

УДК 532.137:681.2

Крих Г., Робур М.

ДУ “Львівська політехніка”, кафедра автоматизації теплових і хімічних процесів

ПОХИБКИ РОЗРАХУНКУ СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГІДРОДИНАМІЧНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ РЕОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ В'ЯЗКОПЛАСТИЧНИХ РІДИН

© Крих Г., Робур М., 2000

The theoretical account of static models of hydrodynamic measuring transducers of plastic viscosity and yield shear stress of viscoplastic liquids based on bridge measuring transducers is considered. Their approximate static models are represented. The errors of calculation of rheological parameters on these models on an example of liquid with given ranges of measurement of rheological parameters are determined.

Вимірювальні перетворювачі, що будуються на основі гідродинамічних мостових перетворювачів, знаходять все більше застосування для вимірювання реологічних параметрів неньютонівських рідин, зокрема в'язкопластичних [1]. У цій роботі аналізуються похибки розрахунку статичних характеристик гідродинамічних вимірювальних пере-

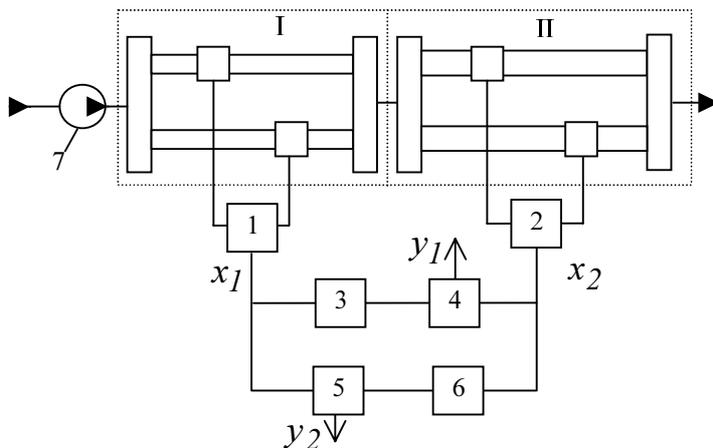


Рис. 1. Принципова схема вимірювальних перетворювачів η і τ_0 : 1,2 – дифманометричні перетворювачі; 3,6 – блоки масштабування; 4,5 – суматори; 7 – задавач витрати

творювачів пластичної в'язкості η та граничного напруження зсуву τ_0 в'язкопластичної рідини, принципова схема яких показана на рис. 1.

Вони складаються з двох послідовно сполучених мостових перетворювачів I і II, задавача постійної витрати 7, двох дифманометричних перетворювачів 1 і 2, двох блоків масштабування 3 і 6, двох суматорів 4 і 5 [2]. Чутливими елементами гідродинамічних вимірювальних перетворювачів є циліндричні трубки круглого поперечного перерізу з внутрішнім діаметром 4-12 мм. Кожний мостовий перетворювач містить чотири трубки з однаковим внутрішнім діаметром та різної довжини. У протилежні плечі кожного моста під'єднані трубки однакової довжини. Проектуючи гідродинамічні вимірювальні перетворювачі, розраховують продуктивність задавача витрати, границі вимірювання дифманометричних перетворювачів, розраховують діаметри і довжини трубок та статичні характеристики вимірювальних перетворювачів.

Під час нагнітання в'язкопластичної рідини насосом 7 через мостові перетворювачі I і II в їх вихідних діагоналях виникають перепади тиску Δp_1 та Δp_2 .

Перепад тиску Δp на виході мостового перетворювача можна розрахувати з рівняння його витратної характеристики [3], яке в безрозмірній формі має вигляд

$$q = \frac{1}{\beta} \cdot \left(1 - \frac{4}{3} \cdot \beta + \frac{1}{3} \cdot \beta^4 \right), \quad (1)$$

де $q = \frac{32\eta F}{\pi D^3 \tau_0}$; $\beta = \frac{4\Delta l \tau_0}{\Delta p D}$ – безрозмірні комплекси, в яких D , Δl – діаметр та різниця довжин трубок в мостовому перетворювачі; F – об’ємна витрата рідини. У практичних розрахунках величиною β^4 в рівнянні (1) нехтують і отримують спрощене рівняння

$$\frac{1}{\beta} = q + \frac{4}{3}, \quad (2)$$

згідно з яким перепад тиску в діагоналі моста лінійно залежить від витрати, пластичної в’язкості η та граничного напруження зсуву τ_0

$$\Delta p = \frac{64F\Delta l}{\pi D^4} \eta + \frac{16\Delta l}{3D} \tau_0. \quad (3)$$

Розрахунок перепаду тиску за наближеним рівнянням (3) зумовлює похибку, яка залежить від величини β , яка може змінюватись від 0 до 1. Так в діапазоні $0 \leq \beta \leq 0.44814$ приведена похибка, визначена як

$$\delta = \left(\frac{1}{\beta} - \frac{1}{\beta_T} \right) \cdot 100,$$

не перевищуватиме 3 %, а в діапазоні $0 \leq \beta \leq 0.35569$ – буде меншою від 1.5 %.

Якщо для розрахунку перепадів тиску Δp_1 і Δp_2 застосувати наближене рівняння (3), то вихідні сигнали x_1 та x_2 дифманометричних перетворювачів 1 і 2 можна записати у вигляді

$$x_1 = k_1 \Delta p_1 = k_1 \left(\frac{128\eta F}{\pi D_1^4} + \frac{16\tau_0}{3D_1} \right) \Delta l_1, \quad (4)$$

$$x_2 = k_2 \Delta p_2 = k_2 \left(\frac{128\eta F}{\pi D_2^4} + \frac{16\tau_0}{3D_2} \right) \Delta l_2,$$

де k_1, k_2 – коефіцієнти передачі дифманометрів 1 і 2 відповідно; $\Delta l_1, \Delta l_2$ – різниця довжин трубок відповідно в мостових перетворювачах I і II; D_1, D_2 – діаметри трубок відповідно в мостових перетворювачах I і II.

Суматор 4 формує різницю між вихідним сигналом x_2 дифманометричного перетворювача 2 і масштабованим сигналом дифманометричного перетворювача 1, а суматор 5 – різницю між вихідним сигналом x_1 дифманометричного перетворювача 1 і масштабованим сигналом дифманометричного перетворювача 2

$$y_1 = x_2 - p x_1, \quad (5)$$

$$y_2 = x_1 - s x_2,$$

де p, s – коефіцієнти передачі блоків масштабування 3 і 6. Коефіцієнти масштабування визначаються конструктивними характеристиками трубок мостових перетворювачів і

коефіцієнтами передачі дифманометричних перетворювачів

$$p = \frac{k_2}{k_1} \cdot \frac{\Delta l_2}{\Delta l_1} \cdot \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^4, \quad s = \frac{k_1}{k_2} \cdot \frac{\Delta l_1}{\Delta l_2} \cdot \frac{D_2}{D_1}. \quad (6)$$

Підставляючи в рівняння (5) x_1 та x_2 , визначені за рівняннями (4), з урахуванням співвідношень (5) одержимо наближені статичні характеристики перетворювачів η і τ_o

$$y_1 = \frac{16\Delta l_2}{3D_2} k_2 \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3\right] \tau_o, \quad y_2 = \frac{128F\Delta l_1}{3D_1^4} k_1 \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3\right] \eta. \quad (7)$$

З отриманих рівнянь видно, що вихідний сигнал вимірювального перетворювача y_1 прямо пропорційний до граничного напруження зсуву і не залежить від в'язкісних властивостей контролюваного середовища, а вихідний сигнал вимірювального перетворювача y_2 прямо пропорційний до пластичної в'язкості і не залежить від пластичних властивостей контролюваного середовища. Похибка визначення реологічних параметрів за рівняннями (7) не перевищуватиме 3 %, якщо в діапазонах їх вимірювання величина β буде менше за 0.44814. Таких значень β можна досягнути відповідним вибором конструктивних характеристик трубок мостових перетворювачів та продуктивності насоса. Мінімально допустиме значення витрати в трубці залежить від прийнятої похибки розрахунку перепаду тиску на виході з мостового перетворювача і визначається з умови

$$F \geq C \cdot \frac{\tau_{ov}}{\eta_H} \cdot D^3, \quad (8)$$

де τ_{ov} – верхня межа діапазону зміни τ_o ; η_H – нижня межа діапазону зміни пластичної в'язкості; D – діаметр капілярної трубки.

Коефіцієнт C в (8) залежить від приведеної похибки δ і становить

$$C = \frac{1}{\beta_B} \cdot \left(1 - \frac{4}{3} \cdot \beta_B + \frac{1}{3} \cdot \beta_B^4\right) \cdot \frac{\pi}{32}, \quad (9)$$

де β_B – верхня межа зміни β , що відповідає заданій максимальній приведеній похибці δ . Чим більша задана похибка δ , тим більше значення β_B і відповідно йому менше значення коефіцієнта C . Так, для $\delta \leq 1.5\%$ коефіцієнт $C = 0.146511$, для $\delta \leq 3\%$ – $C = 0.091071$.

Максимально допустиме значення витрати в трубках визначається з умови забезпечення структурного режиму руху в'язко-пластичних рідин в капілярних трубках. Стійкий структурний режим руху в'язкопластичної рідини незалежно від її реологічних властивостей існує при значеннях узагальненого числа Рейнольдса Re^* , що не перевищують 2000, тобто

$$Re^* = \frac{4\rho F}{\pi D \eta (1 + \tau_o \pi D^3 / 24 \eta F)} \leq 2000, \quad (10)$$

де ρ – густина рідини; D – внутрішній діаметр трубки. Отже, для забезпечення стійкого структурного режиму руху контролюваного середовища в капілярах його витрата повинна задовольняти нерівність

$$F \leq 250 \cdot \frac{\pi D_{\min} \eta_H}{\rho} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{D_{\min}}{\eta_H}\right)^2 \frac{\rho \tau_{oH}}{3000}}\right), \quad (11)$$

де D_{\min} – мінімальний діаметр капілярних трубок мостових перетворювачів; $\tau_{\text{он}}$ – нижня межа діапазону вимірювання граничного напруження зсуву; $\eta_{\text{н}}$ – нижня межа діапазону вимірювання пластичної в'язкості. Умова (11) накладає обмеження на вибір верхнього допустимо можливого значення витрати в капілярних трубках.

Діапазони вимірювання реологічних параметрів рідин, що застосовуються в технологічних процесах, не завжди дозволяють забезпечити виконання умови (8). Якщо верхня межа $\beta_{\text{в}}$ зростає, то відповідно зростає похибка визначення перепадів тиску за рівнянням (4), а отже, зростають і похибки визначення пластичної в'язкості і граничного напруження зсуву за рівняннями (7).

Для прикладу розглянемо гідродинамічний перетворювач для вимірювання реологічних параметрів бурового розчину: пластичної в'язкості η в діапазоні 0.003 – 0.03413 Па·с і граничного напруження зсуву τ_0 в діапазоні 0 – 7.75 Па. У результаті розрахунку вибрані капілярні трубки з діаметрами $D_1 = 3.989$ мм і $D_2 = 6.0087$ мм, різницями довжин $\Delta l_1 = 0.307$ м і $\Delta l_2 = 0.350$ м. Вибрані дифманометри 1 і 2 із струмовим вихідним сигналом 0-5 мА мають діапазони вимірювання 2500 мм в. ст. і 1000 мм в. ст. відповідно. Продуктивність насоса 7 вибрана з урахуванням умови (11) і становить 85.65 л/год (слід відзначити, що за нерівністю (8) ця витрата для $\delta = 3\%$ мала бути більшою 367.5 л/год, при якій порушується структурний режим руху рідини в капілярах, тобто задовольнити виконання умови (8) не вдається).

Розраховані за рівняннями (6) коефіцієнти масштабування p і s відповідно дорівнюють 0.55361 та 0.52850, а статичні характеристики, розраховані за рівняннями (7), мають вигляд

$$y_1 = 0.11201\tau_0, \quad (11)$$

$$y_2 = 84.80425\eta. \quad (12)$$

Зауважимо, що в заданих діапазонах вимірювання реологічних параметрів для вибраних конструктивних і режимних характеристик капілярних трубок $\beta_{\text{в}}$ змінювалось від 0 до 0.6957. Верхнє значення $\beta_{\text{в}} = 0.6957$ досягається в другому мостовому перетворювачі при максимальному значенні $\tau_{\text{ов}} = 7.75$ Па і мініимальному значенні $\eta_{\text{н}} = 3$ мПа·с. Похибка розрахунку перепаду тиску у вихідній діагоналі моста за наближеним рівнянням (4) при цьому значенні $\beta_{\text{в}}$ становить 11.2 %.

На рис.2 показані статичні характеристики гідродинамічного перетворювача τ_0 : наближена, розрахована за рівнянням (11) і точні, розраховані за точним рівнянням (3) при різних значеннях пластичної в'язкості. На рис.3 показані статичні характеристики гідродинамічного перетворювача η : наближена, розрахована за рівнянням (12), – і точні, розраховані при різних значеннях граничного напруження зсуву.

Під час визначення граничного напруження зсуву τ_0 за рівнянням (11) виникає похибка внаслідок недостатньо повної компенсації в'язкісних властивостей середовища, тобто у вихідному сигналі y_1 наявна складова, що залежатиме від значень пластичної в'язкості. η . При визначенні пластичної в'язкості η за наближеною статичною характеристикою (12) виникає похибка внаслідок неповної компенсації впливу пластичних властивостей середовища. Це означає, що у вихідному сигналі y_2 є складова, яка буде залежати від значень τ_0 .

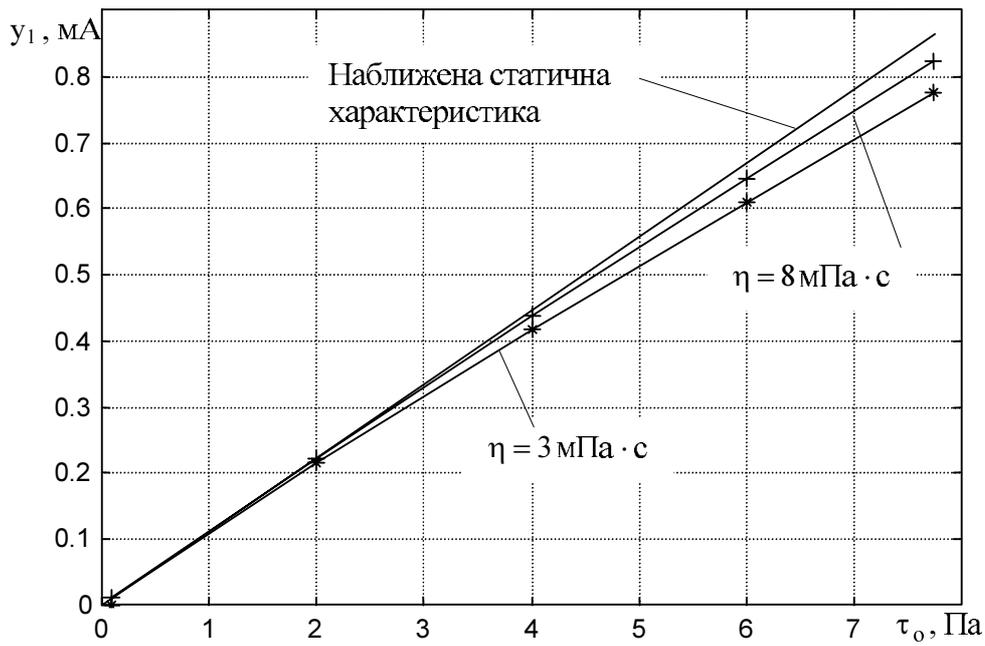


Рис.2. Статичні характеристики вимірювального перетворювача τ_0 для різних значень пластичної в'язкості

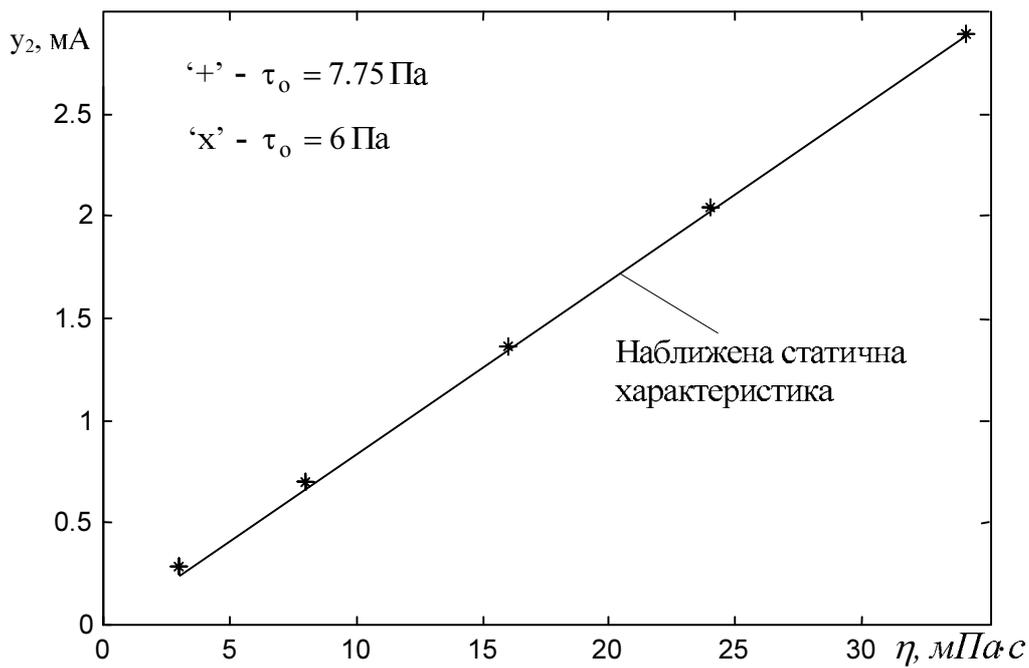


Рис.3. Статичні характеристики вимірювального перетворювача пластичної в'язкості для різних значень τ_0

Приведені до діапазону вимірювання похибки визначення реологічних параметрів за наближеними статичними характеристиками, що розраховані за формулами

$$\delta_{\tau_0} = \frac{\tau_0 - \tau_{0T}}{\tau_{0B} - \tau_{0H}} \cdot 100, \quad (13)$$

$$\delta_{\eta} = \frac{\eta - \eta_T}{\eta_B - \eta_H} \cdot 100, \quad (14)$$

де τ_{oT}, η_T – значення граничного напруження зсуву і пластичної в'язкості, обчислені за точними статичними характеристиками, показані на графіках рис. 4 і 5.

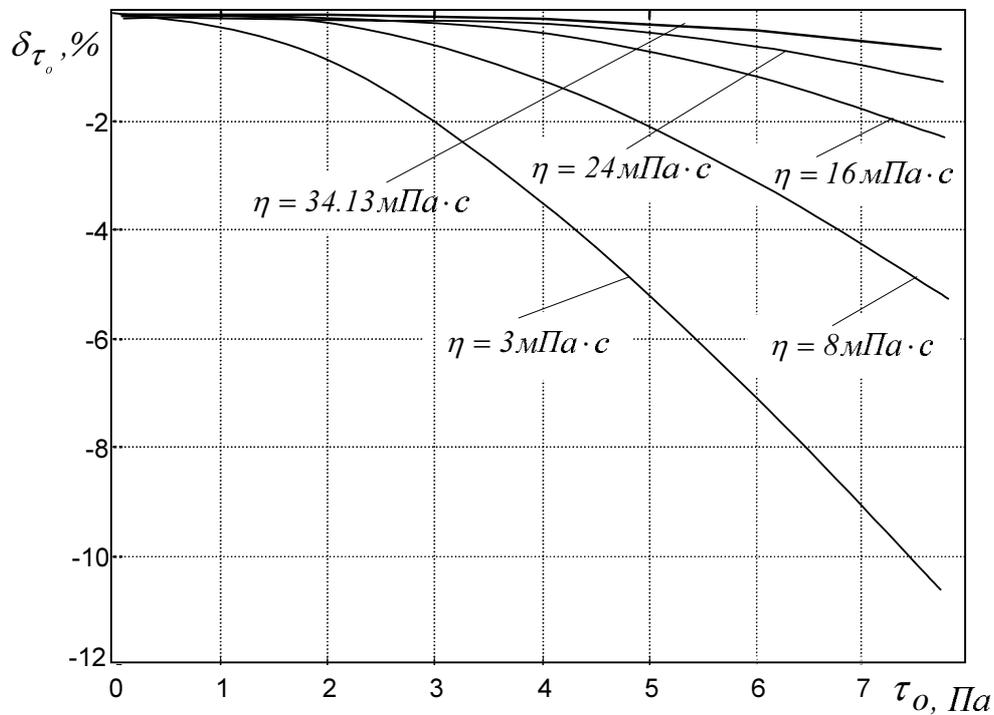


Рис.4. Похибки визначення граничного напруження зсуву за наближеною статичною характеристикою вимірювального перетворювача τ_o

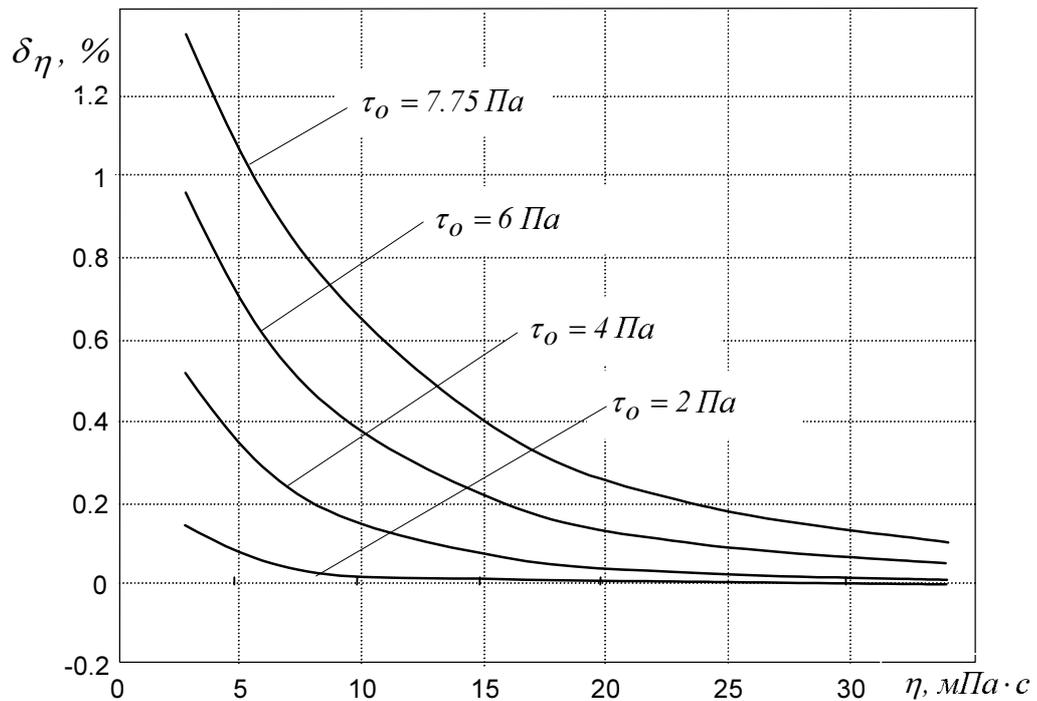


Рис.5. Приведені похибки визначення пластичної в'язкості за наближеною статичною характеристикою вимірювального перетворювача η

Як видно з графіків, чим менше значення η і більше значення τ_0 , тим більші похибки δ_{τ_0} , δ_{η} . Максимальна похибка визначення пластичної в'язкості η за наближеною статичною характеристикою не перевищує $\delta_{\eta} = 1,34\%$, а при визначенні граничного напруження зсуву максимальна похибка δ_{τ_0} досягає $10,67\%$.

Отже, якщо в діапазонах вимірювання граничного напруження зсуву і пластичної в'язкості в'язкопластичної рідини неможливо спроектувати вимірювальні перетворювачі τ_0 і η з похибками δ_{τ_0} і δ_{η} , що не перевищують допустимі, то реологічні параметри необхідно визначати з точних статичних характеристик, застосовуючи для їх розрахунку рівняння витратної характеристики мостового перетворювача (1).

1. Пистун Е.П., Кулик М.П., Крых А.Б. Гидродинамические измерительные системы и преобразователи реологических параметров неньютоновских жидкостей // Пневматические и гидравлические устройства и системы управления: X Межд. конф. «Яблонна-86». – М., 1986. – С.112-115. 2. А.с. 1092379 СССР. Устройство для определения реологических характеристик вязкопластичных сред / Е.П. Пистун, А.Б. Крых // Открыт. Изобрет. – 1984. – № 18. 3. Пистун Е.П., Крых А.Б. Основы расчета катилляров гидродинамической системы для измерения реологических характеристик буровых растворов // Контрольно-измерительная техника. – Вып.34. – 1984. С.38-43.

УДК 543.271.3

Приміський В.

Науково-дослідний інститут аналітичного приладобудування

ОСОБЛИВОСТИ ГАЗОАНАЛІТИЧНИХ ВИМІРІВ В БАГАТОКАНАЛЬНИХ СИСТЕМАХ

© Приміський В., 2000

Vector methods of processing of gas analytical systems measuring information have been investigated. Structural scheme of information processing is developed.

Автоматизація і вдосконалення технологічних процесів у промисловості, енергетиці, на транспорті вимагають швидкого автоматичного аналізу багатоконпонентних газових сумішей, які утворюються в ході різних технологічних процесів. На основі безперервного автоматичного аналізу можливе створення автоматичних систем керування технологічними процесами, пов'язаними з утворенням і використанням газів. Такі процеси існують в чорній і кольоровій металургії, нафтохімії, теплоенергетиці, виробництві надчистих матеріалів, електронних технологіях.

Більшість газоаналітичних вимірів – результат опрацювання непрямих вимірів. Послідовність аналізу похибок має такий вигляд:

1. У результаті визначення окремих аргументів непрямого виміру одержують групи спостережень по кожному аргументу, з яких виключають відомі систематичні похибки.