

УДК 621.577

Харлампида Д.Х.

**ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА  
ПРИ ВЫБОРЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ  
ТЕПЛОНАСОСНОЙ УСТАНОВКИ**

*ИПМаш НАН Украины*

Теплонасосная установка (ТНУ) представляет собой единый комплекс разнообразных элементов оборудования со структурой технологической схемы различной степени сложности.

Под структурой технологической схемы подразумевается множество возможных вариантов реализации термодинамического цикла, отдельные компоненты которого отличаются наличием или отсутствием вспомогательного оборудования, особенностями последовательности включения теплообменных аппаратов по тепло- и хладоносителю и т.д. [1].

Учитывая все многообразие оборудования ТНУ, а также большое число возможных структурных соединений элементов в технологическую схему, возникает задача поиска рациональной структуры технологической схемы ТНУ, конфигурации ее термодинамического цикла и хладагента, обеспечивающих при заданных условиях высокую энергетическую эффективность.

Решение такой задачи связано с анализом и оценкой множества вариантов схемных решений ТНУ как известных, так и новых, синтезируемых на их основе. Для этого необходим единый критерий оценки схемы и оборудования, свободный от влияния субъективных факторов. Таковым является критерий сложности [2].

Критерий сложности представляет собой качественную характеристику, для которой в настоящее время фактически нет однозначных методов оценки. В основе оценки критерия сложности любой технической системы лежит, в первую очередь, характеристика сложности структуры схемы, сложность ее создания, функционирования и т.д. Известны подходы, в которых сложность определяется количеством элементов и связей системы [3], а также числом системных уровней [4]. Эти подходы хорошо себя зарекомендовали в химической технологии и других областях техники, но они не позволяют в полной мере оценить сложность системы, в основе работы которой лежит термодинамический цикл.

Применительно к схемным решениям холодильных машин (ХМ), которые во многом схожи с ТНУ, Е.И. Таубманом в работе [5] предложен критерий сложности  $S_{сх}$ , учитывающий суммарное число взаимодействий системы с окружающей средой, суммарное число технологических связей и сложность всех элементов. Учет последнего фактора вызывает наибольшие затруднения при анализе схем ТНУ. Поэтому оценка сложности элементов ТНУ на основе упрощенного подхода, предложенного ранее в работе [6], представляется более целесообразной.

Принимая во внимание вышесказанное, можно сформулировать следующие рекомендации относительно оценки уровня сложности технологической схемы ТНУ.

Сложность структуры технологической схемы ТНУ определяется числом и разнотипностью элементов основного и вспомогательного оборудования, непосредственно влияющего на термодинамическую эффективность цикла и изменяющего его конфигурацию, количеством вспомогательного оборудования, влияющего на термодинамическую эффективность, но при этом не изменяющего конфигурацию цикла, числом существующих и потенциальных связей между элементами, а также уровнем сложности самих элементов.

Таким образом, критерий сложности ТНУ или ХМ можно записать в следующем виде:

$$S_{\text{сх}} = \sum_{i=1}^n D_i n_i m_i + j + g + p, \quad (1)$$

где  $n$  – число основных и вспомогательных элементов, непосредственно влияющих на термодинамический цикл и определяющих его конфигурацию;  $D_i$  – сложность элементов [6];  $m$  – число технологических связей между элементами;  $j$  – число вспомогательных элементов, влияющих на эффективность цикла, но не изменяющих его конфигурацию;  $g$  – количество разнотипных элементов одинакового технологического назначения;  $p$  – число потенциальных связей между элементами.

Рассмотрим подробно все величины, входящие в формулу (1).

К числу основных элементов схемы ТНУ отнесем оборудование, непосредственно реализующее процесс трансформации теплоты, т.е. компрессор, конденсатор, испаритель, дроссельный клапан (или детандер).

Появление в схеме ТНУ вспомогательных элементов связано с обеспечением надежности и эффективности работы основного оборудования. Среди вспомогательных элементов, влияющих на эффективность цикла и определяющих его конфигурацию, выделим переохладитель, регенеративный теплообменник, экономайзер, промежуточный сосуд, охладитель перегретого пара, отделитель жидкости. Здесь следует отметить [7], что в классическом варианте отделитель жидкости не оказывает прямого влияния на цикл. Только в насосно-циркуляционных схемах, имеющих большую протяженность жидкостного и всасывающего трубопроводов, его установка, за счет увеличения кратности циркуляции хладагента, способствует уменьшению потерь, связанных с дросселированием.

Вспомогательными элементами, которые оказывают влияние на эффективность цикла, но при этом не изменяют его конфигурацию, являются разного рода клапаны (заправочные, соленоидные), фильтры, линейный ресивер, маслоотделитель.

Количественная оценка разнотипности оборудования предусматривает выделение из числа основного и вспомогательного оборудования различных по принципу действия элементов одинакового технологического назначения. Например, наличие в схеме одновременно винтового и поршневого компрессора или же компрессора с дозарядкой.

При определении числа потенциальных связей между элементами необходимо выделить возможные варианты включения основных и вспомогательных элементов. Например, в схеме возможны два варианта охлаждения компрессора: парами рабочего вещества после испарителя или парами рабочего вещества после промежуточного со-

суда. Или же другой пример [7], когда в схеме предусмотрено включение промежуточного охладителя после компрессора высокой ступени или использование охлаждаемого маслоохладителя.

Известно [8], что более сложные технологические схемы применяются с целью сокращения внутренних необратимостей цикла, связанных с дросселированием и нагревом пара выше температуры конденсации. Для оценки эффективности внесенных в цикл усложнений используется коэффициент обратимости  $\psi$

$$\psi = \frac{\mu_d}{\mu_0}, \quad (2)$$

где  $\mu_d$  – действительный коэффициент преобразования цикла ТНУ;  $\mu_0 = T_k / (T_k - T_n)$  – коэффициент преобразования идеального цикла Карно, осуществляемого в диапазоне температур кипения  $T_n$  и конденсации  $T_k$  хладагента.

Зависимость коэффициента  $\psi$  от термодинамических свойств рабочего вещества может быть представлена уравнением [9]

$$\psi = \frac{Kl - 1 + MЛ}{Kl - \frac{M}{2} + MЛ}, \quad (3)$$

где  $Kl = \frac{r_k}{c'_p (T_k - T_n)}$  – критерий Клаузиуса;  $Л = \frac{c''_p}{c'_p}$  – отношение теплоемкостей

насыщенного пара  $c''_p$  и жидкости  $c'_p$ ;  $M = \frac{T_k}{T_m}$  – отношение  $T_k$  к средней температуре в цикле  $T_m$ , равной  $0,5(T_k + T_n)$ ;  $r_k$  – удельная теплота парообразования при  $T_k$ .

Анализ выражения (3) показал, что в рамках заданных температурных границ термодинамического цикла коэффициент  $\psi$  фактически является только функцией критерия Клаузиуса  $Kl_k$  для конденсатора. С увеличением  $Kl_k$  величина  $\psi$  растет. Тем не менее, на величину  $\psi$  также влияет и критерий  $Л$ , характеризующий относительный наклон пограничных кривых. Его значение намного меньше, чем значение  $Kl_k$ . Так, для R134a при  $Kl_k = 1,72$  критерий  $Л = 0,812$ . Чем выше  $Л$ , тем меньше потери при дросселировании и соответственно выше  $\psi$  [9].

Поскольку оба эти критерия являются зависимыми от  $c'_p$  и оценить степень влияния каждого в отдельности на  $\psi$  невозможно, далее в качестве основного критерия, характеризующего термодинамические свойства рабочего вещества, будет использован критерий Клаузиуса.

Определим степень влияния структурных факторов на термодинамическое совершенство ТНУ, построив зависимости  $\psi$  от критерия  $Kl_k$  для схем разного уровня сложности (рис. 1). Исходные данные представлены в таблице 1.

Для расчета термодинамических свойств хладагентов используется база данных [10]. Расчет режимных параметров ТНУ выполнен по методикам [11, 12]. Влиянием величин  $D_i, j, g$  и  $p$ , входящих в формулу (1), при анализе принципиальных схем можно пренебречь.

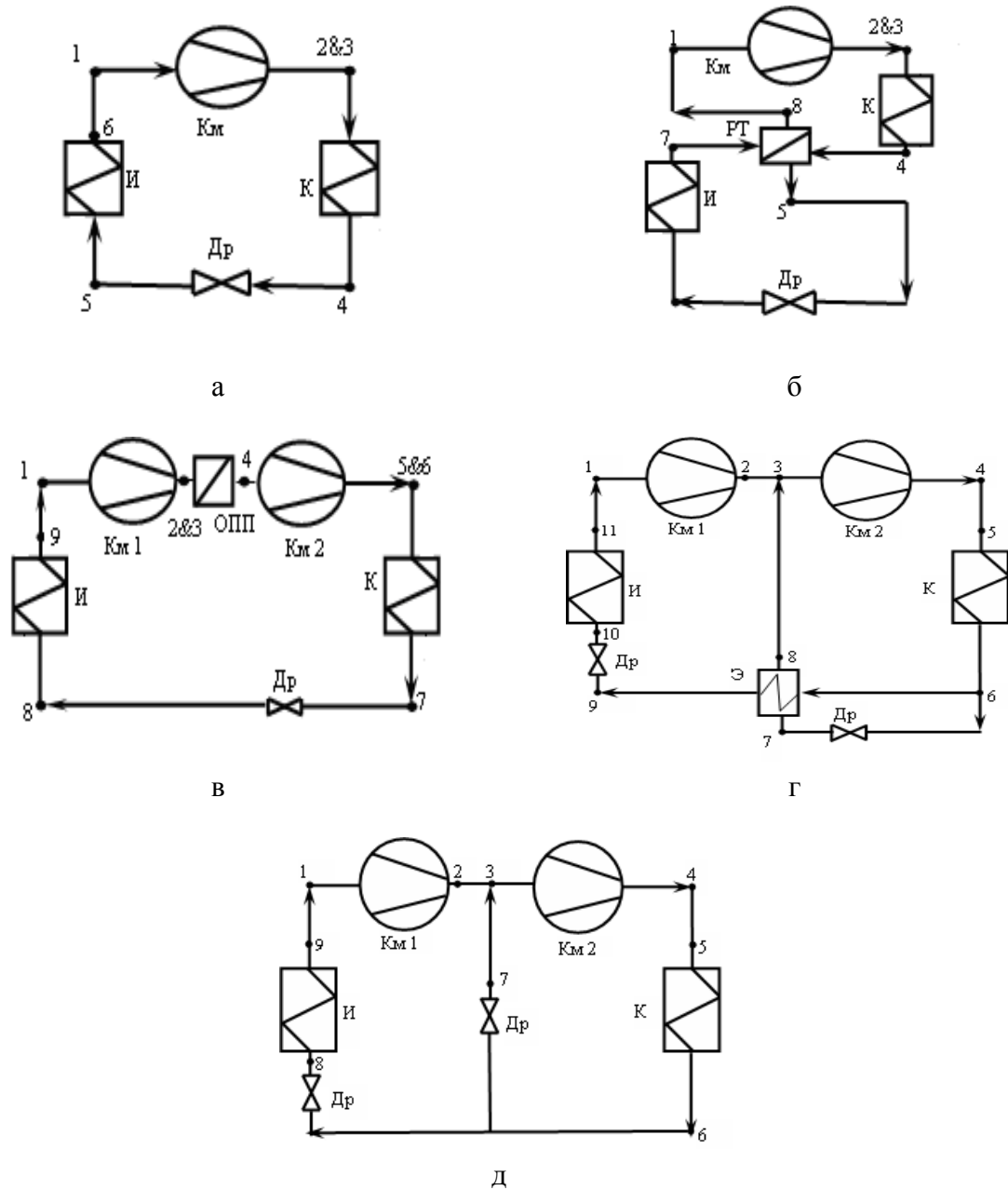


Рисунок 1 – Принципиальные технологические схемы ТНУ:  
 а – простая одноступенчатая; б – регенеративная;  
 в – двухступенчатая с неполным промежуточным охлаждением;  
 г – двухступенчатая с экономайзером;  
 д – двухступенчатая с промежуточным впрыском  
 И – испаритель; К – конденсатор; Км – компрессор; Др – дроссель;  
 ОПП – охладитель перегретого пара; Э – экономайзер

Таблица 1 – Исходные данные для анализа технологических схем ТНУ

п/п	Название схемы	$S_{сх}$	Дополнительно задаваемая величина
а	Простая одноступенчатая	20	Перегрев $\Delta T_{пер} = 7 \text{ }^\circ\text{C}$
б	Одноступенчатая с регенерацией	35	Разность температур в теплообменнике $\Delta T_{рт} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
в	Двухступенчатая с неполным промежуточным охлаждением	41	Температура всасывания во вторую ступень $T_{вс} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$
г	Двухступенчатая с экономайзером	68	Разность температур в экономайзере $\Delta T_3 = 5 \text{ }^\circ\text{C}$
д	Двухступенчатая с промежуточным впрыском	46	Перегрев при впрыскивании $\Delta T_{пер}^в = 10 \text{ }^\circ\text{C}$

Взаимное влияние сложности структуры принципиальной технологической схемы ТНУ и термодинамических свойств рабочего вещества на коэффициент  $\psi$  представлено на рис. 2. Зависимости получены при температуре конденсации  $T_k = 55 \text{ }^\circ\text{C}$ , температура испарения  $T_n$  варьировалась от  $-10$  до  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ .

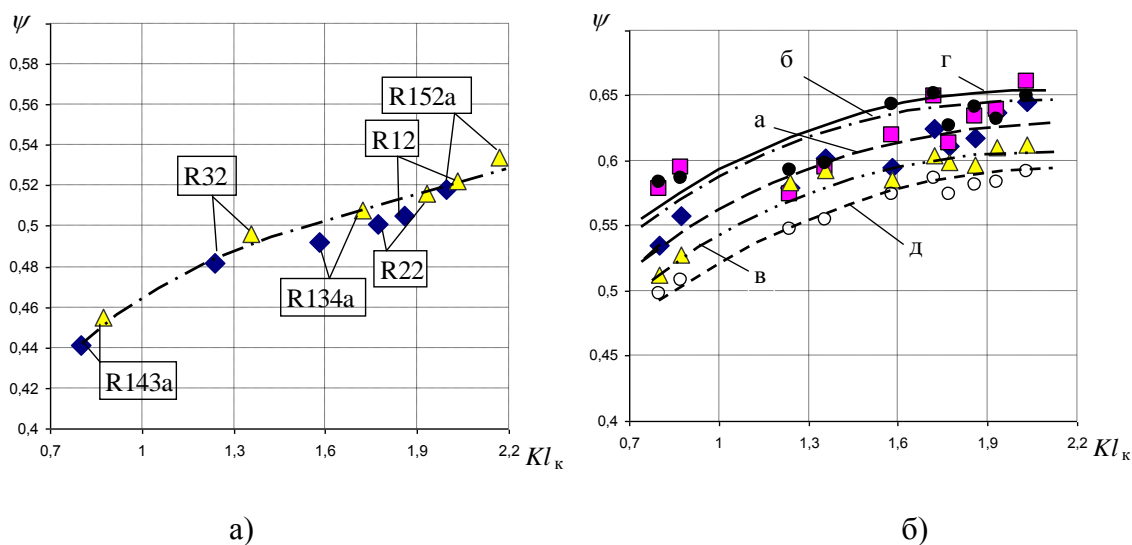


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента  $\psi$  от критерия Клаузиуса  $Kl_k$ :  
 а) без учета сложности схемы; б) с учетом сложности схемы

По результатам расчетов циклов установлено, что влияние  $Kl_k$  на  $\psi$  уменьшается с увеличением сложности схемы и для схем большой сложности величина  $\psi$  от термодинамических свойств фактически не зависит.

Далее оценим влияние сложности схемы на гидравлический режим работы ТНУ. Для этого введем показатель чувствительности  $\mu'/\mu$  [11], представляющий собой отношение коэффициента преобразования, вычисленного с учетом влияния гидравлических сопротивлений  $\mu'$ , к значению  $\mu$  без учета таковых, т.е. в эталонном цикле [7]. Очевидно, что чем больше отношение  $\mu'/\mu$ , тем менее существенное влияние оказывают гидравлические сопротивления на коэффициент преобразования ТНУ.

Рассмотрим два гидравлических контура циркуляции хладагента, имеющие различную сложность схемы: контур простой одноступенчатой ТНУ (рис. 3) и контур двухступенчатой ТНУ с промежуточным впрыском (рис. 4). Принимаем для обеих схем одинаковые температурные границы цикла ( $T_k = 55\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_n = -10\text{ }^\circ\text{C}$ ), а также постоянную теплопроизводительность ТНУ  $Q_T = 8,62\text{ кВт}$ , выбираем хладагент R134a. Для учета влияния неизобарности процессов в цикле используем методику [11].

Анализ результатов расчета показал, что с усложнением схемы ТНУ влияние гидравлических сопротивлений на энергетическую эффективность снижается. Для двухступенчатой схемы отношение  $\mu'/\mu = 0,898$ , а для одноступенчатой  $\mu'/\mu = 0,866$ . С изменением температурных границ цикла и гидравлических сопротивлений соединительных трубопроводов характер зависимости  $\mu'/\mu$  от параметра сложности  $S_{сх}$  остается тем же.

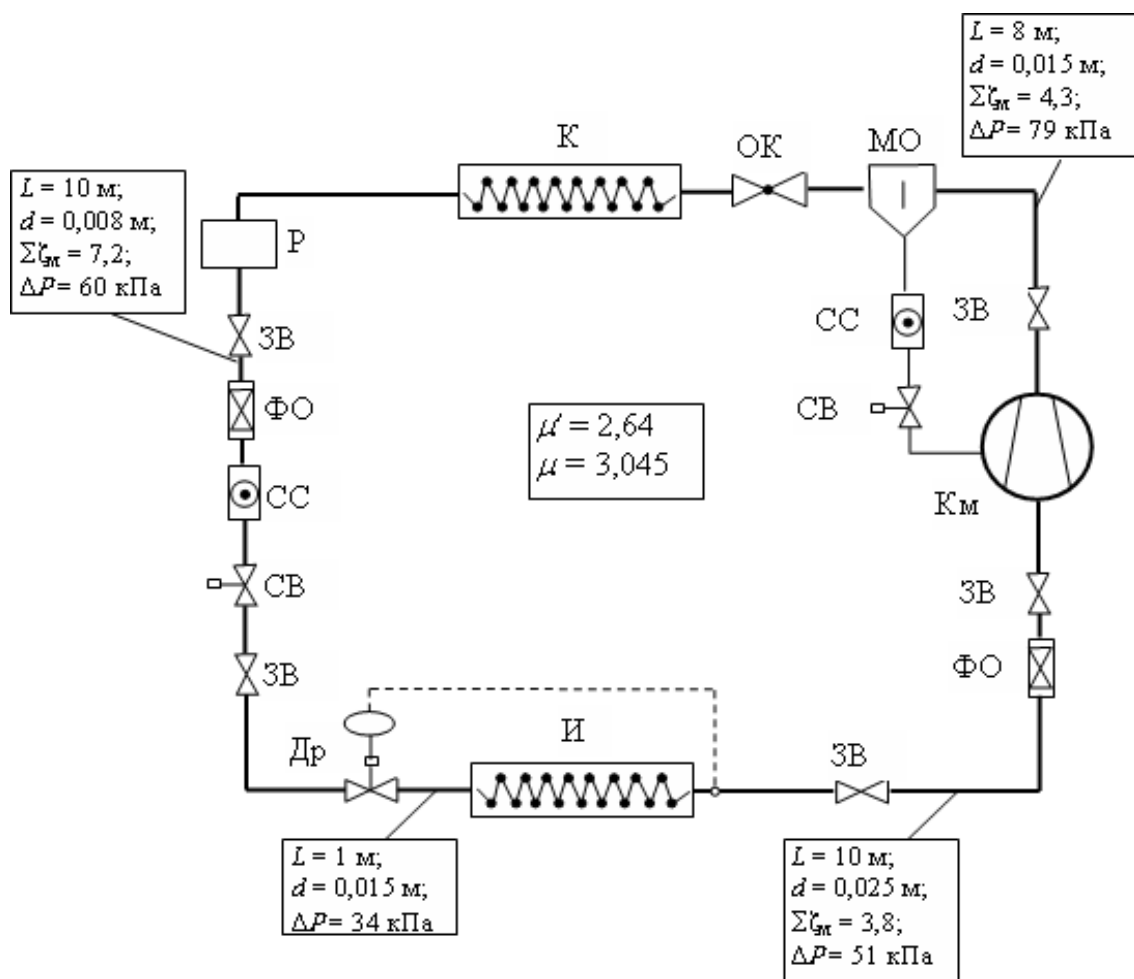


Рисунок 3 – Схема гидравлического контура циркуляции хладагента одноступенчатой ТНУ:  
 И – испаритель; К – конденсатор; Км – компрессор; Др – дроссель; Р – ресивер;  
 МО – маслоохладитель; ФО – фильтр осушитель; СВ – соленоидный вентиль;  
 ЗВ – запорный вентиль; ОК – обратный клапан; СС – смотровое стекло;  $L$  – длина линии;  $d$  – диаметр;  $\Sigma\zeta_m$  – сумма коэффициентов местных сопротивлений;  $\Delta P$  – потери давления в линии

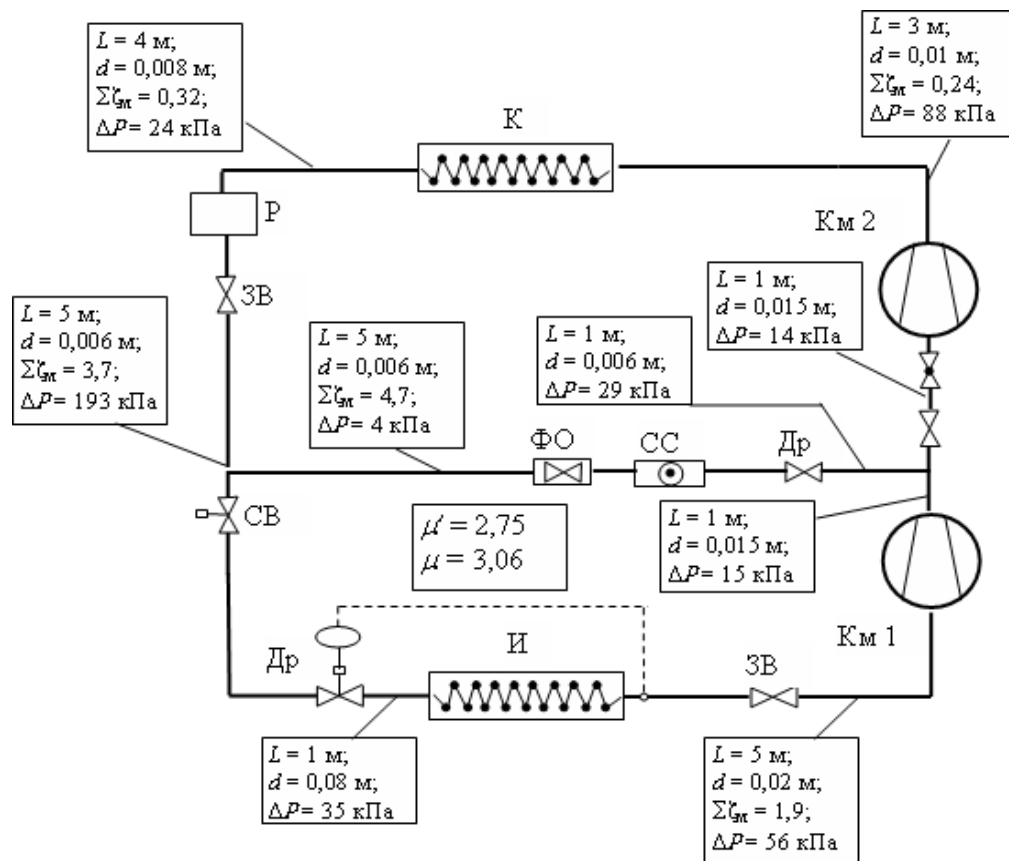


Рисунок 4 – Схема гидравлического контура циркуляции хладагента двухступенчатой ТНУ с промежуточным впрыском (обозначения см. рис. 3)

Следует отметить, что выбор той или иной схемы без учета экономических показателей не может быть окончательным, поскольку любое усложнение схемы ТНУ в итоге приводит к увеличению капитальных затрат. В связи с этим представилось целесообразным предложить обобщенный критерий оценки структуры технологической схемы ТНУ, комплексно учитывающий влияние термодинамических и технико-экономических показателей.

$$\Xi = \frac{\Psi}{Z}, \tag{4}$$

где  $Z$  – интегральный экономический критерий оценки энергетического оборудования;  $\Psi$  – коэффициент обратимости, определяемый по уравнению (3).

Используя рекомендации работы [13], критерий  $Z$  можно представить в следующем виде

$$Z = \frac{z_k + z_{ЭК}}{Q_1 \tau \theta}, \tag{5}$$

где  $z_k$  – капитальные затраты, \$;  $z_{эк}$  – эксплуатационные затраты, \$;  $Q_T$  – теплопроизводительность ТНУ,  $Q_T = 8,62$  кВт;  $\tau$  – наработка установки до капремонта,  $\tau = 7000$  ч;  $\bar{\vartheta} = \frac{c_T}{c_{эл}}$  – весовой коэффициент;  $c_T$  – себестоимость производства тепловой энергии в ТНУ, \$/кВт ч;  $c_{эл}$  – тариф на электрическую энергию,  $c_{эл} = 0,035$  \$/кВт ч.

На рис. 5 представлены зависимости критерия  $\Xi$  от параметра сложности  $S_{сх}$  для рассматриваемых схем и хладагентов.

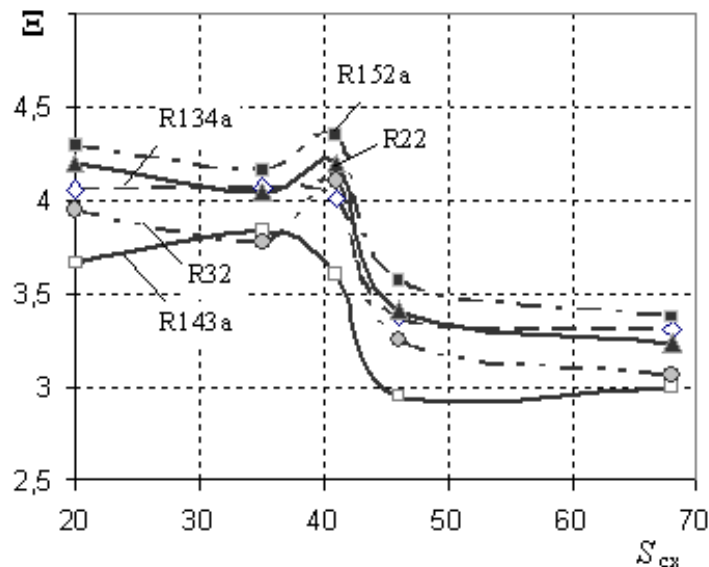


Рисунок 5 – Зависимость критерия  $\Xi$  от параметра сложности схемы  $S_{сх}$

Как видно из рис. 5, для заданных условий ( $T_k = 55$  °С;  $T_{и} = -10$  С) наиболее рациональной для большинства хладагентов является двухступенчатая схема с неполным промежуточным охлаждением ( $S_{сх} = 41$ ). Исключение составляют хладагенты R143a и R134a, для которых эффективной оказывается одноступенчатая регенеративная схема.

Таким образом, впервые предложена методика оценки эффективности схемных решений ТНУ, позволяющая на этапе предпроектных разработок производить комплексный анализ термодинамической и технико-экономической эффективности ТНУ, а также вести направленный поиск рабочих веществ с заданными термодинамическими свойствами для схем различной степени сложности.

#### Литература

1. Попырин Л.С. Математическое моделирование и оптимизация теплоэнергетических установок. – М.: Энергия, 1978. – 416 с.
2. Бусленко Н.П. Лекции по теории сложных систем/ Н.П. Бусленко, В.В. Калашников, И.Н. Коваленко. – М.: Советское радио. –1973. –439 с.
3. Половинкин А.И. Законы строения и развития техники. – Волгоград: ВолгПИ, 1985. – 280 с.



4. Синергетическая парадигма. Многообразие поисков и подходов. Сборник трудов / Под ред. В.И. Аршинова, В.Г. Буданова, В.Э. Войцеховича. – М.: Прогресс-Традиция. – 2000. – 320 с.
5. Таубман Е.И. Анализ и синтез теплотехнических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 176 с.
6. Харлампи́ди Д.Х. Выбор термодинамического цикла и технологической схемы теплонасосной установки на основе оценки критерия сложности // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2006. – №4. – С. 3–11.
7. Морозюк Т.В. Теория холодильных машин и тепловых насосов. – Одесса: Негоциант, 2006. – 721 с.
8. Калнинь И.М. Оценка эффективности термодинамических циклов парокомпрессионных холодильных машин и тепловых насосов/ И. М. Калнинь, К. Н. Фадеков // Холодильная техника. – 2006. – №3. – С. 16–24.
9. Розенфельд Л.М. Холодильные машины и аппараты / Л.М. Розенфельд, А.Г. Ткачев. – М.: Госторгиздат, 1955. – 584 с.
10. Cool Pack – a collection of simulation tools for refrigeration. Tutorial version 1.46 / A. Jakobsen, B. Dindler Rasmussen, M. Skovrup, S. Andersen. – Department of Energy Engineering Technical University of Denmark, 2001. – 20 p.
11. Братута Э.Г. Влияние гидравлических сопротивлений на энергетическую эффективность цикла холодильной машины в зависимости от сложности ее технологической схемы / Э.Г. Братута, Д.Х. Харлампи́ди, В.Г. Шерстюк // Труды Одесского политехнического университета. – 2007. – № 1(27). – С. 98–104.
12. Тепловые и конструктивные расчеты холодильных машин / Кошкин Н.Н., Стукаленко А.К. и др.; Под ред. Н.Н. Кошкина. – Л.: Машиностроение, 1976. – 463 с.
13. Лоза В.М. Критерий оценки эффективности энергетического оборудования// Турбины и дизели. – 2007. – №1. – С. 10–15.

УДК 621.577

Харлампи́ди Д.Х.

### **ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМНОГО ПІДХОДУ ДЛЯ ВИБОРУ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ТЕПЛОНАСОСНОЇ УСТАНОВКИ**

На підставі методології системного аналізу розроблена методика комплексної оцінки технологічної схеми теплонасосної установки. Досліджено вплив складності структури технологічної схеми на термодинамічну ефективність циклу та гідравлічний режим роботи теплонасосної установки при використанні холодоагентів з різними теплофізичними властивостями.