

# Комплекс программ «HolCon» для расчета характеристик и оптимизации параметров систем теплохолодоснабжения

**Д-р. техн.наук И.М. КАЛНИНЬ,  
ЭЛЬ САДИК ХАСАН  
МГУ ИЭ,  
канд. техн.наук Д.В. СИДЕНКОВ  
ГОУВПО МЭИ(ТУ)**

**Современное промышленное производство и жилищно-коммунальное хозяйство невозможно представить без холодильных машин (ХМ). Разработаны достаточно эффективные и технологичные конструкции ХМ, создана теоретическая база, позволяющая проводить расчеты как холодильных, так и теплоносильных установок (ТНУ). Тенденцией развития этой техники в последние годы стало создание комбинированных систем теплохолодоснабжения (СТХС), совмещающих функции холодильной машины и теплового насоса (ТН). Активно обсуждаются варианты децентрализованных и централизованных СТХС для обеспечения кондиционирования воздуха, отопления и горячего водоснабжения бытовых и общественных зданий\*. Однако методы расчета, проектирования и оптимизации этих систем разработаны еще недостаточно. Поскольку в отличие от холодильных машин и тепловых насосов СТХС вырабатывают как холод, так и теплоту, причем часто одновременно, показатели эффективности СТХС и ее составных частей, необходимые для оптимизации параметров системы, будут отличаться от используемых сегодня для ХМ и ТН. Кроме того, СТХС характеризуются большим разнообразием типов, схем и состава оборудования.**

**Таким образом, очевидна актуальность разработки методического аппарата для определения состава и выбора оптимальных параметров комбинированной СТХС на основе комплексного показателя эффективности, учитывающего особенности ее эксплуатации.**

*In connection with the introduction of combined systems of heat and cold supply CSHC into engineering provision of buildings and not adequate development of the methods of their design, a program complex Holcon is being created for designing with the aid of PEVM the optimum in composition and technical and economical signs CSHC. A universal mathematical model CSHC based on vapor-compression refrigerating machines has been developed. Principles of obtaining the output characteristics for each subsystem and the whole CSHC according to the results of optimization on the criterion of economy or efficiency have been considered. The result of the calculation of characteristics of the compressor subsystem for different refrigerants during operation as a refrigerating machine and a heat pump is given. The program complex allows to be switched to the instruments of the test bench, to make collection, primary processing of the results of measurements, and then to make computations using the whole massive of experimental data. Use of the complex for educational purposes is planned.*

Разработка оптимальных по составу и технико-экономическим показателям СТХС требует выполнения трудоемких вариантных расчетов с применением процедуры многокритериальной оптимизации для условий эксплуатации СТХС.

Проведение таких расчетов невозможно без компьютерной реализации математической модели СТХС с использованием современных мощных ПЭВМ.

Специализированный комплекс программ для ПЭВМ «HolCon», общая блок-схема которого представлена на рис. 1, создается в настоящее время.

В макет комплекса входят:

- ◆ графический редактор, позволяющий в интерактивном режиме с помощью современных средств визуализации создавать принципиальную схему СТХС, производить выбор рабочего вещества и термодинамического цикла, осуществлять



*Рис. 1. Структура программного комплекса «HolCon».*

---

\* DAIKIN: Klima vom Besten. 2002.  
Рекламно-технические материалы.

лять ввод исходных данных по компрессорной системе и теплообменному оборудованию, отображать результаты расчетов в виде таблиц, графиков и диаграмм, сохранять информацию в базе данных;

- ♦ расчетные модули, позволяющие проводить расчет термодинамических параметров в характерных точках цикла, рассчитывать его отдельные термодинамические процессы и характеристики в целом, учитывать при расчетах реальные параметры оборудования и др.;
- ♦ базы данных по теплофизическим свойствам хладагентов, элементам оборудования и расчетным соотношениям.

Интерфейс графического редактора программы «HolCon», ориентированного на работу в операционной системе Win9x, представлен на рис. 2.

Схема системы теплохолодоснабжения формируется в графическом режиме путем размещения мнемонических изображений элементов оборудования и проведения между ними линий связи. В число элементов схемы входят управляемая регулирующая и запорная арматура, что позволяет пользователю оперативно изменять режим работы установки. Элементы оборо-

дования (например, компрессор, испаритель и т. д.) снабжены таблицами каталожных данных, которые могут либо заполняться непосредственно пользователем, либо копироваться из базы данных на оборудование. При этом формирование задания на расчет (кодировка схемы, расчет термодинамических параметров для выбранного рабочего вещества в характерных точках цикла и т. д.) проводится программно.

Термодинамические свойства рабочих веществ описываются уравнениями состояния Бенедикта-Вебба-Рубина [6] с индивидуальными константами для 14 веществ. Предусмотрена возможность выполнения автономных расчетов теплофизических свойств веществ и характерных термодинамических процессов (изобарного, изотермического и др.). Окно программы, обеспечивающее эту функциональную возможность, изображено на рис. 2.

Данные о новых экологически безопасных рабочих веществах для ХМ и ТН могут включаться в экспериментальную и теоретическую базу по теплофизическим свойствам (ТФС) хладагентов либо путем введения индивидуальных кон-

стант в уравнения состояния, либо с помощью полиномиальной аппроксимации табличных данных ТФС.

Системы теплохолодоснабжения могут иметь различную комплектацию в зависимости от назначения. Для разработки СТХС с оптимальными энергетическими и экономическими показателями, а также для расчета характеристик СТХС при изменении эксплуатационных условий в реальных пределах была создана универсальная математическая модель функционирования парокомпрессионных СТХС (ХМ, ТН) различного назначения. В рамках системного подхода такая математическая модель представляет собой совокупность математических моделей подсистем (узлов) и уравнений связи между ними.

Технологическая схема термоТрансформирующей установки при этом графически представляется ориентированным помеченным графом [3]. На рис. 3 приведен упрощенный эквивалентный граф для схемы простой ТНУ, изображенной на рис. 2.

Для каждого узла графа определяется его тип в соответствии с тем элементом схемы, который этот

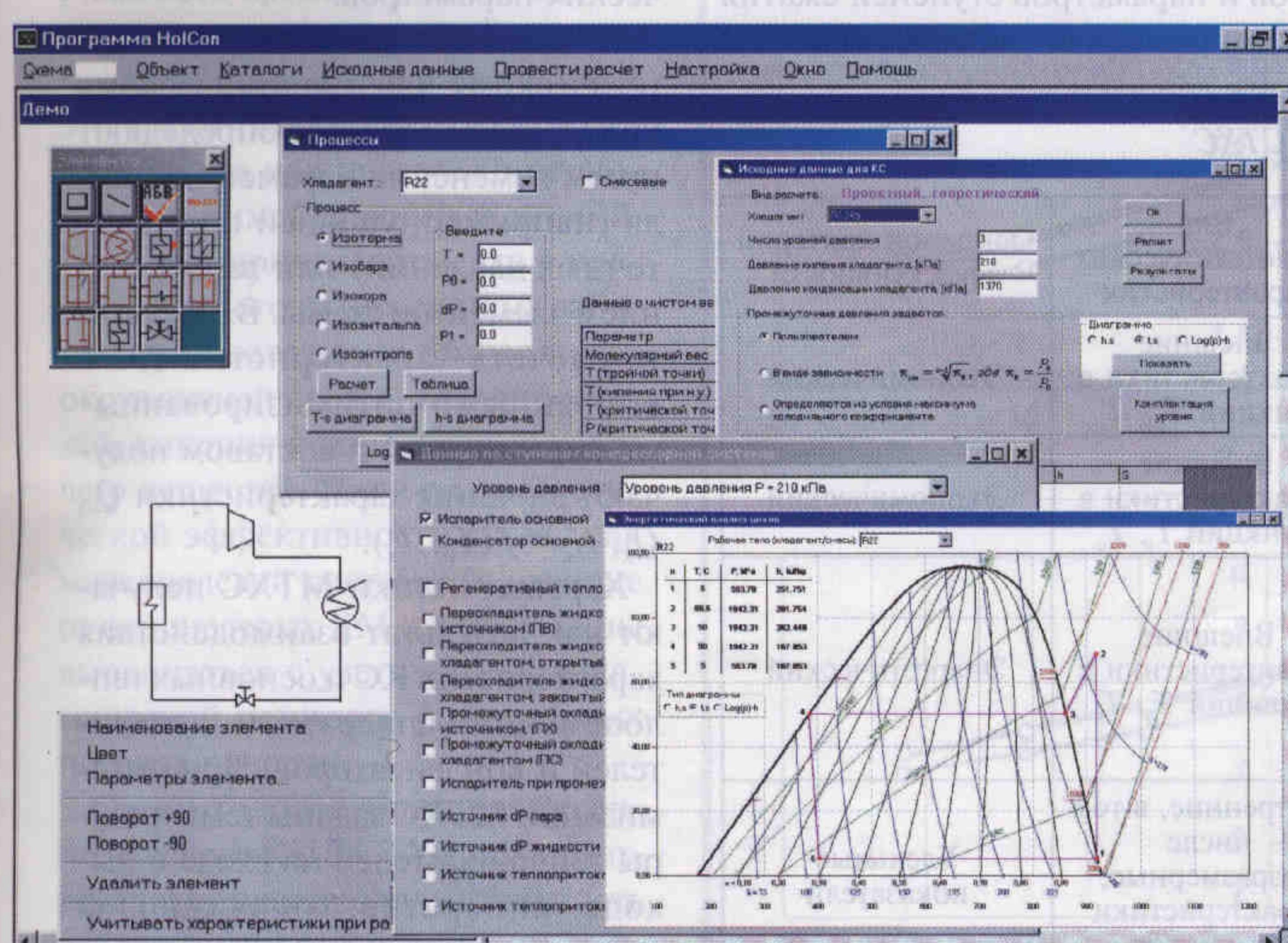


Рис. 2. Элементы интерфейса графического редактора программы «HolCon».

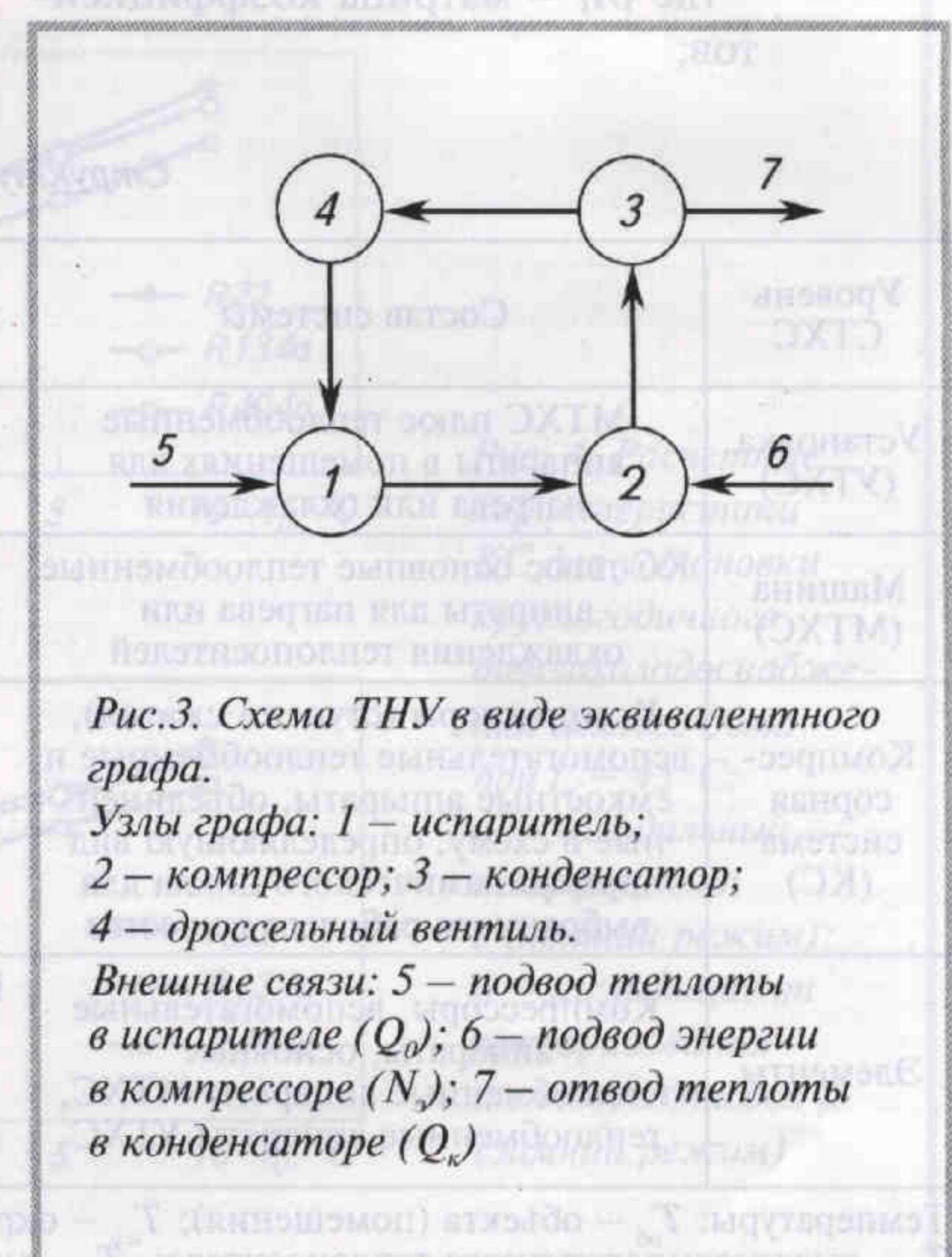


Рис. 3. Схема ТНУ в виде эквивалентного графа.  
Узлы графа: 1 – испаритель; 2 – компрессор; 3 – конденсатор; 4 – дроссельный вентиль.  
Внешние связи: 5 – подвод теплоты в испарителе ( $Q_d$ ); 6 – подвод энергии в компрессоре ( $N_i$ ); 7 – отвод теплоты в конденсаторе ( $Q_k$ )

узел представляет. Так, на рис. 3 изображены четыре узла разных типов. Для каждого типа узлов используется своя математическая модель, связывающая входные энергетические, расходные и гидравлические характеристики элемента схемы с их выходными значениями и учитывающая внешние воздействия на этот элемент (связи 5–7 на рис.3). Например, для узлов 1 и 3 (испаритель и конденсатор) такая математическая модель в общем случае включает уравнения теплового и материального баланса, уравнения гидравлики для потоков энергоносителей и уравнение теплопередачи для описания их энергетического взаимодействия. Взаимодействие элементов схемы осуществляется посредством связей, изображенных на рис. 3 в виде стрелок. Для каждой такой связи составляют уравнения передачи, описывающие взаимодействие выходных и входных параметров соответствующих узлов схемы.

Синтез математических моделей узлов с учетом их взаимодействия (посредством связей) позволяет представить расчетную схему СТХС в форме матричного уравнения

$$\{A\} X = B, \quad (1)$$

где  $\{A\}$  – матрица коэффициентов;

$X$  – вектор-столбец определяемых величин;

$B$  – вектор-столбец правых частей.

Система уравнений (1) решается в дальнейшем относительно  $X$  с использованием методов решения линейных/нелинейных систем, математические основы которых в настоящее время хорошо отработаны, а их компьютерная реализация имеется в стандартных пакетах математических программ.

Удобство такого подхода к анализу СТХС заключается в том, что в качестве подсистем (узлов) могут выступать как отдельные процессы или элементы СТХС, так и целые группы элементов. В соответствии с этим при выборе компонентов и параметров СТХС (проектный расчет) и определении характеристик спроектированной СТХС (поворотный расчет) предусмотрено деление СТХС на несколько уровней, отличающихся составом оборудования, видом характеристик и параметрами оптимизации (см. таблицу).

**Б**азовым является уровень «компрессорной системы» (КС), на котором производится выбор рабочего вещества, схемы (термодинамического цикла), типов и параметров ступеней сжатия (компрессоров) и вспомогательной

аппаратуры, т. е. элементов, определяющих выбранный цикл при заданных температурах кипения и конденсации рабочего вещества.

На рис. 2 можно видеть окна программного комплекса «HolCon», обеспечивающие ввод исходных данных для расчета компрессорной системы и подбора состава оборудования на каждом уровне давления.

Характеристики компрессорной системы (КС) формируются как результат взаимодействия характеристик входящих в нее элементов с параметрами термодинамического цикла для выбранного рабочего вещества. Для расчета процессов сжатия в системе КС используются аппроксимированные зависимости рабочих коэффициентов компрессоров объемного принципа действия (коэффициента подачи, КПД и др.) от условий работы компрессора (давления, температуры, отношения давлений на выходе и входе в компрессор).

Теплообменные аппараты в большинстве случаев описываются степенными зависимостями коэффициентов теплоотдачи от плотности теплового потока, массовой скорости, критерия  $Re$ , теплофизических свойств веществ, геометрических параметров.

При оптимизации КС по энергетическому или экономическому критерию экстремум определяют путем изменения параметров цикла (например, уровней промежуточных давлений) или варьированием элементов схемы. В результате расчета характеристик КС с выбранными оптимизированными параметрами и составом получают внешние характеристики  $Q_0$ ,  $Q_k$ ,  $N_s = f(T_0, T_k)$ .

Характеристики МТХС получают как результат взаимодействия характеристик КС и основных теплообменных аппаратов – испарителей и конденсаторов. При оптимизации МТХС заданы температуры теплоносителей на входе и выходе аппаратов, окружающей среды ( $T_s$ ,  $T_w$ ,  $T_{o.c}$ ) и воды в системе горячего водоснабжения (ГВС), а также соотношения вырабатывае-

## Структура СТХС

Уровень СТХС	Состав системы	Вид теплотехнических характеристик	Основной критерий эффективности
Установка (УТХС)	МТХС плюс теплообменные аппараты в помещениях для нагрева или охлаждения	Внешние характеристики в функции $T_{ob}$ , $T_{oc}$	Экономический
Машина (МТХС)	КС плюс основные теплообменные аппараты для нагрева или охлаждения теплоносителей	Внешние характеристики в функции $T_s$ , $T_w$	Экономический
Компрессорная система (КС)	Компрессоры (ступени сжатия), вспомогательные теплообменные и емкостные аппараты, объединенные в схему, определяющую вид термодинамического цикла для выбранного рабочего вещества	Внешние характеристики в функции $T_0$ , $T_k$	Энергетический
Элементы	Компрессоры, вспомогательные аппараты, основные теплообменные аппараты МТХС, теплообменные аппараты УТХС	Внутренние, в том числе безразмерные, характеристики элементов	Удельные показатели

Температуры:  $T_{ob}$  – объекта (помещения);  $T_{oc}$  – окружающей среды;  $T_s$  – хладоносителя;  $T_w$  – высокотемпературного теплоносителя;  $T_0$  – кипения и  $T_k$  – конденсации.

мых системой тепловых потоков. Поиск экстремума при экономической оптимизации ведется путем изменения площади теплообменной поверхности аппаратов и варьирования конструкций аппаратов. В результате расчета получают внешние характеристики МТХС.

Характеристики УТХС формируются в результате взаимодействия характеристик МТХС и теплообменных аппаратов для охлаждения или нагрева помещения, где происходит теплообмен между теплоносителем с температурой  $T_s$  или  $T_w$  и воздухом помещения с температурой  $T_{ob}$ .

В результате проектного расчета СТХС получают:

- варианты для сопоставления;
- оптимизированный вариант и оптимальные значения выбранных критериев эффективности.

**В** качестве критерия энергетической эффективности принят эксергетический КПД. Этот выбор определяется тем, что СТХС (в отличие от ХМ и ТН) в общем случае одновременно вырабатывают теплоту и холод на нескольких температурных уровнях. Количество вырабатываемой тепловой энергии и температурные уровни могут меняться в течение рассматриваемого времени работы СТХС, например в течение года. В зависимости от климатических условий это время (год) может быть поделено на два или несколько периодов, например зимний и летний. При этом принимается, что в пределах каждого из них система работает при постоянных температурах окружающей среды, теплоносителей, кипения и конденсации рабочего вещества. Расчеты энергетической эффективности СТХС как многоцелевой системы (в отличие от одноцелевых ХМ и ТН) должны выполняться с учетом термодинамической ценности разнородных потоков энергии.

Среднегодовое значение эксергетического КПД СТХС можно определить, зная продолжительность работы системы в летний  $t_l$  и зимний  $t_s$  периоды:

$$\eta_{exp} = \eta_{el} \frac{t_l}{t} + \eta_{es} \frac{t_s}{t}, \quad (2)$$

где  $t_l = t_s + t_3$  – время работы системы за год, ч;

$\eta_{el}$  и  $\eta_{es}$  – эксергетический КПД для каждого периода работы.

$$\eta_{es(a)} = \frac{\sum E_{\lambda(a)}}{N_{\lambda(a)}}, \quad (3)$$

Здесь

$$\sum E_{\lambda(a)} = \sum_{i=1}^n Q_i |\tau_{ei}| = Q_{oxp} \cdot |\tau_{eoxp}| + Q_{otop} \cdot |\tau_{eotop}| + \dots + Q_{FBC} \cdot |\tau_{efbc}| -$$

суммарная эксергия, кВт;

$N_a$  – потребляемая системой электрическая мощность, кВт;

$Q_{oxp}$ ,  $Q_{otop}$ ,  $Q_{FBC}$  – осредненные нагрузки охлаждения, отопления и горячего водоснабжения, кВт;

$\tau_e = 1 - \frac{T_{oc}}{T}$  – значение эксергетической температурной функции;

$T$  – определяющая рабочая температура процесса, К. Для компрессорной системы (КС) это температуры кипения  $T_0$  и конденсации  $T_k$ , для СТХС – термодинамически ос-

редненные температуры потоков теплоносителей.

В качестве критерия экономической эффективности СТХС принято отношение приведенных затрат в течение летнего  $Z_l$  или зимнего  $Z_s$  периода к выработанной за это время эксергии – стоимость эксергии, руб/(кВт·ч):

$$Z_{0a} = \frac{Z_{\lambda(a)}}{\sum E_{\lambda(a)} t_{\lambda(a)}}, \quad (4)$$

где  $\sum E_{\lambda(a)} t_{\lambda(a)}$  – суммарная выработанная эксергия для рассматриваемого периода работы, кВт·ч.

Тогда средне годовые удельные приведенные затраты СТХС, руб/(кВт·ч):

$$Z_{0cp} = \frac{1}{t} \left( \frac{Z_l}{\sum E_l} + \frac{Z_s}{\sum E_s} \right). \quad (5)$$

В безразмерном виде этот критерий является отношением стоимости 1 кВт·ч эксергии к стоимости 1 кВт·ч потребленной электроэнергии:

$$Z_{0cp} = \frac{1}{t} (Z_{0l} + Z_{0s}), \quad (6)$$

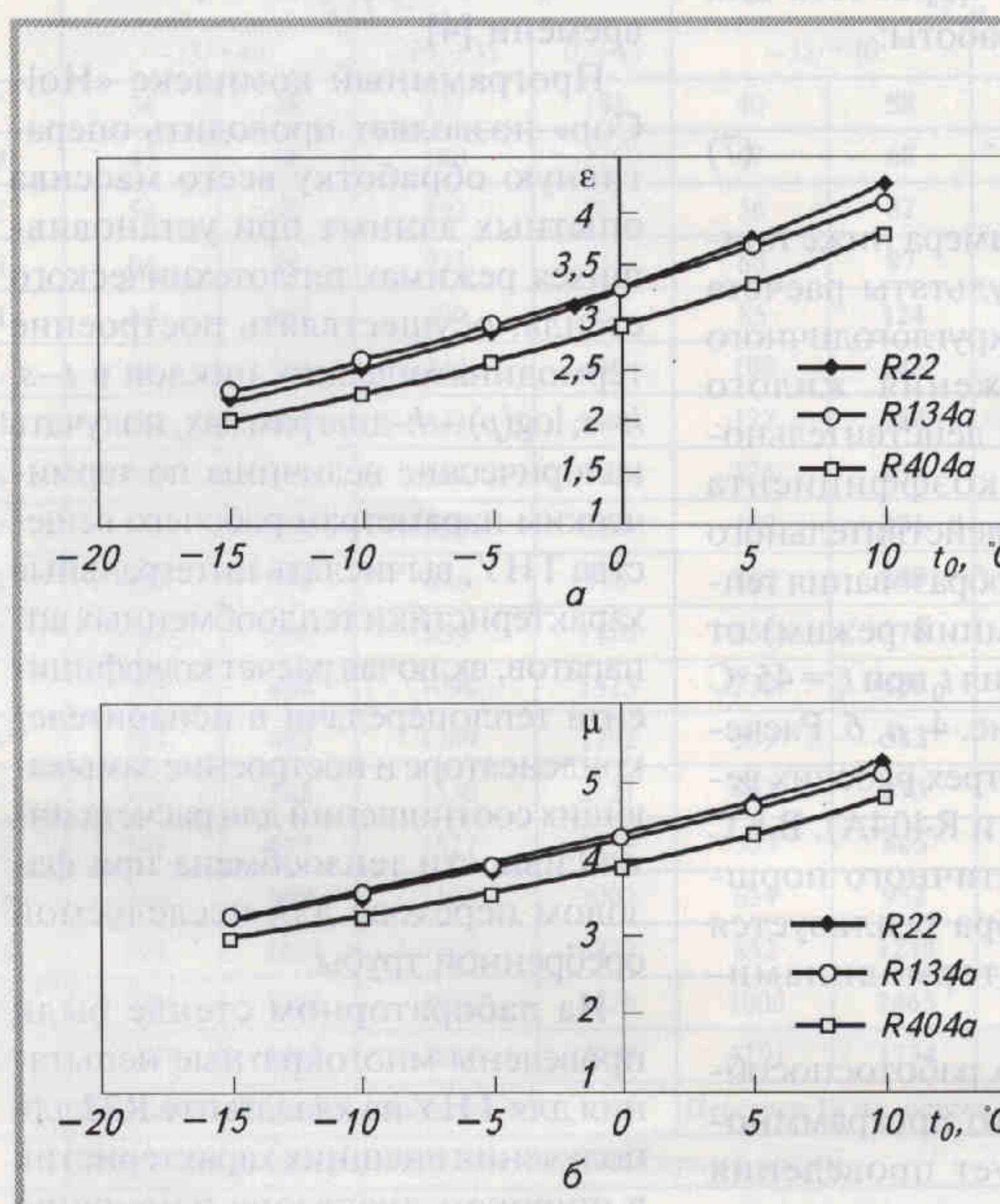


Рис. 4. Расчетные характеристики КС для установки круглогодичного теплохолодоснабжения жилого дома при  $t_k = 45^{\circ}\text{C}$ :  
а – холодильный коэффициент  $\epsilon$  (летний режим);  
б – коэффициент преобразования теплового насоса  $\mu$  (зимний режим)

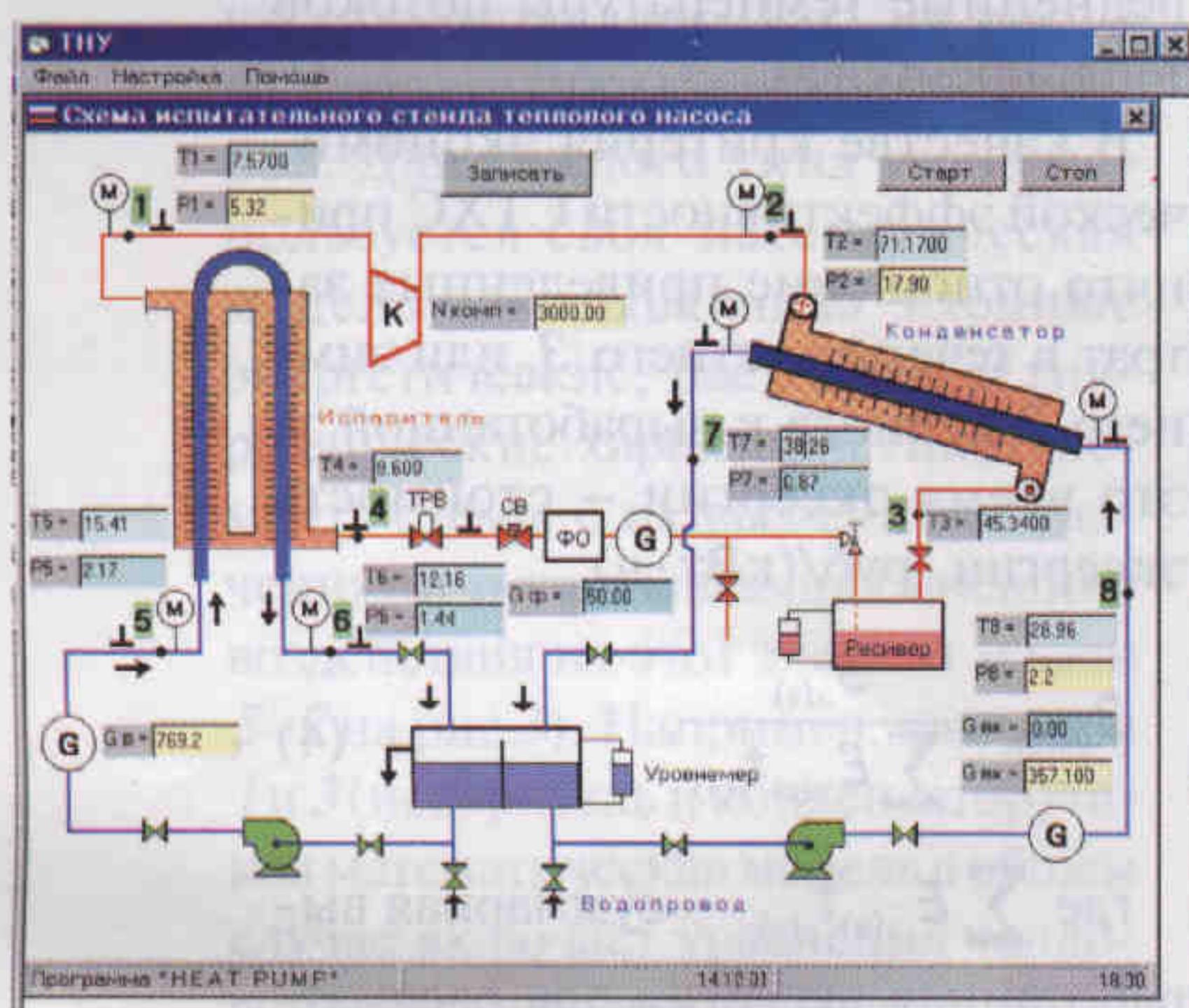


Рис. 5. Схема экспериментального стенда

$$\text{где } Z_{0\lambda(s)} = \frac{Z_{0\lambda(s)}}{\xi_s} - \text{безразмерные}$$

затраты для данного периода работы;  $\xi_s$  – тариф на электроэнергию, руб/(кВт·ч).

Разработанная ранее система зависимостей для определения составляющих безразмерных приведенных затрат и их суммы применительно к холодильной машине ( $Z_{0\lambda M}$ ) холодопроизводительностью  $Q_0$  [1] может быть полностью использована для СТХС с помощью следующего пересчета для каждого периода работы:

$$Z_{0\text{стхс}} = \frac{Z_{0\lambda M} Q_0}{E_{\lambda(s)}}. \quad (7)$$

В качестве примера ниже приводятся результаты расчета КС для установки круглогодичного теплохолодоснабжения жилого дома. Зависимости действительного холодильного коэффициента (летний режим) и действительного коэффициента преобразования теплового насоса (зимний режим) от температуры кипения  $t_k$  при  $t_k = 45^\circ\text{C}$  представлены на рис. 4, а, б. Расчеты выполнены для трех рабочих веществ (R22, R134a и R404A). В КС на базе полугерметичного поршневого компрессора реализуется регенеративный термодинамический цикл.

Отметим, что работоспособность любого программного продукта требует проведения его верификации с использовани-

ем известных (проверенных) численных решений и достоверных экспериментальных данных.

Сотрудниками кафедры «Холодильная и криогенная техника» МГУ ИЭ совместно с научно-производственной фирмой «ЭКИП» разработан и установлен в лаборатории кафедры испытательный стенд теплопроизводительностью до 15 кВт, схема которого представлена на рис. 5. На стенде установлены интенсифицированные теплообменные аппараты оригинальной конструкции с ошипованными микрорельефными поверхностями, изготовленными по технологии деформирующего резания, разработанной в МГТУ им. Баумана. Детальное описание стендла приведено в [5].

В программном комплексе «HolCon» предусмотрен специальный программный модуль, позволяющий с помощью платы АЦП подключаться к первичным приборам экспериментального стенда, проводить в интерактивном режиме настройку рабочих параметров, осуществлять сбор и первичную обработку результатов измерений в режиме реального времени [4].

Программный комплекс «HolCon» позволяет проводить оперативную обработку всего массива опытных данных при установившихся режимах теплотехнического стендла, осуществлять построение термодинамических циклов в  $t-s$ ,  $h-s$ ,  $\log(p)-h$ -диagramмах, получать калорические величины по термическим параметрам рабочего вещества ТНУ, вычислять интегральные характеристики теплообменных аппаратов, включая расчет коэффициента теплопередачи в испарителе/конденсаторе и построение замыкающих соотношений для расчета интенсивности теплообмена при fazовом переходе для исследуемой оребренной трубы.

На лабораторном стенде были проведены многократные испытания для ТНУ на хладагенте R22 для получения внешних характеристик в широком диапазоне изменения

температур теплоносителей, а также тепловых и гидромеханических характеристик испарителя и конденсатора при различных температурных и тепловых нагрузках.

Экспериментальные данные, полученные в ходе этих испытаний, используются в настоящее время для верификации математических моделей, заложенных в программу «HolCon».

В дальнейшем планируется также использование программного комплекса «HolCon» в учебном процессе [2], что обеспечит студентов, инженеров и аспирантов информационно-теоретической и практической базой в области систем тепло- и холода- снабжения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Быков А.В., Калнин И.М., Крузе А.С. Холодильные машины и тепловые насосы. – М.: Агропромиздат, 1988.
- Калнин И.М., Сиденков Д.В., Эль Садик Хасан. Комплекс программного обеспечения для расчета энергетических параметров холодильных машин. Материалы IV выставки-ярмарки «Современная образовательная среда». – М: ВВЦ, 1–4.11.2002 г.
- Попырин Л.С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок. – М.: Энергия, 1978.
- Соколов Е.Ю., Сиденков Д.В., Сухих А.А. Лабораторный стенд и комплекс программ для исследования энергетических характеристик теплонасосной установки // Тезисы докладов 8-й Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов Т. 3.– М.: МЭИ. 28.02–1.03. 2002.
- Сухих А.А., Генералов К.С., Акимов И.А. Испытания теплового насоса для теплоснабжения индивидуального дома // Труды МГУИЭ. Техника низких температур на службе экологии.– М.: МГУИЭ, 2000.
- Starling K.E., Han M.S. Thermodata Refined for LPG Industrial Applications // Hydrocarbon Proc., vol.51, 1972.