

## МЕТОДИ І ПРИЛАДИ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ РІДКОЇ І ГАЗОПОДІБНОЇ ФАЗ

УДК 681.121

### ПРИЛАДОВИЙ КОМПЛЕКС ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ТА КІЛЬКОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ НА ПІДГРУНТІ РІЗНИХ ФІЗИЧНИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ

*І. В. Коробко\*, О. О. Драчук, В. А. Коваленко*

*Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”,  
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, [i.korobko@kpi.ua](mailto:i.korobko@kpi.ua)*

*Стаття направлена на розв'язання надзвичайно важливої задачі сьогодення - вимірювання об'єму та об'ємної витрати природного газу з високими метрологічними показниками, а саме, підвищення точності вимірювальних перетворювачів витрати при розширеному діапазоні та їх самодіагностиці. Для розв'язання поставленої задачі запропоновано застосувати дублювання засобів виміру, які ґрунтуються на різних фізичних методах вимірювання витрати та кількості газу. За результатами проведених досліджень окреслені геометричні параметри просторової форми комплексного вузла вимірювання та визначені локальні місця встановлення приладів на технологічній магістралі.*

*Ключові слова: перетворювач витрати, лічильник, діапазон вимірювання, самодіагностика, повторюваність результатів.*

*Статья направлена на решение чрезвычайно важной задачи сегодня - измерения объема и объемного расхода природного газа с высокими метрологическими показателями, а именно, повышение точности измерительных преобразователей расхода при расширенном диапазоне да их самодиагностике. Для решения поставленной задачи предложено применить дублирование средств измерения, основанных на различных физических методах измерения расхода и количества газа. По результатам проведенных исследований очерчены геометрические параметры пространственной формы комплексного узла измерения и определены локальные места установки приборов на технологической магистрали.*

*Ключевые слова: преобразователь расхода, счетчик, диапазон измерения, самодиагностика, повторяемость результатов.*

*The article devoted to the decision an extremely important task today - measuring the volume and volume flow rate of natural gas with high metrological characteristics, namely, to improve the accuracy of flow measuring transducers with the extended range and their self-diagnostics. To solve this problem proposed to use duplicate measurement tools, based on different physical methods of measuring flow rate and volume of gas. The results of the research describe geometric parameters of spatial form of the measurement complex and determine the site of the devices on the technological line.*

*Keywords: flow measuring, flow meter, measuring range, self-diagnostics, repeatable results.*

**Вступ.** Дефіцит енергетичних ресурсів і неминуче його зростання у майбутньому обумовлюють особливу актуальність проблеми раціонального використання та ефективного обліку паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР). На сьогодні енергоємність валового внутрішнього продукту України майже в тричі перевищує середній рівень енергоємності валового внутрішнього продукту європейських країн. Це обумовлює гостру необхідність

створення дієвої системи енергозбереження, для організації якої необхідно реалізувати ефективну систему вимірювання і обліку витрати ПЕР шляхом побудови приладів і систем вимірювання витрати природного газу з високими метрологічними і експлуатаційними характеристиками. За свідченням експертів зниження похибок вимірювання витрати та кількості хоча б на 1% може забезпечити багатомільйонний економічний ефект.

Важливою задачею є зменшення падіння тиску на вимірювальній ділянці промислових газопроводів. Це не тільки економить енергетичні ресурси компресорних станцій, але і збільшує їхню пропускну спроможність.

При створенні сучасних систем вимірювання витрати та кількості рідин і газів постає задача раціонального вибору вимірювальних перетворювачів витрати (ВПВ), а також їх розміщення по протяжності технологічної мережі, що постає головною метою забезпечення вимірювань з високою точністю, повторюваністю та надійністю. Крім того, останнім часом виникає гостра необхідність у вимірі витрати та кількості ПЕР за різної динаміки їх протікання – від сталих до швидкозмінних потоків як у часі, так і за величиною. Це окреслює нагальну необхідність створення нових та вдосконалення існуючих приладів і систем вимірювання витрати ПЕР з високими метрологічними та експлуатаційними характеристиками, а також розробці критеріїв визначення місця розміщення ВПВ на вимірювальній ділянці з метою забезпечення мінімального обопільного впливу вимірюваного потоку та засобу вимірювання.

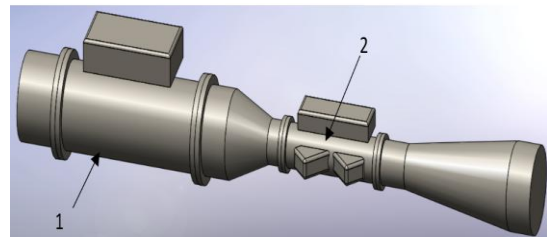
При обліку природного газу надзвичайно важливою і актуальною задачею є розширення діапазону вимірювання витрати при одночасному забезпеченні високої надійності та точності приладів. Існуючі прилади при розширенні діапазону вимірювання втрачають приписані їм точність, надійність і повторюваність вимірювань.

**Постановка задачі.** Розв'язання вищенаведених проблем виміру об'єму та об'ємної витрати можливе шляхом створення приладового комплексу обліку газу, побудованого на базі різних фізичних методів вимірювання. Це надає можливість отримувати надлишкову вимірювальну інформацію і організувати самодіагностику складових засобів вимірювання та комплексу в цілому.

Окрім того, на метрологічні показники ВПВ природного газу значний вплив мають газодинамічні характеристики потоку, які формуються при проходженні по технологічній магістралі за умов вимірювання.

Виходячи з цього, необхідно визначити геометричні параметри просторової форми вузла вимірювання і раціональні місця локального розміщення ВПВ в комплексі та окреслити взаємну дію потоку вимірюваного середовища і засобів реєстрації та визначити їх вплив на результати виміру.

**Визначення точності вимірювального комплексу.** Світовий досвід газовимірювання на магістральних газопроводах свідчить про те, що для досягнення високої точності вимірювання витрати необхідно застосувати, як правило, два різних фізичних методи вимірювання. Для дослідження був створений вимірювальний вузол на підґрунті турбінного та ультразвукового вимірювальних перетворювачів витрати, які розміщувалися на вимірювальній ділянці з просторовою геометричною формою близькою до труби Вентурі (рис.1). Отримання вимірювальної інформації від двох основних приладів і, при необхідності, від витратоміра змінного перепаду тиску за прототипом труби Вентурі, створює передумови організації обопільної взаємодіагностики приладів, які входять до комплексу, та комплексу в цілому.



1 – турбінний перетворювач;  
2 – ультразвуковий перетворювач

### Рисунок 1 - Графічне зображення приладового комплексу обліку газу

Застосування дублюючих приладів направлено на розширення діапазону вимірювання, підвищення точності і надійності шляхом самодіагностики та зниження сумарної вартості комплектуючих засобів вимірювання.

За технічними характеристиками, що окреслюють точність вимірювання турбінних та ультразвукових лічильників газу, побудовані діаграми залежності похибки вимірювання від величини витрати (рис.2).

Аналіз отриманих результатів досліджень вказує на досягненні для всього діапазону точності на рівні номінальних витрат для кожного з приладів, які входять до складу комплексу, значно розширеного діапазону вимірювання – до 1:1562. В той же час, окреслені зони обопільної діагностики функціонування приладів. Необхідно відзначити, що при необхідності визначення достовірності вимірювальної інформації кожного приладу можна використати додаткову надлишкову інформацію з пристрою, що побудований на основі методу змінного перепаду тиску. Звужуючий пристрій по прототипу труби Вентурі формується за рахунок

необхідності переходу трубопроводу з більшим діаметром (зона монтажу турбінного лічильника) на ділянку з меншим діаметром (зона монтажу ультразвукового лічильника). Таким чином, відтворюється звужуючий пристрій, інформацією якого можна використати для додаткової діагностики стану функціонування основних засобів вимірювання окремо та комплексу в цілому.

**Дослідження оптимальної просторової конфігурації вимірювального комплексу.** При реалізації комплексу внаслідок застосування приладів з різним калібром, необхідно дослідити конфігурацію вимірювального вузла, просторове положення його складових,

геометричну форму пристроїв звуження і розширення потоку та вплив всіх параметрів системи на газове середовище.

Нині особливою популярністю серед науковців користуються методи чисельного моделювання на базі технологій обчислювальної гідрогазодинаміки *CFD* (*Computational Fluid Dynamics*), завдяки яким можна ставити експерименти, не витрачаючи на них багато часу і коштів. Крім цього, в деяких випадках такий спосіб отримання інформації є чи не єдиною можливістю виявлення ефектів складної взаємодії вимірюваного середовища з чутливими елементами перетворювачів витрати [1-3].

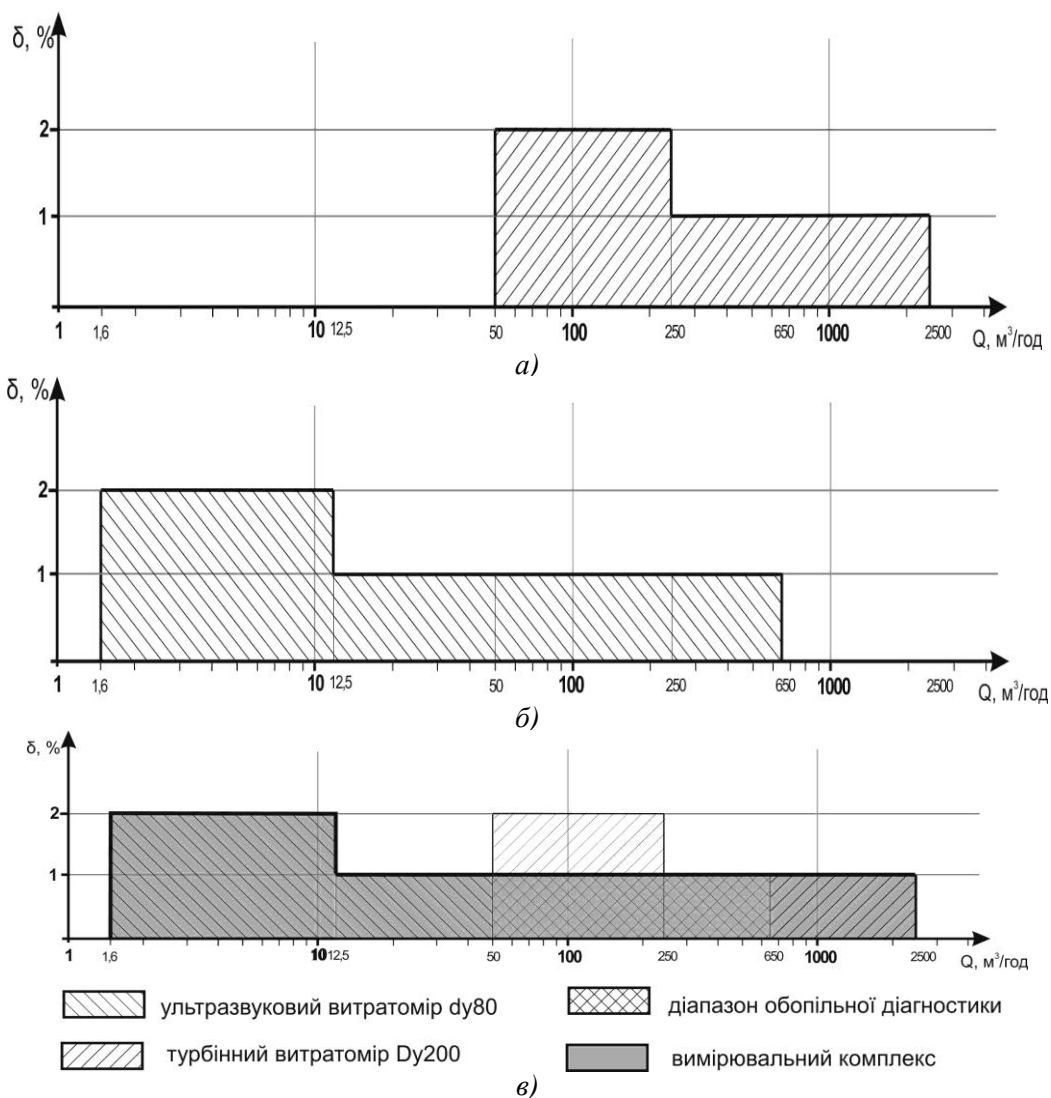
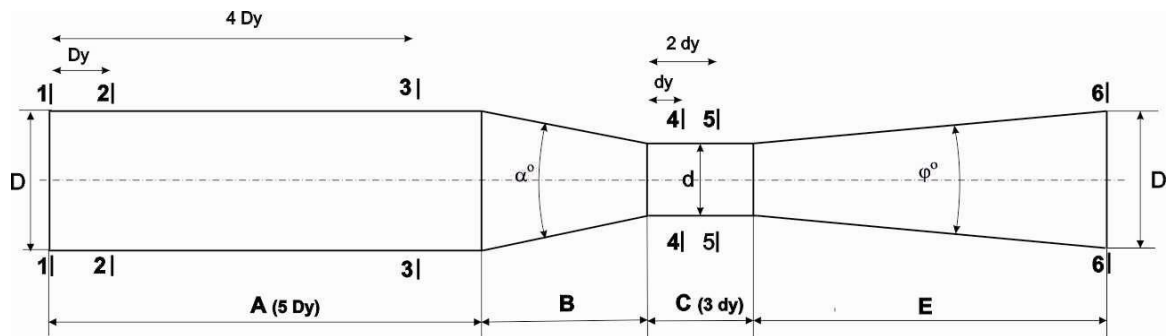


Рисунок 2 – Похибки вимірювання

При проведенні досліджень однією з основних задач було створення максимально симетричної гідродинамічної картини течії на вході засобів вимірювання, особливо ультразвукового класу, та визначення впливу конфігурації вузла обліку на втрату тиску в потоці і окреслення параметрів геометричної форми, які забезпечують максимальне відновлення падіння тиску на комплексі. Для цього із застосуванням комплексу обчислювальної гідродинаміки реалізованого в програмному пакеті *Ansys Workbench CFX* проведено дослідження впливу геометричних характеристик пристроїв звуження та

розширення потоку подібних трубі Вентурі (рис.3).

За побудованою геометричною моделлю (рис.1) вхідний діаметр збіжної конічної частини рівний вихідному діаметру розбіжної конічної частини  $D=0,2\text{ м}$ . Діаметр циліндричної горловини  $d$  дорівнює  $0,08\text{ м}$ . Ця розрахункова модель була досліджена з визначенням впливу величини звуження конфузора і розходження дифузора на втрату тиску потоку на всій розрахунковій моделі при  $Q_{min} = 1,6\text{ м}^3/\text{год}$  ( $0,44 \cdot 10^{-3}\text{ м}^3/\text{с}$ );  $Q_{max} = 2500\text{ м}^3/\text{год}$  ( $0,69\text{ м}^3/\text{с}$ );  $P = 0,5\text{ МПа}$ ;  $\rho = 0,68\text{ кг/м}^3$ ;  $T_{min} = -20\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T_{max} = 30\text{ }^\circ\text{C}$  (рис.4 – рис.5).



A - вхідна циліндрична ділянка, на якій встановлюється турбінний лічильник; B – конфузور; C - горловина, на якій встановлюється ультразвуковий лічильник; E – дифузор.

Рисунок 3 – Розрахункова геометрична модель за трубою Вентурі

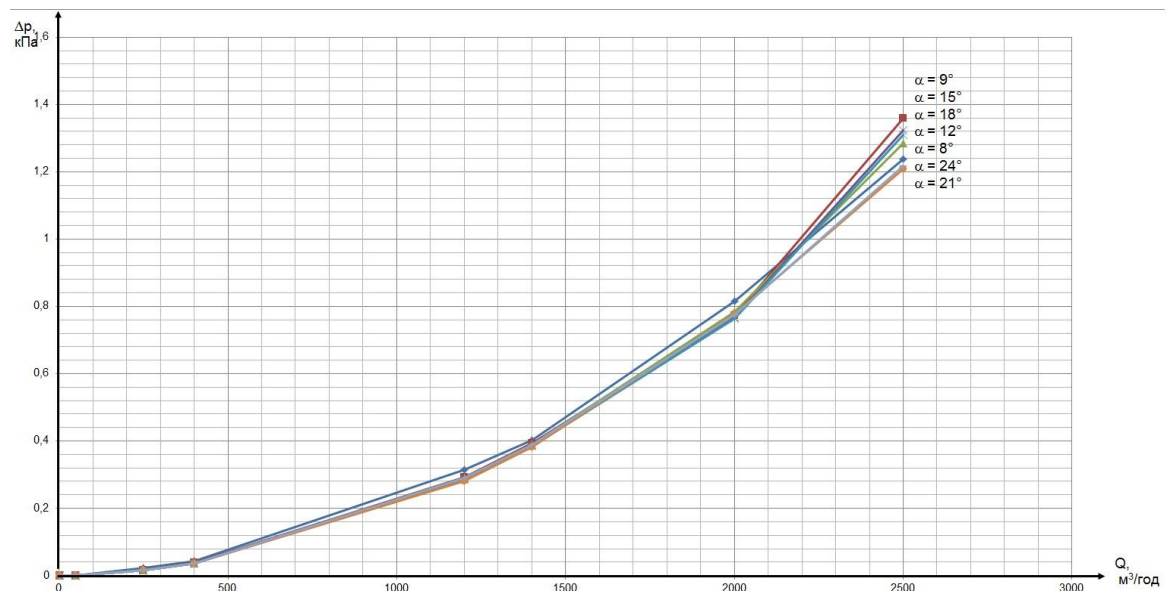
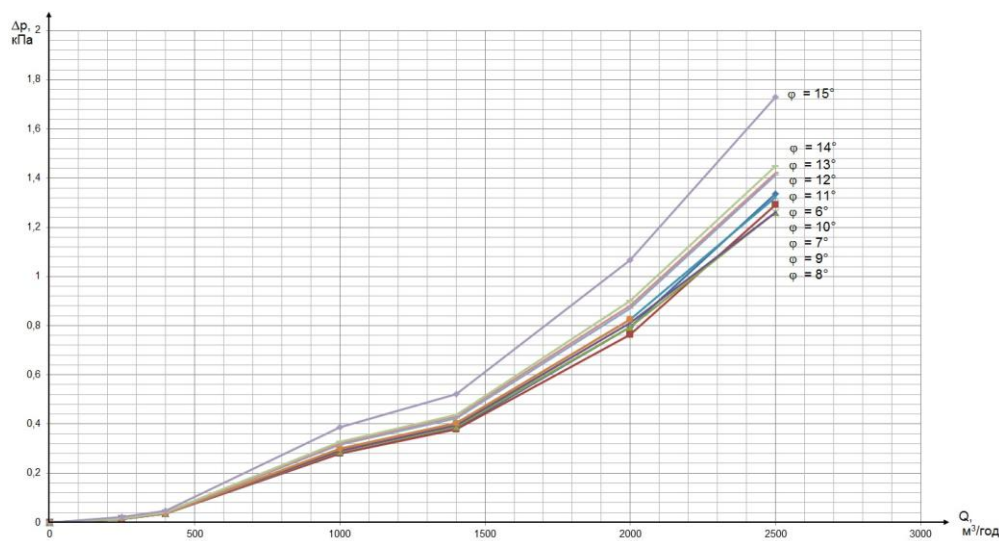


Рисунок 4 - Залежність втрати тиску  $\Delta p$  від витрати  $Q$  при різних кутах сходження конфузornoї ділянки



**Рисунок 5 - Залежність втрати тиску  $\Delta p$  від витрати  $Q$  при різних кутах розходження дифузornoї ділянки**

Аналіз отриманих результатів (рис.4) вказує на те, що оптимальним за критерієм мінімального впливу на вимірюване середовище є сходження конфузора з кутом  $\alpha=21^\circ$ , а розходження дифузора з кутом  $\varphi = 8^\circ$ .

Оскільки однією з основних задач створення вимірювального комплексу є підвищення точності виміру об'єму та об'ємної витрати, на величину якої великий вплив має газодинамічна картина течії в вимірювальних камерах приладів, необхідно створити найбільш сприятливі умови для забезпечення однорідності потоків перед вимірювальними приладами. Виходячи з цього, пропонується конфузornoю ділянкою, завдяки якій здійснюється перехід від більшого діаметру до меншого, замінити ділянкою спеціальної просторової конфігурації у вигляді сопел.

Аналіз результатів моделювання газодинамічної картини потоків при їх проходженні через сопла різної просторової конфігурації вказує на те, що ефективно виправляють асиметрію течій сопла Вітошинського (рис. 6), які розраховуються за виразом

$$r = \frac{r_{\text{вих}}}{\sqrt{1 - \left[ 1 - \left( \frac{r_{\text{вих}}}{r_{\text{вх}}} \right)^2 \right] \left[ \frac{1 - x/l^2}{1 - \frac{1}{3} x/l^2} \right]^3}}, \quad (1)$$

де  $r_{\text{вих}}$  - радіус виходу;  $r_{\text{вх}}$  - радіус входу;  $x$  - відстані від початкової точки;  $l$  - загальна довжина сопла Вітошинського ( $l \geq 2r_{\text{вх}}$ ).

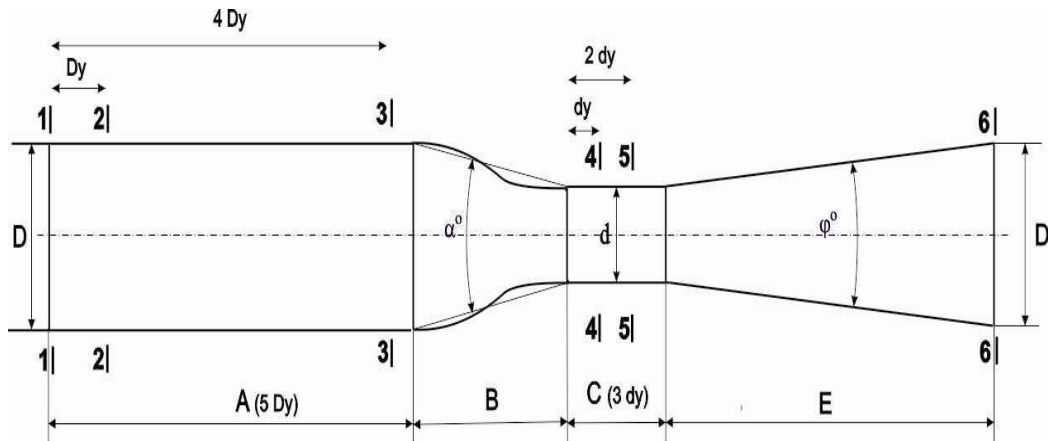
За побудованою геометричною моделлю (рис.6) вхідний діаметр вхідної соплової частини рівний вихідному діаметру розходження дифузornoї частини  $D=0,2\text{ м}$ . Діаметр циліндричної горловини дорівнює  $d=0,08\text{ м}$ .

Дослідження впливу ступеня звуження сопла Вітошинського на втрату тиску потоку по всій розрахунковій моделі проведені при  $Q_{\text{min}} = 1,6\text{ м}^3/\text{год}$  ( $0,44 \cdot 10^{-3}\text{ м}^3/\text{с}$ );  $Q_{\text{max}} = 2500\text{ м}^3/\text{год}$  ( $0,69\text{ м}^3/\text{с}$ );  $P = 0,5\text{ МПа}$ ;  $\rho = 0,68\text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $T_{\text{min}} = -20^\circ\text{C}$ ;  $T_{\text{max}} = 30^\circ\text{C}$  (рис.7).

На рис.7 значення кут  $\alpha$  окреслюють довжину ділянки звуження, яка відповідає куту сходження конфузора з відповідним кутом (рис. 3).

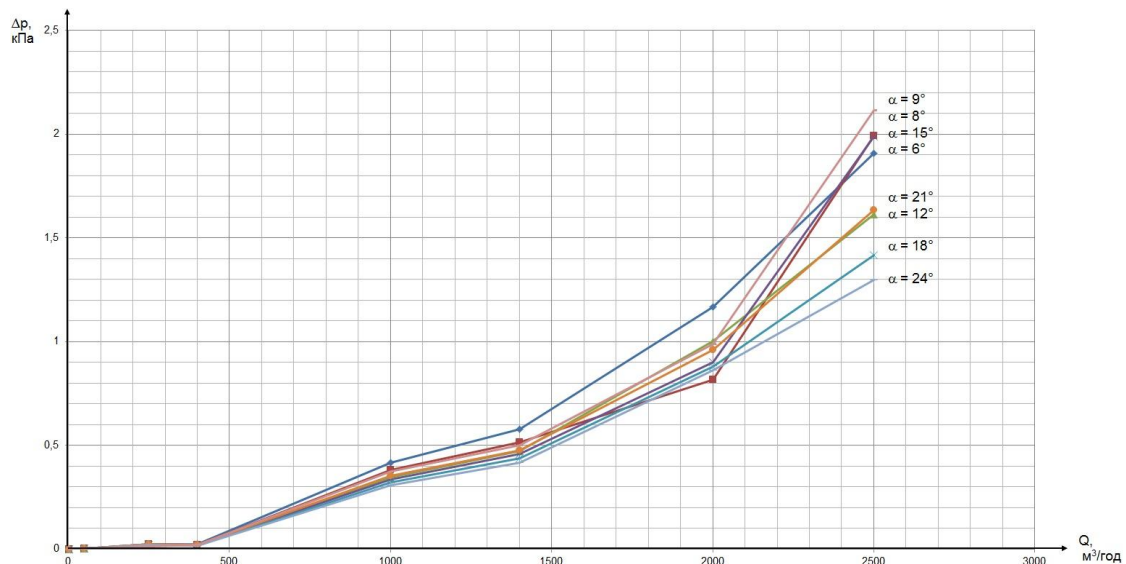
Аналіз отриманих результатів при використанні сопла Вітошинського (рис.7) вказує на те, що оптимальним за критерієм мінімального впливу на вимірюване середовище є сходження сопла Вітошинського на довжині, яка відповідає куту сходження конфузора  $\alpha=21^\circ$ , а розходження дифузора куту  $\varphi = 8^\circ$ .

Враховуючи важливість створення однорідності потоку вимірюваного середовища на вхідних ділянках вимірювальних перетворювачів витрати, для розрахункових моделей у вигляді труби Вентурі і з соплом Вітошинського проведені дослідження газодинамічної картини по протяжності вузлів вимірювання за трьох витрат при  $Q_{\text{min}} = 1,6\text{ м}^3/\text{год}$  ( $0,44 \cdot 10^{-3}\text{ м}^3/\text{с}$ ) (табл.1);  $Q_n = 1250\text{ м}^3/\text{год}$  ( $0,347\text{ м}^3/\text{с}$ ) (табл.2);  $Q_{\text{max}} = 2500\text{ м}^3/\text{год}$  ( $0,69\text{ м}^3/\text{с}$ ) (табл.3);  $P = 0,5\text{ МПа}$ ;  $\rho = 0,68\text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $T_{\text{min}} = -20^\circ\text{C}$ ;  $T_{\text{max}} = 30^\circ\text{C}$  (табл.1).



*A* – вхідна циліндрична ділянка, на якій встановлюється турбінний лічильник; *B* – сопло Вітошинського; *C* – горловина, на якій встановлюється ультразвуковий лічильник; *E* – дифузор

**Рисунок 6 – Розрахункова геометрична модель з соплом Вітошинського**



**Рисунок 7 - Залежність втрати тиску  $\Delta p$  від витрати  $Q$  при різних сходженнях сопла Вітошинського**


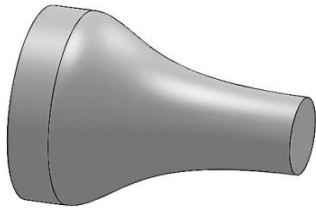
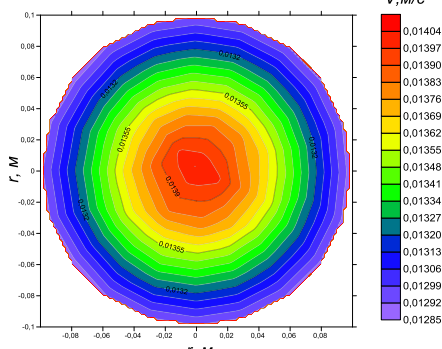
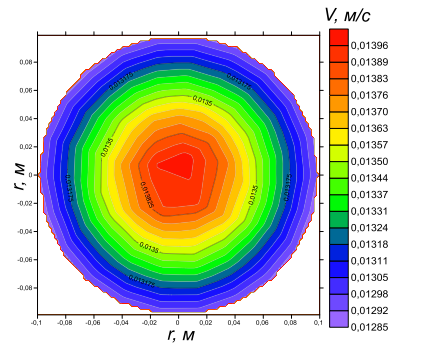
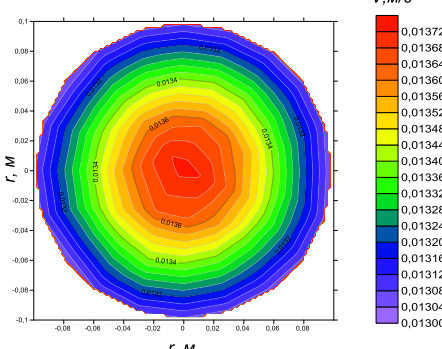
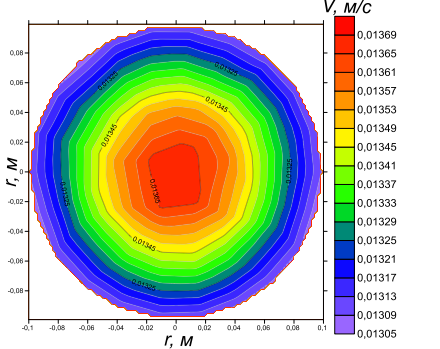
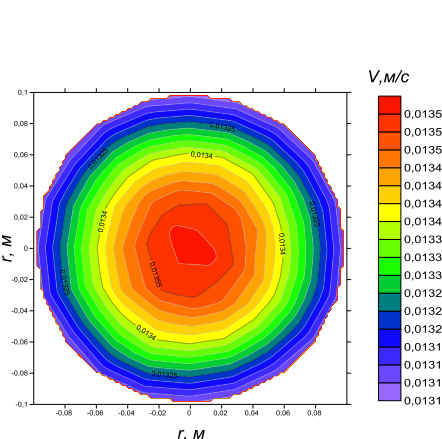
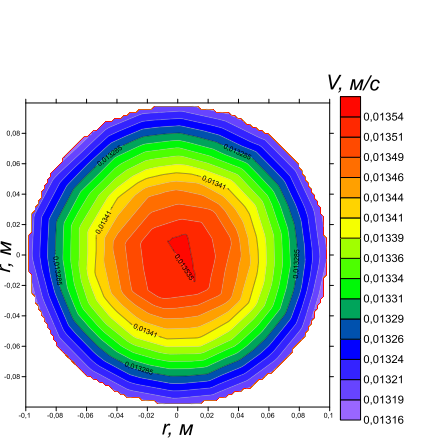
Аналіз результатів досліджень (табл. 1 - табл. 3) наглядно окреслюють ділянки на протяжності вимірювального комплексу зі стабільною симетрією потоку природного газу, які є пріоритетними для монтажу вимірювальних перетворювачів витрати.

### ВИСНОВКИ

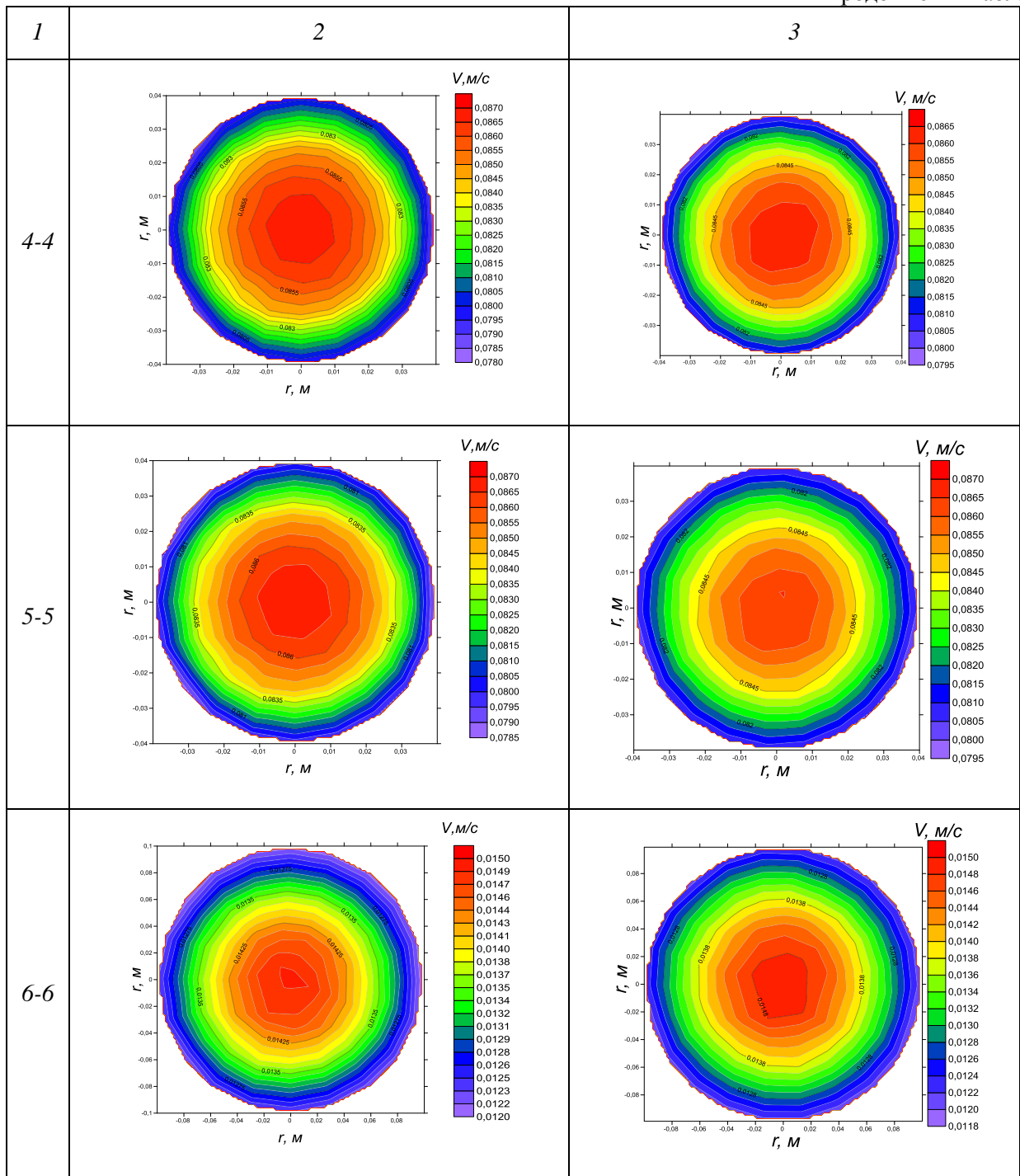
Знаходження оптимальної геометричної просторової форми вузла вимірювання при комплексному застосуванні перетворювачів витрати, що базуються на різних фізичних

методах вимірювання, забезпечує високу точність і надійність вимірювань в широкому діапазоні при мінімізації втрати тиску і вартості приладів. Запропонована схема вимірювального комплексу дозволяє реалізувати ефективну систему обопільної діагностики як засобів вимірювання, що входять до нього, та і системи в цілому. Це значно підвищує повторюваність і достовірність результатів визначення об'єму та об'ємної витрати природного газу в умовах експлуатації.

Таблиця 1 - Ізотахи швидкості потоку природного газу при витраті  $Q_{min}$

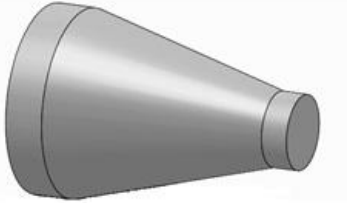

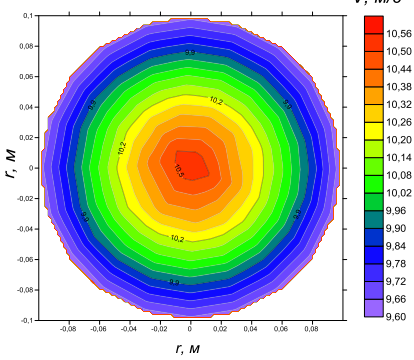
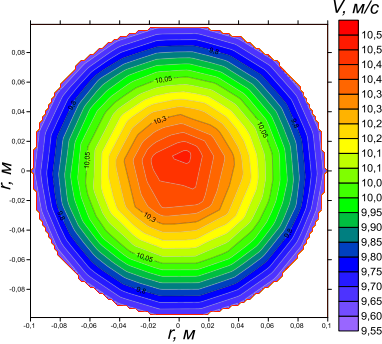
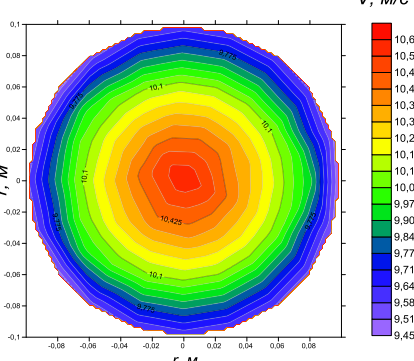
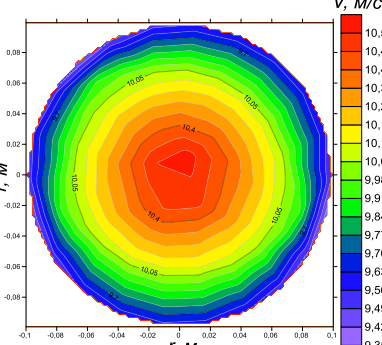
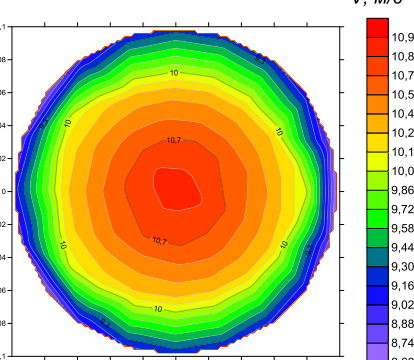
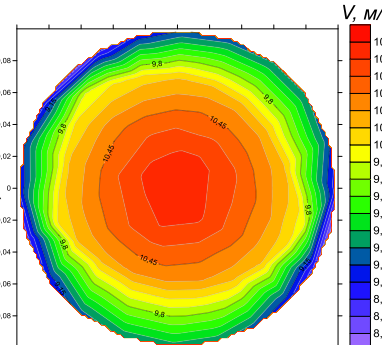
Період	Комплекс з конфуззором 	Комплекс з соплом Вітошинського 
1	2	3
1-1		
2-2		
3-3		

Продовження табл. 1

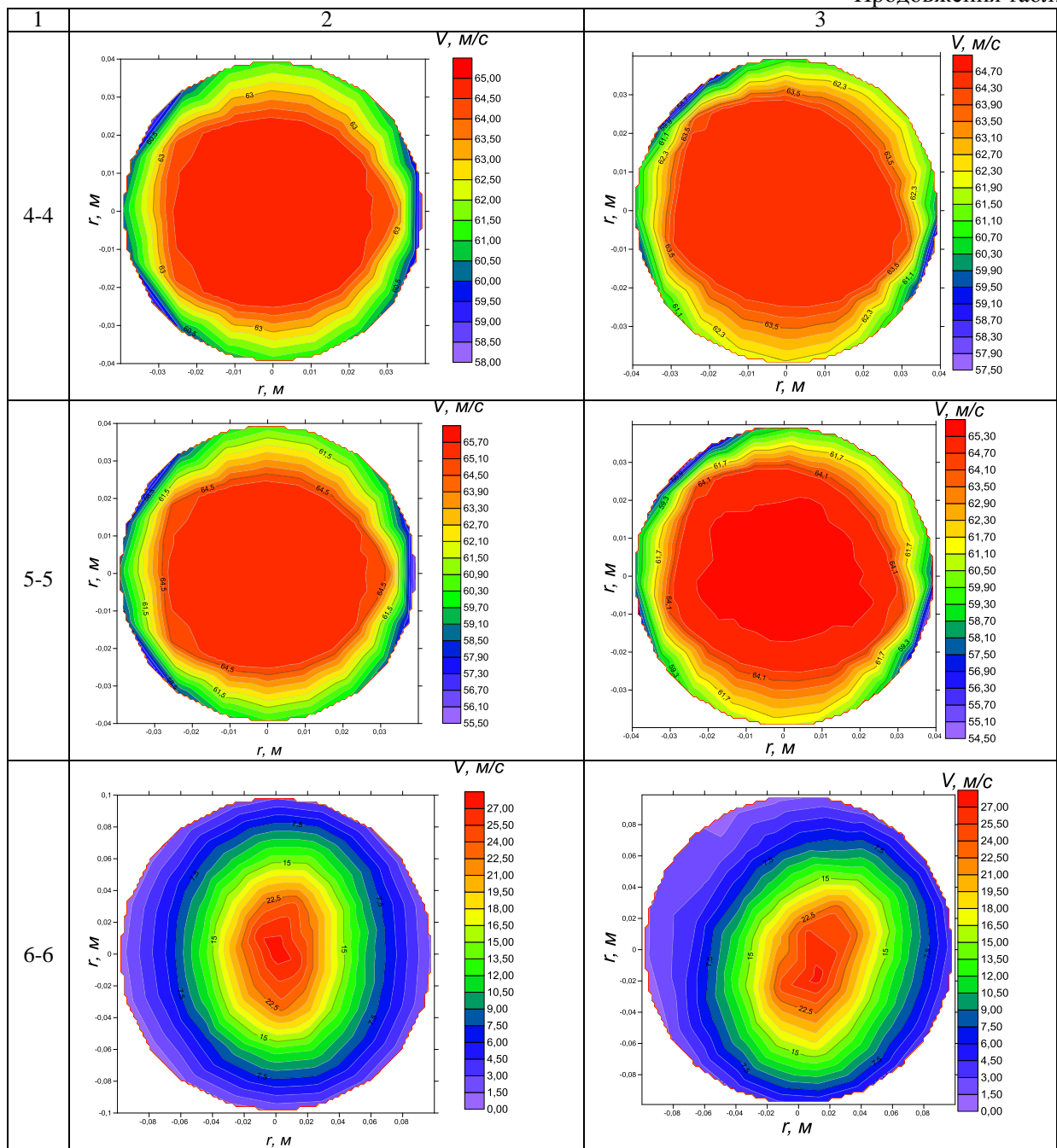




Таблиця 2 - Ізотахи швидкості потоку природного газу при витраті  $Q_n$

<p>Перері 3</p>	<p>Комплекс з конфуззором</p> 	<p>Комплекс з соплом Вітошинського</p> 
<p>1</p>	<p>2</p>	<p>3</p>
<p>1-1</p>		
<p>2-2</p>		
<p>3-3</p>		

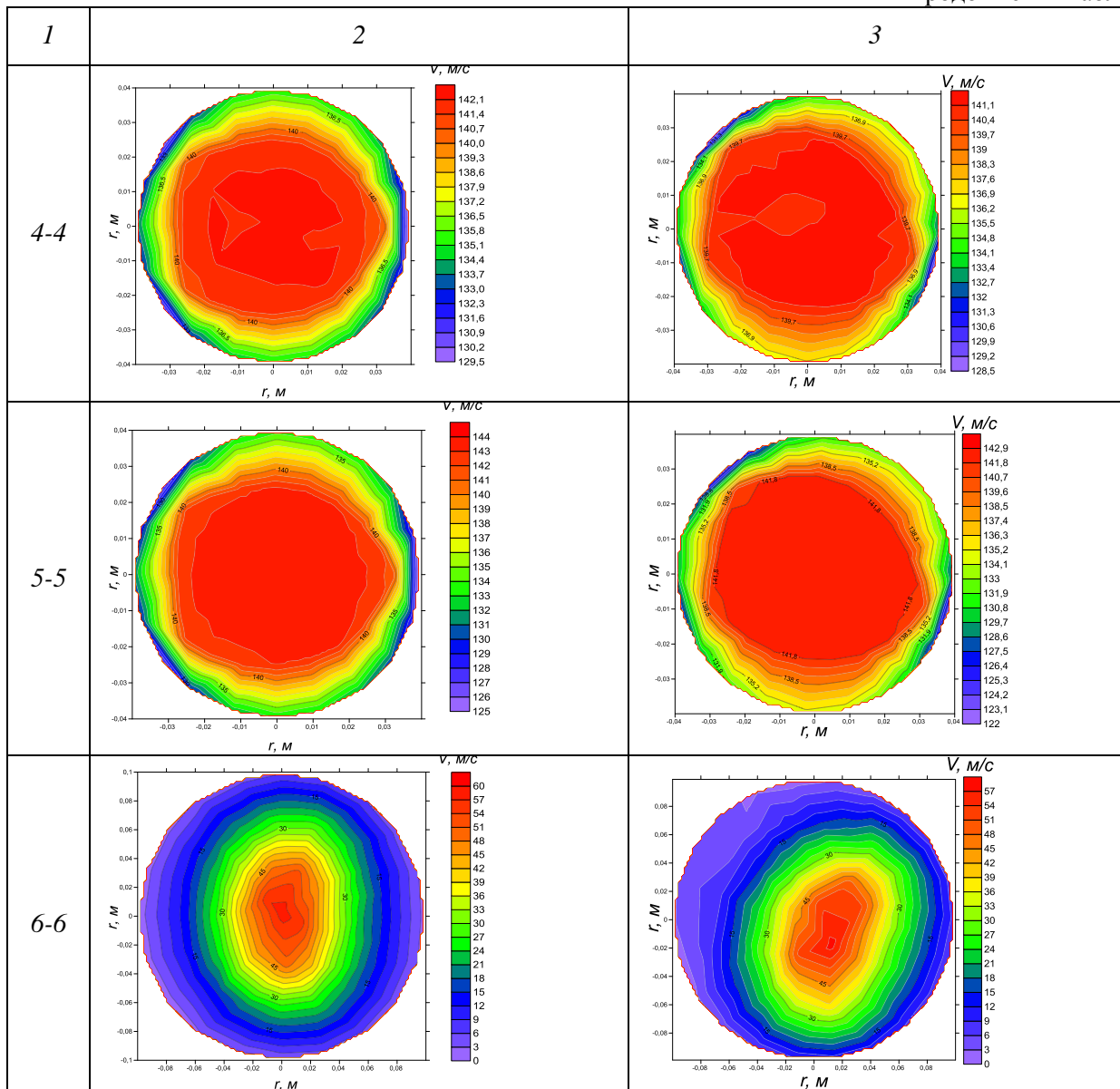
Продовження табл.2



Таблиця 3 - Ізотахи швидкості потоку природного газу при витраті  $Q_{max}$

Переріз	Комплекс з конфузуром	Комплекс з соплом Вітошинського
1	2	3
1-1		
2-2		
3-3		

Продовження табл.3



1. Системи CAD/CAE. ANSYS FLUENT / І. А. Гришанова, І. В. Коробко. – К.: Дія ЛТД, 2012. – 208 с. 2. Коробко І. В. Проектування вимірювальних перетворювачів витрат газу із застосуванням сучасних комп'ютерних технологій / І. В. Коробко, П. К. Кузьменко // VI Всеукраїнська науково-технічна конференція „Вимірювання витрати та кількості газу”. Івано-Франківськ, 20 – 21 жовтня 2009 р. – м. Івано-Франківськ. 3. Коробко, І. В. Дослідження впливу неоднорідності потоку на роботу

ультразвукових вимірювальних перетворювачів витрати [Текст] / І. В. Коробко, Я. В. Волинська // Метрологія та прилади. – 2013. – №5. – С.67 – 70.

Поступила в редакцію 01.12.2014р.

Рекомендували до друку: Оргкомітет 7-ої МНТК з НК і ТД обладнання (25 – 28.11.2014р., ІФНТУНГ) та докт. техн. наук, проф. Середюк О.Є.