

Tetel'baum, S.D.

Kandidat der techn. Wissenschaften

Technisches M.V. Lomonosov-Institut, Odessa

ZUR WAHL DES ARBEITSMITTELS DES NIEDERTEMPERATURKREISLAUFES
VON BINÄREN ENERGIEANLAGEN

Übersetzung aus:

Izvestija. Vyssie učebnye zavedenija. Energetika.
Minsk, 1970, Nr 8, S. 57 - 61.

Russ.: **К ВЫБОРУ РАБОЧЕГО ТЕЛА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО
КОНТУРА БИНАРНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК**

K vyboru rabočego tela nizkotemperaturnogo
kontura binarnych énergoustanovok

Um die Kapazität einer Wasserdampf-Energieanlage wesentlich zu steigern, wurde als eine Maßnahme vorgeschlagen, den Druck im Kondensator im Wasserdampftrakt der Energieanlage zu erhöhen und niedrigsiedende Flüssigkeiten im Niedertemperaturkreislauf zu verwenden. Solche Untersuchungen wurden in der UdSSR (Institut für Wärmephysik der sibirischen Abteilung der Akademie der Wissenschaften der UdSSR¹⁾; Moskauer Institut für Energetik²⁾; Zentrales I.I. Polzunov-Forschungsinstitut für Kessel- und Turbinenbau³⁾; u.a.) sowie im Ausland durchgeführt [1-4].

1) ITF SO AN SSSR - Institut teplofiziki sibirskogo otdelenija Akademii nauk SSSR (Anm.d.Übers.)

2) MEI - Moskovskij ordena Lenina énergetičeskij institut (Anm.d.Übers.)

3) CKTI - Central'nyj naucno-issledovatel'skij i proektno-konstruktorskij kotloturbinnyj institut im.I.I. Polzunova (Anm.D.Übers.)

Um einen maximalen Wirkungsgrad der binären Energieanlage zu erreichen, muß das richtige Arbeitsmittel im Niedertemperaturkreislauf gewählt werden, welches eine Anzahl von Forderungen erfüllen soll.

Die Eigenschaften des Arbeitsmittels des Niedertemperaturkreislaufs müssen gewährleisten:

- 1) Wärmebeständigkeit, physiologische Unschädlichkeit und chemische Beständigkeit;
- 2) maximale thermodynamische Wirksamkeit;
- 3) minimaler Verbrauch;
- 4) mäßiger Druck im Kreislauf, und etwa atmosphärischer Druck im Kondensator;
- 5) minimale Abmessungen der Wärmeübertragungsflächen.

Damit der Wärmeübergang in den Niedertemperaturkreislauf isotherm ist (bei einer Temperatur von ca. 100°C), muß die kritische Temperatur des Arbeitsmittels über der Wärmeübergangstemperatur im Niedertemperaturkreislauf liegen. Die oben aufgestellten Forderungen erfüllen einige Kältemittel, deren thermodynamische Eigenschaften in [5-8] angegeben sind.

Die vorliegende Arbeit beabsichtigt eine Analyse, die es ermöglicht, aus der gesamten Vielzahl niedrigsiedender Flüssigkeiten diejenigen auszuwählen, die die Forderungen am besten erfüllen.

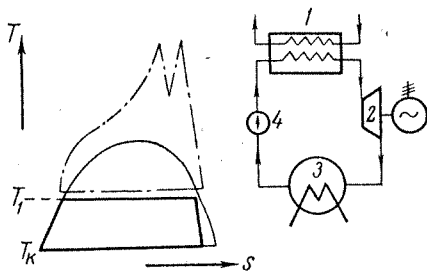


Abbildung 1. Grundsätzliches Wärme-
schema und Kreislauf im T-S-Diagramm
des Niedertemperaturkreislaufs einer
binären Energieanlage:

1 - Dampferzeuger; 2 - Turbine; 3 -
Kondensator; 4 - Pumpe.

Der Wirkungsgrad des in Abb. 1 dargestellten Kreislaufes hängt in beträchtlichem Maße von der Form der rechten Grenzkurve im T-S-Diagramm ab, d.h. vom Vorzeichen und der Größe der orthobaren Wärmekapazität auf der Linie des trockenen gesättigten Dampfes c_x'' . Wenn $c_x'' > 0$, dann läuft die Ausdehnung in der Turbine im Bereich des überhitzten Dampfes ab und endet auch dort, was dazu führt, daß der Wirkungsgrad des Kreislaufs im Vergleich zu den Arbeitsmitteln, die $c_x'' \leq 0$ besitzen, wesentlich abnimmt. So ist bei $T_1 = 373 \text{ }^\circ\text{K}$, $T_K = 293 \text{ }^\circ\text{K}$, $\eta_r = 0,85$ für C_6F_6 ($c_x'' > 0$ [9]), $\eta_i = 12,4\%$, während bei Freon 12 unter denselben Bedingungen $\eta_i = 14,3\%$ ist.

Im Hinblick darauf, den größten Wirkungsgrad zu erzielen, muß das Arbeitsmittel des Niedertemperaturkreislaufes folglich bei minimaler Dampfeuchtigkeit hinter der Turbine eine negative Wärmekapazität des trockenen gesättigten Dampfes besitzen, die jedoch möglichst große Absolutwerte haben soll.

Bekanntlich ist

$$c_x'' - c_x' = \frac{dr}{dT} - \frac{r}{T}, \quad (1)$$

wobei c_x' die Wärmekapazität auf der Linie der siedenden Flüssigkeit darstellt;
 T die Temperatur, $^\circ\text{K}$;
 r Verdampfungswärme.

In genügender Entfernung vom kritischen Punkt erhält man nach den Angaben von [8] für die chlorfluorsubstituierten Kohlenwasserstoffe mit einer Genauigkeit bis zu 3 % die Abhängigkeit

$$c_x' \approx c_p' \approx \frac{\beta}{\mu^{0,6}}, \quad (2)$$

wobei $\beta = (3,215 \div 0,925) \cdot K$; K ist dabei die Anzahl der Kohlenstoffatome.

Wir bestimmen r nach der Beziehung [8]

$$r = a \left(1 - \frac{T}{T_{kr}} \right)^n. \quad (3)$$

Wir nehmen an, daß die chlorfluorsubstituierten Kohlenwasserstoffe im untersuchten Parameterbereich thermodynamisch geeignet sind,

verwenden die Troutonsche Regel, berücksichtigen, daß für die thermodynamisch geeigneten Stoffe im Ausdruck (3) $n = \text{idem}$ ist und erhalten bei gemeinsamer Lösung von (1)-(3)

$$c_x'' = \frac{\beta}{\mu^{0,6}} - \frac{c}{\mu} T_{\text{ns}} \left(1 - \frac{T}{T_{\text{kr}}}\right)^{n-1} \left[1 - \frac{T}{T_{\text{kr}}}(n+1)\right], \quad (4)$$

und hieraus näherungsweise

$$c_x'' \approx \frac{\beta}{\mu^{0,6}} - \frac{C}{\mu} T_{\text{ns}} \frac{T_{\text{kr}} - (1+n)T}{T_{\text{kr}} - (1-n)T}, \quad (5)$$

wobei T_{ns} Siedetemperatur bei atmosphärischem Druck ist.

Wie aus den Ausdrücken (4) und (5) ersichtlich ist, hängt das Vorzeichen der Wärmekapazität c_x'' vom Vorzeichen der Differenz ab.

Die durchgeführten Berechnungen zeigen, daß die meisten Kältemittel mit $K \geq 2$ und einem größeren Wert μ bei $\tau = \frac{T_{\text{k}}}{T_{\text{kr}}} \leq 0,7$ $c_x'' > 0$ haben, wobei die Wärmekapazität ihrem absoluten Wert nach mit zunehmendem Molekulargewicht zunimmt. Um diese Feststellung zu illustrieren, sind in Abb. 2 die rechten Grenzkurven von einigen Kältemitteln abgebildet, für die in der Literatur die notwendigen Daten vorliegen [5-8]. Um zu einem geeigneten Vergleich zu kommen, wird die Entropiezunahme $\Delta S''$ auf 20°C (293°K) bezogen.

Der Wirkungsgrad des Niedertemperaturkreislaufes (Abb. 1) wird in einem festgelegten Temperaturintervall nicht nur durch die Form der Grenzkurve, sondern auch durch bestimmte wärmephysikalische Eigenschaften des Arbeitsmittels bestimmt.

Der Ausdruck für den Wirkungsgrad des Rankine-Prozesses ist bei fehlender Regeneration

$$\eta_i = \eta_r \frac{\Delta T}{T_1} \cdot \frac{1 + \eta' \varphi T_1}{1 + \Delta T \varphi}. \quad (6)$$

Aus Ausdruck (6) geht hervor, daß der Wirkungsgrad des Kreislaufes von der Größe $\varphi = \frac{c_p'}{r_1}$ abhängt, und - wie es die Analyse dieses Ausdruckes zeigte - von $\frac{\partial \eta}{\partial \varphi} < 0$; deshalb nimmt der Wirkungsgrad des Kreislaufes bei Zunahme des Wertes φ zu. Bei den möglichen Extremwerten von φ ($c_p' = 0$ und $r = 0$) beträgt der Wirkungsgrad des Kreislaufes dementsprechend

$$\eta_i = \eta_r \frac{\Delta T}{T_1} \quad \text{oder} \quad \eta_2 = \eta_r \eta'.$$

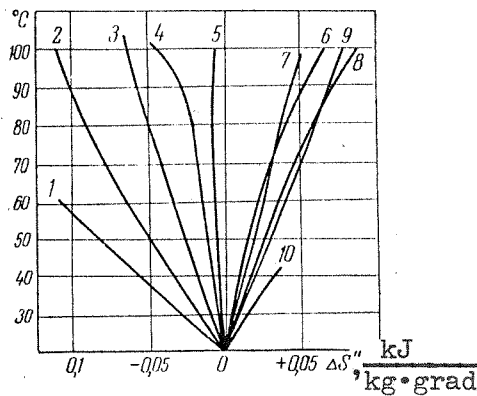


Abbildung 2. Vergleich des Verlaufs der rechten Grenzkurve im T-S-Diagramm von einigen Kältemitteln:

1 - Freon 40 (CH_2Cl); 2 - Freon 30 (CH_2Cl_2); 3 - Freon 21 (CHCl_2F); 4 - Freon 12 (CCl_2F_2); 5 - Freon 11 (CCl_3F); 6 - Freon 113 ($\text{C}_2\text{Cl}_3\text{F}_3$); 7 - Freon 114 ($\text{C}_2\text{Cl}_2\text{F}_4$); 8 - Fluorbenzol (C_6F_6); 9 - Oktafluorzyklobutan (C_4F_8); 10 - Oktafluorbutan (C_4F_{10}).

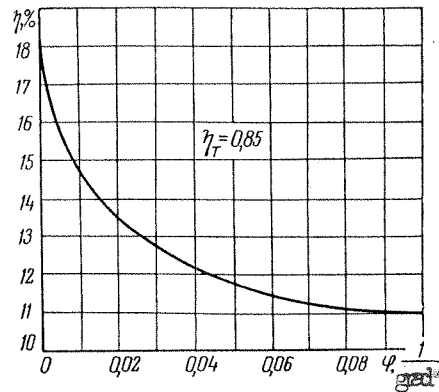


Abbildung 3. Abhängigkeit des Wirkungsgrades des Niedertemperaturkreislaufes vom Verhältnis der durchschnittlichen isobaren Wärmekapazität der Flüssigkeit zur Verdampfungswärme.

Bei den vorher gewählten Temperaturen ($T_1 = 373 \text{ }^\circ\text{K}$ und $T_K = 293 \text{ }^\circ\text{K}$) und dem Wirkungsgrad der Turbine $\eta_T = 0,85$ beträgt die Differenz zwischen η_1 und η_2 beinahe 8 % ($\eta_1 = 18,2\%$, $\eta_2 = 10,5\%$).

Abb. 3 zeigt die Abhängigkeit $\eta = f(\varphi)$. Aus dem Diagramm ist ersichtlich, daß der größte Einfluß auf den Wirkungsgrad im Veränderungsbereich $\varphi = \frac{c_p}{r_1}$ von $(0 \div 0,05) \text{ 1/grad}$ auftritt.

In Tab. 1 sind einige Daten über die Freone der Methanreihe und von NH_3 angegeben. Aus der Tabelle ist zu entnehmen, daß der Wert bei den genannten Verbindungen zwischen $(0,0163 - 0,0010) \text{ 1/grad}$ schwankt; dies führt bei den genannten Bedingungen zu Schwankungen im Wirkungsgrad des Kreislaufes zwischen $\sim 14,3$ und $17,6 \%$ (absolut).

Es muß jedoch hinzugefügt werden, daß der Unterschied im Wirkungsgrad des unteren Kreislaufes um $\sim 3,5 \%$ von den absoluten Werten keinen so großen Unterschied im Wirkungsgrad der gesamten Anlage bedeutet und vom Wirkungsgrad des Wasserkreislaufes abhängt. Wenn man den

Hochtemperaturkreislauf mit 30 % annimmt, so führt der Unterschied im Wirkungsgrad des Niedertemperaturkreislaufes um 3,5 % (absolut) zu einem Unterschied im Wirkungsgrad der gesamten Energieanlage von 2,5 % (absolut).

Da die Verwendung von binären Wasser-Kältemittel-Anlagen es in der kalten Jahreszeit im Prinzip zuläßt, die Kondensationstemperatur des Arbeitsmittels beträchtlich zu senken - was die Wirtschaftlichkeit einer Anlage wesentlich steigern kann - , ist es von großem Interesse, den Einfluß der Eigenschaften des Arbeitsmittels auf die Zunahme des Wirkungsgrades der Energieanlage bei Temperaturabnahme der Wärmeabfuhr zu analysieren.

Tabelle 1

Bezeichnung der Verbindung	Chem. Formel	rel. Molekülmasse	Kritische Kennwerte		Druck d. Satt-dampfes, bar		Verdampfungs-wärme, kJ/kg		Trockenheitsgrad d. Dampfes nach Turb.		Wert von $\varphi = \frac{c_p}{r_1}$, 1/grad	Wirkungsgrad bei $\eta_r = 0,85$, %
			T_{kr} , °K	P_{kr} , bar	bei Kondens. $T_k = 293^\circ K$	bei Sieden $T_1 = 373^\circ K$	bei Kondensation r_k	b. Sieden r_1	bei $\eta_r = 1,0$	bei $\eta_r = 0,85$		
Freon 11	CCl ₃ F	137,4	471,2	43,8	0,89	7,84	184,8	147	0,984		0,0052	15,9
Freon 12	CCl ₂ F ₂	120,9	384,7	41,2	5,8	33,6	144	67,5	0,9	0,95	0,0163	14,3
Freon 21	CHCl ₂ F	102,9	451,7	51,7	1,56	13,1	236	177	0,92	0,96	0,006	15,7
Ammoniak	NH ₃	17,3	405,6	111,5	8,7	59,0	1190	710	0,77	0,80	0,00103	17,6

Die durchgeführte Analyse zeigte, daß $(\partial\eta/\partial T_k)_{\varphi_1} > (\partial\eta/\partial T_k)_{\varphi_2}$ bei $\varphi_1 < \varphi_2$. Und obwohl der Unterschied in der Zunahme des Wirkungsgrades des unteren Kreislaufes bei den möglichen Extremwerten 0,1 % absolut beträgt bei einem Grad Abnahme der Temperatur T_K , ist bei Großenergieanlagen, bei denen die Möglichkeit gegeben ist, die Temperatur der Wärmeabfuhr beträchtlich zu senken, der besagte Unterschied in der Zunahme des Wirkungsgrades bedeutend und muß bei der Wahl des Arbeitsmittels des Niedertemperaturkreislaufes berücksichtigt werden.

Wie oben festgestellt, müssen bei der Wahl des Arbeitsmittels des Niedertemperaturkreislaufes außer dem Wirkungsgrad auch die folgen-

den Faktoren berücksichtigt werden: Druck des Stoffes beim Sieden und bei Kondensation, Größe der Verdampfungswärme, Trockenheitsgrad des Dampfes nach der Turbine u.a. Die Zahlenwerte der besagten Größen für die Kältemittel der Methanreihe, deren kritische Temperatur (T_{kr}) über 373°K liegt, und von NH_3 sind in Tab. 1 angegeben. Die Auswertung von Tab. 1 läßt unter Berücksichtigung der genannten Vorstellungen die Schlußfolgerung zu, daß die zukunfts-trächtigsten Kältemittel der Freongruppe die Freone 11 und 21 sind.

Auch NH_3 verdient besondere Aufmerksamkeit bei Verwendung in Energieanlagen. Diese Verbindung zeichnet sich durch relativ große Verdampfungswärme und einem negativen Wert der orthobaren Wärmekapazität des trockenen Sattdampfes aus.

In dieser Arbeit sind einige andere Eigenschaften, die sich beträchtlich auf die Abmessungen der Wärmetauscher und die Konstruktion der Einzelteile des Niedertemperaturkreislaufes auswirken könnten, nicht untersucht worden. Außerdem wurden auch einige Probleme nicht angesprochen, die mit den Kosten und der Ausnutzung einer Energieanlage (Toxizität, chemische Beständigkeit, Leckagen u. dgl.) zusammenhängen und deren Lösung einer endgültigen Wahl des Arbeitsmittels des Niedertemperaturkreislaufes entgegenstehen.

Schlußfolgerungen

1. Stoffe, die positive orthobare Wärmekapazität auf der rechten Grenzkurve aufweisen ($c'_x > 0$), garantieren keine maximale Wirtschaftlichkeit des Niedertemperaturkreislaufes.
2. Für das Arbeitsmittel des Niedertemperaturkreislaufes muß der Wert $\varphi = \frac{c'_p}{r_1}$ minimal sein; dies garantiert einen maximalen Wirkungsgrad des Kreislaufes und daß er bei Abnahme der Kondensationstemperatur stärker zunimmt.
3. Vom Standpunkt der an das Arbeitsmittel des Niedertemperaturkreislaufes gestellten Forderungen, welche die thermodynamische Effektivität von Energieanlagen sicherstellen, sind die Freone 11 und 21 sowie NH_3 zur Verwendung als Arbeitsmittel am zweckmäßigsten.

L i t e r a t u r

1. Калафати Д. Д., Копп И. З. и др. Выбор рабочего тела низкотемпературного контура мощных паротурбинных блоков. Докл. на Всесоюзной н.-техн. конф. по термодинамике. Л., 1968.

Kalafati, D.D., Kopp, I.Z. u.a.: Vybor rabočego tela nizekoterperaturnogo kontura mošćnych paroturbinných blokov.

Doklad na Vsesojuznoj naučno-techničeskoj konferencii po termodinamike. Leningrad, 1968.

⟨Die Wahl des Arbeitsmittels des Niedertemperaturkreislaufes von Hochleistungs-Dampfturbinenanlagen⟩

2. Кутателадзе С. С., Розенфельд Л. М. «Изв. СО АН СССР», Технические науки, вып. 1, 1965.

Kutateladze, S.S., Rozenfel'd, L.M.: Principy ěnergetičeskogo ispol'zovanija geotermal'nych istočnikov,

In: Izvestija. Sibirskoe otdelenie AN SSSR. Serija techničeskich nauk. Novosibirsk, 1965, Nr 1, S. 70 - 80.

⟨Prinzipien der energetischen Verwendung von Geothermalquellen⟩

3. Вуттон У. Р. Перспективы применения пара в комбинированных энергетических циклах, доклад С₁-239. Докл. МИРЭК-VII, 1968.

Vutton, U.R.: Perspektivy primenenija para v kombinirovannyh ěnergetičeskich ciklax, doklad C₁-239.

Doklady. MIREK - VII, 1968.

Wootton, W.R.: The Place of Steam in Combined Power Cycles of the Future. VII Mirovaja ěnergetičeskaja konferencija/World Power Conference. Sekcija /Section C_I. Doklad/Paper 239. Moskva, 20.-24.8.1968, 22 Seiten.

4. Ивс П. С., Хефилл Г. Ф. Факторы, влияющие на применение бинарного цикла в энергосистеме Великобритании, доклад С₁-241. Докл. МИРЭК-VII, 1968.

Ivs, P.S., Chefill, G.F.: Faktory, vlijajušćie na primenenie binarnogo cikla v ěnergosisteme Velikobritanii, doklad C₁-241.

Doklady. MIREK - VII, 1968.

Eaves, P.S.K., Hadrill, H.F.J.: Factors Affecting the Application of Binary Cycle Plant to the C.E.G.B. System.

VII Mirovaja ěnergetičeskaja konferencija/World Power Conference. Sekcija /Section C_I. Doklad/Paper 241. Moskva, 20.-24.8.1968, 21 Seiten.

5. Варгафтик Н. Б. Справ. по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. Физматгиз, М., 1963.

Vargaftik, N.B.:

Spravočnik po teplofizičeskim svojstvam gazov i židkostej.

Moskva: Verlag "Fizmatgiz", 1963.

Engl. Übersetzung: Tables on Thermophysical Properties of Liquids and Gases in Normal and Dissociated States. By N.B. Vargaftik.

Washington: Hemisphere Publ.Co., (1975).

6. Plank R. Handbuch der Kältechnik, Berlin, 1956.

7. «Guide and Date book», New Iork, 1963.

8. Бадилькес И. С. Рабочие вещества и процессы холодильных машин. Госторгиздат, 1962.

Badyl'kes, I.S.:

Rabotie veščestva i processy choolodil'nych mašin.

Moskva: Verlag "Gostorgizdat", 1962.

(Die Arbeitsstoffe und Arbeitsverfahren der Kältemaschinen)

9. Вукалович М. П., Дзампов Б. В., Бабиков Ю. Н. Атомная энергия, т. 24, вып. 3, 1968.

Vukalović, M.P., Dzampov, B.V., Babikov, Ju.N.

In: Atomnaja energija. Moskva, 24 (1968), Nr 3, S. 271 - 273.

Engl.: Thermophysical Properties of Perfluorbenzene.

In: Soviet Atomic Energy. New York, 24 (1968), Nr 3, S. 333 - 335.

Dem Lehrstuhl für technische
Wärmephysik vorgelegt

[27.1.1969]

Stuttgart, den 9.9.1978

übersetzt von

Ottmar Pertschi
(Ottmar Pertschi)
Dipl.-Übersetzer