внешней работы, вихревой эффект, абсорбция газов и десорбция газов из растворов, эжекция;

2) Разработана методика построения моделей ФПД на основе вербального описания схемы и условий работы проектируемой СО. Эта методика представлена в виде блок-схемы структурированного алгоритма, для которого определены основные структуры данных.

**Заключение и выводы.** Модель ФПД инженерно-физического метода, адаптированная к рассматриваемому классу технических систем, позволяет представить структуру проектируемой СО в виде ориентированного графа, учитывает перемещения рабочего тела в пространстве и осуществление физических взаимодействий во времени при работе СО и, следовательно, дает возможность проектировщику осуществить переход к его конструктивной реализации. А именно это и является наиболее трудоемким и ответственным процессом проектирования СО.

Процессы разработки модели ФПД осуществляются в соответствии с жесткими правилами и не зависят от интуиции человека. Это существенно увеличивает производительность труда конструкторов на начальных стадиях проектирования, что существенно снижает сроки и стоимость конструкторских разработок СО.

Моделирование ФПД – один из этапов поискового конструирования СО. Данный шаг предшествует этапу синтеза ТР, позволяющему сформировать матрицу ТР, путем сопоставления элементарных функций с альтернативными конструктивными элементами. В последующей статье будет рассмотрена методика синтеза ТР на основе модели ФПД и представлено программное приложение для автоматизации процедур формирования списков технических решений СО в виде функционально-совместимых конструктивных элементов.

#### Список литературы

1. Архаров А. М. Теплотехника / А. М. Архаров, И. А. Архаров, В. Н. Афанасьев и другие. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 712 с.
2. Глазунов В. Н. Поиск принципов действия технических систем / В. Н. Глазунов. – Москва : Речной транспорт, 1990. – 143 с.
3. Дячек П. И. Холодильные машины и установки : учебное пособие / П. И. Дячек. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2007. – 424 с.

4. Закомолдин И. И. Системы охлаждения двигателей внутреннего сгорания и их классификация / И.И. Закомолдин // Двигателестроение. – 2005. – № 1. – С. 18–20.
5. Камаев В. А. Обучение концептуальному проектированию преобразователей энергии на базе системного подхода / В. А. Камаев, А. А. Яковлев // Открытое образование. – 2005. – № 5 (52). – С. 62–69.
6. Коробкин Д. М. Автоматизация процесса формирования информационного обеспечения базы данных физических эффектов / Д. М. Коробкин, С. А. Фоменков, С. Г. Колесников // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2005. – № 3. – С. 22–25.
7. Лазаренко О. О. Анализ и управление энергоэффективностью абсорбционных бромистолитиевых холодильных машин на основе использования эксергетического подхода и имитационного моделирования / О.О. Лазаренко, Л. В. Галимова // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2014. – № 1.
8. Путилин С. С. Использование математических моделей и методов системного анализа для оптимизации управления работой аммиачной холодильной установки / С. С. Путилин // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2013. – № 3.
9. Фоменков С. А. Информационное наполнение баз данных по физическим эффектам / С. А. Фоменков, С. Г. Колесников // Информационные технологии. – 2004. – № 6. – С. 60–62.
10. Яковлев А. А. Инженерно-физический подход к проектированию преобразователей энергии / А. А. Яковлев // Справочник. Инженерный журнал. – 2006. – № 2. – С. 32–38.
11. Яковлев А. А. Метод построения моделей физических принципов действия преобразователей энергии / А. А. Яковлев // Известия вузов. Машиностроение. – 2005. – № 10. – С. 22–28.
12. Altshuller G. S. Search For New Ideas: From Insight To Technology / G. S. Altshuller, B. L. Zlotin, A. V. Sussman, V. I. Filatov. – Kishinev, USSR : Karte Moldaveniske, 1989.
13. Ang M. C. An engineering design support tool based on TRIZ / M. C. Ang, et. al. // International Visual Informatics Conference, IVIC. 2013: 3rd Conference (Selangor; Malaysia, November 13–15, 2013) : Proceedings. – Switzerland : Springer International Publishing, 2013. – P. 115–127.
14. Baranov A. Y. Turbo-refrigerators Using for Cooling the Cryotherapeutic Units / A. Y. Baranov, T. A. Malysheva // Proceedings of the International Conference on Oil and Gas Engineering, OGE (Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation, April, 25–30, 2016). – 2016. – Vol. 152. – P. 169–172.
15. Chang H. L. Conceptual design of cryogenic turbo expander for 10 kW class reverse Brayton refrigerator / H. L. Chang, et. al. // Progress in Superconductivity and Cryogenics (PSAC). – 2015. – Vol. 17, № 3. – P. 41–46.
16. Chen W. Proposed split-type vapor compression refrigerator for heat hazard control in deep mines / W. Chen, S. Liang, J. Liu // Applied Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 105, № 25. – P. 425–435.
17. de Olivera P. A., Barbosa J. R. Nowel two-phase jet impingement heat sink for active cooling of electronic device / P. A. de Olivera, J. R. Barbosa // Applied Thermal Engineering. – 2017. – Vol. 112, № 5. – P. 952–964.
18. Fomenkov S. A. Method of Ontology-Based Extraction of Physical Effect Description from Russian text / S. A. Fomenkov, D. M. Korobkin, S. G. Kolesnikov // Knowledge-Based Software Engineering : Proceedings of 11<sup>th</sup> Joint Conference, JCKBSE 2014 (Volgograd, Russia, September 17–20, 2014). – [Б/М] : Springer International Publishing, 2014. – P. 321–330.
19. Jiang J.-G. Application of TRIZ theory in problem based learning / J.-G. Jiang, et. al. // Proceedings of 10th International Conference on Computer Science and Education, ICCSE (Fitzwilliam College, Cambridge University Cambridge, United Kingdom, July, 22–24, 2015) / IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers. – Cambridge (United Kingdom), 2015. – P. 905–909.
20. Jorg J. Hot spot removal in power electronics by means of direct liquid jet cooling / J. Jorg, et. al. // Proceedings of the 16<sup>th</sup> InterSociety on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, ITTherm 2017 (Walt Disney World Swan and Dolphin Hotel, Lake Buena Vista Orlando, United States, 30 May–2 June 2017). – IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers. Orlando (United States), 2017. – P. 471–481.
21. Kamaev V. A. Use of physical knowledge for automation of the initial stages of designing / V. A. Kamaev, S. A. Fomenkov, D.A. Davidov // Proceedings – International Conference on Artificial Intelligence Systems, ICAIS 2002 (Divnomorskoe, Russian Federation, 5-10 September, 2002). – IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers. – Divnomorskoe (Russian Federation), 2002. – P. 411–413.
22. Pal D. Liquid cooled system for aircraft power electronics cooling / D. Pal, M. Severson // Proceedings of the 16<sup>th</sup> InterSociety on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, ITTherm 2017 (Walt Disney World Swan and Dolphin Hotel, Lake Buena Vista Orlando, United States, 30 May–2 June 2017). – IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers. Orlando (United States), 2017. – P. 800–805.
23. Petrova I. Y. Conceptual modeling methodology of multifunction sensors on the basis of a fractal approach / I. Y. Petrova, O. Shikulskay, M. Shikulskiy // Advanced Material and Manufacturing Science, ICAMMS 2012: International Conference (Beijing, China, December 20–21, 2012) Proceedings. – Switzerland : Trans Tech Publication, 2012. – P. 951–956.
24. Pollerberg S. Solar driven steam jet ejector chiller / S. Pollerberg, A. H. H. Ali, C. Doetsch // Applied Thermal Engineering. – 2009. – Vol. 29, № 5–6. – P. 1245–1252.
25. Zaripov M. Project on Creation of Knowledge Base on Physical and Technological Effects / M. Zaripov, I. Petrova, V. Zaripova // Education in Measurements and Instrumentation – Challenges of New Technologies: Proceedings of TC-1 Symposium – 2002. – Wroclaw : Wroclaw University of Technology, 2002. – P. 171–176.
26. Zaripova V. M. Ontological knowledge base of physical and technical effects for conceptual design of sensors / V. M. Zaripova, I. Y. Petrova // Journal of physics : Conference Series. – 2014. – Vol. 588, № 1.

## References

1. Arharov A. M., Arkharov I. A., Afanasev V. N. *Teplotekhnika* [Heat engineering], Moscow, MGTU im Bauma-na Publ. House, 2004. 712 p.
2. Glazunov V. N. *Poisk printsipov deystviya tehnikeskikh sistem* [Search for the principles of the operation of technical systems], Moscow, Rechnoy transport Publ., 1990. 143 p.
3. Dyachek P. I. *Kholodilnye mashiny i ustanovki* [Refrigerating machines], Rostov-on-Don, Pheniks, Vyishee obrazovanie Publ., 2007, 424 p.
4. Zakomoldin I. I. Sistemy ohlazhdeniya dvigateley vnutrennego sgoraniya i ih klassifikatsiya [Cooling systems of internal combustion engines and its classification]. *Dvigatelistroenie* [Engine Building], 2005, no. 1, pp. 18–20.
5. Kamaev V. A., Yakovlev A. A. Obuchenie kontseptualnomu proektirovaniyu preobrazovateley energii na baze sistemnogo podkhoda [Training in conceptual design based on a systematic approach]. *Otkrytoe obrazovanie* [Open Education], 2005, no. 5 (52), pp. 62–69.
6. Korobkin D. A., Fomenkov S. A., Kolesnikov S. G. Avtomatizatsia protsessa formirovaniya informatsionnogo obespecheniya bazy dannykh fizicheskikh effektov [Automation of the process of formation of information support of the database of physical effects]. *Vestnik kompyuternykh i informatsionnykh tekhnologiy* [Bulletin of the Computer and Information Technologies], 2005, no. 3, pp. 22–25.
7. Lazarenko O. O., Galimova L. V. Analiz i upravlenie energoeffektivnostyu bromistolitievnykh mashin na osnove ispolzovaniya eksergeticheskogo podkhoda i imitatsionnogo modelirovaniya [Analysis and management of energy efficiency of absorption bromistolithium refrigeration machines based on the use of the exergy approach and simulation modeling]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2014, no. 1.
8. Putilin S. S. Ispolzovanie matematicheskikh modeley i metodov sistemnogo analiza dlya optimizatsii upravleniya rabotoy ammiachnoy kholodilnoy ustanovki [Using mathematical models and methods of system analysis to optimize the operation of an ammonia refrigeration system]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Control and High Technologies], 2013, no. 3.
9. Fomenkov S. A., Kolesnikov S. G. *Informatsionnoe napolnenie baz dannykh po fizicheskim efektam* [Information content of databases on physical effects], 2004, no. 6, pp. 60–62.
10. Yakovlev A. A. Inzhenerno-fizicheskii podkhod k proektirovaniyu preobrazovateley energii [Engineering-physical approach to the design of energy converters]. *Spravochnik. Inzhenerny zhurnal* [Directory. Engineering Journal], 2006, no. 2, pp. 32–38.
11. Yakovlev A. A. Metod postroeniya modeley fizicheskikh printsipov deystvia preobrazovateley energii [The method of constructing models of physical operating principles for energy converters]. *Izvestiya vuzov. Mashinstroenie* [Proceedings of the High Schools. Mechanical Engineering], 2005, no. 10, pp. 22–28.
12. Altshuller G. S., Zlotin B. L., Sussman A. V., Filatov V. I. *Search For New Ideas: From Insight To Technology*, Kishinev, USSR, Karte Moldaveniske Publ., 1989.
13. Ang M. C., et. al. An engineering design support tool based on TRIZ. *International Visual Informatics Conference, IVIC. 2013: 3rd Conference (Selangor; Malaysia, November 13-15, 2013) : Proceedings*, Switzerland, Springer International Publishing, 2013, pp. 115–127.
14. Baranov A. Y., Malysheva T. A. Turbo-refrigerators Using for Cooling the Cryotherapeutic Units. *Proceedings of the International Conference on Oil and Gas Engineering, OGE (Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation, April, 25–30, 2016)*, Omsk (Russian Federation), 2016, vol. 152, pp. 169–172.
15. Chang H. L., et. al. Conceptual design of cryogenic turbo expander for 10 kW class reverse Brayton refrigerator. *Progress in Superconductivity and Cryogenics (PSAC)*, 2015, vol. 17, no. 3, p. 41–46.
16. Chen W., Liang S., Liu J. Proposed split-type vapor compression refrigerator for heat hazard control in deep mines. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 105, no. 25, pp. 425–435.
17. de Olivera P. A., Barbosa J. R. Novel two-phase jet impingement heat sink for active cooling of electronic device. *Applied Thermal Engineering*, 2017, vol. 112, no. 5, pp. 952–964.
18. Fomenkov S. A., Korobkin D. M., Kolesnikov S. G. Method of Ontology-Based Extraction of Physical Effect Description from Russian text. *Knowledge-Based Software Engineering : Proceedings of 11<sup>th</sup> Joint Conference, JCKBSE 2014 (Volgograd, Russia, September 17–20, 2014)*, Б/м, Springer International Publishing, 2014, pp. 321–330.
19. Jiang J.-G., et. al. Application of TRIZ theory in problem based learning. *Proceedings of 10th International Conference on Computer Science and Education, ICCSE (Fitzwilliam College, Cambridge University Cambridge, United Kingdom, July, 22–24, 2015)*, IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers, Cambridge (United Kingdom), 2015, pp. 905–909.
20. Jorg J., et. al. Hot spot removal in power electronics by means of direct liquid jet cooling. *Proceedings of the 16<sup>th</sup> InterSociety on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, ITherm 2017 (Walt Disney World Swan and Dolphin Hotel, Lake Buena Vista Orlando, United States, 30 May–2 June 2017)*, IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers. Orlando (United States), 2017, pp. 471–481.
21. Kamaev V. A., Fomenkov S. A., Davidov D. A. Use of physical knowledge for automation of the initial stages of designing. *Proceedings – International Conference on Artificial Intelligence Systems, ICAIS 2002 (Divnomorskoe, Russian Federation, 5–10 September, 2002)*, IEEE– Institute of Electrical and Electronics Engineers, Divnomorskoe (Russian Federation), 2002, pp. 411–413.
22. Pal D., Severson M. Liquid cooled system for aircraft power electronics cooling. *Proceedings of the 16<sup>th</sup> Inter-Society on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, ITherm 2017 (Walt Disney World Swan and Dolphin Hotel, Lake Buena Vista Orlando, United States, 30 May–2 June 2017)*, IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers. Orlando (United States), 2017, pp. 800–805.

23. Petrova I. Y., Shikulskay O., Shikulskiy M. Conceptual modeling methodology of multifunction sensors on the basis of a fractal approach. *Advanced Material and Manufacturing Science, ICAMMS 2012: International Conference (Beijing, China, December 20–21, 2012) Proceedings*, Switzerland, Trans Tech Publication, 2012, pp. 951–956.

24. Pollerberg S., Ali A. H. H., Doetsch C. Solar driven steam jet ejector chiller. *Applied Thermal Engineering*, 2009, vol. 29, no. 5–6, pp. 1245–1252.

25. Zaripov M., Petrova I., Zaripova V. Project on Creation of Knowledge Base on Physical and Technological Effects. *Education in Measurements and Instrumentation – Challenges of New Technologies: Proceedings of TC-1 Symposium – 2002*, Wroclaw, Wroclaw University of Technology Publ. House, 2002, pp. 171–176.

26. Zaripova V. M., Petrova I. Y. Ontological knowledge base of physical and technical effects for conceptual design of sensors. *Journal of physics: Conference Series*, 2014, vol. 588, no. 1.

#### РЕДАКЦИОННЫЙ КОММЕНТАРИЙ К СТАТЬЕ

Использование систем охлаждения (СО) важно для эксплуатации различных видов оборудования, в т.ч. и бортового, работающего в условиях ограниченных пространств. Поэтому развитие средств информационно-аналитической поддержки поискового конструирования (ПК) для СО безусловно является актуальным.

Характер изложения в статье последовательный. Подробно представлено использование аппарата графовых моделей для описания физических принципов действия (ФПД), которые потенциально могут использоваться в проектируемых СО. Используемый математический аппарат адекватен характеру решаемых задач.

Однако по статье целесообразно сделать следующие замечания. 1) Представленные графовые модели (их количество ограничено) никак не обоснованы авторами с точки зрения относительной частоты использования соответствующих ФПД в СО. Вероятно, стоило бы перечислить и некоторые другие ФПД; может быть указать общее количество ФПД, которые потенциально целесообразно включить в базу данных эффектов для использования при ПК. 2) В силу прикладной направленности статьи было бы разумным указать ключевые группы/подгруппы международной патентной классификации для изобретений рассматриваемого в статье направления деятельности. Как максимум – привести количества зарегистрированных изобретений по важнейшим группам/подгруппам (пусть даже только в России за последние годы). Это, в свою очередь, дало бы возможность показать основные «точки роста» по теме статьи. 3) Вероятно что-то следовало бы сказать и в отношении возможностей использования средств имитационного компьютерного моделирования процессов, соответствующих рассматриваемым ФПД. Такое моделирование потенциально позволяет детально проанализировать эти процессы, – в т.ч. и их динамику во времени. 4) Возможность реализации предлагаемых разработок в виде «интерактивной информационно-поисковой системы поддержки принятия решений в рамках САПР СО» в статье только упоминается – без какой либо дополнительной информации. Между тем особенности такой реализации могут представлять, по крайней мере, практический интерес.