

WOJCIECH SITKO, CZESŁAW WOŹNIAK, SZCZEPAN WYRA

METODYKA OBLICZANIA LICZB WPŁYWOWYCH
DLA RUROCIĄGÓW SAMOKOMPENSACYJNYCH

Streszczenie. Autorzy przedstawili szereg praktycznych uwag, dotyczących obliczania liczb wpływowych w przestrzennych rurociągach. Praca wynika z prac wykonywanych przez autorów dla potrzeb "Energoprojektu" Warszawa.

WSTĘP

Projektowane systemy rurociągów samokompensacyjnych, jako układy złożone z prętów prostych oraz zakrzywionych posiadają zazwyczaj skomplikowaną konfigurację przestrzenną. Decydującym czynnikiem przy wymiarowaniu tych ustrojów są wpływy termiczne. Stosowna literatura (np. [1], [2]) przytacza szereg analitycznych sposobów obliczania sił i momentów w takich schematach, rozgraniczając zazwyczaj wpływy termiczne od wpływów mechanicznych (ciężar własny, napór wiatru itp.). Wspomniane metody charakteryzują się przeważnie małą operatywnością, zmuszając statyka do żmudnej i czasochłonnej pracy rachunkowej. Zagadnienie niewątpliwie komplikuje fakt, że w tej dziedzinie trudno jest opracować metody uproszczone, w dostatecznym stopniu uwzględniające przestrzenny charakter pracy ustroju. Czynione są zatem poszukiwania nowych, ścisłych i bardziej operatywnych sposobów obliczeń. Takim przykładem jest metoda macierzowo-iteracyjna [3], która w znacznym stopniu pozwala na automatyzację obliczeń oraz umożliwia prowadzenie bieżącej kontroli. Tok postępowania w tej pracy można podzielić na dwa etapy:

- I. obliczenia wstępne (aż do momentu otrzymania macierzy liczb wpływowych),
- II. obliczenia statyczne.

Obliczenia wstępne wymagają dużego nakładu pracy, skrupulatności oraz konsekwencji w przyjmowaniu i przekształcaniu parametrów związanych z rurociągiem. Celowym więc wydaje się podanie szeregu praktycznych uwag, które umożliwić mogą usprawnienie procesu obliczeń.

Celem zatem niniejszej pracy jest usystematyzowanie metody-ki obliczeń części statyczno-wytrzymałościowej, do momentu uży-skania macierzy liczb wpływowych układu równań kanonicznych, z-jednoczesnym podaniem wyczerpującego komentarza oraz wskaza-niem możliwych uproszczeń.

Parametry wchodzące w skład liczb wpływowych można podzie-lić na:

- a) współczynniki geometryczne określające położenie i cechy wymiarowe danego elementu rurociągu, oraz
- b) współczynniki wytrzymałościowe, których wartości oblicza się według przytoczonych w [1] wzorów.

Wspomniane wzory wymienione są w niniejszej pracy na stronach 72, 73 i 74.

METODYKA OBLICZANIA MACIERZY LICZB WPŁYWOWYCH

Przygotowanie schematu obliczeniowego

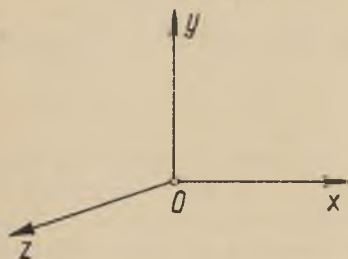
Obliczany system rurociągów dzielimy na składowe gałęzie, z-jednoczesną ich numeracją. Gałąź stanowić będzie część rurociągu pomiędzy dwoma węzłami lub pomiędzy węzłem a punk-tem stałym (zanocowaniem lub podporą). Każdą z gałęzi dzielimy na e l e m e n t y s k ł a d o w e biorąc pod uwagę konfi-gurację odcinka oraz jego sztywność (EI). Określone w ten spo-sób elementy proste i łukowe opatrzone są numeracją 1.1, 1.2, 1.3 itd. (gdzie pierwszy wskaźnik określa gałąź, drugi element).

Układ współrzędnych

Schemat statyczny rozpatrywać będziemy w prostokątnym ukła-dzie odniesienia (w przytoczonych dalej wyjaśnieniach posługi-wać się będziemy tzw. "układem pra-ym" rys. 1).

Celem uproszczenia obliczeń wpro-wadzamy dwa jednoimienne układy współrzędnych:

- a) główny układ współrzędnych (x, y, z),
- b) pomocnicze układy współrzęd-nych (x', y', z').

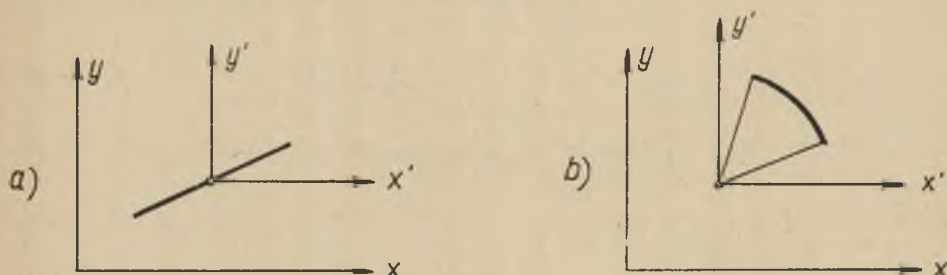


Rys. 1

Początek głównego układu współrzęd-nych zasadniczo można przyjąć w do-

wolnym punkcie, dla rurociągów o wielu węzłach - najkorzystniej w jednym ze środkowych węzłów systemu.

Pomocnicze układy współrzędnych (x' , y' , z') będące równoległym przesunięciem układu głównego, przyłożone są w środkach elementów liniowych (odcinków prostych) i w środkach krzywizny elementów łukowych [rys. 2].



Rys. 2

Współczynniki geometryczne (charakteryzujące położenie elementu).

- 1) Współczynniki "a" i "b" określają położenie środka odcinka prostego lub środka krzywizny łuku w głównym układzie współrzędnych. Pełny obraz możliwych kombinacji współczynników w układzie przestrzennym pokazano na rys.3. Zmiana indeksów przy współczynnikach określających osie współrzędnych zgodna jest z cykliczną zmianą. Cykliczna zmiana tego typu obowiązuje w dalszych przekształceniach. Związki zachodzące pomiędzy współczynnikami "a" i "b", współrzędnymi układu głównego i współrzędnymi układu pomocniczego łatwo można ustalić (rys. 3); dla elementu leżącego w płaszczyźnie $z = \text{const}$:

$$x = a_x + x'$$

$$y = b_y + y'$$

w płaszczyźnie $x = \text{const}$:

$$y = a_y + y'$$

$$z = b_z + z'$$

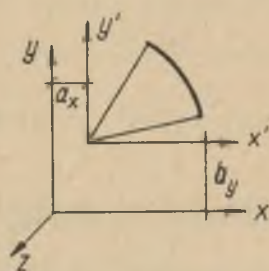
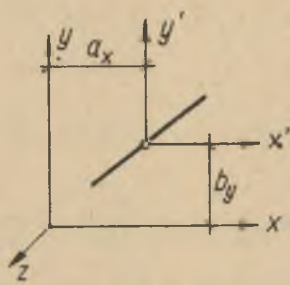
w płaszczyźnie $y = \text{const}$:

$$z = a_z + z'$$

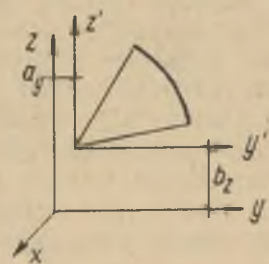
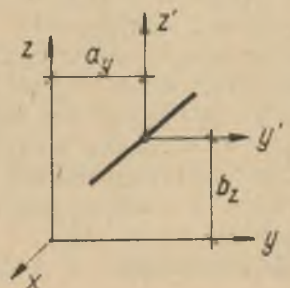
$$x = b_x + x'$$



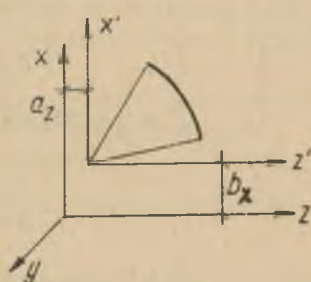
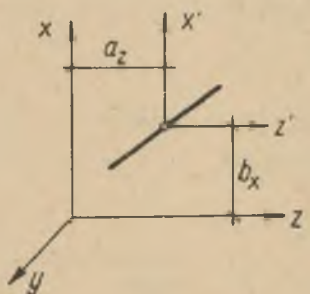
Dla elementu w płaszczyźnie $z=\text{const.}$



Dla elementu w płaszczyźnie $x=\text{const.}$

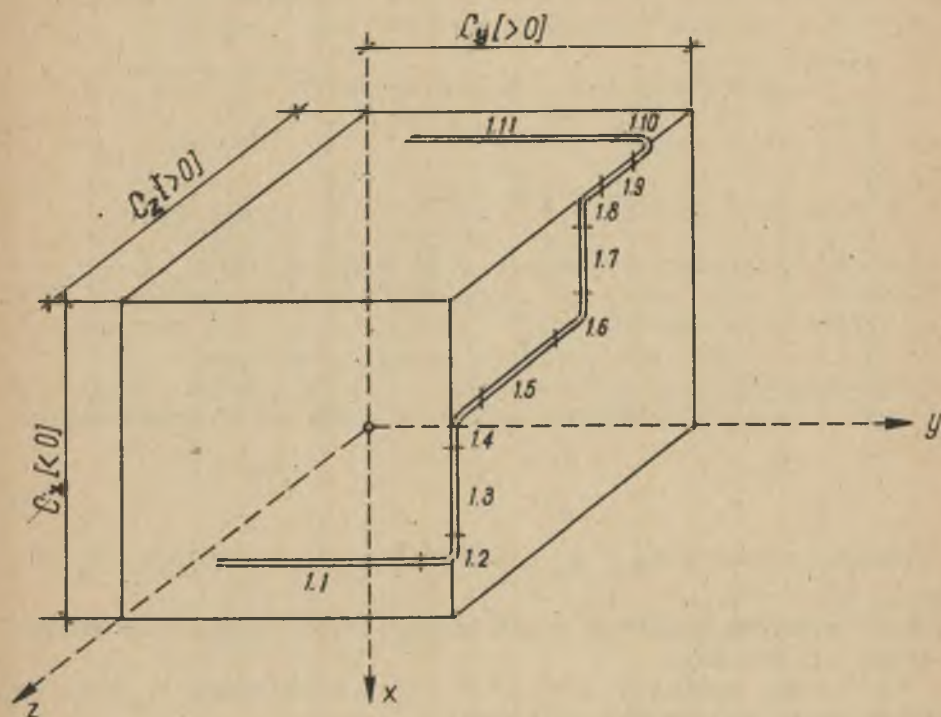


Dla elementu w płaszczyźnie $y=\text{const.}$



Rys. 3

- 2) Współczynnik "c". Współczynnik $c(c_x, c_y$ lub $c_z)$ określa odległość (pomnożoną przez +1 lub -1) pomiędzy płaszczyzną główną, a płaszczyzną pomocniczą, w której leży rozpatrywany element rurociągu



Rys. 4

Jak pokazano na rysunku 4 poszczególne elementy leżą w płaszczyznach określonych przez:

$c_x (< 0)$ 1.1 1.2

$c_y (> 0)$ 1.4 1.5 1.6 1.7 1.8

$c_z (> 0)$ 1.10 1.11

Dwuznaczność w określeniu płaszczyzny, w której element leży powstaje przy odcinkach 1.3 i 1.9.

Dla 1.3 w rachubę wchodzi płaszczyzny określone przez c_z i c_y a dla 1.9 c_x i c_y .

Sposób określania kątów ϕ i α

Występujący we współczynnikach wytrzymałościowych (przytoczonych na str. 73 i 74) kąt ϕ jest kątem rozwarcia łuku, mierzonym w radianach.

Kąt α zawarty jest pomiędzy dodatnim zwrotem

osi x' w płaszczyźnie $z = \text{const} = c_z$

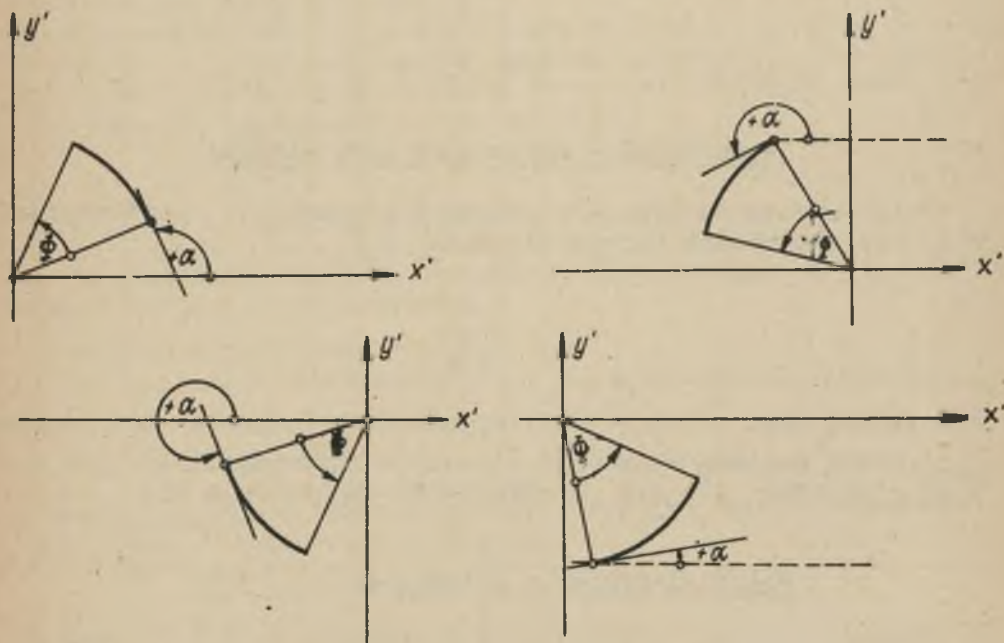
osi y' " $x = \text{const} = c_x$

osi z' " $y = \text{const} = c_y$

a styczną do początku łuku (dla elementów łukowych) (rys. 7).

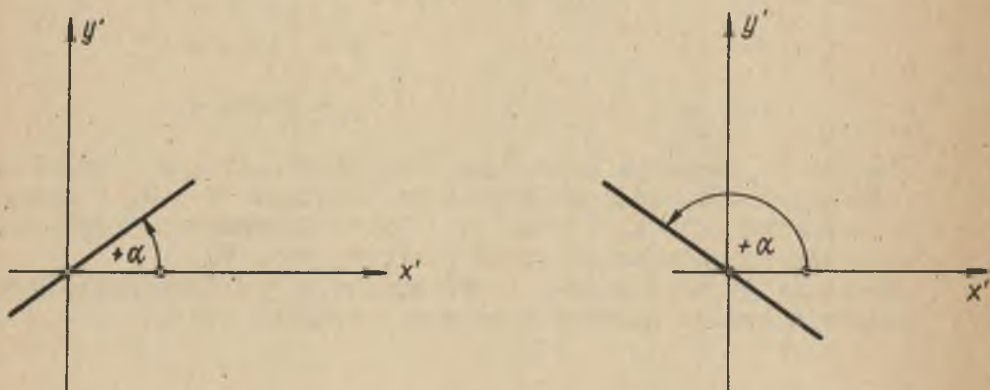
Dla elementów będących odcinkami prostymi $\phi = 0$, a kąt α odmierzamy od osi x' , y' lub z' (jak w elementach łukowych) do kierunku wyznaczonego przez odcinek (rys. 8).

Dodatnią wartość kąta α odmierzamy w kierunku przeciwnym, ujemną w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara.



Rys. 7

Pojęcie początku łuku jest związane z kierunkiem całkowania. Współczynniki wytrzymałościowe są efektem całkowania pewnych wyrażeń w analitycznej metodzie i ustalenie kierunku całkowania jest sprawą bardzo istotną. Kierunek całkowania jest zgodny z odkładanym dodatnim kątem α i taki należy stosować w obliczanych schematach. Na rys. 7 początek każdego z łuków jest wyraźnie zaznaczony.



Rys. 8

Wprowadzenie sztywności porównawczej

Współczynnik Q określa stosunek sztywności porównawczej $E_o I_o$ do sztywności danego elementu $E_n I_n$.

$$Q = \frac{E_o I_o}{E_n I_n}$$

Korzystnie jest przyjąć jako sztywność porównawczą $E_o I_o$, sztywność, którą posiada większość elementów rurociągu. Dla tych bowiem elementów $Q = 1,0$ i obliczenia upraszczają się.

Wpływ elementów o sztywności $EI \rightarrow \infty$

Elementy o dużej sztywności w porównaniu z $E_o I_o$ można pominąć bez szkody dla dalszych obliczeń. Elementy te wpływają tylko na wartość współczynników metrycznych a , b i c .

Zestawienie pomocniczych wielkości

Jak widać z podanych współczynników wytrzymałościowych wielokrotnie powtarzają się pewne wielkości wspólne dla wszystkich elementów łukowych tej samej sztywności. Wielkości te:

$$R, R^2, R^3$$

$$kQR, kQR^2, kQR^3$$

$$1,3 QR^2, 1,3 QR^3,$$

oraz liczby Kármána $K = \frac{1}{k}$, $k = 1 + \frac{9}{12h^2 + 1}$ gdzie $h = \frac{t \cdot R}{r_m^2}$

t - grubość ścianki

R - promień krzywizny łuku

r_m - średni promień rury

korzystnie jest zebrać w pomocniczej tablicy, co znacznie upraszcza dalszy ciąg obliczeń.

Po wyznaczeniu współczynników geometrycznych ($a, b, c, \alpha, \phi, R, L$ gdzie L oznacza długość elementu liniowego), przystępujemy do obliczania współczynników wytrzymałościowych według wzorów podanych na stronicach 72, 73 i 74.

Dokładność prowadzenia obliczeń

Za jednostkę długości korzystnie jest przyjąć m i obliczenia prowadzić z dokładnością:

współczynniki geometryczne

	o wymiarach	$[m]$	- 4 miejsca po przecinku
"	"	$[m^2]$	- 2 " " "
"	"	$[m^3]$	- 1 miejsce " "

współczynniki wytrzymałościowe - 2 miejsca po przecinku niezależnie od wymiarów jednostek.

Tablice zestawcze

Dla przejrzystości obliczeń oraz kontroli otrzymanych wartości, współczynniki wytrzymałościowe zestawiamy w tablicy (tablica II). W miarę zmiany parametrów geometrycznych, współczyn

niki wytrzymałościowe kolejnych elementów gałęzi ulegają sukcesywnemu zwiększeniu lub zmniejszeniu, co pozwala korygować ewentualne pomyłki. Dodając sumy poszczególnych współczynników z odpowiednich płaszczyzn otrzymujemy elementy macierzy liczb wpływowych dla poszczególnych gałęzi (tablica III).

Jeżeli rurociąg jest złożony z "n" gałęzi, otrzymujemy tyle tablic typu III. Sumując odpowiednie - jednoimienne liczby wpływowe z poszczególnych gałęzi schodzących się w jednym węźle, otrzymujemy macierz główną (dla danego węzła):

$$[M] = \begin{bmatrix} A_{xx} & A_{xy} & A_{xz} & B_{xx} & B_{xy} & B_{xz} \\ \cdot & A_{yy} & A_{yz} & B_{yx} & B_{yy} & B_{yz} \\ \cdot & \cdot & A_{zz} & B_{zx} & B_{zy} & B_{zz} \\ \cdot & \cdot & \cdot & C_{xx} & C_{xy} & C_{xz} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & C_{yy} & C_{yz} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & C_{zz} \end{bmatrix}$$

symetryczną względem głównej przekątnej.

Macierz M z kolumną przemieszczeń [w] oraz kolumną sił [P] tworzy relację:

$$[P] = [M] \cdot [w]$$

Określenie powyższego związku kończy I etap obliczeń (tzw. obliczenia wstępne). Dalszy proces przebiega zgodnie z relacjami podanymi w pracy 3.

Zestawienie współczynników wytrzymałościowych dla elementów liniowych *)

$$s = k Q L$$

$$u = (k \cos^2 \alpha + 1,3 \sin^2 \alpha) Q L$$

$$q = (1,3 - k) \sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot Q L$$

$$v = (1,3 \cos^2 \alpha + k \sin^2 \alpha) Q L$$

$$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} [m]$$

*) Wg "Design of Piping Systems" The M.W. Kellogg Company, New York, John Wiley & Sons Inc.

$$s_a = a s$$

$$s_b = b s$$

$$u_o = a u - b q$$

$$v_o = b v - a q$$

$$u_{oo} + v_{oo} = a^2 u + b^2 v - 2abq + u_{oo} + v_{oo}$$

$$u_{oo} + v_{oo} = \frac{kQL^3}{12}$$

$$s_{aa} = a^2 s + \frac{k Q \cos^2 \alpha L^3}{12}$$

$$s_{bb} = b^2 s + \frac{k Q \sin^2 \alpha L^3}{12}$$

$$s_{ab} = abs + k Q \sin \alpha \cos \alpha \frac{L^3}{12}$$

gdzie:

a, b - współczynniki metryczne (objaśnienia w tekście)

$K = \frac{1}{k}$ - liczba Kármána,

L - długość elementu,

α - kąt nachylenia elementu (objaśnienie w tekście),

Q - stosunek sztywności porównawczej do sztywności elementu.

Zestawienie współczynników wytrzymałościowych dla elementów łukowych *)

$$c_a = \cos \alpha - \cos(\alpha + \phi)$$

$$c_{aa} = 0,5 \phi - 0,25 \sin 2(\alpha + \phi) - \sin 2\alpha$$

$$c_b = \sin \alpha - \sin(\alpha + \phi)$$

$$c_{bb} = 0,5 \phi + 0,25 \sin 2(\alpha + \phi) - \sin 2\alpha$$

$$c_{ab} = 0,25 \cos 2(\alpha + \phi) - \cos 2\alpha$$

$$s = kQR (c_{aa} + c_{bb}) = kQR \phi$$

$$u = QR (1,3 c_{aa} + k c_{bb})$$

$$q = (k - 1,3) Q R c_{ab}$$

$$v = Q R (1,3 c_{bb} + k c_{aa})$$

*)

Wg "Design of Piping Systems"

$$\begin{array}{ll}
 s_a = a s + s'_a, & s'_a = k Q R^2 c_a \\
 s_b = b s + s'_b, & s'_b = k Q R^2 c_b \\
 u_o = a u - b q + u_o, & u_o = 1,3 Q R^2 c_a \\
 v_o = b v - a q + v_o, & v_o = 1,3 Q R^2 c_b
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} s_a \\ s_b \\ u_o \\ v_o \end{array}} \right\} [m^2]$$

$$u_{oo} + v_{oo} = a^2 u + b^2 v - 2abq + 2au_o + 2bv_o + 1,3 Q R^3 (c_{aa} + c_{bb})$$

$$\begin{array}{ll}
 s_{aa} = a^2 s + 2as_a + s'_{aa}, & s'_{aa} = k Q R^3 c_{aa} \\
 s_{bb} = b^2 s + 2bs_b + s'_{bb}, & s'_{bb} = k Q R^3 c_{bb} \\
 s_{ab} = abs + a s_b + bs_a + s'_{ab}, & s'_{ab} = k Q R^3 c_{ab}
 \end{array}
 \left. \vphantom{\begin{array}{l} s_{aa} \\ s_{bb} \\ s_{ab} \end{array}} \right\} [m^3]$$

gdzie:

a, b, Q, k jak we współczynnikach dla elementów liniowych
 R - promień łuku

\varnothing, α kąty charakteryzujące krzywiznę (objaśnienie w tekście).

TABLICA II

Płaszczyzna	x				y	
Numer elementu	1.1.	1.2.	Σ		
Szkio						
K						
Q						
R						
L						
a						
b						
c						
α						
ϕ						
$J^2/12$						
S						
s_a						
s_b						
q						
cq						
u						
u_o						
cu						
v						
v_o						
cv						
$s_{ab} + c^2 q$						
cu_o						
cv_o						
$s_{aa} + c^2 v$						
$s_{bb} + c^2 u$						
$u_{oo} + v_{oo}$						

TABLICA III

Pz.	M _x	M _y	M _z	P _x	P _y	P _z
x	+S				+S ₀	-S _a
y	+u		+q	+o _q	+ ¹ _o	-CU
z	+v	+q		- ² _s	+Cv	-v
Σ	+A _{xx}	+A _{xy}	+A _{xz}	+B _{xx}	+B _{xy}	+B _{xz}

x	+v		+q	-v ₀	-o _q	+c ¹
y	+S			-S _a		+S _b
z	+u			-CU	+o _q	+u ₀
Σ	+A _{yy}		+A _{yz}	+B _{yx}	+B _{yy}	+B _{yz}

x	+u		+S _a	-CU	+o _q
y	+v		+Cv	-v ₀	-o _q
z	+S		+S _b	- ² _s	
Σ	+A _{zz}		+B _{zx}	+B _{zy}	+B _{zz}

z	+u ₀₀ +v ₀₀		-CU ₀	-Cv ₀
y	+S _{aa} +C ² _v		-Cv ₀	-S _{ab} -C ² _q
x	+S _{bb} +C ² _u		-S _{ab} -C ² _q	-CU ₀
Σ	+u _{xx}		+C _{xy}	+C _{xz}

x	+S _{bb} +C ² _u		-S _{ab} -C ² _q
y	+u ₀₀ +v ₀₀		-CU ₀
z	+S _{aa} +C ² _v		-Cv ₀
Σ	+C _{yy}		+C _{yz}

x	+S _{aa} +C ² _v	
y	+S _{bb} +C ² _u	
z	+u ₀₀ +v ₀₀	
Σ	+C _{zz}	

LITERATURA

- [1] Design of Piping Systems The M.W. Kellogg Company New York. John Wiley & Sons, Inc.
- [2] SILBERING L.: Obliczanie wytrzymałościowe rurociągów, PWN Warszawa 1959.
- [3] WOŹNIAK Cz.: Statyka przestrzennych rozgałęzionych rurociągów samokompensacyjnych. Rozprawy Inżynierskie 1, 11 (1963)

МЕТОДИКА ВЪЧИСЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ
ВЛИЯНИЯ АВТОКОМПЕНСАЦИОННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

С о д е р ж а н и е

В статье представлен способ систематизации методики статических расчётов автокомпенсационных трубопроводов матрично-итерационным способом [3], до момента получения матрицы коэффициентов влияния. Одновременно приводятся примечания с указанием возможных упрощений.

DESIGN OF INFLUENCE NUMBERS FOR SPATIAL
BRANCHED SELF - COMPENSATING PIPE LINES

S u m m a r y

In the paper the calculation procedure of determining the influence numbers for spatial branched self compensating pipe lines has been systematized. In the detailed commentary the possibility of some symplifications in the procedure has been analysed.