

ТЕОРЕТИЧНИ И СТЕНДОВИ ИЗСЛЕДВАНИЯ ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ КОЕФИЦИЕНТА НА ХИДРАВЛИЧНО СЪПРОТИВЛЕНИЕ ПРИ ДВИЖЕНИЕ НА ГАЗ В ПОЛИЕТИЛЕНОВИ ТРЪБИ ИЗПОЛЗВАНИ ЗА ИЗГРАЖДАНЕ НА ГАЗОРАЗПРЕДЕЛИТЕЛНИ МРЕЖИ

Мартин М. Бояджиев, Милко Х. Харизанов

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София; martinb@mgu.bg, mharizanov@mgu.bg

РЕЗЮМЕ. В настоящата статия се разглежда актуален проблем, свързан с практиката при проектирането на газоразпределителни мрежи. Дейности характеризирани се с използване на високи технологии и съвременни материали. Основната цел е разработване на методика за оптимизиране проектирането на газопроводи и газоразпределителни мрежи изградени от полиетиленови тръби – висока плътност (PE-HD). Направен е обзор на използваните в практиката хидравлични модели за описание движението на газ в тръбопроводни системи. Разработен е лабораторен стенд за определяне коефициента на хидравлично съпротивление при движение на газ в полиетиленови тръби използвани за изграждане на газоразпределителни мрежи у нас. Разработена е конкретна методика за изследване и определяне на хидравличните съпротивления при движение на технически газ в тръби PE-HD на база обзор и анализ на използваните в световната практика хидравлични модели за описание движението на газ в тръбопроводни системи ниско налягане. Изследвани и оценени са режима на движение на газа при конкретни условия, числото на Reynolds и коефициента на хидравлично триене при експеримента и пресмятания на база емпирични зависимости.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY FOR DETERMINATION OF THE HYDRAULIC FRICTION FACTOR IN CASE OF GAS TRANSPORT IN PE – HD PIPELINE FOR GAS DISTRIBUTION SYSTEMS

Martin M. Bojajiev, Milko H. Harizanov

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Sofia 1700; martinb@mgu.bg; mharizanov@mgu.bg

ABSTRACT. This paper presents a review of actual problem to application practice project and design of gas distribution systems. The paper will describe the development of all generally equation and formulas that can be used as project and design pipeline system. The laboratory experimental apparatus of experimental determination of pressure drop and friction loss in PE – HD pipe is development. The experimental part of this paper present the results of experiments run in a new laboratory apparatus. The objectives of these experiment were to evaluate the pressure drop, hydraulic friction factor, Reynolds number and to analyses. The results of flow test have sometimes appeared to be contradictory and difficult to explain in future study.

Въведение

Практиката при съвременното проектиране и строителство на газоразпределителни мрежи се характеризира с използване на високи технологии и съвременни материали. В последните години у нас, поради своите предимства за изграждане на газоразпределителни мрежи се използват основно *полиетиленови тръби висока плътност*. Използва се полиетилен PE-HD 80 и PE-HD 100 отговарящ на изискванията на стандарт БДС-EN 12 007-2.

Полиетиленовите тръбопроводи имат редица предимства като:

- дълговечност на експлоатация (50 години);
- висока технологичност при полагането им за градски газоразпределителни мрежи и улични комуникации поради голямата дължина на безшевните участъци до 400 линейни метри;
- автоматизирани технологии за високо качествени муфове съединения на тръбите;

- еквивалентната грапавина на тръбите по вътрешен диаметър е малка и практически не се изменя във времето;
- ниска себестойност при експлоатация, в частност и за това че тръбите не се повреждат от корозия и не е обходима електрохимична защита;
- мобилност и висока производителност на групите по изграждането на газоразпределителните мрежи.

Технологичните решения при проектиране на тръбопроводни системи, в частност газови мрежи се базират на *хидравлични и якостно – деформационни пресмятания и оразмерявания*. Основните изследвания по хидравликата на движение на флуиди - течности в тръбопроводи са провеждани в средата на 20 век. Установените емпиричните закони за движение на течностите са използвани и за пресмятане на хидравличните съпротивления при движение на газ, като установените зависимости са получени от изследвания проведени за стоманени, азбестови и циментови тръби. Към настоящият момент тези закони - математични модели са общо приети и са в основата на нормативните документи използвани при проектирането на

тръбопроводни системи, както за стоманени така и за полиетиленови тръби. Грешката, която може да се допусне в случая е до 20-25 % [2, 3, 4, 7]. Това налага прецизиране на използваните емперични формули за определяне на коефициента на хидравлично триене при движение на газ за конкретния материал – полиетилен висока плътност [1, 2, 4, 7].

За тази цел е необходимо разработването на стенд и методика за експериментално определяне хидравличните съпротивления при движение на газ (въздух, азот и природен газ) в полиетиленови тръби при различни условия - диаметър и дължина на тръбопровода; вид използван газ; режим на движение и др.

В съответствие с поставените цели е разработен стенд, за провеждане на експериментите и методика за определяне хидравличните съпротивления (линейни) при движение на газ (въздух, азот и природен газ) в полиетиленови тръби за газоразпределителни мрежи.

Стеновите изследвания на хидравличните съпротивления на полиетиленови тръби са извършени на 2 етапа в учебна лаборатория "Хидравлика и транспорт на нефт и газ" към катедра "Сондиране и добив на нефт и газ" при Минно-Геоложки Университет "Св. Иван Рилски" София по ДОГОВОР ГПФ №84/2006, НИСМ, [4]:

I етап – Разработване на стенд и методика за определяне коефициента на хидравлично съпротивление в периода август – октомври 2006г.

II етап – Експериментални лабораторни измервания и обработка на получените резултати, включващи тест тръба от материал PE-HD PE-80 в периода октомври – декември 2006г.

Експерименталната част в ДОГОВОР №ГПФ 84/2006 "Стенови изследвания за определяне коефициента на хидравлично съпротивление при движение на газ (въздух, азот и природен газ) в полиетиленови тръби за изграждане на газоразпределителни мрежи" е свързана с измерване на режимните параметри при работа на тръбопровод (входно налягане, разход, температура, наляганя в определени точки по дължина на тръбопровода и определяне загубите (линейни) на налягане, коефициента на хидравлично съпротивление (триене), критерия на Reynolds и режима на движение на газ в полиетиленови тръби (PE-HD).

Теоретична постановка

Хидравличните изчисления и пресмятания на газопроводи се извършват на база общоприети уравнения на хидравликата на флуидите, в частност газовата динамика, основаващи се на функционална взаимовръзка между хидравличният диаметър, разхода (дебита) на газ и пада на налягане в тръбопровода с известна дължина, конструкция и използван материал. От уравненията може да се определи желан параметър по зададени изходни стойности на останалите параметри.

Основният въпрос при оразмеряване и проектиране на газопроводи и газоразпределителни мрежи се явява

определянето на *коефициента на хидравлично триене*, влизащ в изходното уравнение описващо движението на газа и определящ хидравличната характеристика на използваните тръби и тръбопроводната система. В качеството на изходен модел за описанието на движението на газ се използва общоприетият модел на Darcy-Waisbah [1, 3, 4, 5, 6, 8] и неговите модификации, уравнения (1) и (2):

$$Q = C \cdot \frac{T_b}{P_b} \cdot D^{2.5} \left(\frac{P_1^2 - P_2^2}{L \cdot \rho \cdot T_a \cdot Z_a \cdot \lambda} \right)^{0.5}, \quad (1)$$

$$P_1^2 - P_2^2 = 1,62 \cdot \lambda \cdot \frac{Q_0^2}{d^5} \cdot \rho_o \cdot P_o \cdot \frac{T}{T_o} \cdot L \cdot Z, \quad (2)$$

където:

Q и Q₀ е обемният дебит при стандартни условия, [m³/24h];

C – константа, C = 0,0011493;

D, d - хидравличният (вътрешен) диаметър на тръбопровода, [mm];

L – дължината на тръбопровода, [km];

P₁ – началното налягане, [kPa];

P₂ – крайното налягане, [kPa];

P_b, P_o – стандартното налягане, [kPa];

T_b, T_o – стандартната температура, [°K];

T_a – средната температура, [°K];

λ – коефициентът на хидравлично триене, [-];

ρ, ρ_o – относителната плътност на газа, [-];

Z_a, Z – коефициентът на свръхсвиваемост на газа, [-].

Загубите на налягане в тръбопровод се определят в зависимост от режима на движение на флуида по дължина на тръбопровода, който се характеризира с критерия (числото) на Reynolds зависещ от параметрите на газа, хидравличният диаметър на тръбата и скоростта на потока:

$$Re = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu}, \quad (3)$$

където:

D е хидравличният (вътрешен) диаметър на тръбопровода;

V – средната скорост на потока флуид в тръбопровода;

μ – динамичният вискозитет на флуида;

ρ – плътността на флуида.

Режима на движение се дефинира като *ламинарен*, ако критерият на Reynolds е по-малък от 2100. Режима е *турбулентен* при следните установени зони: *зона хидравлично "гладки" тръби*, *зона смесено триене* и *зона квадратично триене*, ако Reynolds е по-голям от 4000. Когато критерият на Reynolds е между 2100 и 4000 говорим за *пребоден* режим на движение [1, 3, 4, 5, 6].

При хидравличните изчисления на магистрални газопроводи и газоразпределителни мрежи *коефициента на хидравлично триене* (λ или f) е основна величина, която подлежи на определяне в експериментални изследвания и λ = f (Re, Ke/D) се определя в зависимост от режима на

движение (Критерият на Reynolds) и относителната грапавост на тръбопровода (K_e/D) графично по диаграмата на Moody, в чиято основа лежи уравнението на Colebrook – White или по емпирични формули и зависимости [3, 6, 8].

Съществуват различни подходи и форми на аналитично представяне на зависимостта $\lambda = f(Re, K_e/D)$ и определяне на коефициента на хидравлично триене (λ).

При направата на литературният обзор и анализа относно този проблем авторският колектив предлага използването на следните аналитични подходи при обработка и анализиране на експерименталните резултати:

I. Подхода е основно използван в *руската практика* при хидравлично оразмеряване на газопроводи и газоразпределителни мрежи при промишлена и битова газификация. Базира се на стандарти, отраслови нормали, фундаментални научни теоретични и практически разработки [1, 2, 3, 5].

За определяне критерият на Reynolds (Re) са предложени зависимости по Г. Николов и СНиП 2.04.08 – 87* предложени в [3, 5]

При ламинарен режим на движение на газа $Re < 2100$, коефициента на хидравлично триене зависи само от критерия на Reynolds и се определя по формулата Hagen-Poiseuille:

$$\lambda = \frac{64}{Re}, \quad (4)$$

При преходен режим на движение на газа $2100 < Re < 4000$, коефициента на хидравлично триене се определя по формулата на Р. М. Зайченко:

$$\lambda = 0,0025 \sqrt[3]{Re}, \quad (5)$$

При турбулентен режим на движение на газа $Re > 4000$, в съответствие с посочените три зони - зона хидравлично "гладки" тръби, зона смесено триене и зона квадратично триене, хидравличните съпротивления са различни и зависят от т.н. гранични стойности на критерия на Reynolds за установяване на съответната зона на турбулентния режим.

За зона *хидравлично "гладки" тръби*, коефициентът на хидравлично триене зависи основно от критерия на Reynolds и се определя по формулата на Blasius:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}, \quad (6)$$

За зона *смесено триене*, коефициента на хидравлично съпротивление зависи от критерия на Reynolds и относителната грапавост по вътрешен диаметър на тръбопровода. Определя се по формулата на Алтшул и производни корелационни зависимости.

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{K_e}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}, \quad (7)$$

За зона *квадратично триене*, коефициента на хидравлично съпротивление зависи основно от

относителната грапавост и се определя по формулата на Shefrinsson:

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{K_e}{D} \right)^{0,25}, \quad (8)$$

II. Подхода е основно използван в *европейската практика* при хидравлично оразмеряване на газопроводи и газоразпределителни мрежи за промишлена и битова газификация. Базира се на стандарти AGA Technical Report № 10 (1965), PSIG – Pipeline Simulation Interest Group, "N .V. Nederlandse GasUnie" и фундаментални научни теоретични и практически разработки [6, 7, 8].

За определяне критерият на Reynolds (Re) са предложени зависимости по Schroeder, D и E. Shashi Menon и American Gas Association (AGA) предложени в [6, 8].

При ламинарен режим на движение на газа, коефициента на хидравлично триене зависи само от критерия на Reynolds и се определя по формулата Hagen-Poiseuille:

$$\lambda = \frac{64}{Re}, \text{ или } \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \frac{\sqrt{Re}}{8}, \quad (9)$$

При турбулентен режим на движение на газа, в съответствие с посочените три зони - зона хидравлично "гладки" тръби, зона смесено триене и зона квадратично триене, хидравличните съпротивления са различни и зависят от т.н. гранични стойности на критерия на Reynolds за установяване на съответната зона на турбулентния режим.

За зона *хидравлично "гладки" тръби* коефициента на хидравлично триене зависи основно от критерия на Reynolds и се определя по закона за "smooth pipe law" на von Karman и Prandtl:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2,3 \log(Re \cdot \sqrt{\lambda}) - 0,8 = 2,3 \log \frac{Re \cdot \sqrt{\lambda}}{2,51}, \quad (10)$$

За зона *смесено триене*, коефициента на хидравлично съпротивление зависи от критерия на Reynolds и относителната грапавост по вътрешен диаметър на тръбопровода. Определя се по формулата на Colebrook – White и производни корелационни зависимости.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2,3 \log \left(\frac{k/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} \right), \quad (11)$$

За зона *квадратично триене*, коефициента на хидравлично съпротивление зависи основно от относителната грапавост и се определя по формулата на Nikuradse.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2,3 \log \left(\frac{D/k}{2} \right) + 1,74 = -2,3 \log \left(\frac{k/D}{3,71} \right), \quad (12)$$

където:

D или d е хидравличният (вътрешен) диаметър на тръбопровода;

Re – критерият на Reynolds;

K_e или k – еквивалентната грапавост на тръбата по вътрешен диаметър;

λ – коефициентът на хидравлично триене.

Пресмятането на експерименталната стойност на коефициента на хидравлично съпротивление ($\lambda_{\text{екс}}$) на база резултатите от експерименталните изследвания се извършва използвайки общоприетият модел на Darcy-Waisbah за описанието на движението на газ [1, 3, 6, 8]. Използвани са основни зависимости (1) и (2), като същите са развити и са получени формули за оразмеряване и хидравлично пресмятане на газопроводи и газоразпределителни мрежи ниско налягане [1, 4, 6, 8].

$$P_1 - P_2 = 1,6 \cdot 10^3 \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \frac{Q^2 L}{d^5}, \quad (13)$$

където:

Q е обемният дебит при стандартни условия, [$m^3/24h$];

d - хидравличният (вътрешен) диаметър на тръбопровода, [mm];

L – дължината на тръбопровода, [m];

P_1 – началното налягане, [kPa];

P_2 – крайното налягане, [kPa];

λ – коефициентът на хидравлично триене, [-];

ρ – относителната плътност на газа, [-].

$$P_1 - P_2 = 1,02 \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \rho \cdot \frac{v^2}{2}, \quad (14)$$

където:

v е средната скорост на движение на газа по дължина на тръбопровода, [m/s];

D - хидравличният (вътрешен) диаметър на тръбопровода, [m];

L – дължината на тръбопровода, [m];

P_1 – началното налягане, [kgf/m²];

P_2 – крайното налягане, [kPa];

λ – коефициент на хидравлично триене, [-];

ρ – плътността на газа, [kg/m³]

Предложените формули (13) и (14) са коректни за несвиваеми флуиди, движещи се с постоянна скорост при константна плътност т.е. за газопроводи и мрежи ниско налягане, където пада на налягане е неголям и удовлетворява условието: $\Delta P = (P_1 - P_2)/P_1 < 5\%$ [1, 4, 7]. Грешката при пресмятането в случая е по-малка от 1,5%.

Изследванията [1, 7, 8] показват, че в приетите модели за описание на движението на газ и определяне на хидравличната характеристика на газопроводите и газоразпределителните мрежи е целесъобразно да се направят редица уточнения. Към настоящият момент има доста малко информация и данни за промишлени и експериментални стендови изследвания при движение на газ в полиетиленови тръби [2]. Като единствен възможен за реализация у нас начален подход е провеждането на стендови експерименти с цел разработване методика за

определяне и пресмятане на хидравличните съпротивления, коефициента на хидравлично триене и режима на движение на газ в полиетиленови тръби.

Разгледани, приложени и изследвани при обработка на експерименталните резултати са следните теоретични хидравлични модели за пресмятане на коефициента на хидравлично триене ($\lambda_{\text{теор}}$) при турбулентен режим на движение на газа за установените зони: *зона хидравлично "гладки" тръби и зона смесено триене* имащи най-голямо признание и практическо приложение. На този етап от изследванията се пренебрегват граничните стойности на критерия на Reynolds за установяване на съответната зона на турбулентният режим при конкретните условия на експеримента. На база обобщени резултати от промишлени изследвания [1, 2] върху режимите на движение на газ в газоразпределителни мрежи в градски условия (газопроводи ниско и средно налягане) определени при: *известен диаметър, разчетен дебит, при преходен и турбулентен режим на движение, и нови стоманени тръби*, анализирайки данните може да се направи извод, че движението на газа в газопроводи и газоразпределителни мрежи – ниско и средно налягане е основно при турбулентен режим - *зона хидравлично "гладки" тръби* съответно 59 % при ниско налягане и *зона смесено триене*, съответно 20 % при ниско налягане и 86% при средно налягане.

За оценка на експерименталните стойности на коефициента на хидравлично съпротивление по резултатите от измерванията са използвани следните известни хидравлични модели:

1. Формулата на Алтшул (7) е предложена за оразмеряване на газопроводи и газоразпределителни мрежи при турбулентен режим на движение на газа, основно в *зоната на смесено триене* [1, 2, 3, 5, 7].
2. Формулата на Colebrook – White и производните ѝ корелационни зависимости (11) са предложени и описват движението на газа при турбулентен режим в транзитната зона между *зона хидравлично "гладки" тръби и зона смесено триене* [3, 6, 7, 8]

Експериментална част

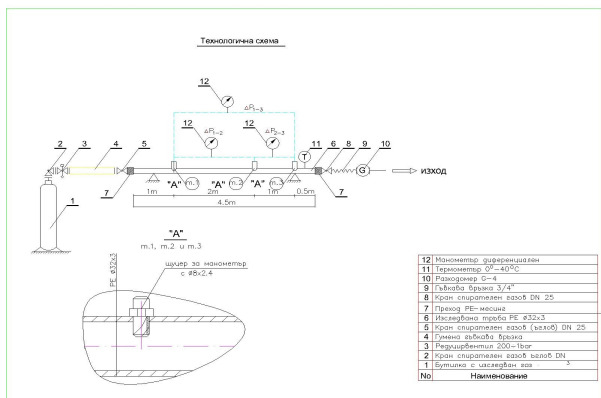
Стендовите изследвания на хидравличните съпротивления при движение на газ – въздух са извършени с разработен хоризонтален стендов тест-тръбопровод с постоянно сечение [4]. Елементите на стенда са:

- дължината на тръбопровода е 4,5 m;
- материал полиетилен висока плътност със следните технически характеристики: PE-80 (PEHD), Ø 32x3,0, SDR – 11, DVCW DG 8105 AS2199, DIN EN1555;
- преходи полиетилен – стомана Ø 40x11/4;
- сферични кранове;
- муфи - месинг 1 1/4" Vi;
- нипели - месинг 1 1/4" Vi;

- гъвкава връзка за газов разходомер – INOX 200/400-3/4”;
- разходомер за природен газ, модел GGR Gas, code 23343, #10583845, $Q_{max} = 6 [m^3/h]$, $Q_{min} = 0,04 [m^3/h]$;
- Дигитален диференциален манометър за ниско налягане, модел Krom Schroder DMG S2510, id # 033521146, range: 1000mbar, temp. 0 – 40 °C;
- Термометър, “U” образен манометър и запасни части.

На фигура 1 е представена принципната технологична схема на експерименталната стендова установка и проектираните отвори, и щуцери. Стенда е проектиран за максимално работно налягане 4 [bar] и температура от 0 °C до 50 °C.

Поради техническа невъзможност да бъде измерена реалната грапавост на вътрешната повърхност на избраните полиетиленови тръби – висока плътност (Тръба # 1 PE-80 (PEHD), $\varnothing 32 \times 3,0$), еквивалентната грапавост на тръбата (K_e) при обработката на резултатите и пресмятане на коефициента на хидравлично съпротивление е приета съгласно [4, 5, 6]. Приети са следните препоръчителни проектни стойности на еквивалентната грапавост за полиетиленови тръби висока плътност, както следва $K_1 = 0,0015$; $K_2 = 0,0020$; $K_3 = 0,0090$ cm.



Фиг. 1 и 1а. Принципна технологична схема на експерименталната стендова установка за определяне хидравличната характеристика на полиетиленови тръби – висока плътност

В четири точки по дължина на тръбопровода са направени отвори в стената на тръбата с диаметър $\varnothing 8$ [mm], в които са монтирани щуцери – нипели за свързване на измервателната апаратура и приборите – дигитален и “U” образен манометри, чрез гумени шлангове и термометър. Проектираните и изработени отвори и щуцери са представени на фигура 1а.

Първият отвор – точка #1 е локализиран на 1 [m] от началото на тръбопровода, точка #2 на 2 [m], а точка #3 на 1 [m] от преходната. В края на тръбопровода са монтирани образцов термометър, манометър и разходомер за газ.

Лабораторни експериментални изследвания

Авторският колектив е използвал следните подходи [1, 2, 3, 4, 7, 8, 9] представени в теоретичната част при изследванията, обработката и анализа на експерименталните резултати. Всички експерименталните резултати са представени в ДОГОВОР ГПФ №84/2006, НИСМ [4]. Обработката на експерименталните резултати са извършени по следната процедура:

1. Тества се стенда за херметичност, измерват се температурата и налягането в лабораторията;
2. За всеки един от опитните тестове (общо 7 теста) се избира входно налягане в диапазона – (1,0-4,0) със стъпка 0,5 [kgf/cm²];
3. При избрано входно налягане се установява стационарен режим на движение на газа в тръбопровода за определено време, след което се измерва разхода (дебита) при стандартни условия с разходомер за природен газ;
4. Измерват се наляганята в точки #1, 2 и 3 с дигитален диференциален манометър, при вече установен стационарен режим на движение на газа, след което се пресмятат загубите на налягане.

Процедурата се изпълнява за всеки един от опитните тестове (общо 7 теста) при избрано входно налягане и измерен разход (дебит).

За някои от опитните тестове, наляганята в точки #1, 2 и 3 са измерени с “U” образен манометър – вода, за проверка точността на дигиталният манометър и получаване на по-коректни стойности на наляганята.

Опитните експериментални резултати са представени в Таблица 1.

5. Пресмятат се средният разход и средната скорост на газа в тръбопровода за всеки един от опитните тестове;
6. При известни стойности на дебита (или скоростта) на газа, хидравличният диаметър на тръбопровода и параметрите на газа (плътност, относително тегло, динамичен или кинематичен вискозитети) се пресмята критерият на Reynolds по зависимости [3, 5, 6, 8];
7. Определя се опитната (експериментална) стойност на коефициента на хидравлично триене по методики [1, 5, 7, 8] и формули (13) и (14). Част от експерименталните резултати [4] и пресметнатите стойности са представени в Таблица 2;
8. Определя се теоретичната стойност на коефициента на хидравлично триене по методики [1, 2, 3, 7, 8], при съответният режим на движение на газа и приетите коефициенти на абсолютна еквивалентна грапавост на вътрешната повърхност на тръбата от формули (7), (10) и (11). Част от експерименталните резултати [4] и пресметнатите стойности са представени в Таблица 2;
9. Построяват се графики на функционалните връзки на зависимостите коефициент на хидравлично триене (теоретичен и експериментален) от режима на движение и еквивалентната грапавост: $\lambda = f(Re, K_e/D)$;

10. Извършва се оценка и анализ на експерименталните резултати, като се сравнява степента на съвпадение между опитните (експериментални) стойности на коефициента на *хидравлично триене* и теоретичните чрез корелационен анализ по средноквадратичните отклонения.

Експериментални резултати за определените основни разходи (дебити) на газ при установен режим на движение за всеки един от опитните 7 теста и пресметнатите средни стойности на разхода, пада на налягане, скоростта на газа по дължина на тръбопровода и измерените налягания в точки #1, 2 и 3, и определените загуби на налягане при съответният тест-режим в разглеждан участък от тръбопровода са представени в Таблица 1.

Таблица 1
Резултати от експерименталните изследвания

Опитна постановка на лабораторните измервания							
<p>Тръба # 1 Полиетилен висока плътност PE-80 (PEHD), Ø 32x3,0 Вътрешен хидравличен диаметър d = 26 [mm] Приет коефициент на абсолютна еквивалентна грапавост на вътрешната повърхност на тръбата за полиетилен висока плътност $K = 0,0020$ [cm] Стандартни условия: Тст. = 20 ± 1 [°C] и Рст. = $101,325 \pm 0,1$ [kPa] Температура в лабораторията Тлаб. = $19,7 \pm 1$ [°C] Налягане в лабораторията Рлаб. = $962,4 \pm 0,2$ [mbar] Разстояние от точка #1 до точка #2, $L_{1,2} = 2$ [m] Разстояние от точка #2 до точка #3, $L_{2,3} = 1$ [m] Разстояние от точка #1 до точка #3, $L_{1,3} = 3$ [m]</p>							
Опитни експериментални резултати							
№	Входно налягане, Рвх	Обемен среден разход (дебит) на газ при стандартни условия [m³/min] Експериментално измерени налягания в точки #1, 2 и 3; P _i [mbar] Пад на налягане в разглеждан участък от тръбопр.; ΔP _i [mbar] Среден пад на налягане за линеен метър; ΔP _{ср} [kPa]					
		[kgf/cm²]	Q _{ср}	ΔP _{ср}	Критерий на Reynolds по E. Shashi Menon и AGA []	ΔP _{1,2}	ΔP _{2,3}
1.	1,0	0,066	0,015	3003	0,2	0,1	0,3
2.	1,5	0,083	0,025	3777	0,4	0,1	0,5
3.	2,0	0,100	0,030	4577	0,6	0,2	0,8
4.	2,5	0,118	0,035	5383	0,4	0,3	0,7
5.	3,0	0,133	0,045	6052	0,8	0,4	1,2
6.	3,5	0,145	0,055	6579	0,5	0,3	0,8
7.	4,0	0,163	0,070	7430	0,6	0,3	0,9

В Таблица 2 са представени стойностите на коефициента на хидравлично съпротивление – теоретичен и експериментален, в зависимост от режима на движение на газа (Критерият на Reynolds) и приетите значения на коефициента на еквивалентната грапавост за полиетиленови тръби висока плътност за една от сериите опити. Значението и оценката на теоритичната стойност на коефициента на хидравлично съпротивление е определена в съответствие предложените модели и формули (7), (11), (13), (14).

Анализ на резултатите

Оценяването на коефициента на хидравлично съпротивление, определен на база експериментални изследвания, се използва за проверка кой от посочените теоретични хидравлични модели използвани в практиката [2, 4, 7, 8] е подходящ за описание движението на газ по тръбопровод изграден от полиетиленови тръби.

Съществуват различни подходи и форми на аналитично представяне на зависимостта $\lambda = f(Re, Ke/D)$ и определяне на *коефициента на хидравлично триене* (λ).

В зависимост от пресметнатите стойности на критерият на Reynolds, по методики [3, 4, 5, 8], се установява, че за условията на експеримента режима на движение на газа е *турбулентен*, с изключение на режима в тест #1 който е *преходен*.

Няма съществено различие между предложените зависимости [3, 5, 6, 8] за определяне критерия на Reynolds за газопроводи високо налягане по методики предложени от Г. Николов, СНиП 2.04.08 – 87* и Schroeder, D. Формулата предложена E. Shashi Menon и American Gas Association (AGA) дава по – ниски стойности на критерия и потвърждава извода [1, 2, 6, 8], че е коректна за използване при оразмеряване на газопроводи и мрежи ниско налягане.

Като се вземат предвид тези резултати, за определяне на критерия на Reynolds при установяване режима на движение на газ в газопроводи и мрежи ниско налягане може да бъде препоръчана формула (15) на E. Shashi Menon и American Gas Association (AGA).

$$Re = 0,5134 \cdot \frac{P_b}{T_b} \left(\frac{\bar{\rho} \cdot Q}{\mu \cdot D} \right), \quad (15)$$

където:

Q е обемният дебит при стандартни условия, [m³/24h];

D - хидравличният (вътрешен) диаметър на тръбопровода, [mm];

P_b – стандартното налягане, [kPa];

T_b – стандартната температура, [°K];

ρ – относителната плътност на газа, [-];

μ – динамичният вискозитет, [Poise].

За по-детайлно определяне на режима на движение на газа е необходимо да се установят т.н. гранични стойности на критерия на Reynolds за определяне на съответната зона на турбулентният режим.

Изложени са няколко основни извода, направени на база резултатите от обработката на експерименталните данни по посочените методики в процедурата както следва. В таблица 2 са представени пресметнатите теоретичните и експериментални средни стойности на коефициента на *хидравлично триене* за зададените условия на експеримента. Показани са на фигура 2 функционалните връзки илюстриращи зависимостта -

коэффициент на хидравлично триене от режима на движение и приетата еквивалентна грапавост.

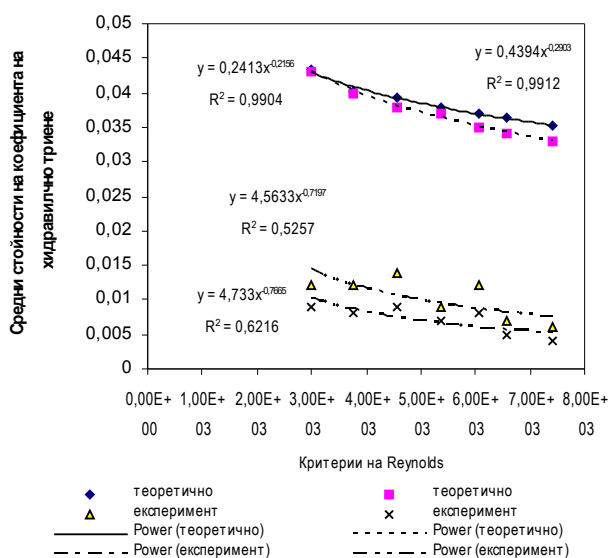
Видно е, че използваните теоретични хидравлични модели за условията на експеримента дават еднакви резултати за **теоретичният** коэффициент на хидравлично триене в граници $\lambda = 0,0353 - 0,0433$ определен по формула (7) и $\lambda = 0,0330 - 0,0430$ по формула (11).

Използваните хидравлични модели от авторският колектив за условията на експеримента дават следните резултати за **експерименталният** коэффициент на хидравлично триене изразен със средните стойности в граници $\lambda = 0,004 - 0,009$ по формула (13) и $\lambda = 0,006 - 0,014$ по формула (14).

Таблица 2
Средни стойности на теоритичните и експериментални стойности на коефициента на хидравлично съпротивление

№	Критерий на Reynolds по E. Shashi Menon и AGA []	Средни стойности на теоритичните и експериментални стойности на коефициента на хидравлично съпротивление, на база предложените и използвани хидравлични модели			
		λ теор по формулата на Алтшул (7)	λ теор по формулата на Colebrook – White (11)	λ експер по формула (14)	λ експер по формула (13)
1.	3003	0,0433	0,0430	0,012	0,009
2.	3777	0,0403	0,0400	0,012	0,008
3.	4577	0,0393	0,0380	0,014	0,009
4.	5383	0,0379	0,0370	0,009	0,007
5.	6052	0,0370	0,0350	0,012	0,008
6.	6579	0,0363	0,0340	0,007	0,005
7.	7430	0,0353	0,0330	0,006	0,004

Зависимост на средните стойности на коефициентите на хидравлично триене (теоретичен и експериментален) в зависимост то режима на движение на газа (критерия на Reynolds) и приетата еквивалентна грапавост



Фиг. 2. Зависимости на средните стойности на коефициента на хидравлично триене (теоретични и експериментални) от режима на движение на газа.

В тази връзка при съпоставяне, оценка и анализ на експерименталните резултати, използваните хидравлични модели и корелационни зависимости се оказват неподходящи за описание движението на газ в полиетиленови тръби при зададените експериментални условия и се нуждаят от уточнение.

Необходимо е да се уточни функцията $\lambda = f(Re, Ke/D)$, като се установят т.н. гранични стойности на критерия на Reynolds за определяне на съответната зона на турбулентният режим и еквивалентната грапавост и да се предложи формула за изчисляване на коефициентът на хидравлично триене при условията на движение на газ в полиетиленови тръби за условията на експеримента, близки до промишлените у нас.

Изводи и препоръки

Въз основа на извършената научноизследователска работа могат да бъдат направени следните изводи и препоръки:

- направен е обзор на използваните в световната практика хидравлични модели за описание движението на газ в тръбопроводни системи при проектирането им;
- разработен е лабораторен изследователски стенд, позволяващ определянето на хидравличната характеристика на газопроводи и мрежи, изградени от полиетиленови тръби – висока плътност;
- разработена е конкретна методика за изследване и определяне на хидравличните съпротивления при движение на технически газ в тръби PE-HD.

Авторският колектив изказва благодарност на фирма "Овергаз-техника" - "Овергаз Инк" АД, "Газтек БГ" и фирма "Газтерм системс" ЕООД, за оказаното съдействие, материална и техническа подкрепа при разработването на стенда и провеждането на изследванията и анализите.

Литература

1. Ионин, А. А. 1989. Газоснабжение. М., Стройиздат.
2. Карасевич, А. М., М. Г. Сухарев, И. В. Тверской. 2002. Анализ результатов экспериментов по оценке гидравлического сопротивления полиэтиленовых труб. – 1 Международная научно-техническая конференция DISCOM 2002.
3. Николов, Г. К. 1993. Транспорт и съхраняване на нефта и газа. С., Минно-геоложки университет.
4. Отчет на договор ГПФ №84/2006, НИСМ, МГУ "Св. Иван Рилски", 2007.
5. Строительные нормы и правила газоснабжения. 1995. СНиП 2.04.08 – 87*, М.
6. Shashi Menon, E. 2005. Gas Pipeline Hydraulics. M. Dekker, Inc.
7. Piggott, J., N. Ravell, T. Kurschat. 2002. Taking the rough with the smooth – a new look at transmission factor formulae, PSIG, 23-25 October 2002.
8. Schroeder, D. W. Jr. 2001. A tutorial on pipe flow equations. Stoner Associates, Inc., August 16, 2001.

Препоръчана за публикуване от
Катедра "Сондиране и добив на нефт и газ", ГПФ