

МОДЕЛИРАНЕ И СИМУЛИРАНЕ НА СКОРОСТНО ПОЛЕ В ТРЪБИ ОТ РЕ-HD ЗА ГАЗОРАЗПРЕДЕЛИТЕЛНИ МРЕЖИ ЧРЕЗ СПЕЦИАЛИЗИРАН СОФТУЕР

Мартин Бояджиев¹, Ивелина Хинова²

¹Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София; martinb@mgu.bg

²ОВЕРГАЗ ИНК. АД, 1407 София; ivelina_hinova@overgas.bg

РЕЗЮМЕ. В настоящата статия авторите представят сравнителен анализ на получените симулационни резултати с изчислителни експериментални данни и реален физичен експеримент в натурни условия на движение на газообразен флуид в тръбно пространство. Получените резултати са потвърдени чрез привеждане на сложния математически апарат описващ поведението на флуида към опростена математическа зависимост за приложение в инженерната практика при проектиране на разпределителни газопроводи.

MODELING AND SIMULATION OF VELOCITY IN PIPES FOR PE-HD GAS DISTRIBUTION NETWORK BY CFD

Martin Boiajiev¹, Ivelina Hinova²

¹University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", 1700 Sofia; martinb@mgu.bg

²Overgas Inc., Jsc, Sofia 1407; ivelina_hinova@overgas.bg

ABSTRACT. In this paper the authors present a comparative analysis of simulation results and experimental data of real physical experiment in natural conditions of movement of gaseous fluid in the tubular space. Have confirmed the results obtained and is given the complicated mathematical formalism describing the behavior of the fluid to a simple mathematical relationship for use in engineering practice in the design of distribution lines.

Въведение

При решаването на задачи, свързани с движение на газообразни флуиди трябва да се отчете, че базовата физика на процесите е сложно комплицирано явление и резултатите, получени от програмните продукти са дотолкова достоверни, доколкото химичните параметри и физични величини заложили в програмния продукт са такива. Тъка, че за да се изработят и получат възможно най-достоверни резултати трябва да се съчетаят знания и умения от редица области.

За стартиране и настройване на числени симулации се минава през етапа на идентифициране и формулиране на проблема във физичен и химичен смисъл на разглежданото явление. Типовите решения предлагат възможност да се моделира двумерна или тримерна задача, за да се изключи влиянието на температура или вариациите на други физични величини. Да се определят гранични условия за уравненията за турбулентен или ламинарен поток и чрез математически допускания да се ограничат странични ефекти. За да се получат правилни решения са необходими конкретни познания в моделирането, необходими за да се направят допусканията понижаващи сложността на модела до определено/поносимо (решимо) ниво, като в същото време се запазят основите му. Това удобство на опростяването в този етап на моделиране е необходимо за да се управлява

качеството на информацията, генерирана от програмата, като в същото време потребителя да бъде в течение на всички направени допускания (Хинова, 2004). Доброто разбиране на алгоритмите на числените решения също е от решаващо значение за получаване на качествено решение.

Преди да се пристъпи към решаването на конкретна газодинамична задача, трябва да се отговори на основния въпрос – кой метод да бъде избран. Да се направи това е трудно, доколкото изискванията в поставените задачи могат да бъдат съществено различни. Така например, ако в една задача основното изискване е висока точност на решението, то в друга може да бъде – минималните ресурси за получаване на решението. Задачата моделира движението на свиваем флуид в тръбопроводна система от полиетиленови тръби, тъй като при съвременното проектиране и строителство на газоразпределителни мрежи се използват в последните години тръби от полиетилен висока плътност. Използва се полиетилен РЕ-HD 80 и РЕ-HD 100 отговарящ на изискванията на стандарт БДС-EN 12 007-2.

Със създаването на модел на движението на свиваем флуид в полиетиленови тръби ще се изследват и скоростните полета, коефициентите на хидравлично триене и загубите на налягане в новите условия за пренос на газ.



Фиг. 1а. Вид на използваната тръба PE-HD 80

Изграденият стенд с помощта на фирма "ГАЗТЕРМ СИСТЕМ" ЕООД в катедрата по "Сондиране и добив на нефт и газ" в ГПФ на Минно-геоложкия университет и направените експерименти там за изследване на газодинамично движение в тръбопроводи затвърждават резултатите получени от представения в доклада модел.

Валидността на физичните и химичните модели вградени в програма или точността на крайните резултати могат да се оценят чрез сравняване с експерименталните резултати или изследвания в полеви условия, което е цел на последващи тестове и изследвания. Все пак експеримента си остава мощен инструмент за доказване на тези и решаването на проблеми, подход доказан с историята на научните изследвания.

Теоретична постановка

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. Моделът и последващите експерименти ще отговорят на въпроса доколко изведените зависимости и емпирични закони съответстват на използваните нови материали в газопрееносните системи.

Разработените по 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" НИСМ (Отчет на Договор, 2007), 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 фиг. 16 (Schroeder, 2001; Shashi Menon, 2005; *Отчет на Договор*, 2007) е преход между резултатите на модела и полевите изследвания в условия на газоразпределителните мрежи.



Фиг. 1б. Експериментална стенова установка за определяне хидравличната характеристика на полиетиленови тръби (Harizanov, Boyadjiev, 2007)

Стеновите изследвания на хидравличните съпротивления на полиетиленови тръби са извършени в учебната лаборатория "Хидравлика и транспорт на нефт и газ" към катедра "Сондиране и добив на нефт и газ" при Минно-геоложкия университет "Св. Иван Рилски" в София с участници М. Харизанов и М. Бояджиев.

Експерименталната част в договора 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) (*Отчет на Договор*, 2007).

Изчислителната механика на флуидите – CFD (computational fluid dynamics) е софтуер, който се базира на числени алгоритми, които решават задачи свързани с теченията на флуиди (Хинова, 2004).

Възможните приложими методи за конкретното изследване са: *Метода на крайните елементи* и *Метода на крайните разлики*. Методът на крайните елементи започва да се прилага от 50-те години на миналия век от специалисти по строителна механика, когато сложната геометрия на обекта в задачата не позволява да се получи аналитично решение. В тези случаи обекта се разделя на на по-прости подобласти за които се търси приблизително решение. Тези подобласти започнали да се наричат крайни елементи, а самият метод- метод на крайните елементи. През последните десетилетия метода на крайните разлики е един от най-широко използваните числени методи. Популярността му се обяснява с използваната в него математическа идея за дискретизация. Дискретизацията е апроксимационна процедура, при която непрекъснатата област се заменя с омрежена повърхност, като физичните променливи се търсят не в отделните области, а в конкретни точки от мрежата. За целите на настоящето изследване от голяма важност е гладкостта на полученото решение характерна за метода на крайните разлики (Хинова, 2004). Само този подход дава възможност за по-добро описание на нелинейните членове от вида на $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$, които се съдържат в уравненията на Навие-Стокс – основни

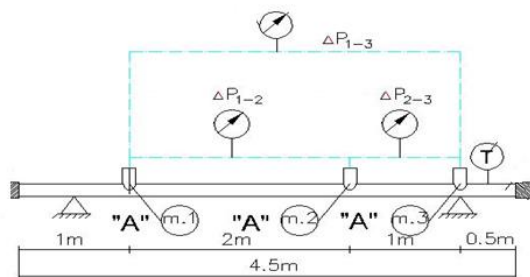
уравнения описващи движението на флуиди и това предопределя избора на този метод в конкретната задача.

Използваният числен метод е метода на крайните разлики и по конкретно метода на контролните обеми. Този метод е развит оригинално като специална формулировка на метода на крайните разлики. При него са спазени основните стъпки, характеризиращи численото решение на задачата: формално интегриране на основните уравнения на течението навсякъде по контролните обеми на решаваната област; замяна на производните с отношения на крайни разлики; итеративно решаване на получената система алгебрични уравнения.

По този начин непрекъснатото решение се заменя със съвкупност от дискретни стойности, получени за центъра на всеки контролен обем. Като естествено следствие точността на решението зависи от големината на стъпките на дискретизация.

Параметри на изследването

За конкретния случай е разгледан цилиндричен обем на тръбопровод (схематично показан на фиг. 2) с размери: диаметър $D=32$ mm и дължина $L=4.5$ m, с геометричен обем от $2,38797 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$.



Фиг. 2. Принципно технологична схема на експерименталния стенд

Математичен модел (Harizanov, Boyadjiev, 2007)

Основните уравнения описващи процеса на движение на флуида са:

- уравнение за съхранение на масата:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0$$

- уравнение на движението:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial \tau} + \text{div}(\rho u \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad} u)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial \tau} + \text{div}(\rho v \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad} v)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial \tau} + \text{div}(\rho w \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad} w)$$

- уравнение за съхранение на енергията:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial \tau} + \text{div}(\rho h \vec{u}) = -p \cdot \text{div} \vec{u} + \text{div}(\lambda \text{grad} t)$$

- уравнение на състоянието:

$$p = p(\rho, t); \quad i = i(\rho, t),$$

където ρ - плътност на флуида, kg/m^3 ,

$\vec{u}(u, v, w)$ - вектор на скоростта,

μ - динамичен вискозитет на флуида, $[\text{kg/m.s}]$

i - енталпия на флуида, $[\text{kJ/kg}]$

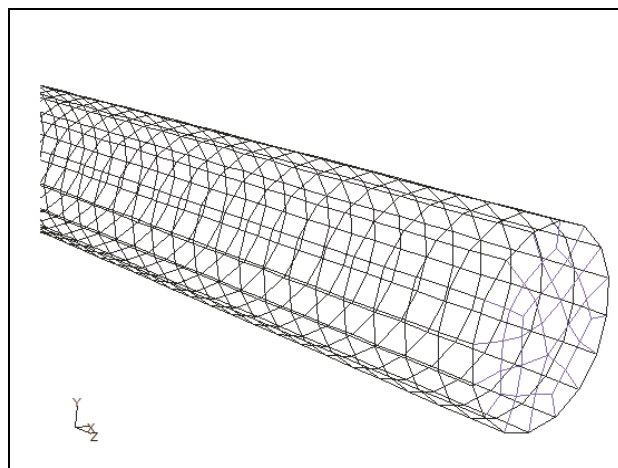
p - налягане на флуида, $[\text{Pa}]$

λ - коефициент на топлопроводност на флуида, $[\text{W/m.K}]$, t - температура, $^{\circ}\text{C}$.

Представените уравнения съставляват обобщен математичен модел на установен процес на движение на флуида. Те се използват за получаване на скоростното поле и полето на налягането във всяка точка на изследваната тръба.

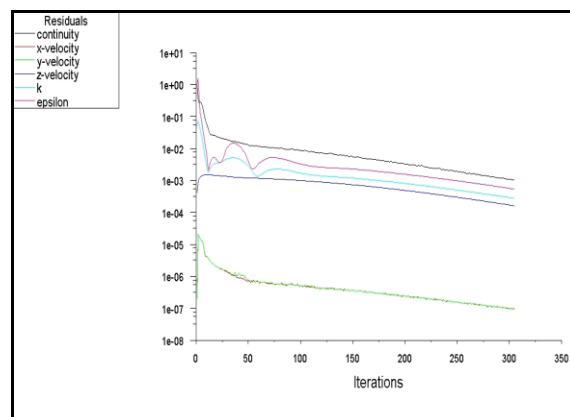
Процедура за моделиране

Геометрията на съда позволява да се работи със структурирана мрежа. В тримерното пространство такава мрежа представлява подредена конфигурация от hexahedral-ни клетки с размери $\Delta r = \Delta h = 5$ mm. По този начин е получена мрежа с 28 384 контролни обеми, както е показано на фиг. 3. Течението е преходно от ламинарно към турбулентно. Заложения в CFD модел на турбулентност е $k-\epsilon$.



Фиг. 3. Вид на използваната мрежа

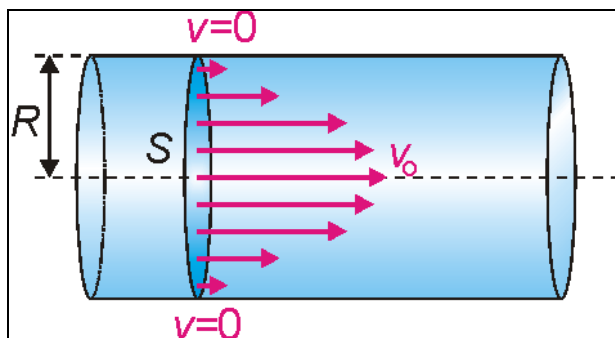
Използваната схема на дискретизация е неявна. Тя се препоръчва за основни преносни процеси при CFD симулациите главно заради свойството си стабилност. Стъпката във времето е $\Delta t=1\text{s}$. След 320 итерации (фиг. 4) се получава сходимо решение. Това потвърждава правилната постановка на модела.



Фиг. 4. Сходимост на решението

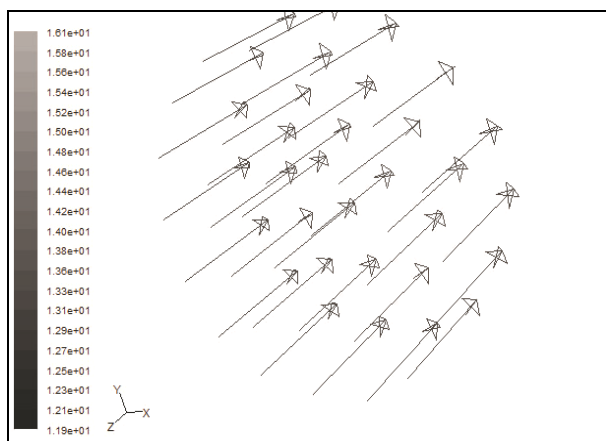
Анализ на резултатите

Симуляционното изследване доказва физическата същност на установено течение в тръба фиг. 5.

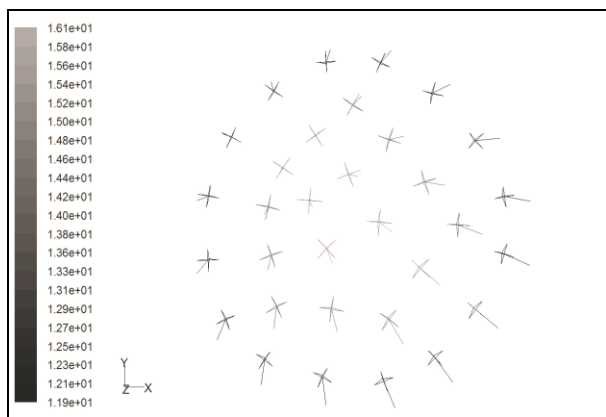


Фиг. 5. Скоростен профил на течение в тръбата

В началния момент имаме равномерно и симетрично разпределение на скоростното поле фиг. 6, което се изменя на изхода, отчитайки триенето по вътрешната повърхност и се концентрира по оста на тръбата фиг. 7.



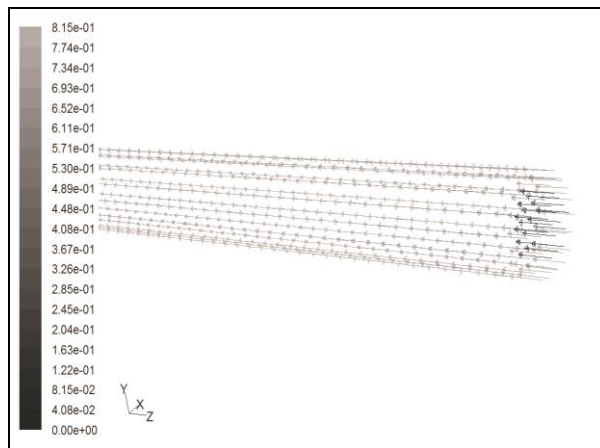
Фиг. 6. Скоростен профил на входа на тръбата



Фиг. 7. Скоростен профил на изхода на тръбата

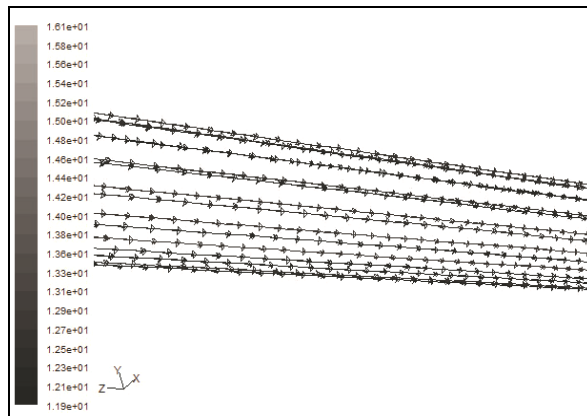
Силите на триене (фиг. 8) отчитат скоростта по вътрешната стена на тръбата и са в противоположна посока (фиг. 9). Те са по-големи по вътрешната стена на тръбата и са в противоположна на движението посока. Те определят и загубите на налягане при движението на газа, които са в зависимост от дебита от порядъка на 0.2 mbar/m. Такива резултати са получени и от

експериментите в лабораторията по "Хидравлика и транспорт на нефт и газ" (Harizanov, Boyadjiev, 2007).



Фиг. 8. Сили на триене по вътрешните стени на тръбата

Анализа на резултати дава основание за изследваната геометрия на тръбата, че скоростното поле не се изменя надлъжно по оста на тръбата, а изменението е основно в радиално направление за конкретното напречно сечение.



Фиг. 9. Скоростен профил по вътрешните стени на тръбата

Изменението в скоростното поле на изхода, отчита триенето по вътрешната повърхност и се концентрира по оста на тръбата (фиг. 7). Скоростта по оста на кръглото сечение е значително по-висока от тази по периферията на тръбата и е в границите от 11 до 15 m/s от началото към края по профила, която е препоръчителна за движение по газа в градските газоразпределителни мрежи.

Изводи

Създаден е модел на движението на флуид в тръба. За съставянето на модел на процеса се изискват специализирани знания и умения в областта на изчислителната механика на флуидите.

Компютърното моделиране и симулиране дава възможност за визуализиране и качествена оценка на процесите на движение с основна цел изготвяне на конкретни предложения за подобряване на процеса на определяне на газодинамичните загуби в полиетиленови тръби.

Получените резултати показват определени закономерности в изменението на скоростното поле при

движение на флуид в тръба, които може да се използват за привеждане на сложния математически апарат към инженерно приложни зависимости, след доказването и м в експериментални условия.

Анализа на резултати дава основание за извода че скоростното поле по оста на тръбата може да се сведе до едномерно, т.е. изменението в радиално направление, има основание да се пренебрегне като се вземе средно-интегрална стойност на скоростта в надлъжния профил.

Разработеният 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 потвърждава до голяма степен получените резултати от модела (*Отчет на Договор*, 2007; Harizanov, Boyadjiev, 2007).

Получените резултати показват определени закономерности в изменението на скоростното поле при движение на флуид в тръба, които може да се използват за привеждане на сложния математически апарат към инженерно приложни зависимости.

Резултатите от експерименталното и числено изследване ще се сравнят с реални измервания в експлоатационни условия на газоразпределителни мрежи.

Литература

- Николов, Г. К. 1993. *Транспорт и съхраняване на нефта и газа*. С., Минно-геоложки университет.
- Отчет на Договор*. 2007. ГПФ №84-2006, НИСМ, МГУ "Св. Иван Рилски".
- Хинова, И. 2004. Числени методи в механиката на флуидите. – *Сборник доклади от Втората международна конференция "Мениджмънт и инженеринг'04", София, 13-15 май 2004*, 123-126.
- Harizanov, M., M. Boyadjiev. 2007. New approaches and solutions for determination of hydraulic resistance in PE-HD pipelines for gas distribution systems. – *SGEM Conference 2007, Albena*.
- Schroeder, D. W., Jr. 2001. *A tutorial on pipe flow equations*. Stoner Associates, Inc.
- Shashi Menon, E. 2005. *Gas Pipeline Hydraulics*, M. Dekker, Inc.

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