

DIAGRAMME ZUR KALORISCHEN BEMESSUNG VON BENZOL-DAMPFTURBINEN

Von

A. DONKÓ und GY. EKE

Lehrstuhl für Kalorische Maschinen an der Technischen Universität Budapest

(Eingegangen am 23. Januar 1967)

Vorgelegt von Prof. Dr. D. BRODSZKY

In neuerer Zeit haben sich Forscher und Forschungsanstalten mehrfach mit der Frage befaßt, welche Möglichkeiten zur Verwendung organischer Arbeitsmedien (z. B. Benzol oder Diphenyl) im Dampfkreisprozeß bestehen. Bedeutung kann ihre Anwendung besonders in den Kreisprozessen von Atomkraftwerken erlangen, da diese Medien im Kühlsystem des Reaktors nicht radioaktiv werden. Darüber hinaus haben sie den Vorzug, daß ihre den höheren Temperaturen zugehörigen Sättigungsdrücke wesentlich unter jenen des Wassers liegen.

Neben diesen Vorzügen haben jedoch die organischen Arbeitsmedien auch ungünstige Eigenschaften, die ihrer Anwendung schwer zu überbrückende Hindernisse in den Weg legen.

Über Anregung der Budapester Zentral-Forschungsanstalt für Physik wurde auch hier die Frage studiert, wie die Turbinenabmessungen gestaltet werden müßten und welche Ausgestaltung die wichtigeren konstruktiven Teile zu erhalten hätten. Zur Beantwortung dieser Frage mußten das IS-Diagramm des Benzoldampfes aufgetragen und einige Kennwerte bestimmt werden.

Da die Zielsetzung eng begrenzt war, konnte sich die Arbeit auf die Ergänzung des in der Literaturquelle [1] zur Verfügung stehenden IS-Diagramms durch die Kurven für $v = \text{konstant}$ beschränken.

Das neu aufgetragene und ergänzte IS-Diagramm ist aus der Beilage ersichtlich.

Auf Grund der verfügbaren lückenhaften Unterlagen wurde des folgende einfache Verfahren angewandt:

Anhand der Dampftabellendaten wurden zunächst die Zustandsgleichung und aus dieser zu den Isothermen des IS-Diagramms auf Grund eines bestimmten $v = \text{konstant}$ die Druckwerte ziffernmäßig bestimmt. Hierauf folgte die Interpolation entlang der Isothermen. Zur Kontrolle wurden in das neu aufgetragene IS-Diagramm die den runden Werten des spezifischen Volumens entsprechenden Punkte auch auf Grund der Dampftabellendaten eingezeichnet. Die aus der Zustandsgleichung berechneten Kurvenwerte für $v = \text{konstant}$ zeigten im allgemeinen eine gute Übereinstimmung mit diesen Punkten.

Durch die Interpolation konnten die Fehler der Zustandsgleichungen auf einen engeren Bereich beschränkt werden.

Hierzu sei bemerkt, daß die der Dampftabelle entnommenen Werte des spezifischen Volumens für die Auftragung der Kurven $v = \text{konstant}$ zu wenige Punkte lieferten und daß es sich bei den Isobaren der Dampftabelle und des ursprünglichen IS-Diagramms weder im SI-, noch im technischen System um ganzzahlige Werte handelte.

Den Ausgangspunkt für die Aufstellung der Zustandsgleichung bildete die Beziehung $v = \frac{RT}{P}$. Diese Grundgleichung wurde in Sinne der Literaturangaben [2] durch verschiedene Korrektionsglieder erweitert, durch die einerseits dem Eigenvolumen der Moleküle, andererseits z. B. in der Form $-\frac{C}{T^n}$ dem sekundären Einfluß der Temperatur Rechnung getragen wurde. In bestimmten Bereichen wurde auch ein druckabhängiges Glied eingeführt.

Dieses letztere Glied muß in der Nähe der Grenzkurve und besonders des kritischen Punktes Berücksichtigung finden, während man von ihm in einem Großteil des Überhitzungsfeldes absehen kann.

Bei geringeren Drücken kann man sich im Überhitzungsfeld — bei Benzol unter 1 at — der Zustandsgleichung für ideale Gase bedienen, weil die sekundären Einflüsse vernachlässigt werden dürfen.

Der Auftragung des IS-Diagramms lagen für den überhitzten Dampf drei Gleichungen zugrunde:

1. Im Bereich $p \leq 1$ at die Gleichung

$$v = \frac{RT}{P} \left(R = 10,86 \frac{mkp}{kpK^0} \right)$$

für ideale Gase.

Der Gültigkeitsbereich kann auch so definiert werden, daß die Gleichung für ideale Gase bei Werten von $v \geq 0,5$ m³/kp anwendbar ist.

2. Im Bereich von $p \geq 1$ at und $t \geq t_s + 40^\circ$ C bildete die Callender-Molliersche Gleichung

$$v - v' = \frac{RT}{P} - \frac{C}{T^n} \quad (1)$$

die Berechnungsgrundlage. Sie eignet sich u. a. auch für Wasserdampf bei Werten von $p \leq 20$ at.

In Gl. (1) bezeichnet

v' das spezifische Volumen der flüssigen Phase (für Benzol bei 18° C 0,0013828 m³/kp), während

C und n Konstanten sind, deren Wert für jedes Arbeitsmedium gesondert bestimmt werden muß.

Mit den Dampftabellenwerten und aus den gemittelten Werten aus mehreren Berechnungen ergab sich die Gleichung

$$v = 10,86 \frac{T}{P} - \frac{0,0251}{T^{0,25}} + 0,0013. \quad (2)$$

Eingehende Kontrollberechnungen erbrachten den Beweis, daß das zweite Korrektionsglied bei Drücken von $p \leq 10$ at und bei Temperaturen von $t \geq t_s + 40^\circ \text{C}$ annähernd konstant ist. Die Gl. (2) geht somit in die einfachere Form

$$v = 10,86 \frac{T}{P} - 0,0041 \quad (3)$$

über.

Der Fehler bleibt im allgemeinen unter 5%, ja in den meisten Fällen erhält man noch genauere Ergebnisse, was jedoch den konkreten Zielen dieser Untersuchung nicht entspricht.

3. Im Bereich $p \geq 10$ at und $t \leq 270 \pm 10^\circ \text{C}$ wurde das druckabhängige Glied

$$C_1 \frac{P^n}{T^n}$$

eingeführt.

Aus den Daten der uns vorliegenden Dampftabelle errechnete sich dieses Korrektionsglied für Benzol zu

$$- 1,29 \cdot 10^{19} \frac{\sqrt{P}}{T^9}.$$

Mit diesem Korrektionsglied ergibt sich bei Drücken über 1 at und auch in der Nähe der Grenzkurve als beste Annäherung die Zustandsgleichung

$$v = 10,86 \frac{T}{P} - 0,0041 - 1,29 \cdot 10^{19} \frac{\sqrt{P}}{T^9}. \quad (4)$$

Der Fehler bleibt selbst nahe an der Grenzkurve unter 1,5% und ist im allgemeinen wesentlich kleiner als 1%. Bei Temperaturen über $270 \pm 10^\circ \text{C}$ liefert jedoch die Gleichung (3) genauere Resultate.

Im weiteren wurden im Zuge der Berechnung der Kurven für $v = \text{konstant}$ bei den gegebenen (ganzahligen) ziffernmäßigen Werten des spezifischen Volumens die Temperaturwerte t — den Isothermen des uns vorliegenden IS-Diagramms entsprechend — angenommen und die zugehörigen Druckwerte P bestimmt.

Die so ermittelten Druckwerte waren im allgemeinen nicht ganzzahlig, sie konnten somit in das für ganzzahlige Druckwerte neu aufgetragene IS-

Diagramm nicht eingezeichnet werden. Zur Auftragung der v -Kurven mußten auch die Entropiewerte in den Schnittpunkten der v - mit den t -Kurven bestimmt werden.

Nachdem die Fehler mehrerer Methoden ermittelt worden waren, wurde zur Ermittlung der Entropiewerte folgendes Verfahren gewählt:

Für die Schnittpunkte der dem ermittelten Druck P_x zunächst gelegenen beiden Druckkurven (P_1, P_2) mit der gegebenen Isotherme wurden die ziffermäßigen Werte der Entropie (S_1, S_2) und aus diesen die Entropiezunahme

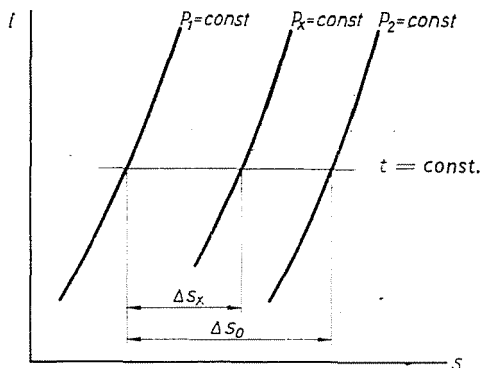


Abb. 1

$\Delta S_0 = S_2 - S_1$ berechnet (Abb. 1). Sodann wurde rechnerisch die Änderung ΔS_x , die den Schnittpunkt der Kurven P_x und t bestimmt, anhand der Formel

$$\Delta S_x = \Delta S_0 \frac{\ln \frac{P_1}{P_x}}{\ln \frac{P_1}{P_2}} \quad (5)$$

ermittelt, in der $P_1 > P_x > P_2$.

Streng genommen, gilt dieser Zusammenhang nur für ideale Gase, dennoch ergab er nach den Dampftabellendaten eine ausreichende Annäherung.

Die genauere Beziehung

$$S = -A \int_{P_1}^{P_2} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P dP + \text{konst.} \quad (6)$$

wurde nur nahe an der Grenzkurve — im Bereich $t \leq t_s + 20^\circ \text{C}$ angewandt.

Mit dem aus der Zustandsgleichung (4) abgeleiteten Zusammenhang $\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_P$ erhält man aus (6) nach Integration für die Entropiezunahme die Beziehung

$$\Delta S = S_2 - S_1 = -AR \ln \frac{P_2}{P_1} - K \frac{1}{T^{10}} [P_2^{3/2} - P_1^{3/2}], \quad (7)$$

$$\text{in der } K = \frac{2}{3} \frac{2,1 \cdot 29 \cdot 10^{19}}{427} = 1,812 \cdot 10^{17}.$$

Mit (7) und den Bezeichnungen der Abb. 1 gestaltet sich die Interpolation wie folgt:

$$\Delta S_x = \Delta S_0 \frac{AR \ln \frac{P_1}{P_x} - K \frac{1}{T^{10}} [P_1^{3/2} - P_x^{3/2}]}{AR \ln \frac{P_1}{P_2} - K \frac{1}{T^{10}} [P_1^{3/2} - P_2^{3/2}]} \quad (8)$$

Läßt man sowohl aus den Zähler als auch aus dem Nenner dieser Beziehung das zweite Glied weg, erhält man die für ideale Gase gültige einfachere Interpolationsformel. Bemerkte sei hier, daß die kontrollehalber vorgenommene Berechnung der Entropieunterschiede selbst in jenem Bereich keine genaue Übereinstimmung mit den Werten des ursprünglichen IS-Diagramms zeigten, in welchem die für ideale Gase gültigen Gleichungen im Sinne der Literaturangaben (1) anwendbar sind. Aus diesem Grunde schien es richtig, die Interpolation möglichst auf einen engeren Bereich zu beschränken. Die Richtigkeit unseres Verfahrens erhellt auch aus der Tatsache, daß die entsprechenden Kurven für $v = \text{konstant}$ die auf Grund der Dampftabellendaten auf der Grenzkurve vermerkten (runden) v -Punkte gut durchlaufen.

Das auf diese Weise berechnete und in neuem Maßstab aufgetragene Diagramm bietet eine befriedigende Grundlage für die kalorische Bemessung der Benzoldampfturbine.

Zur Bemessung benötigt man nun noch den ziffernmäßigen Wert des Isentropenexponenten, des Maximums (ψ_{\max}) der Durchfluß-Funktion und des kritischen Druckverhältnisses. Bei diesen letzteren handelt es sich um Funktionen des Isentropenexponenten.

Genau betrachtet, ist auch κ nicht konstant, so daß die Angabe eines ziffernmäßigen Wertes nur einer groben Annäherung gleichkäme. Obgleich ziffernmäßige Werte bei Dampf nur für den gesättigten und den überhitzten Dampf angegeben zu werden pflegen, wurde von uns auch der Abstand zwischen Expansions- und Grenzkurve berücksichtigt. Zu diesem Zweck

wurden in dem in Frage kommenden Bereich Expansionskurven angenommen und anhand der dem IS-Diagramm entnommenen Daten die κ -Werte, weiterhin auf Grund der allgemein bekannten Formeln auch die zur Düsenbemessung erforderlichen Faktoren berechnet. Sie wurden gemäß Abb. 2 in Abhängigkeit von der Entropie aufgetragen, die den Verlauf der Expansionskurve bestimmt. Auf Grund dieser Kurven und aus der ermittelten Lage der Expansionskurven können die Querschnitte berechnet werden.

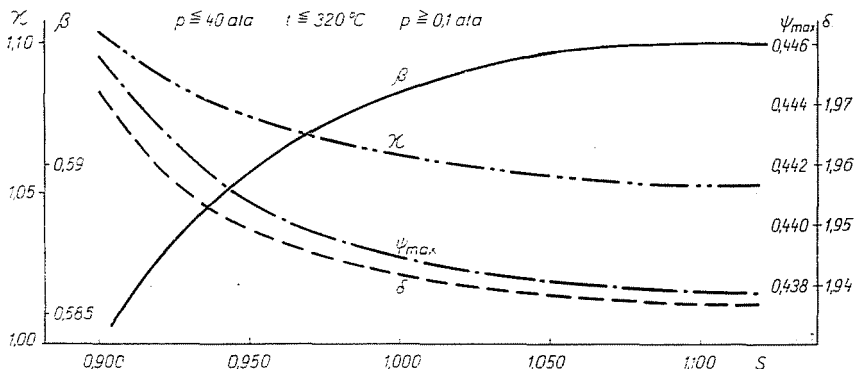


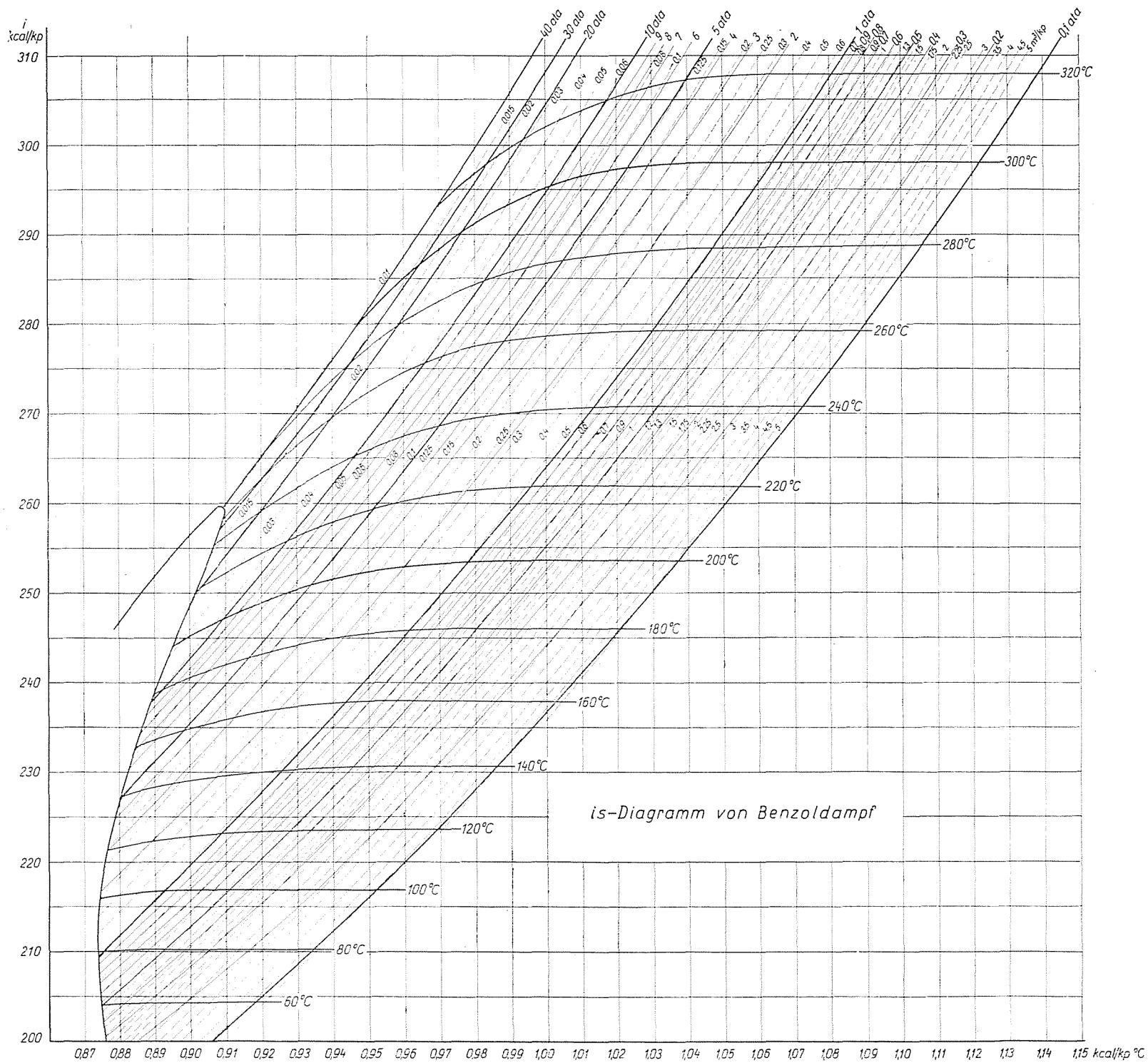
Abb. 2. Zusammenhang zwischen kritischem Druckverhältnis (β), Isentropenexponenten (κ), Maximum der Druckverhältnis-Funktion (ψ_{\max}) und δ

Zusammen mit den oben erwähnten stehen damit auch jene Daten zur Verfügung, die man zur Bemessung der Strömungsquerschnitte in einer mit Benzoldampf betriebenen Turbine benötigt.

Auf Grund des beschriebenen IS-Diagramms und der angeführten Daten wurden die Entwürfe für eine mit Benzol zu betreibende Versuchsturbine erstellt.

Bezeichnungen und Maßeinheiten

I kcal/kp	Enthalpie
S kcal/kp $^{\circ}$ K	Entropie
P kp/m 2	Absolutdruck
p at	Absolutdruck
v m 3 /kp	spezifisches Volumen
t $^{\circ}$ C	Temperatur
T $^{\circ}$ K	absolute Temperatur
R $\frac{\text{mkp}}{\text{kp}^{\circ}\text{K}}$	allgemeine Gaskonstante
κ	Isentropenexponent
$\beta = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}$	kritisches Druckverhältnis



Beilage I. Das IS-Diagramm des Benzoldampfes

$$\begin{aligned} \psi_{\max} & \text{ Maximum der Durchfluß-Funktion} \\ \delta & = \sqrt{2g_n} \psi_{\max} \\ g_n & = 9,81 \frac{m}{s^2} \text{ normale Erdbeschleunigung} \\ A & = \frac{1}{427} \frac{\text{kcal}}{\text{mkp}} \text{ Wärmeäquivalent der mechanischen Arbeit} \end{aligned}$$

Den Berechnungen liegt das technische Maßsystem zugrunde. Als eines seiner Grundeinheiten wird die Kraft (Einheit: Kilopond) betrachtet; die Mengen der Medien sind mit ihrem Normalgewicht angegeben.

Zusammenfassung

Für die Bewältigung der Kreisprozesse in Atomkraftwerken wurde mehrfach die Verwendung organischer Arbeitsmedien (Benzol, Diphenyl usw.) vorgeschlagen. Auch Verfasser haben die Bestimmung der Abmessungen und die Ausgestaltung der wichtigeren Konstruktionsteile einer Benzoldampfturbine studiert. Hierzu benötigt man das vollständige IS-Diagramm des Benzoldampfes. Die vorliegende Arbeit beschreibt das auf Grund unvollständiger Schrifttumsangaben von ihnen aufgetragene IS-Diagramm sowie das hierbei angewandte vereinfachte Verfahren. Schließlich werden auch die zur Bestimmung der Turbinenquerschnitte erforderlichen Faktoren angegeben.

Literatur

1. Gosudarstvennoy Komitet po Ispole Atomnoj Energii SSSR: Ispolsowanie difenila i benzola v kotschestve rabotschego tiela jadernih energetitscheskih ustanowok. Moskau 1965.
2. PLANCK: Handbuch der Kältetechnik II. Berlin 1949.
3. D'ANS LAX: Taschenbuch für Chemiker und Physiker, Berlin 1949.
4. ORGANICK, E. I., STUDHALTER, W. R.: Thermodynamic Properties of Benzene. Chem. Eng. Progr. vol. 44. No. 11. 1948.

András DONKÓ }
György EKE } Budapest, XI. Műegyetem rkp. 7. Ungarn.