

## ANALIZA PODSTAWOWYCH ŹRÓDEŁ BŁĘDÓW PRZY POMIARZE NATĘŻENIA PRZEPŁYWU METODĄ ZWĘŻKOWĄ

*Źródła błędów pomiaru natężenia przepływu oraz wyznaczenia ich wartości liczbowych na podstawie dokumentów normalizacyjnych. Dla błędów powodowanych zmianą gęstości czynnika mierzonego podano metody normalizowania ich wartości.*

### 1. Wstęp

We współczesnej technice pomiaru i regulacji natężenia przepływu, metoda zwężkowa odgrywa coraz większą rolę dominującą ze względu na jej powszechność. Stosowana jest zarówno w realizacji procesów technologicznych, jak też w rozliczeniach bilansowych oraz przy kupnie i sprzedaży przede wszystkim gazu przy technologicznej i gazów opałowych. Jeśli więc zważy się, że dokładność pomiaru lub regulacji natężenia i ilości przepływu może decydować o jakości produktu, na pewno zaś decyduje o kosztach, w przypadku rozliczeń przy zakupie lub sprzedaży, szczególnie gdy przedmiotem transakcji jest para technologiczna lub gaz opałowy, znaczenie błędu pomiaru nabiera istotnego sensu.

Warto tu podać przykładowo dane według W. Ohnesorge [19] dotyczące zakupu gazu ziemnego przez RFN. Wprowadzie dane te dotyczą sytuacji sprzed ok. 10 lat, tym nie mniej z pewnością są jeszcze bardziej wymowne teraz, w okresie kryzysu energetycznego. Otóż przy ilości i cenie importowanego przez RFN gazu ziemnego, błąd pomiaru 1% na niekorzyść kupujących naraża ich na straty 10 mln marek w skali rocznej. Podwyższenie dokładności pomiaru o 0,1% zmniejsza więc straty o 1 mln marek!

Znane są w kraju procesy arbitrażowe z powodu różnych wyników pomiarów u dostawcy i odbiorcy jak również należy mieć na względzie to, że Polska również będzie importować znaczne ilości gazu ziemnego, po uruchomieniu rurociągu orenburskiego.

Reasumując, można stwierdzić, że błędy pomiaru przy metodzie zwężkowej, to nie tylko problem technologiczny, to również problem ekonomiczny.

W wielu przypadkach błędy pomiaru natężenia i ilości przepływu metodą zwężkową nie są dostatecznie analizowane i eliminowane. W ramach niniejszego opracowania podjęto próbę analizy źródeł błędów występujących przy zwężkowej metodzie pomiaru natężenia przepływu, z równoczesnym zwróceniem uwagi na możliwe sposoby zmniejszania ich wartości.

### 2. Charakterystyka ogólna błędów pomiaru natężenia przepływu i jego źródeł

Ogólna, znana zależność, z której oblicza się masowe natężenie przepływu przy stosowaniu metody zwężkowej, ma postać

$$M = k \cdot L \cdot \epsilon \cdot d^2 \sqrt{\Delta p \cdot \rho}$$

11

gdzie:

- M — masowe natężenie przepływu,
- k — współczynnik liczbowy o wartości zależnej od przyjętych jednostek miar wielkości M, d,  $\Delta p$ ,  $\rho$ ,
- L — liczba przepływu,
- e — liczba ekspansji,
- d — średnica otworu zwężki,
- $\Delta p$  — ciśnienie różnicowe,
- $\rho$  — gęstość mierzonego płynu.

W przypadku objętościowego natężenia przepływu  $\dot{V}$ , jest stosowany wzór o postaci

$$\dot{V} = k L e u^2 \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \quad /2/$$

Z metrologicznego punktu widzenia, pomiar natężenia przepływu określonego wzorem /1/ lub /2/, jest realizowany metodą pośrednią. Wyznaczenie błędu pomiaru wielkości M lub  $\dot{V}$  sprowadza się więc do obliczenia błędu pomiaru pośredniego. Zgodnie z rachunkiem błędów [18], błąd pomiaru pośredniego wielkości  $Y = F(X_1, X_2 \dots X_m)$  można obliczyć stosując wzór

$$\delta_Y = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial X_1}\right)^2 \delta_1^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial X_2}\right)^2 \delta_2^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial X_m}\right)^2 \delta_m^2} \quad /3/$$

gdzie:  $\frac{\partial F}{\partial X_i}$  — cząstkowe pochodne funkcji F względem poszczególnych zmiennych  $X_i$ , a wyrażenia  $\frac{\partial F}{\partial X_i} \delta_i$  — błędy cząstkowe.

Wzór powyższy umożliwia obliczanie przypadkowych błędów bezwzględnych. W przypadku dostosowania go do obliczania błędów względnych, każde z wyrażeń podpierwiastkowych  $\left(\frac{\partial F}{\partial X_i} \delta_i\right)^2$  należy pomnożyć przez odwrotność kwadratu funkcji F, czyli przez wyrażenie  $[F(X_1, X_2 \dots X_m)]^{-1}$ .

Wzór /3/ można stosować zarówno w przypadku gdy  $\delta_i$  jest błędem średnim wielkości  $X_i$ , jak też i dla przypadku gdy  $\delta_i$  jest błędem granicznym wielkości  $X_i$ . Jako wynik otrzymujemy wtedy odpowiednio  $\delta_Y$  jako błąd średni, lub jako błąd graniczny.

Również ten wzór można stosować do granic błędów przypadkowych wyznaczonych w jakikolwiek inny sposób (podawanych zwykle ze znakami  $\pm$ ). Natomiast w żadnym przypadku nie może być on stosowany do błędów systematycznych.

Dość często aby zmniejszyć pracę obliczeniową wyznacza się błędy graniczne przy pomiarach pośrednich stosując wzór

$$s = \pm \left[ \left| \frac{\partial F}{\partial X_1} \cdot e_1 \right| + \left| \frac{\partial F}{\partial X_2} \cdot e_2 \right| + \dots + \left| \frac{\partial F}{\partial X_m} \cdot e_m \right| \right] \quad /4/$$

W powyższym wzorze symbolami  $e_1, e_2 \dots e_m$  oznaczono błędy wielkości  $X_1, X_2 \dots X_m$  mierzonych bezpośrednio, przyjmując je jako błędy graniczne, pomimo że w swojej istocie są konkretnymi odchyleniami wyniku pomiaru, od wartości poprawnej. Powyższa metoda jest stosowana również przy obliczaniu błędu granicznego względnego.

Wartości liczbowe dla przypadku błędu granicznego obliczone według wzoru /3/ i /4/ różnią się, przy czym różnica rośnie szybko ze wzrostem liczby błędów cząstkowych.

Wykorzystując powyższe rozważania do wyprowadzenia wzoru umożliwiającego obliczenie błędu pomiaru natężenia przepływu, przyjmuje się założenie, że liczba przepływu L zależy tylko od rodzaju zwężki i jej modułu, a mianowicie

$$L = b' + 0,4 m^2 \quad \text{dla kryz}$$

$$L = b'' + 0,6 m^2 \quad \text{dla dysz}$$

gdzie:

$b'$  i  $b''$  – stałe charakterystyczne dla danego rodzaju zwężki,  
 $m$  – moduł zwężki.

Uśredniając wartości współczynników liczbowych w powyższych zależnościach uzyska się [1]

$$L = b + 0,5 m^2$$

Po wstawieniu powyższego wyrażenia na liczbę przepływu do wzoru /1/, przyjmuje on postać

$$\dot{M} = k(b + 0,5 m^2) \cdot \epsilon d^2 \sqrt{\Delta p \cdot \varsigma} \quad /5/$$

Wyznaczając przez różniczkowanie, na podstawie wzoru /5/ błędy cząstkowe względne otrzymano następujące zależności:

$$\frac{1}{\dot{M}} \cdot \frac{\partial \dot{M}}{\partial b} = \delta_b = \frac{\delta_b}{b + 0,5 m^2} = \frac{\delta_L}{L} = \delta_L$$

przyjęto  $\frac{\delta_b}{L} = \frac{\delta_L}{L}$

$$\frac{1}{\dot{M}} \cdot \frac{\partial \dot{M}}{\partial \epsilon} \cdot \delta_\epsilon = \frac{\delta_\epsilon}{\epsilon} = \delta_\epsilon$$

$$\frac{1}{\dot{M}} \cdot \frac{\partial \dot{M}}{\partial D} \cdot \delta_D = \frac{-2 m^2}{L} \cdot \frac{\delta_D}{D} = -2 \frac{m^2}{L} \cdot \delta_D$$

przyjęto  $b + 0,5 m^2 = b + 0,5 \frac{d^4}{D^4}$

$$\frac{1}{\dot{M}} \cdot \frac{\partial \dot{M}}{\partial d} \cdot \delta_d = 2 \left(1 + \frac{m^2}{L}\right) \frac{\delta_d}{d} = 2 \left(1 + \frac{m^2}{L}\right) \delta_d$$

$$\frac{1}{\dot{M}} \cdot \frac{\partial \dot{M}}{\partial \Delta p} \cdot \delta_{\Delta p} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\delta_{\Delta p}}{\Delta p} = \frac{1}{2} \cdot \delta_{\Delta p}$$

$$\frac{1}{\dot{M}} \cdot \frac{\partial \dot{M}}{\partial \varsigma} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\delta_\varsigma}{\varsigma} = \frac{1}{2} \cdot \delta_\varsigma$$

Wzór dla obliczenia średniego błędu względnego pomiaru natężenia przepływu przyjmie postać

$$\delta_{\dot{M}} = \delta_V = \sqrt{\delta_L^2 + \delta_\epsilon^2 + 4 \left(\frac{m^2}{L}\right)^2 \delta_D^2 + 4 \left(1 + \frac{m^2}{L}\right)^2 \delta_d^2 + \frac{1}{4} \delta_{\Delta p}^2 + \frac{1}{4} \delta_\varsigma^2} \quad /6/$$

gdzie:

$\delta$  – średni błąd bezwzględny,

$\delta$  – średni błąd względny.

Graniczny błąd względny uzyska się, mnożąc obliczone według wzoru /6/ wartości  $\bar{\delta}_M$  lub  $\bar{\delta}_V$  przez 2 (dwusigmowy przedział ufności), czyli

$$\bar{S}_M = \bar{S}_V = 2\bar{\delta}_M = 2\bar{\delta}_V$$

lub podstawiając do wzoru /6/ zamiast błędów średnich  $\bar{\delta}$ , błędy graniczne  $\bar{S}$

$$\bar{S}_M = \bar{S}_V = \sqrt{S_L^2 + S_e^2 + 4\left(\frac{m}{L}\right)^2 \cdot S_D^2 + 4\left(1 + \frac{m}{L}\right)^2 S_d^2 + \frac{1}{4} S_{\Delta p}^2 + \frac{1}{4} S_c^2} \quad /7/$$

Przy założonym przedziale ufności, prawdopodobieństwo przekroczenia wartości błędu  $\bar{S}_M$  lub  $\bar{S}_V$  obliczonego według wzoru /7/ nie przekracza 5%.

Rozważmy czynniki wpływające na wartość liczbową granicznego błędu pomiaru natężenia przepływu, analizując błędy wielkości składowych.

#### *Błąd liczby przepływu*

Przy doświadczalnym wyznaczaniu wartości liczby przepływu dla zwęzek znormalizowanych, były stosowane odcinki pomiarowe proste na długości do 100D przed zwężką, o stałym przekroju poprzecznym i gładkiej powierzchni wewnętrznej, wolne od zaburzeń przepływu. Badania prowadzono przy przepływie turbulentnym. Ewentualne źródła zakłóceń w części odpływowej odcinka pomiarowego były tak oddalone od zwężki, że praktycznie nie miały wpływu na wartość liczby przepływu.

Utrzymanie takich wymagań w warunkach przemysłowych, o ile nie z zasady, to na pewno nie zawsze jest w pełni możliwe do spełnienia. Występują więc przypadki, gdzie przyjmuje się niezmiennosc liczby przepływu (w funkcji liczby Reynoldsa), pomimo że warunek ten nie jest spełniony. Stosuje się zwężki o wartościach parametrów charakterystycznych różniących się od wartości znormalizowanych.

Podobnie, zabudowa zwęzek w rurociągu może odbiegać nie tylko od zabudowy stosowanej w zwęzkach doświadczalnych, ale może mieć również błędy wynikające z niedoskonałości montażu, np. błąd mimośrodowości.

W odcinku pomiarowym mogą wystąpić zarówno chropowatości rurociągu jak i źródła zaburzeń przepływu. W każdym przypadku, gdy występują odchylenia od warunków istniejących, przy doświadczalnym wyznaczaniu liczby przepływu, należy uwzględnić ilościowy wpływ tych odchyżeń, stosując mnożniki poprawkowe, lub uwzględniając błędy dodatkowe.

Nie dla wszystkich, występujących w praktyce przemysłowej odchyżeń, istnieje możliwość stosowania mnożników poprawkowych. Wynika to zarówno z zakresu przeprowadzonych badań jak też faktu, że nie w każdym przypadku jest możliwe ich uwzględnienie ze względu na przebieg zjawiska.

Przykładem tej ostatniej sytuacji są zaburzenia przepływu powodujące rotację strumienia.

W ogólnym przypadku liczbę przepływu można wyrazić wzorem

$$L = L_0 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \dots \cdot k_n$$

gdzie:

$L_0$  – obliczeniowa liczba przepływu odpowiadająca rzeczywistej wartości  $L$  wyznaczonej w określonych warunkach dla największej liczby Reynoldsa,

$k_1, k_2, k_3 \dots k_n$  – mnożniki poprawkowe uwzględniające wpływ zmiany warunków, na wartość liczby przepływu.

Błąd względny liczby przepływu, stosownie do przeprowadzonych wyżej rozważań, można wyrazić wzorem

$$\bar{\delta}_L = \sqrt{\bar{\delta}_{L_0}^2 + \bar{\delta}_{k_1}^2 + \bar{\delta}_{k_2}^2 + \dots + \bar{\delta}_{k_n}^2} \quad /8/$$

gdzie:

$\delta_{L0}$  — błąd podstawowy liczby przepływu powstały w wyniku niedokładności przyrządów pomiarowych stosowanych przy jej doświadczalnym wyznaczeniu,

$\delta_{k1}, \delta_{k2} \dots \delta_{kn}$  — błędy mnożników poprawkowych.

Liczba mnożników poprawkowych, jak już wspomniano, zależy od zakresu przeprowadzanych badań. Liczbowe wartości tych mnożników, jak również wartości błędów z jakimi je wyznaczono, są przedmiotem dokumentów normalizacyjnych.

Zastanówmy się nad głównymi przyczynami, powodującymi konieczność uwzględnienia mnożników poprawkowych.

W przypadku kryzy, niedostateczna ostrość krawędzi wlotowej przyczynia się do zmniejszenia zwężenia strugi, a w konsekwencji do wzrostu wartości liczby przepływu [16]. Oznacza to, że wskazująca na wartość natężenia przepływu w układzie pomiarowym zaprojektowanym z kryzą o ostrej krawędzi wlotowej jest mniejsza od wartości rzeczywistej (błąd ujemny), gdy krawędź jest stępiona.

Przyczyną niedostatecznej ostrości krawędzi wlotowej kryzy może być niestaranność jej wykonania lub stępienie w wyniku korozji lub erozji.

Ponadto ostre krawędzie kryzy są wrażliwe na zanieczyszczenia mechaniczne, które osiadając na czołowej powierzchni kryzy, tworzą zgrubienie wokół jej otworu, efektem czego jest *zaokrąglenie* krawędzi i wzrost liczby przepływu.

Zmniejszenie liczby przepływu powodowane *zarastaniem* otworu kryzy występuje po znacznie większym upływie czasu i głównie przy małych prędkościach przepływu. Do źródła błędów tej grupy należy też zaliczyć wadliwe zamknięcie kryzy (obrócenie o  $180^\circ$ , w stosunku do kierunku przepływu). Ten ostatni przypadek nie dotyczy oczywiście kryzy symetrycznej. Ze względów metrologicznych ten błąd pomiaru jest niedopuszczalny.

Uwzględnienie zmiany wartości liczby przepływu spowodowanej zmianą ostrości krawędzi wlotowej kryzy, przez zastosowanie mnożnika poprawkowego, jest możliwe jedynie wtedy, gdy znany jest promień zaokrąglenia ostrza kryzy. Z tych też względów, dla przypadków, gdy występuje erozyjne lub korodujące działanie płynu mierzonego, konieczne jest stosowanie na kryzy odpowiednich trudnościeralnych lub antykorozyjnych materiałów pozwalających na zwiększenie trwałości ostrej krawędzi.

W przypadku dyszy nie istnieje wpływ ostrych krawędzi, może wystąpić stożkowatość części cylindrycznej, powodująca zwężenie strugi, co wpływa na zmniejszenie liczby przepływu. Ten sam efekt powodują osadzające się w dyszy zanieczyszczenia. Według wyników badań [16], przy porównywalnym stopniu zanieczyszczenia, błąd dla dyszy wynosi 5%, dla kryzy — 12%.

Zbliżony do wyżej omówionego wpływ jakościowy na wynik pomiaru ma chropowatość rurociągu. Pod względem ilościowym wpływ ten jest na ogół nieznaczny. Znane są jednak przypadki [16] gdy w rurociągu wodnym, eksploatowanym przez kilka lat bez konserwacji, mnożnik poprawkowy chropowatości, gdyby go uwzględniono, wyniósłby 1,4. Oznacza to w praktyce, że wskazująca wartość natężenia przepływu była ok. 40% mniejsza od wartości rzeczywistej.

Nieostrość krawędzi wlotowej kryzy i chropowatość rurociągu są przyczynami wzrostu liczby przepływu, ale ich wpływ maleje ze wzrostem średnicy rurociągu, a więc przede wszystkim w przypadku kryz, w rurociągach o małej średnicy ( $D < 300$  mm), występuje duże prawdopodobieństwo zbyt małych wskazań przy pomiarze natężenia przepływu. Powstający błąd ujemny ma tym większą wartość im mniejsza jest średnica rurociągu.

Z powyższego wypływa wniosek praktyczny, a mianowicie przy bilansowaniu dużych węzłów, np. energetycznych, produkcja prawie zawsze przewyższa zużycie. Wynika to z faktu, że pomiar ilości wyprodukowanego czynnika jest bardziej dokładny, dzięki dużej średnicy rurociągu, natomiast wyniki pomiaru u odbiorców są zaniżane w konsekwencji stosowania rurociągów o mniejszych średnicach.

Dla zapobieżenia powyższej sytuacji należy stosować u odbiorców kryzy o ostrej krawędzi wlotowej, gładkie rurociągi i prowadzić staranną konserwację układu pomiarowego, lub na etapie projektowa-

nia tego układu przyjmować wartość liczby przepływu z jej górną tolerancją, co jednak należy traktować jako półśrodek.

Źródłem znacznych wartości błędów pomiaru natężenia przepływu są również wady montażu. Należy do nich zaliczyć przede wszystkim mimośrodowe zamocowanie zwężki, wystające do wnętrza rurociągu uszczelki, szwy spawalnicze, łby nitów. Błędy powstające w wyniku istnienia mimośrodowości na ogół nie przekraczają wartości 2% [16], przy czym w przeważającej liczbie przypadków mają wartości dodatnie.

Wystająca do wnętrza rurociągu uszczelka powoduje wzrost liczby przepływu. Wartość bezwzględna powstałego błędu ujemnego wzrasta ze zmniejszaniem się średnicy  $D'$  uszczelki, wzrostem modułu zwężki; odległością uszczelki od płaszczyzny czołowej zwężki, przy czym większe wartości błędów są w przypadku kryzy niż dyszy. Według niektórych źródeł [16], gdy  $m > 0,3$  i  $\frac{D'}{D} > 0,9$ , błąd może osiągnąć wartość do 20% dla dyszy i do 40% dla kryzy.

Źródłem szczególnie znacznych wartości błędów pomiaru natężenia przepływu mogą być zaburzenia przepływu na odcinku dopływowym i odpływowym.

W zależności od przyczyny powodującej zaburzenia występuje zniekształcenie profilu rozkładu prędkości, lub powstaje rotacja strumienia względem osi rurociągu.

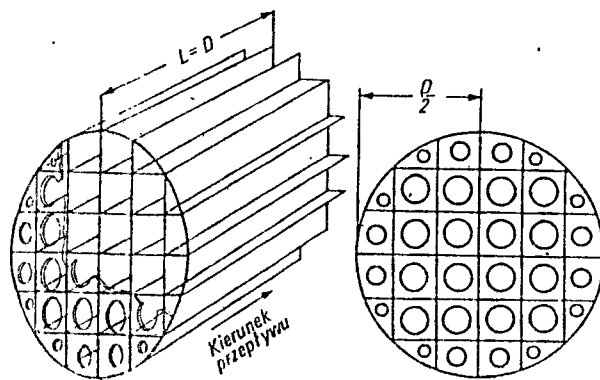
Omówione wyżej czynniki: chropowatość rurociągu, wystające uszczelki, obudowy zwęzek i dyfuzory powodują zaostrzenie profilu rozkładu prędkości, co prowadzi do wzrostu wartości liczby przepływu. Jednakże zmiany tej wartości nie przekraczają w praktyce kilku procent. Istotne jest, że w wielu przypadkach istnieje możliwość ilościowego uwzględniania tych wpływów na drodze obliczeniowej.

Rotacja strumienia występuje za wszelkiego typu zaworami, w szczególności za zaworami grzybkowymi oraz w miejscach połączeń kilku rurociągów i za przestrzennymi kolanami.

Znane są przypadki [10] zaburzeń, przy których zmiany wartości liczby przepływu zawierały się w granicach od -20 do 50%, przy czym dla małej wartości  $m$  zmiana jest dodatnia (w stosunku do wartości znormalizowanej), dla dużych wartości  $m$  jest ujemna.

Znamienne jest, że w przypadku tak silnych zaburzeń, nawet odcinek dopływowy, o długości rzędu  $100D$ , między źródłem zaburzenia, a zwężką, okazuje się zbyt krótki. Stan zaburzenia na dopływie można ocenić, wykonując w rurociągu (w płaszczyźnie *plusowych* otworów impulsowych) cztery otwory, co  $90^\circ$  i mierząc różnicę ciśnień pomiędzy poszczególnymi otworami. Przepływ uznaje się za niezakłócony, jeżeli maksymalna z mierzonych różnic nie przekracza 0,5% wartości ciśnienia różnicowego. Podobny pomiar w przekroju *minusowym* jest zbyteczny.

W przypadku występowania rotacji strumienia, staje się konieczne stosowanie kierownic, które rozdzielają całkowity strumień na mniejsze pojedyncze strugi, ukierunkowane równoległe do osi rurociągu.



Rys. 1. Kierownica strumienia według Zankera

Pośród wielu typów kierownic strumienia, na uwagę zasługuje kierownica według Zankera (rys. 1), która eliminuje rotację strumienia oraz poprawia profil rozkładu prędkości, dzięki zwiększeniu oporu przepływu strug bliższych ścianie rurociągu, co jest osiągnięte malejącą średnicą otworów w płycie czołowej.

Przy stosowaniu tej kierownicy, błąd liczby przepływu, w przypadku kryzy zainstalowanej w odległości  $5D$  za kierownicą, nawet dla silnych zakłóceń przepływu, jest mniejszy od  $0,5\%$ . Nie zalecane jest stosowanie kierownic strumienia przy wysokich prędkościach, ciśnieniach i temperaturach mierzonego płynu.

Rozpatrywane wyżej przyczyny powstawania zmian wartości liczby przepływu nie wyczerpują całości problemu. ilościowemu ujęciu zjawisk będą poświęcone rozważania podane w p. 3 niniejszej pracy.

#### Błąd liczby ekspansji

Wartość liczby ekspansji zależy od rodzaju i modułu zwężki, stosunku ciśnień bezwzględnych za i przed zwężką oraz wykładnika izentropy gazu. Średni błąd względny liczby ekspansji można obliczyć na podstawie wzoru

$$\bar{\delta}_{\epsilon} = \sqrt{\delta_{\epsilon 0}^2 + \delta_{\epsilon \Delta}^2} \quad /9'$$

gdzie:

$\bar{\delta}_{\epsilon 0}$  – średni błąd obliczeniowej wartości liczby ekspansji,

$\bar{\delta}_{\epsilon \Delta}$  – błąd spowodowany zmianą wartości liczby ekspansji w stosunku do wartości obliczeniowej. Sposób obliczania błędu  $\bar{\delta}_{\epsilon 0}$  jest podawany w normach i sprowadza się do korzystania ze wzoru

$$\bar{\delta}_{\epsilon 0} = n \cdot \frac{\Delta p}{p_1} \%$$

gdzie:

$n$  – zależy od rodzaju i modułu zwężki.

Wartość błędu  $\bar{\delta}_{\epsilon \Delta}$  jest uwarunkowana obliczeniową wartością liczby ekspansji  $\epsilon_0$  i może być obliczona ze wzoru

$$\bar{\delta}_{\epsilon \Delta} = \frac{100}{2} \cdot \frac{|\epsilon_0 - \epsilon|}{\epsilon_0} \%$$

gdzie:

$\epsilon$  – liczba ekspansji w dowolnym punkcie zakresu pomiarowego, różnym od punktu dla którego  $\epsilon = \epsilon_0$ .

O wartości błędu  $\bar{\delta}_{\epsilon}$  decyduje więc zarówno założony przy projektowaniu układu pomiarowego stosunek  $\frac{\Delta p}{p_1}$ , jak też wybór punktu zakresu pomiarowego, dla którego oblicza się  $\epsilon_0$ . Jeżeli przewidyuje się, że średnia wartość natężenia przepływu będzie wynosić ok.  $2/3$  zakresu pomiarowego, wartość  $\epsilon_0$  należy obliczyć dla  $\Delta p = \frac{4}{9} \cdot \Delta p_{100}$ , gdzie indeks 100 wskazuje wartość ciśnienia różnicowego, odpowiadającą górnej granicy zakresu pomiarowego.

Skrajne wartości  $\bar{\delta}_{\epsilon}$  występują w tym przypadku dla wartości  $\epsilon$  obliczonej dla dolnej i górnej granicy zakresu pomiarowego. Według niektórych autorów [9] w przypadku, gdy  $\frac{\Delta p}{p_1} \leq 0,04$ , błąd liczby ekspansji można pominąć. O pomijalnym wpływie błędu  $\bar{\delta}_{\epsilon}$  na błąd pomiaru natężenia przepływu decydują wartości pozostałych błędów cząstkowych we wzorze /6'.

Błąd pomiaru natężenia przepływu gazów i pary, spowodowany zmianą liczby ekspansji, może osiągnąć

gać wartość do  $\pm 5\%$  i więcej [13], co w przypadku bardziej dokładnych pomiarów wymaga stosowania samoczynnej kompensacji tego błędu.

*Błędy średnicy rurociągu i średnicy otworu zwężki*

Wartości tych błędów określają przepisy normalizacyjne. W przypadku, gdy temperatura mierzonego płynu, odbiega znacznie od wartości założonej, dla pomiarów dokładnych należy uwzględnić błąd mnożnika poprawkowego rozszerzalności cieplnej. Wówczas błąd średnicy otworu zwężki  $\bar{\delta}_{d,t}$  można obliczyć według wzoru

$$\bar{\delta}_{d,t} = \pm \sqrt{\bar{\delta}_d^2 + \bar{\delta}_{k_t}^2} \quad /10/$$

gdzie:

$\bar{\delta}_{k_t}$  — średni błąd względny mnożnika poprawkowego rozszerzalności cieplnej. Wartość tego błędu, według [16], przy temperaturze 450°C nie przekracza  $\pm 0,02\%$ .

*Błąd pomiaru ciśnienia różnicowego*

Rzeczywista wartość  $\Delta p_{rz}$  mierzona na króćcach wejściowych miernika, w najbardziej ogólnym przypadku, jest sumą właściwego ciśnienia różnicowego oraz ciśnień hydrostatycznych powstałych zarówno w wyniku różnicy poziomów otworów impulsowych, jak też w wyniku różnych wartości ciśnienia hydrostatycznego, w każdym z przewodów impulsowych, co można zapisać:

$$\Delta p_{rz} = p_1 - p_2 + \rho \cdot g \cdot \Delta h + p_p - p_m$$

gdzie:

$p_1$  i  $p_2$  — ciśnienie statyczne odpowiednio przed i za zwężką,

$\rho$  — gęstość czynnika mierzonego,

$g$  — przyspieszenie ziemskie,

$\Delta h$  — różnica poziomów otworów impulsowych,

$p_p$  i  $p_m$  — ciśnienie hydrostatyczne, odpowiednio w przewodach impulsowych *plusowym* i *minusowym*, wywołane działaniem słupów cieczy wypełniających te przewody.

Różnica ciśnień  $\Delta p = p_1 - p_2$  jest właściwym ciśnieniem różnicowym, które powstaje w wyniku przepływu przez zwężkę.

Wpływ ciśnienia hydrostatycznego, wyrażonego iloczynem  $\rho g \Delta h$  na wartość  $\Delta p$  można zmniejszyć, stosując odpowiednio duże  $\Delta p$ , lub ograniczając się do instalowania zwężki na poziomym odcinku rurociągu.

Różnicę ciśnień hydrostatycznych w przewodach impulsowych można wyrazić wzorem

$$p_p - p_m = (\rho_1 h_1 - \rho_2 h_2)g$$

gdzie:

$\rho_1$  i  $\rho_2$  — gęstości płynów wypełniających przewody impulsowe odpowiednio *plusowy* i *minusowy*,

$h_1, h_2$  — wysokości usytuowania otworów impulsowych odpowiednio *plusowego* i *minusowego*, odniesione do jednakowej wysokości, np. wysokości usytuowania króćców miernika.

W przypadku gdy  $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ , czyli gdy temperatura obydwu przewodów impulsowych jest jednako-  
kowa, to

$$p_p - p_m = \rho g (h_1 - h_2)$$



Jak już stwierdzono wyżej, w przypadku zwężki zainstalowanej w poziomym odcinku rurociągu, można przyjąć  $h_1 = h_2$ .

Różnica ciśnień hydrostatycznych  $p_p - p_m$  może być wywołana nie tylko różną gęstością płynu, w każdym z przewodów impulsowych, lecz także innymi czynnikami. Należą do nich: zapowietrzenie jednego z przewodów impulsowych, nie jednakowa dla obydwu przewodów wysokość poziomu odniesienia, w przypadku garnków kondensacyjnych, lub rozdzielaczy cieczowych, różna sztywność przepon, w przypadku rozdzielaczy przeponowych, lub różna wartość oporu hydraulicznego, gdy są zastosowane filtry.

Gdy w układzie są zastosowane garnki kondensacyjne lub rozdzielacze cieczowe, występuje błąd dodatkowy, przy każdej zmianie natężenia przepływu.

Wpływ tego błędu można wyeliminować, stosując odpowiednio duże powierzchnie przekrojów (w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku siły ciężenia) garnków kondensacyjnych lub rozdzielaczy cieczowych, dostosowane do zmian objętości wewnętrznej miernika po stronie plusowej.

W przypadku pomiaru natężenia przepływu gazów, ze względu na pomijalną gęstość, liczba źródeł błędów maleje.

W najbardziej ogólnym przypadku błąd  $\bar{\delta}_{\Delta p}$  można wyrazić wzorem

$$\bar{\delta}_{\Delta p} = \bar{\delta}_{\Delta p_0} + \frac{1}{2} [c g \Delta h + (p_p - p_m)] \quad /11/$$

gdzie:  
 $\bar{\delta}_{\Delta p_0}$  — średni błąd względny miernika.

Błąd  $\bar{\delta}_{\Delta p_0}$  będzie zależny od właściwości metrologicznych miernika przepływomierza.

W przypadku, gdy do pomiaru  $\Delta p$  zostanie użyty manometr różnicowy o granicznych (dwusigimowym) bezwzględnych błędzie pomiaru  $s_{\Delta p}$ , błąd względny średni  $\bar{\delta}_{\Delta p_0}$  oblicza się według wzoru

$$\bar{\delta}_{\Delta p_0} = \frac{100}{2} \cdot \frac{s_{\Delta p}}{\Delta p} \% \quad /12/$$

Przy zastosowaniu miernika przepływomierza z podziałką liniowo proporcjonalną do natężenia przepływu, to znaczy miernika z urządzeniem pierwiastkującym, o klasie dokładności  $k_L$ , do obliczenia względnego błędu średniego  $\bar{\delta}_{\Delta p_0}$  stosuje się wzór

$$\bar{\delta}_{\Delta p_0} = \frac{2}{3} k_L \sqrt{\frac{\Delta p_{100}}{\Delta p}} \% \quad /13/$$

gdzie:  
 $\Delta p_{100}$  — ciśnienie różnicowe odpowiadające górnej granicy zakresu pomiarowego

Wzór powyższy wyprowadzono, stosując ustaloną zasadę, że błąd graniczny bezwzględny, obliczony na podstawie klasy dokładności, jest błędem trzysigimowym, czyli

$$s_{\dot{V}} = 3 \delta_{\dot{V}} = \frac{k_L Z}{100}$$

gdzie:  
 $k_L$  — wartość liczbowa klasy dokładności miernika,  
 $Z$  — jego zakres wskazań.

W przypadku, gdy zamiast miernika konwencjonalnego jest stosowany układ składający się z przetwornika różnicy ciśnień, przystawki pierwiastkującej i miernika końcowego, do obliczenia klasy dokładności układu przyjmuje się wzór

$$k_1 = \pm \sqrt{k_{\Delta p}^2 + k_{\sqrt{\Delta p}}^2 + k_m^2}$$

gdzie:

$k_{\Delta p}$ ,  $k_{\sqrt{\Delta p}}$ ,  $k_m$  — wartości liczbowe klas dokładności przetwornika  $\Delta p$ , przystawki pierwiastkującej i miernika końcowego.

#### Błąd wyznaczenia gęstości

Należy tu rozróżnić dwa przypadki, które mogą zaistnieć w czasie dokonywania pomiaru:

- zmiany gęstości będą tak małe, że można pominąć ich wpływ na wynik pomiaru i założyć  $\rho = \text{const}$ ,
- zmiany gęstości będą tak duże, że wystąpi konieczność uwzględnienia ich wpływu na wynik pomiaru.

W przypadku pierwszym, średni błąd względny gęstości należy obliczać według wzoru podanego w PN-65/M-53950.

Gdy jest stosowana samoczynna korekcja zmian gęstości, błąd zależy od przyjętej metody korekcji i właściwości metrologicznych użytych urządzeń. W przypadku przeliczeń na podstawie pomiaru ciśnienia i temperatury, błąd  $\bar{\delta}_\rho$  w najbardziej ogólnym przypadku, można obliczyć według wzoru

$$\bar{\delta}_\rho = \pm \sqrt{\bar{\delta}_p^2 + \bar{\delta}_t^2 + \bar{\delta}_u^2} \quad /14/$$

gdzie:

$\bar{\delta}_p$ ,  $\bar{\delta}_t$  — błędy względne pomiaru lub przetworzenia ciśnienia i temperatury,  
 $\bar{\delta}_u$  — błąd względny przetwarzania urządzenia lub urządzeń przeliczających.

Dla korekcji realizowanej na podstawie pomiaru gęstości błąd  $\bar{\delta}_\rho$  jest po prostu błędem względnym, o wartości wynikającej z klasy dokładności zastosowanego gęstościomierza.

### 3. Błąd pomiaru natężenia przepływu w świetle norm i przepisów

Rozważania przeprowadzono na podstawie PN-65/M-53950 [1], ISO/R541 [2], DIN 1952 [3] oraz VDI 2040 Blatt 1 [4].

Według ustaleń normy PN-65/M-53950 względny błąd pomiaru natężenia przepływu oblicza się na podstawie wzoru /6/ (błąd średni). Jako błąd graniczny przyjmuje się wartość dwusigmową. W przypadku pomiaru ze skróconą długością odcinka pomiarowego (o około połowę w stosunku do ustaleń normy), graniczny błąd względny pomiaru oblicza się według wzoru

$$\bar{\delta}_M^* = 2 \bar{\delta}_M + 0,5\%$$

Do obliczenia średniego błędu względnego liczby przepływu dla kryzy ISA, z przytarczowym odbiorem ciśnienia stosuje się wzór

$$\bar{\delta}_L = 0,25 (1 + m^2) + \frac{12,5}{D} + 0,25 m (\lg Re - 6)^2 + 25 (k_2 + k_3 - 2)\% \quad /15/$$

gdzie:

- $k_2$  — mnożnik poprawkowy chropowatości rurociągu,
- $k_3$  — mnożnik poprawkowy nieostrości krawędzi wlotowej kryzy.

Wartość mnożnika  $k_2$  zmienia się w granicach  $1 \div 1,03$ , dla zakresu zmian  $\frac{\Delta}{D} = 400 \div 3000$ ,  
gdzie:  $\Delta$  – maksymalna nierówność (chropowatość) powierzchni wewnętrznej rurociągu.

Mnożnik  $k_3$ , jako funkcja promienia  $r_k$  zaokrąglenia krawędzi wlotowej kryzy, średnicy rurociągu  $D$  i modułu zwężki  $m$  zawiera się w granicach  $1 \div 1,06$ .

Liczbę przepływu dla kryzy ISA, z przytarczowym odbiornikiem ciśnienia, oblicza się według wzoru

$$L = L_0 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \quad /16/$$

gdzie:

$k_1$  jest mnożnikiem poprawkowym lepkości, uwzględniającym wpływ liczby Reynoldsa na wartość  $L$ ; wartość  $k_1$  jest tym większa od jedności, im bardziej rzeczywista liczba  $Re$  różni się od  $Re_{max}$  ( $Re_{max}$  określa granicę przeprowadzonych doświadczeń i wzorowań). W normie, jako wartość maksymalną, ustalono  $k_1 = 1,03$ .

Do obliczenia średniego błędę względnę liczby przepływu dla dyszy ISA jest podany wzór, stąd:  
ny dla  $m > 0,2$ .

$$\bar{\delta}_L = 0,25 + 0,75 m^2 + \frac{12,5}{D} + 25(k_2 - 1) + 0,25(\lg Re - 6)^2 \% \quad /17/$$

Liczbę przepływu dla dyszy ISA oblicza się według wzoru

$$L = L_0 \cdot k_1 \cdot k_2 \quad /18/$$

Mnożniki poprawkowe lepkości  $k_1$  i chropowatości rurociągu  $k_2$ , w przypadku dyszy, osiągają wartość do 1,02.

Przy pomiarach technologicznych, gdy pomija się wpływ  $Re$  na wartość liczby przepływu ( $k_1 = 1$ ), norma zaleca powiększenie wartości błędę względnę liczby przepływu obliczonej według wzoru /15/ lub /17/ przez arytmetyczne dodanie 0,25%.

Średni błędę względnę  $\bar{\delta}_\epsilon$  liczby ekspansji wyrażony w procentach oblicza się według wzorów dla kryzy ISA z pomiarem przytarczowym

$$m = 0,05 \div 0,55 \quad \bar{\delta}_\epsilon = 2 \frac{\Delta p}{p_1} \%$$

$$m = 0,55 \div 0,64 \quad \bar{\delta}_\epsilon = 4 \frac{\Delta p}{p_1} \%$$

dla dyszy ISA

$$\bar{\delta}_\epsilon = \frac{\Delta p}{p_1} \%$$

gdzie:  $p_1$  – absolutne ciśnienie statyczne przed zwężką.

Średni błędę względnę pomiaru średnicy otworu zwężki  $\bar{\delta}_d$  i średnicy rurociągu  $\bar{\delta}_D$  według ustaleni normy wynosi

$$\bar{\delta}_d = \pm 0,01 \% \quad \text{dla pomiarów dokładnych}$$

$$\bar{\delta}_d = \pm 0,03 \% \quad \text{dla pomiarów technicznych}$$

$$\bar{\delta}_D = 0 \quad \text{dla wszystkich przypadków}$$

Norma podaje również wzory do obliczenia średniego błędu względnego pomiaru ciśnienia różnicowego i średniego błędu względnego wyznaczenia gęstości. Wzory te jednak należy traktować jako zalecenia.

Według ustaleń zaleceń ISO/R541 [2] względny błąd pomiaru natężenia przepływu oblicza się na podstawie wzoru /6/ traktując ten błąd jako błąd średni (standard deviation). Jako błąd graniczny (tolerance) przyjmuje się wartość dwusigmową.

W przypadku pomiaru ze skróconą długością odcinka pomiarowego (wartości podane w nawiasach w tabl. 1—ISO/R541), graniczny błąd względny pomiaru oblicza się według wzoru

$$\bar{\delta}_M = \pm (2\bar{\delta}_M + 0,5)\%$$

Do obliczenia średniego błędu względnego liczby przepływu dla kryzy, z przytarczowym odbiorem ciśnienia, jest podany wzór

$$\bar{\delta}_D = \pm 0,25 [1 + 2m^2 + 100(k_2 - 1) + m(\lg Re - 6)^2 + \frac{50}{D}] \% \quad /19/$$

Woryginalie mnożnik poprawkowy chropowatości rurociągu  $k_2$  jest oznaczony symbolem  $r_{Re}$ . Obliczenie jego liczbowej wartości umożliwia wzór

$$r_{Re} = (r_0 - 1) \left( \frac{\lg Re_D}{6} \right)^2 + 1$$

Jeżeli  $Re_D \geq 10^6$ , to  $r_{Re} = r_0$ . Wartość wielkości  $r_0$  otrzymuje się z tablic jako funkcję  $\frac{D}{\Delta}$  i  $m$ . Wartość ta zawiera się w granicach  $1 \div 1,024$ , dla zakresu wartości  $\frac{D}{\Delta} = 400 \div 3200$ .

Gdy  $\frac{D}{\Delta} \geq 3400$ , wówczas  $r_0 = 1$  niezależnie od modułu kryzy.

Liczbę przepływu dla kryzy, z przytarczowym odbiorem ciśnienia, oblicza się, stosując wzór

$$L = L_0 k_2$$

Średni błąd względny liczby przepływu  $\bar{\delta}_L$  dla dyszy oblicza się stosując wzór słuszny dla  $m \geq 0,2$

$$\bar{\delta}_L = \pm 0,25 [1 + 3m^2 + 100(k_2 - 1) + (\lg Re_D - 6)^2 + \frac{50}{D}] \% \quad /20/$$

Występujący w powyższym wzorze mnożnik poprawkowy chropowatości rurociągu oblicza się, stosując zależność

$$k_2 = (r_0 - 1) \left( \frac{\lg Re_D}{5,5} \right)^2 + 1$$

Jeżeli  $Re_D \geq 3,2 \cdot 10^5$ , to  $k_2 = r_0$ . Wartości wielkości  $r_0$ , w przypadku dyszy ISA, zawierają się w granicach  $1 \div 1,016$ . Gdy  $\frac{D}{\Delta} \geq 3200$ , wówczas  $r_0 = 1$  niezależnie od modułu dyszy.

Liczbę przepływu oblicza się identycznie jak w przypadku kryzy. Średni błąd względny  $\bar{\delta}_L$  liczby ekspansji, w myśl ustaleń ISO, oblicza się według wzorów dla kryzy z pomiarem przytarczowym

$$0,22 \leq \sqrt{m} \leq 0,75 \quad \bar{\delta}_e = \pm \frac{2\Delta p}{p_1}$$

$$0,75 < \sqrt{m} \leq 0,8 \quad \bar{\delta}_\epsilon = \pm 4 \frac{\Delta p}{p_1}$$

dla dyszy ISA

$$\bar{\delta}_\epsilon = \pm \frac{\Delta p}{p_1} \%$$

Zalecenia ISO/R541 nie ustalają metod wyznaczania błędów  $\bar{\delta}_D$ ,  $\bar{\delta}_d$ ,  $\bar{\delta}_{\Delta p}$ ,  $\bar{\delta}_c$ .

Norma DIN 1952 [3] wprowadza jako względny błąd pomiaru natężenia przepływu, błąd graniczny dwusigmowy (Messspiel). Wartość tego błędu wyznacza się ze wzoru

$$\bar{\delta}_M = \pm \sqrt{\bar{s}_L^2 + \bar{s}_\epsilon^2 + \frac{1}{4} \bar{s}_{\Delta p}^2 + \frac{1}{4} \bar{s}_c^2 + \bar{s}_D^2 (2 \frac{m}{L})^2 + \bar{s}_d^2 (2 + \frac{m}{L})^2} \quad (21)$$

Błędy cząstkowe  $\bar{s}$ , w wyrażeniu podpierwiastkowym powyższego wzoru, są w tym przypadku również błędami względnymi granicznymi.

Norma DIN 1952 ustala jedynie zależności umożliwiające wyznaczenie wartości błędów  $\bar{s}_L$  i  $\bar{s}_\epsilon$  dla zwęzek znormalizowanych, odsyłając do VDI 2040 Blatt 1 (w zakresie obliczania wartości tych błędów) w przypadku odchyżeń od ustaleń normy, natomiast do VDI 2040 Blatt 5, w zakresie błędów  $\bar{s}_D$ ,  $\bar{s}_d$ ,  $\bar{s}_{\Delta p}$ ,  $\bar{s}_c$ .

Błąd graniczny liczby przepływu według ustaleń DIN 1952, w ogólnym przypadku, wyznacza się według wzoru

$$\bar{s}_L = |\bar{s}_{L,0}| + |\bar{s}_{L,r}| + |\bar{s}_{L,m}| + |\bar{s}_{L,z}| \quad (22)$$

gdzie:

- $\bar{s}_{L,0}$  — błąd podstawowy liczby przepływu, o wartości charakterystycznej dla określonej zwężki,
- $\bar{s}_{L,r}$  — błąd liczby przepływu spowodowany skokową zmianą średnicy rurociągu na odcinku dopływowym,
- $\bar{s}_{L,m}$  — błąd liczby przepływu spowodowany mimośrodowością osi otworu zwężki i osi rurociągu,
- $\bar{s}_{L,z}$  — błąd liczby przepływu spowodowany obudową zwężki.

Błąd podstawowy liczby przepływu dla kryzy z przytarczowym odbiorem ciśnienia, oblicza się z zależności

$$s_{L,0} = \pm [0,35 + m^2 + 0,3m(\lg Re - 6)^2] \% \quad (23)$$

w przypadku dyszy

$$s_{L,0} = \pm [0,2 + \frac{0,05}{m} + m^2 + 0,25(\lg Re - 6)^2] \% \quad (24)$$

Wartość błędu  $\bar{s}_{L,r}$  jest uwarunkowana wielkością  $\frac{\Delta D}{D}$ , gdzie:  $\Delta D$  — zmiana średnicy rurociągu. Rozróżnia się tu następujące przypadki

- 1)  $\bar{s}_{L,r} = 0$ , nie występuje skokowa zmiana średnicy rurociągu
- 2)  $\bar{s}_{L,r} = \pm 0,2 \frac{\Delta D}{D}$  spełniona poniższe warunki

$$\frac{\Delta D}{D} 100\% \leq \pm 0,3, \text{ gdy } a \leq 2D \quad /25/$$

$$\frac{\Delta D}{D} 100\% \leq \pm [0,3 + 0,45 \left(\frac{a}{D} - 2\right)]\%, \text{ gdy } 2D \leq a \leq 8D$$

$$3) \bar{s}_{L,r} = \pm 0,6 (0,1 + 2,3 m^2) \frac{\Delta D}{D} \%, \text{ gdy } \frac{a}{D} \leq 0,5$$

$$4) \bar{s}_{L,r} = \pm 0,54 \frac{0,1 + 2,3 m^2}{\frac{a}{D} + 0,4} \frac{\Delta D}{D} \%, \text{ gdy } \frac{a}{D} > 0,5$$

W powyższych zależnościach  $a$  jest odległością skokowej zmiany średnicy rurociągu od czołowej powierzchni zwężki. Przypadek pierwszy i drugi ustala norma DIN 1952. Przypadek trzeci i czwarty jest podany w VDI 2040 Blatt 1 i są słuszne wtedy, gdy wartość  $\frac{\Delta D}{D}$  jest większa od ustalonej w przypadku drugim, nie przekracza jednak 10%.

Błąd  $\bar{s}_{L,m}$  uwarunkowany mimosrodowością  $e$ , może przybierać następujące wartości.

$$1) \bar{s}_{L,m} = 0, \text{ gdy } \frac{e}{D} \cdot 100\% \leq \frac{0,05}{0,1 + 2,3 m^2} \% \quad /26/$$

$$2) \bar{s}_{L,m} = \pm 0,3\%, \text{ gdy } \frac{e}{D} \cdot 100\% < \frac{0,5}{0,1 + 2,3 m^2} \%$$

$$3) \bar{s}_{L,m} = \pm 0,6 \cdot \frac{e}{D} (0,1 + 2,3 m^2)\%, \text{ dla } \frac{e}{D} \leq 0,05$$

Pierwszy i drugi przypadek ustala norma DIN 1952, przypadek trzeci ustalają przepisy VDI 2040, Blatt 1.

Błąd  $\bar{s}_{L,z} = 0$  jedynie w przypadku, gdy zwężka jest wbudowana między kołnierze rurociągu.

Dla zwężki montowanej w obudowie  $\bar{s}_{L,z} = \pm 0,2\%$ , gdy są spełnione warunki

$$D_z \geq D$$

$$\frac{D}{B} \frac{0,1}{0,1 + 2,3 m^2} \% \geq \frac{\Delta D}{D} 100\% \leq 4\%, \text{ przy czym } B \leq 0,5D \quad /27/$$

gdzie:

$D_z$  - średnica wewnętrzna obudowy zwężki,

$$\Delta D = D_z - D,$$

$B$  - odległość liczona od płaszczyzny styku obudowy zwężki i kołnierza rurociągu do czołowej powierzchni zwężki, na odcinku dopływowym.

Przepisy VDI 2040 Blatt 1, wprowadzają warunek ograniczający wartość iloczynu  $B \cdot \Delta D$ , a mianowicie

$$B \cdot \Delta D \leq \frac{0,001}{0,1 + 2,3 m^2} D^2 \leq 0,04 D \cdot B \quad /28/$$

Gdy nie są spełnione wymagania według warunków podanych wzorami /27/ i /28/, błąd  $\bar{s}_{L,z}$  należy obliczać według zależności

$$\bar{s}_{L,z} = \pm \frac{B}{D} \cdot \frac{\Delta D}{D} \cdot 200 (0,1 + 2,3 m^2) \%$$

/29/

przy czym zakres jego stosowania jest ograniczony warunkami

$$B \leq 0,5 D; \quad \frac{\Delta D}{D} \leq 0,04$$

W znacznie szerszym zakresie niż norma DIN 1952, traktując zagadnienie błędów liczby przepływu przepisy VDI 2040 Blatt 1, rozszerzając przedmiot do przypadków wykraczających poza *znormalizowane*. Zgodnie z tymi przepisami liczbę przepływu, w najbardziej ogólnym przypadku, oblicza się według wzoru

$$L = L_0 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot k_6$$

/30/

gdzie:

$k$  — mnożniki poprawkowe uwzględniające odpowiednio: wpływ chropowatości powierzchni wewnętrznej rurociągu, nieostrości krawędzi wlotowej dla kryzy, zmienionej (w stosunku do znormalizowanej) grubości kryzy oraz długości części cylindrycznej jej otworu, różnego od znormalizowanego usytuowania otworów impulsowych. Indeksy współczynników  $k$  zaczynają się od 2, gdyż przyjęto tu te same oznaczenia, które występują w PN-65/M-53950, a przepisy VDI 2040 Blatt 1, nie stosują mnożnika poprawkowego lepkości  $k_1$ .

Wartość liczbowa mnożnika poprawkowego chropowatości  $k_2$  zawiera się w granicach  $1 \div 1,03$ , przy czym wartość górna dotyczy przypadku, gdy  $\frac{\Delta}{D} = 50 \cdot 10^{-4}$  oraz modułu zwężki  $m = 0,64$ . Mnożnik poprawkowy nieostrości krawędzi wlotowej kryzy  $k_3$  zawiera się w granicach  $1 \div 1,068$ .

Wartość dolna dotyczy przypadku, gdy  $\frac{r_k}{d} \leq 0,0004$ , wartość górna, gdy  $\frac{r_k}{d} = 15 \cdot 10^{-3}$ .

Mnożniki poprawkowe grubości kryzy  $k_4$  i długości części cylindrycznej jej otworu  $k_5$  stosuje się w przypadku, gdy grubość przekracza  $0,05 D$ , a długość części cylindrycznej  $0,02 D$ . Wartości liczbowe tych współczynników wynoszą wówczas

$$k_4 = 0,995 \div 1, \quad \text{dla } m = 0,7$$

$$k_5 = 1 \div 1,045, \quad \text{dla } m = 0,05$$

Mnożnik poprawkowy usytuowania otworów impulsowych, według przepisów VDI 2040 Blatt 1, należy obliczać stosując wzór

$$k_6 = \sqrt{\frac{100\%}{100\% + X_1 - X_2}}$$

Wartości wielkości  $X_1$  i  $X_2$  są funkcjami odległości otworów impulsowych odpowiednio przed i za zwężką i modułu zwężki i zawierają się w granicach

$$X_1 = 0 \div \frac{-9,5 \cdot \Delta D}{100}; \quad X_2 = 0 \div \frac{-3 \cdot \Delta D}{100}$$

Błąd liczby przepływu, na podstawie danych VDI 2040 Blatt 1, w najbardziej ogólnym przypadku, można wyrazić wzorem

$$\bar{s}_L = \pm \sqrt{(|\bar{s}_{L,0}| + |\bar{s}_{L,r}| + |\bar{s}_{L,m}| + |\bar{s}_{L,z}|)^2 + \bar{s}_{L,k_2}^2 + \bar{s}_{L,k_3}^2 + \bar{s}_{L,k_4}^2 + \bar{s}_{L,k_5}^2 + |\bar{s}_{L,k_6}| + |\bar{s}_{L,l}| + |\bar{s}_{L,x}|} \quad /31/$$

17

Wielkości  $\bar{s}_{L,0}$ ,  $\bar{s}_{L,r}$ ,  $\bar{s}_{L,m}$ ,  $\bar{s}_{L,z}$  omówiono przy /22/, natomiast  $\bar{s}_{L,k}$  są to błędy mnożników poprawkowych podanych we wzorze /30/. Wartości liczbowe tych błędów (VDI 2040 Blatt 1) wynoszą

$$\bar{s}_{L,k_2} = \pm (k_2 - 1) \cdot 100\%; \quad \bar{s}_{L,k_3} = \pm 0,5\% \text{ do } \pm 0,5 (k_3 - 1) \cdot 100\%;$$

$$\bar{s}_{L,k_4} = \bar{s}_{L,k_5} = \pm 0,6\%; \quad \bar{s}_{L,k_6} = \pm 0,5\% \text{ dla } m \leq 0,4 \text{ oraz}$$

$$\bar{s}_{L,k_6} = \pm 1\% \text{ dla } m > 0,4$$

Błąd  $\bar{s}_{L,1}$  jest spowodowany zakłóceniami przepływu na odcinku dopływowym. W przypadku, gdy zakłócenia te są spowodowane jedynie skróceniem długości odcinka dopływowego, o około połowę w stosunku do długości ustalonej normą,  $\bar{s}_{L,1} = \pm 0,5\%$ .

Błąd  $\bar{s}_{L,x}$  ma ten sam charakter, co błąd  $\bar{s}_{L,1}$ , dotyczy jednak przypadków szczególnych jak np. skrócenie długości odcinka dopływowego, gdy w rurociągu występuje kolano, dyfuzor lub konfuzor. W tym przypadku przyjmuje się  $\bar{s}_{L,1} = 0$ , wstawiając do wzoru /31/ odpowiednią wartość  $\bar{s}_{L,x}$ . Ze względu na zakres przeprowadzanych badań, przepisy VDI 2040 Blatt 1, nie traktują zagadnienia wyczerpująco, ograniczając się do podania danych dla kolana  $90^\circ$  i czujnika termometrycznego. Dyfuzor i konfuzor jest potraktowany w normie opisowo. Dla kolana  $90^\circ$ , błąd  $\bar{s}_{L,x} = \pm 0,5 \cdot (b_{kr,Gr} - 1) \cdot 100\%$ , występuje ponadto konieczność wprowadzenia mnożnika poprawkowego do wzoru /30/. Wartość tego mnożnika oblicza się według zależności

$$k_7 = 0,5 (b_{kr,Gr} + 1)$$

Wprowadzona wyżej wielkość  $b_{kr,Gr}$  jest funkcją odległości kolana od zwężki oraz modułu zwężki i zawiera się w granicach od 1 do 0,948.

Jeśli zostanie wbudowany czujnik termometryczny w odległości  $(3 \div 15) D$  przed zwężką, o średnicy  $(0,13 \div 0,18) D$ , to błąd  $\bar{s}_{L,x} = \pm 0,5\%$ , a wartość mnożnika poprawkowego do wzoru /30/ wynosi

$$k_8 = 0,99 \div 0,998 \quad \text{dla dysz}$$

$$k_8 = 0,985 \div 0,994 \quad \text{dla kryz}$$

Błąd liczby ekspansji (według DIN 1952) oblicza się, stosując następujące zależności:  
dla kryzy

$$\bar{s}_e = \pm 4 \frac{\Delta p}{p_1} \% \quad \text{dla } 0,05 \leq m < 0,55$$

$$\bar{s}_e = \pm 8 \frac{\Delta p}{p_1} \% \quad \text{dla } 0,55 \leq m \leq 0,64$$

dla dyszy

$$\bar{s}_e = \pm 2 \frac{\Delta p}{p_1} \%$$

Na zakończenie przeglądu ustaleń zawartych w normach i przepisach należy podkreślić, że błąd pomiaru natężenia przepływu, gdy zostanie pominięty jeden lub więcej mnożników poprawkowych we wzorze na liczbę przepływu, będzie sumą błędów wyznaczonego wzorem /6/ lub /21/ i błędów spowodowanego nieuwzględnieniem wartości mnożnika poprawkowego.

#### 4. Błąd spowodowany zmianą gęstości czynnika mierzzonego i metody jego minimalizowania

Jeśli w czasie pomiaru natężenia przepływu występują znaczne zmiany gęstości czynnika mierzzonego,



to nie można uwzględniać tych zmian przez zwiększanie wartości  $\bar{\delta}_c$ . Prowadziłoby to do nieuzasadnionego wzrostu błędów pomiaru natężenia przepływu, ale podważałoby w ogólnie ich wartość i sens obliczenia błędów  $\delta_{\dot{V}}$  lub  $\delta_{\dot{M}}$ . Będą to wartości błędów  $\delta_{L_r}$ ,  $\delta_{\epsilon_r}$ ,  $\delta_{D_r}$ ,  $\delta_{\rho_1}$  i  $\delta_{\Delta p_1}$  w odniesieniu do wartości błędów  $\delta_{\dot{c}}$  byłyby pomijalne, w świetle kryterium błędów znikomych. Błąd spowodowany znaczącymi zmianami gęstości należy więc traktować jako błąd dodatkowy pomiaru natężenia przepływu.

Przy wyznaczeniu tego błędów, a przypadku gdy  $\epsilon_r = \epsilon_{obl}$  wzór (1) przyjmie postać

$$M_{obl} = k \cdot L_{obl} \cdot c_{obl} \cdot d^2 \sqrt{\Delta p_1 \cdot \epsilon_{obl}} \quad (32)$$

Indeksy r, obl oznaczają odpowiednio warunki robocze i obliczeniowe.

W przypadku, gdy  $\epsilon_r \neq \epsilon_{obl}$  powyższy wzór należy zapisać w postaci

$$\dot{M}_r = k \cdot L_r \cdot c_r \cdot d^2 \sqrt{\Delta p_2 \cdot \epsilon_r} \quad (33)$$

Gdy  $\Delta p_1 = \Delta p_2$ , wskazywane przez układ pomiarowy wartości  $\dot{M}_{obl}$  i  $\dot{M}_r$  są jednakowe, mimo że w rzeczywistości są różne. Różnica wartości rzeczywistych wynika z zasady pomiarowej, gdyż w po-prawnie działającym układzie wielkość  $\dot{M}$  jest funkcją tylko jednej zmiennej,  $\epsilon_r$ .

Jeśli przyjmie  $L_{obl} = L_r$ , co przy znacznych zmianach lepkości jest uzasadnione, wówczas wzór na błąd względny pomiaru natężenia przepływu, odniesiony do wartości obliczonej, spowodowany zmianą gęstości mierzonych, wyznacza zależność

$$\delta \dot{M} = \frac{\dot{M}_{obl} - \dot{M}_r}{\dot{M}_{obl}} \cdot 100\%$$

to otrzymamy

$$\delta \dot{M} = \left( 1 - \frac{\epsilon_r}{\epsilon_{obl}} \sqrt{\frac{\epsilon_r}{\epsilon_{obl}}} \right) \cdot 100\% \quad (34)$$

W przypadku cieczy, gęstość zmienia się pod wpływem zmian temperatury i ciśnienia, przy czym wpływ decydujący w sensie ilościowym, ma temperatura. Przyjmuje się, że powstały w tym przypadku błąd pomiaru natężenia przepływu cieczy, w warunkach przemysłowych, na ogół nie przekracza 4%. Dla gazów i pary wodnej wpływ ilościowy zmian gęstości powodowanych zmianami temperatury i ciśnienia jest znacznie większy niż w przypadku cieczy, a powstały z tego tytułu błąd pomiaru natężenia przepływu w warunkach występujących w przemyśle może przekroczyć 30%.

W dotychczasowych rozważaniach, jak i w dalszych rozważaniach założono, że zmiana gęstości cieczy mierzonych jest spowodowana tylko zmianą jego temperatury i ciśnienia. Nie wchodzi więc w grę tutaj zmiana gęstości spowodowana zmianą składu, a w przypadku gazów rozważania są słuszne jedynie dla gazów suchych, natomiast w przypadku pary wodnej – tylko dla pary przegrzanej.

Na podstawie wzorów (32) i (33) można wyprowadzić zależność

$$\dot{M}_r = \dot{M}_{obl} \cdot \frac{\epsilon_r}{\epsilon_{obl}} \sqrt{\frac{\epsilon_r}{\epsilon_{obl}}} \quad (35)$$

kłóca, która wskazuje, że dla wyznaczenia rzeczywistej wartości natężenia przepływu  $\dot{M}_r$ , wskazawaną przez układ pomiarowy wartość tego natężenia należy pomnożyć przez współczynnik korekcyjny

$$C_M = \frac{\epsilon_r}{\epsilon_{obl}} \sqrt{\frac{\epsilon_r}{\epsilon_{obl}}} \quad (36)$$

W przypadku obciążeniowego natężenia przepływu współczynnik korekcji można wyrazić wzorem

$$C\dot{V} = \frac{\epsilon_r}{\epsilon_{obl}} \sqrt{\frac{\rho_{obl}}{\rho_r}} \quad /37/$$

Jeśli we wzorach /36/ i /37/, na podstawie równania gazów rzeczywistych, wyrazimy gęstość jako funkcję ciśnienia i temperatury, to otrzymamy

$$C\dot{M} = \frac{\epsilon_r}{\epsilon_{obl}} \sqrt{\frac{K_{obl} \cdot P_r T_{obl}}{K_r P_{obl} T_r}} = k_\epsilon \sqrt{\frac{k_p}{k_T \cdot k_k}} \quad /38/$$

$$C\dot{V} = \frac{\epsilon_r}{\epsilon_{obl}} \sqrt{\frac{K_r \cdot P_{obl} T_r}{K_{obl} P_r T_{obl}}} = k_\epsilon \sqrt{\frac{k_T \cdot k_k}{k_p}} \quad /39/$$

gdzie:

P – ciśnienie absolutne gazu w warunkach przed zwężką,

T – temperatura absolutna gazu w warunkach przed zwężką,

K – współczynnik ściśliwości gazu,

$k_T = \frac{T_r}{T_{obl}}$  – współczynnik korekcji dla temperatury,

$k_p = \frac{P_r}{P_{obl}}$  – współczynnik korekcji dla ciśnienia,

$k_k = \frac{K_r}{K_{obl}}$  – współczynnik korekcji dla ściśliwości,

$k_\epsilon = \frac{\epsilon_r}{\epsilon_{obl}}$  – współczynnik korekcji dla liczby ekspansji.

Wprowadzając współczynnik korekcji dla gęstości  $k_\rho = \frac{\rho_r}{\rho_{obl}}$ , wzory /36/ i /37/ przyjmą postać

$$C\dot{M} = k_\epsilon \sqrt{k_\rho}$$

$$C\dot{V} = \frac{k_\epsilon}{\sqrt{k_\rho}} \quad /40/$$

Wprowadzenie współczynników korekcji jest wygodne ze względów praktycznych. Przykładowo, jeśli ciśnienie zmienia się o  $\pm 20\%$  od wartości obliczeniowej, to odpowiednio współczynnik

$$k_p = 0,8 \div 1,2.$$

Jak wynika ze wzorów /38/ i /39/, rzeczywista wartość natężenia przepływu zależy nie tylko od temperatury i ciśnienia, ale również od współczynnika ściśliwości gazu. Obliczenia wykazują [14], że w najczęściej spotykanym zakresie zmian ciśnienia i temperatury, rzeczywista wartość współczynnika ściśliwości może się zmieniać w stosunku do jego wartości obliczeniowej do 8% dla powietrza i do 7% dla tlenu.

Pomijanie zmian współczynnika ściśliwości może prowadzić do nadmiernych wartości błędów.

Uwzględnianie tych zmian na drodze samoczynnej kompensacji ich wpływu, jest trudne, gdyż

współczynnik ściśliwości jest podawany w tablicach lub na wykresach, jako funkcja ciśnienia zredukowanego i temperatury zredukowanej.

Opracowanie nawet przybliżonych wzorów analitycznych  $K = f(p, t)$ , również nie rozwiązuje kwestii, ze względu na złożoną ich postać.

Na przykład, dla metanu wzór  $K = f(p, t)$  umożliwiający wyznaczenie wartości współczynnika ściśliwości  $K$ , z błędem rzędu 1%, jest wielomianem ósmego stopnia, przy czym zakres jego zastosowania ogranicza się do przedziału zmian temperatury od  $-20$  do  $60^{\circ}$  i ciśnienia od 2 do 18 MPa

Równie złożoną postać wzorów występuje dla innych gazów, chociaż stopień wielomianu obniża się w miarę zawężania zakresu zmian ciśnienia i temperatury.

Na podstawie przeprowadzonego wyżej rozważania można ustalić:

- potrzebę korekcji wyniku pomiaru natężenia przepływu w zależności od wymaganej dokładności pomiaru,
- metodę realizacji korekcji.

Dla ustalenia potrzeby wprowadzenia korekcji zmian gęstości przyjmuje się że błędy wartości  $M_{obl}$  we wzorze /35/ oraz współczynnika korekcji  $C_M$  podanego w /36/ są równe zeru.

Wówczas, dla założonego dopuszczalnego błędem pomiaru natężenia przepływu  $\pm \delta\%$  (graniczny błąd względny), spowodowanego zmianą gęstości czynnika mierzonego w stosunku do wartości obliczeniowej, na podstawie /34/ z uwzględnieniem, że  $\Delta M = \delta$  oraz /36/, można zapisać

$$C_M = \frac{100 - (\pm \delta)}{100} = \frac{\epsilon_r}{\epsilon_{obl}} \sqrt{\frac{\epsilon_r}{\epsilon_{obl}}} \quad /41/$$

Na podstawie powyższej zależności, przy założeniu  $\epsilon_r = \epsilon_{obl}$ , można wyznaczyć zakres zmian gęstości czynnika mierzonego, przy którym nie występuje konieczność wprowadzenia korekcji.

Dla masowego natężenia przepływu granice te są określone nierównością

$$\epsilon_{obl} \left[ \frac{100 - (-\delta)}{100} \right]^2 > \epsilon_r > \epsilon_{obl} \left[ \frac{100 - (+\delta)}{100} \right]^2 \quad /42/$$

W przypadku objętościowego natężenia przepływu odpowiednia nierówność przyjmuje postać

$$\epsilon_{obl} \left[ \frac{100}{100 - (+\delta)} \right]^2 > \epsilon_r > \epsilon_{obl} \left[ \frac{100}{100 - (-\delta)} \right]^2 \quad /43/$$

Gdy współczynnik  $C_M$  jest określony wzorem /38/, należy przyjąć zakresy zmian  $P$  i  $T$ , dla których  $k_e = 1$ ,  $k_k = 1$ .

Potrzeba wprowadzania korekcji nie występuje, jeśli dla masowego natężenia przepływu jest spełniona nierówność

$$\left[ \frac{100 - (-\delta)}{100} \right]^2 > \frac{P_r \cdot T_{obl}}{P_{obl} \cdot T_r} > \left[ \frac{100 - (+\delta)}{100} \right]^2 \quad /44/$$

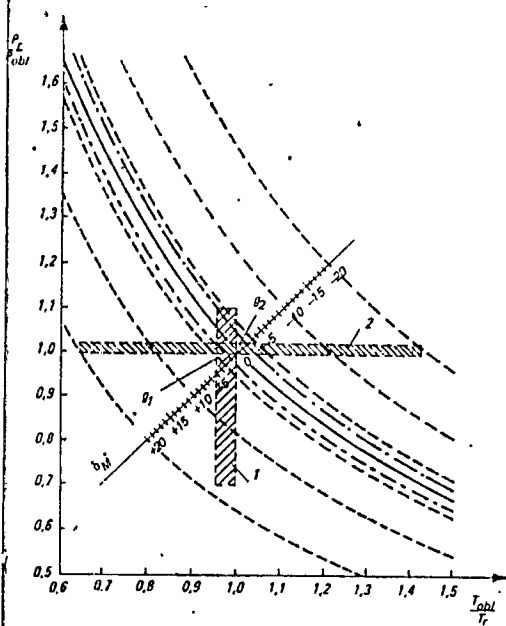
W przypadku objętościowego natężenia przepływu odpowiednia nierówność przyjmuje postać

$$\left[ \frac{100 - (-\delta)}{100} \right]^2 > \frac{P_{obl} \cdot T_r}{P_r \cdot T_{obl}} > \left[ \frac{100 - (+\delta)}{100} \right]^2 \quad /45/$$

Przy ustalaniu zakresu zmian  $P$  i  $T$ , nie wymagającego stosowania korekcji, można również wykorzystać metodę podaną przez Schulza [21], która polega na korzystaniu z nomogramu (rys.2). W układzie współ-

rzędnych prostokątnych, gdzie odciętą jest iloraz  $\frac{T_{obl}}{T_r}$ , a rzędną  $\frac{P_r}{P_{obl}}$  wykreśla się krzywe odpowiadające określonej wartości błędu pomiaru natężenia przepływu, wywołanego zmianą wartości  $P$  i  $T$ , w stosunku do wartości obliczeniowych. Krzywe te są hiperbolami wyznaczonymi z zależności

$$C_{M_i} = \sqrt{\frac{P_{r,i} \cdot T_{obl}}{P_{obl} \cdot T_{r,i}}} = \text{const} \quad /46/$$



Rys. 2. Nomogram do wyznaczania wartości błędu  $\delta_M^*$

Między wartością współczynnika  $C_{M_i}$ , a błędem pomiaru natężenia przepływu  $\bar{s}$  (graniczny błąd względny) wywołanym zmianą wartości  $P$  i  $T$ , w stosunku do wartości obliczeniowych, istnieje zależność

$$C_M^* = \frac{100 - \bar{s}}{100}$$

gdzie:

$\bar{s}$  jest wyrażone w procentach.

Dla określonych wartości  $\bar{s}$  np.  $\bar{s} = 20\%$ ;  $10\%$ ,  $-10\%$ ,  $-10\%$ ,  $-20\%$ ;  $C_M^*$  wynosi odpowiednio 0,8; 0,9; 1,1; 1,2.

Dla określonej wartości  $C_M^*$ , np.  $C_M^* = 0,8$ , zadając kolejno różne wartości  $\frac{P_r}{P_{obl}}$  z zależności /46/, oblicza się odpowiednio wartości  $\frac{T_{obl}}{T_r}$ , otrzymując w ten sposób współrzędne punktów leżących na krzywej, dla której błąd pomiaru natężenia przepływu wynosi  $+20\%$ .

Sposób korzystania z tak przygotowanego nomogramu zilustrują poniższe przykłady

**Przykład 1.**

Dane:

ciśnienia (wartości bezwzględne):  $P_{obl} = 0,5 \text{ MPa}$ ;  $P_{r \text{ min}} = 0,35 \text{ MPa}$ ;  $P_{r \text{ max}} = 0,55 \text{ MPa}$

temperatury:  $T_{obl} = 453 \text{ K}$ ;  $T_{r \text{ min}} = 453 \text{ K}$ ;  $T_{r \text{ max}} = 473 \text{ K}$

stąd

$$\frac{P_{r \text{ min}}}{P_{obl}} = 0,7; \quad \frac{P_{r \text{ max}}}{P_{obl}} = 1,1; \quad \frac{T_{obl}}{T_{r \text{ max}}} = 0,957; \quad \frac{T_{obl}}{T_{r \text{ min}}} = 1$$

a więc

$$0,7 \leq \frac{P_r}{P_{obl}} \leq 1,1 \quad 0,957 \leq \frac{T_{obl}}{T_r} \leq 1$$

Na podstawie powyższych danych, wykreślono (rys. 2) prostokąt, który wskazuje że:

- wszystkie możliwe zmiany  $P_r$  i  $T_r$  wewnątrz prostokąta 1 powodują w skrajnych przypadkach maksymalne wartości błędów pomiaru natężenia przepływu, wynoszące  $-5\%$  i  $+18\%$ ,
- przy wprowadzeniu korekcyjnego ciśnienia, prostokąt 1 zostanie zredukowany do odcinka prostej  $g_1$  i wówczas maksymalne błędy pomiaru natężenia przepływu dla skrajnych wartości temperatury wyniosą  $0\%$  i  $+2\%$ .

**Przykład 2**

Dane:

nadciśnienia:  $P_{obl} = 2 \text{ kPa}$ ;  $P_{r \text{ max}} = 4 \text{ kPa}$ ;  $P_{r \text{ min}} = 1,5 \text{ kPa}$

temperatury:  $T_{obl} = 423 \text{ K}$ ;  $T_{r \text{ max}} = 653 \text{ K}$ ;  $T_{r \text{ min}} = 298 \text{ K}$

ciśnienie barometryczne:  $1006 \text{ hPa}$

stąd:

$$\frac{P_{r \text{ min}}}{P_{obl}} = 0,995; \quad \frac{P_{r \text{ max}}}{P_{obl}} = 1,02; \quad \frac{T_{obl}}{T_{r \text{ max}}} = 0,647; \quad \frac{T_{obl}}{T_{r \text{ min}}} = 1,42$$

a więc

$$0,995 \leq \frac{P_r}{P_{obl}} \leq 1,02 \quad 0,647 \leq \frac{T_{obl}}{T_r} \leq 1,42$$

Na podstawie powyższych danych wykreślono prostokąt 2 (rys. 2), który wskazuje że:

- wszystkie możliwe zmiany  $P_r$  i  $T_r$  wewnątrz prostokąta 2 mają w skrajnych przypadkach maksymalne wartości błędów pomiaru natężenia przepływu wynoszące  $-20\%$  i  $+20\%$ ,
  - przy wprowadzeniu kompensacji (korekcji) temperatury prostokąt 2 zostanie zredukowany do odcinka prostej  $g_2$  i wówczas maksymalny błąd pomiaru natężenia przepływu wyniesie ok.  $\pm 1\%$ .
- W przypadku stwierdzenia konieczności uwzględnienia wpływu zmian gęstości na wynik pomiaru natężenia przepływu, można skorygować wynik pomiaru obliczeniowo lub zastosować urządzenia do samoczynnej kompensacji tych zmian.

Metoda obliczeniowa może być zastosowana jedynie wtedy, gdy trzeba wyznaczyć ilość przepływu. Przy pomiarze lub regulacji natężenia przepływu, gdy istotne są wartości chwilowe, występuje konieczność stosowania kompensacji samoczynnej.

Uwzględnienie obliczeniowe zmian gęstości wymaga stosowania przyrządów rejestrujących natężenie przepływu oraz ciśnienie i temperaturę czynnika mierzonego.

Obliczenie skorygowanej ilości przepływu na podstawie wyników pomiarów zapisów na wrażliwość

kach, można przeprowadzić stosując jeden z podanych niżej sposobów.

- Planimetrując wykresy, oblicza się średnie wartości  $\dot{M}_s$ ,  $p_s$ ,  $t_s$  w rozpatrywanym przedziale czasu np.  $\tau = 12$  h.

Podstawiając powyższe dane do wzoru

$$\dot{M}_{sk} = \dot{M}_s \sqrt{\frac{p_s}{T_s} \cdot \frac{T_{obl}}{p_{obl}}} \quad /47/$$

otrzymamy skorygowane średnie natężenie przepływu  $\dot{M}_{sk}$  dla przedziału  $\tau$ . Ilość przepływu uzyska się, mnożąc wynik przez czas  $\tau$ .

- Dla tej samej współrzędnej czasu odczytuje się na każdej z trzech wykresówek wartości  $\dot{M}$ ,  $p$ ,  $t$ . Na podstawie uzyskanych wyników oblicza się skorygowane natężenie przepływu według /47/ i wynik obliczeń nanosi się na rozpatrywaną współrzędną czasu na wykresówce z wynikami pomiaru natężenia przepływu. Postępując tak dla kolejnych współrzędnych czasu, uzyskuje się dla rozpatrywanego przedziału czasu skorygowany wykres natężenia przepływu. Splanimetrowanie tego wykresu pozwala na uzyskanie skorygowanej ilości przepływu.

W każdym z powyższych sposobów, błąd wyznaczenia skorygowanej ilości przepływu zależy od stałości w czasie wielkości mierzonych oraz od *częstości próbkowania* przy opracowywaniu zapisanych wyników pomiarów. Jeśli założyc, że przyrządy rejestrujące natężenie przepływu, ciśnienie i temperaturę realizują pomiar tych wielkości z błędem rzędu  $1 \div 1,5\%$  oraz zastosowany planimetr ma niedokładność  $0,2\%$ , to błąd pomiaru skorygowanej ilości przepływu, przy opracowywaniu wyników na drodze obliczeniowej, jest rzędu  $5 \div 8\%$ . Można więc stwierdzić, że metoda jest nie tylko pracochłonna, ale i mało dokładna, niezależnie od ograniczenia jej stosowania, na co zwracano już uwagę.

Wad tych nie ma samoczynna korekcja zmian gęstości. Rozpatrzymy podstawowe metody jej realizacji.

■ *Metoda zwężki autokorekcyjnej.* Zwężka autokorekcyjna stanowi kryżę, w której powierzchnia otworu przepływowego jest zmienna i zależy od parametrów mierzonego gazu. Zmiana powierzchni otworu, przy stałej wartości natężenia przepływu, powoduje zmianę ciśnienia różnicowego  $\Delta p$ . Istota metody polega więc na korekcji  $\Delta p$ . Stosowane techniki realizacji tej metody wykorzystują zarówno zmiany ciśnienia i temperatury jak i zmiany gęstości. W przypadku pierwszym w otwór kryży jest wprowadzony odpowiednio ukształtowany trzpień połączony z mieszkciem wypełnionym gazem, o tym samym składzie co gaz mierzony. Gdy występuje zmiana ciśnienia lub temperatury mierzonego gazu, trzpień zostaje przesunięty współosiowo zmieniając powierzchnię przepływową kryży odwrotnie proporcjonalnie do  $\sqrt{\frac{P}{T}}$ , gdzie:  $P$  i  $T$  odpowiednio ciśnienie absolutne i temperatura absolutna mierzonego gazu.

Ten typ zwężki autokorekcyjnej, opracowany przez National Instrument Laboratories [22], jest stosowany do pomiaru natężenia przepływu gazów o ciśnieniach  $0 \div 6$  MPa i temperaturach  $-45^\circ$  do  $260^\circ\text{C}$ .

W drugim typie zwężki autokorekcyjnej zmiana powierzchni otworu przepływowego jest realizowana przysłoną uruchamianą przez odpowiednio ukształtowany nurtnik, który pod wpływem zmiany gęstości mierzonego gazu wykonuje ruch obrotowy. Wzrost gęstości zmniejsza powierzchnię otworu przepływowego.

■ *Metoda zmiennego oporu hydraulicznego* również polega na korekcji ciśnienia różnicowego  $\Delta p$ . Urządzenie korekcyjne (korektor) jest instalowane między zwężką, a miernikiem lub przetwornikiem natężenia przepływu. Zasada działania polega na *dławieniu* ciśnienia różnicowego zmiennym oporem hydraulicznym sterowanym zmianami ciśnienia i temperatury mierzonego gazu.

Opracowany w MERA PIAP korektor GTP-Q ma zakres działania korekcyjnego 4:1 i podstawowy błąd przetwarzania  $\pm 2\%$ .

*Metoda urządzeń przeliczających* na podstawie pomiaru ciśnienia i temperatury.

Przekształcamy wzór /35/ z uwzględnieniem zależności /38/ do postaci

$$\dot{M} = G \sqrt{\Delta p \cdot \frac{P_r}{T_r}}$$

/48/

gdzie:

$$G = k \cdot c_{obl} \cdot d^2 \cdot \epsilon_r \sqrt{c_{obl} \cdot \frac{K_{obl} T_{obl}}{K_r P_{obl}}}$$

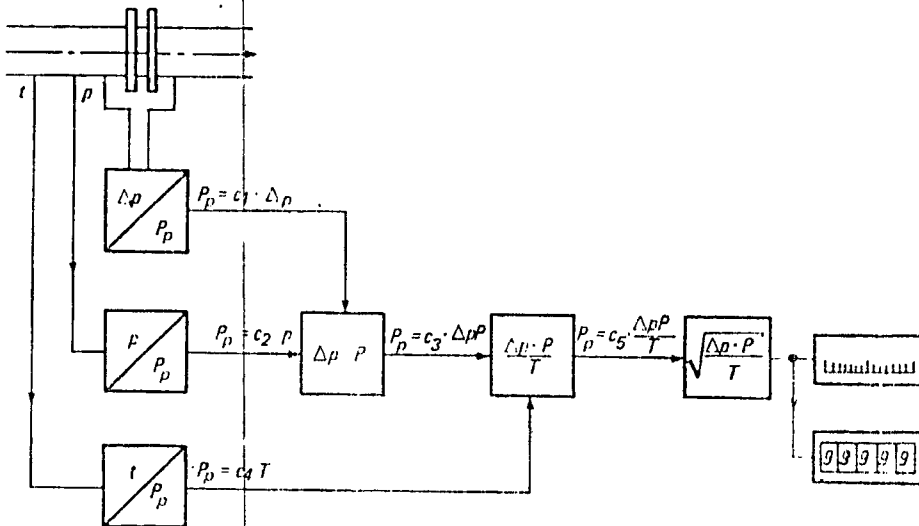
i przyjmujemy, że przy pomiarze natężenia przepływu  $G = \text{idem}$ . Wówczas wartość wskazania  $M = G \cdot f(\Delta p, P_r, T_r)$ . Jak wynika z powyższego, istota metody sprowadza się do pomiaru wielkości  $\Delta p$ ,  $P_r$  i  $T_r$  i wykonaniu obliczeń według wzoru /48/, za pomocą urządzeń przeliczających. W konwencjonalnych miernikach natężenia przepływu (waga pierścieniowa, miernik pływakowy, miernik z elementami sprężystymi) urządzenia przeliczające stanowią integralną część miernika. Wykonywane przez nie operacje matematyczne, a więc mnożenie, dzielenie i pierwiastkowanie są realizowane za pomocą mechanizmów dźwigniowo-krzywkowych [6], [7] urządzeń mechaniczno-elektrycznych [8] lub elektrycznych [5].

Zakres korekcyjnych tych mierników jest określany przez podawanie wartości współczynnika korekcyjnego  $C_M$  [25], lub przez podawanie podzakresów ciśnienia absolutnego i zakresu zmian temperatury [6], [7].

W przypadku pierwszym  $C_M = 0,7 \div 1,3$ . W przypadku drugim podzakresy ciśnienia absolutnego wynoszą  $0,25 \div 0,6$ ;  $0,4 \div 1,0$ ;  $0,6 \div 1,6$ ;  $1,0 \div 2,5$ ;  $1,6 \div 4,0$  MPa, przy równoczesnej zmianie temperatury o  $\pm 50^\circ\text{C}$ , w przedziale  $0 \div 200^\circ\text{C}$  [6], [7].

Klasa dokładności mierników konwencjonalnych z integralnym urządzeniem przeliczającym wynosi od 2 do 4 [6], [7].

W układach pomiarowych z zastosowaniem przetworników są stosowane samoistne urządzenia przeliczające (korektory), w których realizowana funkcja zależy od zastosowanego systemu i typu urządzenia.



Rys. 3. Schemat układu do pomiaru natężenia przepływu z korektą zmian gęstości, dla systemu pneumatycznego.  $P_p$  - pneumatyczne sygnały standardowe,  $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5$  - współczynniki proporcjonalności.

W systemie pneumatycznym zasadniczy układ pomiarowy z urządzeniami przeliczającymi składa się z przetworników różnicy ciśnienia, ciśnienia i temperatury, urządzeń mnożącego i pierwiastkującego oraz miernika końcowego. Przebiegi sygnałów i realizowane funkcje matematyczne pokazano na rys. 3. Zastosowany przetwornik ciśnienia musi być zerowany tak, aby jego charakterystyka rozpoczynała się od zerowego ciśnienia absolutnego. Również i charakterystyka przetwornika temperatury musi rozpoczynać się od zera bezwzględnego, co w warunkach praktycznych stwarza kłopoty techniczne [15].

Zakresy zmian ciśnienia i temperatury czynnika mierzonego, w przypadku stosowania samoczynnej korekcji, nie mogą być dowolne. Zastanówmy się więc, co decyduje o granicach zakresu korekcji. Przekształćmy w tym celu wzór /48/ do postaci

$$\dot{M} = G_1 \sqrt{\Delta p} \sqrt{\frac{P_r \cdot T_{obl}}{P_{obl} \cdot T_r}} \quad /49/$$

gdzie

$$G_1 = k \cdot \epsilon_{obl} \cdot d^2 \cdot \epsilon_r \sqrt{\epsilon_{obl} \cdot \frac{K_{obl}}{K_r}}$$

Analizując wyrażenie

$$\frac{P_r \cdot T_{obl}}{P_{obl} \cdot T_r} \quad /50/$$

to jeśli chcemy, by dla wartości obliczeniowych nie była realizowana korekcja, czyli  $C_M^* = 1$ , należy przyjąć

$$P_{obl} = P_{min}$$

$$T_{obl} = T_{max}$$

Wówczas wyrażenie /50/ przyjmie postać

$$\frac{P_r \cdot T_{max}}{T_r \cdot P_{min}}$$

Dla  $P_r = P_{min}$  i  $T_r = T_{max}$   $C_M^* = 1$ .

Zarówno zmiana  $P_r$  od  $P_{rmin}$  do  $P_{rmax}$  jak i zmiana  $T_r$  od  $T_{rmax}$  do  $T_{rmin}$  powodują wzrost współczynnika korekcji ( $C_M^* > 1$ ). Również dla  $P < P_{min}$  i  $T > T_{max}$  układ korekcyjny pracuje poprawnie, z tym że  $C_M^* < 1$ .

Dla przypadku, gdy  $P > P_{max}$  i  $T < T_{min}$ , układ korekcyjny będzie działał dla każdej wartości  $P$  i  $T$ , jeżeli zostanie spełniony warunek

$$P \approx \frac{Z_p}{Z_T} \cdot T$$

gdzie:

$Z_p$  i  $Z_T$  — zakresy pomiarowe przetworników ciśnienia i temperatury.

Dla  $P > \frac{Z_p}{Z_T} \cdot T$  korekcja jest niemożliwa.

Zakresy pomiarowe  $Z_p$  i  $Z_T$  przetworników ciśnienia i temperatury nie mogą być dowolne, gdyż



za względu na realizowaną w urządzeniu przeliczającą operację dzielenia ich sygnałów, musi być spełniony warunek

$$X_p \leq 1 \quad (5)$$

gdzie

$$X_p = \frac{P}{Z_p} \cdot 100\%$$

$$X_T = \frac{T}{Z_T} \cdot 100\%$$

Warunek /5/ można zapisać w postaci

$$\frac{P}{Z_p} \leq \frac{1}{Z_T}$$

Nierówność powyższa jest spełniona dla wszystkich wartości P i T, jeżeli

$$\frac{P_{\max}}{Z_p} \leq \frac{1}{Z_T}$$

Z powyższej nierówności wynika, że dla założonych wartości  $Z_p$  i  $Z_T$  muszą być spełnione warunki

$$T \leq T_{\min}$$

$$T \geq T_{\max}$$

$$P \geq P_{\max}$$

Błąd względny pomiaru ciśnienia przy stosowaniu układu korekcyjnego w systemie pomiarowym można obliczyć z wzoru (1) podstawiając na  $\delta_c$  wartość obliczoną dla

14. Błąd  $\delta_D$  jest w tym celu sumą błędów wynikających z błędów przetwarzania ciśnienia mnożącego, dzielącego i pomiaru ciśnienia.

Jeśli przyjęć klasę dokładności 0,5 (klasę dla wszystkich urządzeń pneumatycznych i elektrycznego (przetworniki ciśnienia, temperatury, urządzenia mnożące i dzielące) i wyliczyć dla klasy najmniejszą wartość względnego błędów (dla wartości przetwarzanych w powyższych górnej granicy zakresu przetwarzania), to wartość błęd  $\delta_c$  wyniesie  $\pm 0,4\%$  (dla przetwarzanych w powyższych 0,5 zakresu przetwarzania, błąd  $\delta_c = \pm 2\%$ ).

Postępując podobnie przy obliczaniu błęd  $\delta_{\Delta p}$  czyli zakładając klasę dokładności 0,6 (przetworniki różnicy ciśnienia i urządzenia pomiarowe), natomiast klasę dokładności 1,6 (mnożnik i dzielący) wyniesie  $\pm 0,6\%$ , natomiast wartość większa (wartość przetwarzana równa 0,2 górnej granicy zakresu przetwarzania) wyniesie  $\pm 2\%$ .

Według [15] średni błąd względny pomiaru ciśnienia przy stosowaniu układu korekcyjnego wynosi 2%. Na wartość tego błęd składają się błędy przetwarzania przetwornika różnicy ciśnienia i przetwornika ciśnienia (każdy z przetworników o klasie dokładności 0,6) oraz błąd w układzie przeliczającym (charakterystykę przetwornika temperatury). W obliczeniu tym nie uwzględniono błędów przetwarzania urządzeń przeliczających.

W systemie elektrycznym są stosowane zarówno przetworniki ciśnień jak i przetworniki przepływu (przetworniki  $\Delta p$  o charakterystyce pierwiastkującej).

W przypadku stosowania przetwornika różnicy ciśnień, urządzenie przeliczające (korektor) realizuje funkcję  $\frac{\Delta p \cdot P}{T}$ . Linearyzacja sygnału wyjściowego jest dokonywana w urządzeniu pierwiastkującym.

Gdy w układzie korekcyjnym jest zastosowany przetwornik przepływu, korektor realizuje funkcję  $I \cdot \sqrt{\frac{P}{T}}$ , gdzie  $I$  — sygnał wyjściowy przetwornika przepływu.

Jako sygnały wejściowe do elektronicznych urządzeń przeliczających mogą być stosowane sygnały standardowe, jak też sygnały w postaci zmian oporności (od czujnika termometru oporowego lub nadajnika potencjometrycznego). Oczywiście rodzaj sygnału wejściowego jest zależny od konstrukcji urządzenia przeliczającego.

W przypadku korektora dostosowanego do sygnałów wejściowych standardowych z przetworników różnicy ciśnień, ciśnienia i temperatury, są słuszne te same warunki i relacje, co w systemie pneumatycznym.

Zakresy zmian ciśnienia i temperatury czynnika mierzonego, są uwarunkowane nie tylko dopuszczalnym zakresem zmian współczynnika ściśliwości, ale również właściwościami urządzenia przeliczającego.

Na przykład, dla korektora systemu TELEPERM [12] musi być spełniony warunek

$$1 > \frac{P_{\min} T_{\min} \cdot \zeta_{\min}}{P_{\max} T_{\max} \cdot \zeta_{\max}} > 0,35$$

Znane są rozwiązania korektorów, gdzie istnieje możliwość nastawiania współczynnika ściśliwości [17]. Rachunek błędów dla wyznaczenia  $\delta_{\zeta}$  i  $\delta_{\Delta p}$  w systemie elektrycznym jest taki sam jak w systemie pneumatycznym. Błąd przetwarzania korektora wynosi  $\pm 1\%$  [17]. Według [15] błąd przetwarzania elektrycznego układu korekcyjnego (z uwzględnieniem błędów przetwarzania ciśnienia i temperatury) wynosi  $\pm 1,5\%$ .

Znane są urządzenia przeliczające [23], w których nie są wykonywane operacje matematyczne nad sygnałami ciśnienia i temperatury, jest natomiast realizowane obliczanie gęstości gazu, na podstawie wielomianów trzeciego stopnia, z sześcioma niezależnymi stałymi. Stałe te, charakterystyczne dla każdego gazu, są wprowadzone przez producenta do pamięci urządzenia przeliczającego.

Przeliczenie jest realizowane na podstawie sygnałów standardowych z przetworników różnicy ciśnienia, ciśnienia i temperatury.

Klasa dokładności urządzenia przeliczającego wynosi 0,3, przy zakresie zmian ciśnienia statycznego (0,3 ÷ 0,35) MPa i zakresie zmian temperatury do 40°C.

Według obliczeń podanych przez [23] przy zastosowaniu przetwornika  $\Delta p$ , o klasie dokładności 0,2, przetwornika ciśnienia klasy 0,25, przetwornika temperatury klasy 0,15, urządzenia pierwiastkującego klasy 0,25 i miernika klasy 0,01, graniczny błąd względny pomiaru skorygowano natężenia przepływu wynosi  $\pm 0,6\%$ .

*Metoda urządzeń przeliczających na podstawie pomiaru gęstości*

Przekształćmy wzór /35/ do postaci

$$\dot{M} = G_2 \sqrt{\Delta p \cdot \zeta} \quad /52/$$

gdzie:

$$G_2 = k \cdot L_{obl} \cdot d^2 \cdot \epsilon_r$$

i przyjmijmy, że przy pomiarze natężenia przepływu  $G_2 = idem$ . Wówczas wartość wskazana  $M = G_2 f(\Delta p, \zeta)$ . Jak wynika z powyższego istota metody sprowadza się do pomiaru wielkości  $\Delta p$  i  $\zeta$  oraz wykonania obliczeń według /52/ za pomocą urządzenia przeliczającego.

Przykładem stosowania tej metody jest układ opisany w [11]. Do pomiaru gęstości zastosowano gęstościomierz rezonatorowy z rezonatorem kamertonowym, o klasie dokładności 0,3. Klasa dokładności ci urządzenia przeliczającego zawiera się w granicach  $0,2 \div 0,3$ .

Według obliczeń podanych przez [11] i [19], przy zastosowaniu przetwornika  $\Delta\rho$ , o klasie dokładności 0,5, graniczny błąd względny pomiaru skorygowanego natężenia przepływu wynosi  $\pm 1\%$ . W obliczeniach nie uwzględniono błędu miernika.

## 5. Uwagi końcowe

Jak wynika z przeprowadzonych rozważań, błąd pomiaru natężenia przepływu metodą zwężkową, za leżnie od poprawności zaprojektowania i wykonania oraz staranności konserwacji układu pomiarowego, może się zawierać w granicach od ułamka procenta do kilkudziesięciu procent.

Według PN-65/M-53950, najmniejsza osiągalna wartość granicznego względnego błędu pomiaru w optymalnych warunkach, zawiera się w granicach  $0,5 \div 1\%$ , zależnie od rodzaju i modułu zwężki pomiarowej.

W najbardziej nie sprzyjających warunkach [16] wartość tego błędu nie przekracza 3,5%. Należy rozumieć, że w tym przypadku są spełnione wszystkie wymagania określone dokumentami normalizacyjnymi, a klasa dokładności miernika nie przekracza 1,5.

W przypadku stosowania samoczynnej korekcji zmian gęstości, przy założonych optymalnych warunkach pomiaru, wartość względnego granicznego błędu pomiaru, w zależności od zastosowanej metody i właściwości metrologicznych użytych urządzeń zawiera się w granicach  $0,6 \div 2,5\%$ .

Jak już na to zwrócono uwagę, we wstępie niniejszego opracowania, problematyka dokładności pomiaru natężenia przepływu, to nie tylko metrologia, to również w dużej liczbie przypadków skutki ekonomiczne.

Szczególne znaczenia nabierają tu błędy występujące przy pomiarze natężenia przepływu gazu i pary, w przypadkach znacznych zmian gęstości czynnika mierzonego.

W pewnym stopniu dotyczy to również cieczy, jeśli tą cieczą jest np. ropa naftowa. Błąd pomiaru 4% dla jednego miliona ton, odpowiada 40 000 ton.

Jeśli przyjąć liczbę publikacji jako jedno z kryteriów spopularyzowania tej problematyki w kraju, to należy przyznać, że zagadnienie korekcji zmian gęstości nie jest doceniane przez użytkowników pomiaru natężenia przepływu.

Prace w zakresie zastosowania korekcji są prowadzone jedynie w Centralnym Laboratorium Gazownictwa [20].

Należałoby się zastanowić, czy odpowiednia dokładność w rozliczeniach wewnętrznych w przemyśle, jak też i w rozliczeniach międzynarodowych, nie może przynieść efektów ekonomicznych, co najmniej tego samego rzędu, co efekty wynikające ze zmniejszenia zużycia paliwa przez transport samochodowy. Dlatego wydaje się celowe kontynuowanie prac nad udoskonaleniem korektora opisanego w [17], jak również podjęcia prac nad korektorem działającym na podstawie pomiaru gęstości, z zastosowaniem rezonatorowego czujnika gęstości.

Sprawą nie budzącą wątpliwości jest potrzeba nowelizacji normy PN-65/M-53950. Należy przede wszystkim rozszerzyć zakres ustaleń merytorycznych dotyczących błędów pomiaru, wprowadzić uzupełnienia w zakresie terminologii. Proponuje się również uwzględnienie w znowelizowanej wersji normy problematyki związanej z terminologią (np. korekcja czy kompensacja) i właściwościami korektora i układu korekcji.

## Literatura

- [1] PN-65/M-53950. Pomiar natężenia przepływu płynów za pomocą zwężek.
- [2] ISO Recommendation R541. Measurement of Fluid Flow by Means of Orifice Plates and Nozzles. 1-st. Edition., January, 1967.
- [3] DIN 1952. Durchflussmessung mit genormten Düsen, Blenden und Venturidüsen, August 1971.
- [4] VDI 2040, Blatt 1. Berechnungsgrundlagen für die Durchflussmessung mit Drosselgeräten. Durchflusszahlen und Expansionszahlen genormter Drosselgeräte und Abweichungen von den Normvorschriften, Oktober 1971.
- [5] Bourek R.: Eine neue elektronische Ringwaage. Sonderdruck aus: Technische Berichte. Jhg. 8, Heft 2, September 1956.
- [6] Czegodajew W.L.: K woprosu ob izmierenije razchoda gazow i para difmanometrami-razchodomierami. Pribory i systemy uprawlenija, nr 5, 1971.
- [7] Czegodajew W.L.: Difmanometr-razchodomer gaza s awtomatycznej korrekcyj. Izmeritielnaja Technika, nr 1, 1972.
- [8] Gafanowicz M.D.: Difmanometry-razchodomierzy s awtomatycznej korrekcyj po nieskolkim parametram gaza. Izmeritielnaja Technika, nr 10, 1959.
- [9] Gafanowicz M.D.: Tocznost izmierenija razchoda gaza i para difmanometrami. Izmeritielnaja Technika, nr 7, 1967.
- [10] Hengstenberg J., Sturm B., Winkler O.: Messen und Regeln in der Chemischen Technik. 2 Aufl. 1964.
- [11] Henning J.: Neue Messgeräte zur Erfassung von Erdgasmengen in Verbindung mit Messumformern für Dichte. Sonderdruck aus Erdöl-Erdgas-Zeitschrift 86 Jahrg., Heft 5, 1970.
- [12] Hoffart E.: Der TELEPERM — Rechner für Zustandsgrößen—ein Gerät zur Druck—, Temperatur—, Wichte— und Feuchte— Berichtigung der Durchflussmessung von Gasen. Regelungstechnik, Heft 10, Oktober 1962.
- [13] Kachanowicz W.S.: Awtomatycznej kompensacija pogresznosti raschodomierow ot izmienienija koefficienta rassirenija izmierajemoj sriedy. Izmeritielnaja Technika, nr 7, 1967.
- [14] Kiwilis S.S. i Gafanowicz M.D.: Izmierenije razchoda po pierepadu dawlenija s awtomatycznej kompensacyj izmienienija parametrow gaza. Izmeritielnaja Technika, nr 12, 1964.
- [15] Koj J.: Kompensacja zmian ciśnienia i temperatury podczas pomiaru natężenia przepływu gazu dokonana przy użyciu przyrządów pneumatycznych. PAK, nr 5, 1967.
- [16] Kremlewski P.P.: Razchodomierzy. Wyd 2. Maszgiz, Moskwa 1963.
- [17] Łukaszewicz J., Kosztowski S.: Korektory przepływu elektronicznego systemu automatyki INTELEKTRAN. Biuletyn Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów MERA PIAP, nr 2/58, 1976.
- [18] Obalski J.: Podstawy metrologii. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1966.
- [19] Ohnesorge W.: Beitrag zur Berechnung der Fehler von Messanlagen mit Wirkdruckzähler und Dichtemesser für Erdgas. Sonderdruck aus Erdöl Erdgas-Zeitschrift, 85 Jahrg. Heft 11, 1969.
- [20] Piekarski M., Osiać z A.: Układy automatycznej korekcji natężenia przepływu gazu. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, t. XLIV, nr 8.
- [21] Schulz H.: Zur Druck- und Temperaturkompensation bei Durchflussmessungen nach der Differenzdruckmethode. H C Berichte, 1968.
- [22] Compensation Practice. Instruments and Control Systems. August 1959.
- [23] Mass Flow Measurement. Bulletin E80-001 f my Rosemount.