

Maye qazların nəqli zamanı multifazalı axın zonalarının diagnostikasi

Q.Q. İsmayilov, t.e.d.,

X.T. Cahangirova

Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti

Açar sözlər: maye qaz, doyma təzyiqi, hidravlik maillik, basqı, aşırım nöqtəsi, multifazalı axın.

e-mail: asi_zum@mail.ru

DOI.10.37474/0365-8554/2023-10-23-29

Диагностика зон многофазного течения при транспортировке сжиженных газов

Diagnostics of multiphase flow zones during transportation of liquid gases

Г.Г. Исмаилов, д.т.н., Х.Т. Джахангирова
Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности

G.G. Ismayilov, Dr. in Tech. Sc., Kh.T. Jahangirova
Azerbaijan State University of Oil and Industry

Ключевые слова: сжиженный газ, давление насыщения, гидравлический градиент, давление, точка перехода, многофазный поток.

Keywords: liquid gas, saturation pressure, hydraulic gradient, pressure, transition point, multiphase flow.

Трубопроводный транспорт, являющийся одним из способов транспортировки жидких газов, в отличие от нефтепроводов, имеет специфические особенности. В первую очередь в трубопроводе необходимо обеспечить переход жидкой фазы в пар, иначе потери давления в трубопроводе значительно возрастают, и вопросы безопасности становятся более актуальными. Для этого следует определить, имеются ли на трассе трубопровода "опасные" точки, а давление по длине трубопровода должно быть больше давления насыщенных паров. Во многих случаях в зависимости от рельефа, изменения режима работы и свойств транспортируемых жидких газов в результате испарения, возникающего при транспортировке в трубопроводе образуются зоны многофазного течения. Вопросы существования таких зон и определения их координат весьма актуальны.

Разработан графоаналитический метод диагностики зон многофазного течения и определения их координат при транспортировке сжиженных газов на основе баланса давлений.

Pipeline transport, which is one of the ways to transport liquid gases, unlike oil pipelines, has specific features. First of all, it is necessary to ensure the transition of the liquid phase into steam in the pipeline, otherwise the pressure loss in the pipeline will increase significantly, and safety issues become more relevant. To do this, it is necessary to determine whether there are "dangerous" points on the pipeline route, and the pressure along the length of the pipeline must be greater than the saturated vapor pressure. In many cases, depending on the relief, changes in the operating mode and properties of the transported liquid gases, as a result of the evaporation that occurs during transportation, zones of multiphase flow are formed in the pipeline. The questions of the existence of such zones and the determination of their coordinates are very topical.

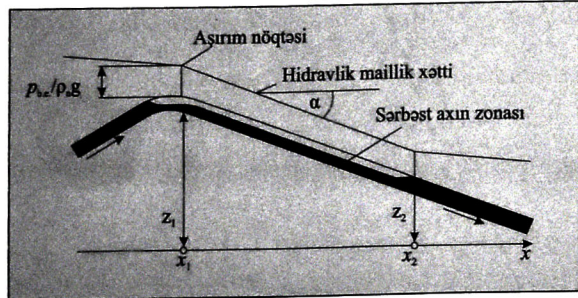
In the article, a graphic-analytical method for diagnosing multiphase flow zones and determining their coordinates during the transportation of liquid gases based on the pressure balance has been developed.

Məlumdur ki, maye qazların nəqlini həyata keçirən boru kəmərlərinin layihələndirilməsi məqsədilə onların hesablanması (məhkəmlilik və hidravlik) zəruridir. Bu zaman maye qazları nəql edən boru kəmərlərinin hidravlik hesablanması izotermik kəmərlər üçün (yaxud temperaturun uzunluq boyu az dəyişdiyi halda) neft məhsulları kəmərlərinin hesablanmasından prinsipə fərqlənir. Fərqli olan odur ki, müəyyən termobarik şəraitdə maye qaz asanlıqla qaz halına keçərək, canlı en kəskin sahəsinin dolması səbəbindən kəmərin buraxma qabiliyyəti xeyli aşağı düşür. Bu hadisənin yolverilməzliyi həm də onunla bağlıdır ki, bu halda nasoslarda kavitasiya hadisəsinin başvermə ehtimalı artır. Digər tərəfdən, qaz fazasının yaranması boru kəmərinə hidravlik müqaviməti və təzyiq itkilərini çoxaltmış olur. Maye qaz kəmərlərində qeyd olunan halın baş verməsi adətən qorxulu nöqtə hesab edilən ən yüksək nöqtədə (aşırım nöqtəsində) baş

vermiş olur. Odur ki, maye qazların nəqli zamanı boru kəmərinin trasının hansı nöqtəsində buxarlanma (qazlaşma) halının baş verməsinin əvvəlcədən diaqnostikasi və yaranan buxar zonasının koordinatlarının təyini çox vacib məsələlərdəndir. Bir çox hallarda temperatur rejiminin və nəql olunan maye qazların (məsələn propan-butan və ya butan-propan qarışıqlarının) fiziki-kimyəvi və reoloji xassələrinin kəmər boyu dəyişməsi hesabına qorxulu nöqtə aşırım nöqtəsi olmaya da bilər.

Məsələnin qoyuluşu. Fərz edək ki, boru kəmərinin müəyyən bir hissəsində qaz ayrılması baş vermiş və hərəkət zamanı axında müəyyən uzunluqda qaz fazası ilə dolan boru hissəsi mövcud olmuşdur.

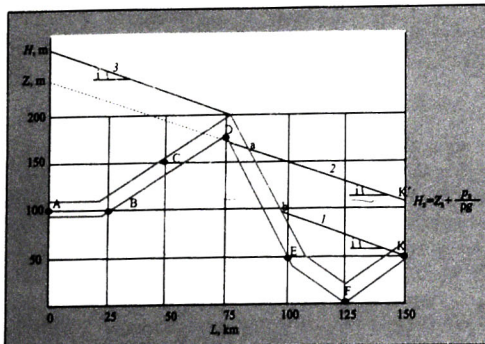
Beləliklə, kəmərin (x_1, x_2) hissəsində ağırlıq qüvvəsinin təsiri altında, maye qazın boruda tam en kəsik boyu olmayan axını baş verəcək (şəkil 1). Boşluğu dolduran qaz fazasında təzyiq, buxar elastikliyi təzyiqinə p_{be} bərabər olmaqla sabit qalacaq. Belə axın zonasının (x_1) və (x_2) kəsikləri arasında müəyyən basqılar fərqi həmin kəsiklərin geodezik hündürlükləri fərqinə $(Z_1 - Z_2)$ bərabər olacaq. Bu halda başlanğıc (x_1) nöqtəsi aşırım kimi qəbul edilə bilər. Qeyd etmək lazımdır ki, bu cür nöqtə bir qayda olaraq trasın profilinin hündür nöqtələrindən biri ilə üst-üstə düşür.



Şəkil 1. Maye qaz kəmərinə multifazalı axın zonası

Maye qaz kəmərlərində qeyd olunan multifazalı sahələrin yaranması kəmərin statik vəziyyətində, hətta qərarlaşmış iş rejimlərində də müşahidə oluna bilər. Həmin zonaların tədqiqi və təyini maye qaz kəmərlərinin təhlükəsiz, səmərəli istismarı üçün çox vacibdir. Belə zonalar bir qayda olaraq aşırım nöqtəsi ilə əlaqədər olduğundan iş rejimindən asılı olaraq onlar heç mövcud olmaya da bilər. Multifazalı axın zonalarının yaranması iş rejiminin dəyişməsi, dayandırılması, nəql olunan maye qazın xüsusiyyətlərinin dəyişməsi zamanı mümkündür [1-3].

Multifazalı axın zonasının təyini məsələsinə maye qaz kəmərinin şərti sxemində əsasən baxaq. Aşırım nöqtəsini təyin etmək məqsədilə hidravlik mailik (i) hesablanmalı və sxem qurulmalıdır (şəkil 2). Bu məqsədlə kəmərin son nöqtəsindən (K) trasın profilini kəsənə kimi K_0 mailik (i) xətti keçirilir. Bu xəttə paralel (3) və profili kəsməyən, yalnız onunla toxunma nöqtəsi (D) aşırım nöqtəsi olacaq.



Şəkil 2. Maye qaz kəmərinə multifazalı axın hissəsinin təyini

Boru kəmərinin sonunda təzyiq (p_s) olarsa, onda mailik xətti $H_s = Z_s + p_s / \rho g$ basqı hündürlüyü olan K nöqtəsindən profili kəsənə qədər (2 xətti) çəkilir. Boru kəmərinə aşırım nöqtəsinin mövcud olduğu hallarda həmin nöqtədən başlayaraq multifazalı axın sahələri yaranacaq. Bu cür sahələrin başlanğıcı həmin aşırım nöqtəsi, sonu isə hidravlik mailiyyin profilə kəsişmə nöqtəsi olacaq. Belə ki, şəkil 2-də 1 və 2 ilə uyğun olaraq a və b kəsişmə nöqtələri yaranan həmin zonaların sonunu göstərən nöqtələr olacaq.

Qeyd etmək lazımdır ki, multifazalı zonaların yaranmaması üçün boru kəmərinin istənilən nöqtəsində pyezometrik basqı (hündürlük - H) vakuumetrik hündürlük də (h_g) nəzərə alınmaqla vacibdir ki, geodezik hündürlükdən (Z) az olmasın. Yəni aşağıdakı bərabərsizlik ödənilməlidir:

$$H > Z + h_g; h_g = p_{be} / \rho g. \quad (1)$$

burada, p_{be} - maye qazın doymuş buxar elastikliyi təzyiqidir, Pa.

Sürət basqısı ($V^2 / 2g = 0$) baxılan halda çox kiçik olduğundan nəzərə alınmır. Multifazalı axın zonasının koordinatlarının təyini məqsədilə aşağıda qrafoanalitik üsulun işlənilməsinə baxılmışdır.

Məsələnin həlli. İlk növbədə hidravlikanın məlum düsturlarına əsasən aşağıdakı nəql parametrləri təyin edilir:

1. Axının sürəti və Reynolds ədədi;

$$Q = 4Q / \pi d^2, R_e = vd / \vartheta. \quad (2)$$

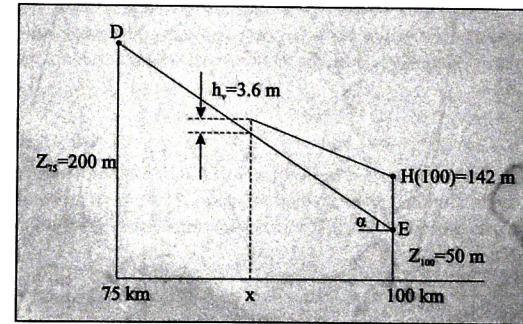
2. Hidravlik müqavimət əmsalı;

$$\lambda = 64 / R_e - \text{laminar rejim üçün } (R_e < 2300) \\ \lambda = \frac{0.3164}{\sqrt{R_e}} - \text{hamar kələ-kötürlük zonası üçün } (R_e > 2300), \quad (3)$$

Q - maye qazın sərfi, d - kəmərin diametri; ϑ - mayenin kinematik özlülüyüdür.

3. Hidravlik mailik;

$$i = \lambda \frac{v^2}{2gd}. \quad (4)$$



Şəkil 3. Multifazalı axın zonasının təyini

Multifazalı zonanın koordinatlarını təyin etmək üçün şəkil 3-də göstərilən sxemə baxaq. Bu zaman X nöqtəsi bu zonanın son nöqtəsi olacaq. α bucağı məlum olduğu üçün multifazalı zonada hidravlik mailik profilə paralel və ondan h_g məsafəsindən keçməklə aşağıdakı kimi təyin olunur:

$$i = \operatorname{tg} \alpha = \frac{Z_{as} - Z_{F*}}{L_{F*} - L_{as}}, \quad (5)$$

burada Z_{as} , L_{as} , Z_{E*} , L_{E*} – uyğun olaraq aşırım nöqtəsi və multifazlı axın zonası olan boru kəməri hissəsinin sonu üçün (E nöqtəsi) geodezik hündürlük, m – kəmərin başlanğıcından olan məsafəldir.

Qeyd olunanları nəzərə alaraq aşağıdakı bərabərliyi yazmaq olar:

$$Z_{E*} + i^* \cdot (L_{E*} - x) = H_{E*} + i(L_{E*} - x). \quad (6)$$

Onda (6) ifadəsindən multifazlı axın zonasının son nöqtəsinin koordinatını (x) və uzunluğunu (l_{ma}) təyin etmək üçün aşağıdakı ifadələri yazmaq olar:

$$\begin{cases} x = L_{E*} - \frac{H_{E*} - Z_{E*}}{i^* - i}, \\ l_{ma} = x - L_{as} \end{cases} \quad (7)$$

burada i^* və i uyğun olaraq boru kəmərinin multifazlı axın və monofaza hissələrində hidravlik maillik; H_{E*} – multifazlı axının sonundakı (E nöqtəsində) olan basqıdır. Bu basqını şəkil 2-yə əsasən aşağıdakı kimi hesablamaq olar:

$$H_{E*} = H_s - i(L_{bk} - L_{E*}) \cdot m, \quad (8)$$

burada L_{bk} , H_s – uyğun olaraq boru kəmərinin uzunluğu və sonunda yaranan basqıdır. Adətən bu basqı məlum olur.

Boru kəmərinin başlanğıcında olan basqı (təzyiq) məlum deyilsə, onu hesablamaq üçün i (hidravlik maillik), aşırım nöqtəsinin məlumatları (Z_{as} , L_{as}) və vakuummetrik hündürlüyə (h_a) əsasən aşağıdakı kimi təyin etmək olar:

$$H_b = Z_{as} + h_a + i \cdot L_{as}, \quad (9)$$

burada $i \cdot L_{as}$ – boru kəmərinin aşırım nöqtəsinə kimi olan hissəsində basqı itkisidir, m . Sonuncu ifadəni nəzərə alsaq, başlanğıcda olan təzyiq p_b aşağıdakı kimi olacaq

$$p_b = \rho \cdot g \cdot H_b, \text{ Pa}. \quad (10)$$

burada ρ – nəql olunan maye qazın sıxlığıdır, kg/m^3 .

Basqılı hərəkət zonasında sürət multifazlı axındakı sürətdən az olduğu üçün sərfin sabitliyi qanununa görə qaz fazası ayrılmış hissələrdə mayenin hərəkəti tam kəsik boyu olmadığı üçün borunun maye ilə dolan en kəsik sahəsi tam en kəsiyindən az olacaq. Həmin sahələrin dolma əmsalı (K_d) kəmərinin diametrinə uyğun sərf moduluna əsasən təyin edilir. Diametrin dəyişməsinə görə sərf modulunun dolma əmsalına uyğun dəyişməsi cədvəldə verilmişdir. Hidravlik mailliyə əsasən sərf modulu (M) aşağıdakı kimi təyin edilir [1, 4–6]:

$$M = Q / \sqrt{i^*}, \quad (11)$$

burada Q – mayenin sərfi, m^3/s ; i^* – sərbəst axın sahəsində hidravlik maillikdir, m/m .

Cədvəl əsasən (11) təyin olunmuş M -in qiymətinə uyğun K_d -nin qiyməti təyin edilir. Əgər bu qiymət cədvəl qiymətləri ilə üst-üstə düşməzsə, onda K_d – əmsalı interpolasiya üsulu ilə dəqiqləşdirilir:

$$K_d(M) = K_d(M_1) \frac{(M_1 - M)}{(M_1 - M_0)} + K_d(M_0) \frac{(M - M_0)}{(M_1 - M_0)}, \quad (12)$$

burada M_0 , M_1 – M -ə aşağı və yuxarıdan yaxın cədvəl qiymətləri; $K_d(M_0)$, $K_d(M_1)$ – müvafiq olaraq M_0 , M_1 -ə uyğun gələn dolma əmsallarıdır.

Beləliklə, multifazlı zonada qazla dolan hissənin həcmi aşağıdakı ifadəyə əsasən təyin etmək olar:

$$V_{boq} = (1 - K_d) \frac{\pi d^2}{4} l_{ma}. \quad (13)$$

Dolma əmsalı, K_d	Kəmərin diametri, mm		
	200	300	350
0.05	0.0184	0.0542	0.0818
0.10	0.0368	0.1058	0.1636
0.15	0.0552	0.1627	0.2455
0.20	0.0736	0.2170	0.3273
0.25	0.0920	0.2712	0.4091
0.30	0.1104	0.3254	0.4909
0.35	0.1288	0.3767	0.5727
0.40	0.1472	0.4339	0.6545
0.45	0.1656	0.4882	0.7364
0.50	0.1840	0.5427	0.8182
0.55	0.2024	0.5964	0.9000
0.60	0.2208	0.6509	0.9818
0.65	0.2392	0.7051	1.0637
0.70	0.2576	0.7593	1.2273
0.75	0.2760	0.8136	1.3091
0.80	0.2944	0.8678	1.3909
0.85	0.3128	0.9221	1.4728
0.90	0.3312	0.9763	1.5546
0.95	0.3495	1.0306	1.6363
1.00	0.3500	1.0800	1.7000

İşlənmiş grafoanalitik üsula əsasən şərti maye qaz kəmərinə multifazlı zonanın qiymətləndirilməsinə baxaq. Məsələn, uzunluğu $L=50$ km və diametri $D=200$ mm olan maye qaz kəməri ilə sıxlığı $\rho=550$ kg/m^3 , kinematik özlüklüyü $\nu=0.0310 \cdot 10^{-6}$ m^2/s olan maye qaz nəql olunur. Sonda təzyiq $p_s=0.1$ MPa olarsa, başlanğıcda təzyiq nə qədər olmalıdır ki, mayenin sərfi $Q=200$ m^3/saat olsun. Buxar elastikliyi təzyiqi $p_{be}=0.2$ MPa.

Şəkil 2-dən göründüyü kimi, aşırım nöqtəsindən (D) başlayaraq multifazlı axın zonası mövcud olacaq. Əvvəlcə verilənlərə əsasən nəqlin parametrlərini hesablayaq:

$$\nu = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 200}{3.14 \cdot (0.3)^2 \cdot 3600} = 0.78 \text{ m/s}$$

$$R_c = \frac{\nu d}{\nu} = \frac{0.78 \cdot 0.3}{0.3 \cdot 10^{-6}} = 780000$$

$$\lambda = \frac{0.3164}{\sqrt[4]{780000}} = 0.0106$$

$$i = \lambda \frac{1}{d} \frac{\nu^2}{2g} = 0.0106 \frac{(0.78)^2}{0.3 \cdot 2 \cdot 9.81} = 0.001094 \frac{\text{m}}{\text{m}} = 1.094 \frac{\text{m}}{\text{km}}$$

$$h_v = \frac{p_{be}}{\rho g} = \frac{0.2 \cdot 10^6}{550 \cdot 9.81} = 37.1 \text{ m}.$$

Kəmərin sonunda (K nöqtəsi) basqı aşağıdakı kimi olacaq:

$$H_K(150) = Z_{(150)} + \frac{p_s}{\rho g} = 50 + \frac{0.1 \cdot 10^6}{550 \cdot 9.81} = 68.5 \text{ m}.$$

Onda vakuummetrik hündürlük nəzərə alınmaqla boru kəmərinin F , E və D kimi xarakterik nöqtələrində basqılar aşağıdakı kimi olacaq:

$$H_F(125) = H_K(150) + i \cdot 25 = 68.5 + 1.094 \cdot 25 = 95.85 \text{ m} < 0 + 37.1 = 37.1 \text{ m}$$

$$H_F(100)=H_F(125)+i \cdot 25=95.85+1.094 \cdot 25=138.8 > 50+37.1=87.1 \text{ m}$$

$$H_D(75)=H_E(100)+i \cdot 25=138.8+1.094 \cdot 25=166.2 < 200+37.1=237.1 \text{ m}$$

Sonuncu basqının qiymətindən göründüyü kimi, D nöqtəsində basqı geodezik hündürlükdən az olduğu üçün ($H_D = 150.6 \text{ m} < 268 \text{ m}$) kəmərdə başlanğıcı məhz 75-ci km-də (D nöqtəsində) olan multifazalı zona yaranacaq (bax: şəkil 2).

Bu halda multifazalı zonada hidravlik maillik aşağıdakı kimi olacaq:

$$i^* = tg \alpha = \frac{Z_D - Z_E}{(100 - 75) \cdot 10^3} = \frac{200 - 50}{25000} = 0.0060 \frac{\text{m}}{\text{m}} = 6 \frac{\text{m}}{\text{km}}$$

Beləliklə, multifazalı hissənin son nöqtəsinin koordinatı (7) ifadəsinə əsasən aşağıdakı kimidir:

$$x = L_E - \frac{H_E - Z_E}{i^* - i} = 10^5 - \frac{123.2 - 50}{(6 - 1.094) \cdot 10^{-3}} = 10^5 - 14920 = 85080 \text{ m} = 85 \text{ km}.$$

Onda multifazalı axın zonasının uzunluğu

$$l_{m.a} = x - L_{as} = 85.0 - 75 = 10 \text{ km} = 10^4 \text{ m}.$$

Boru kəmərinin digər kəsiklərində (C, B və A nöqtələri) tam basqıların hesablanmasına baxaq:

$$H_C(50)=H_D(75)+i \cdot 25=166.2+1.094 \cdot 25=193.51 \text{ m} > 150+37.1=187.1 \text{ m},$$

$$H_B(25)=H_C(50)+i \cdot 25=193.51+1.094 \cdot 25=220.8 > 100+37.1=137.1 \text{ m},$$

$$H_A(0)=H_B(25)+i \cdot 25=220.8+1.094 \cdot 25=248.2 > 100+37.1=137.1 \text{ m}.$$

Hesablamalardan göründüyü kimi, boru kəmərinə yuxarıda qeyd olunan əlavə multifazalı zona yaranmır. Nəticə etibarilə kəmərin başlanğıcında təzyiq aşağıdakı kimi olacaq:

$$p_b = \rho \cdot g[H(0) - Z_0] = 550 \cdot 9.81[248.2 - 100] = 799613 \text{ Pa} = 0.79 \text{ MPa}.$$

Multifazalı axında boru kəmərinin en kəsiyinin hansı hissəsinin maye ilə dolmasını araşdırmaq.

Bu məqsədlə (11) düsturuna əsasən sərf modulu hesablanır:

$$M = \frac{Q}{\sqrt{i^*}} = \frac{200}{\sqrt{6 \cdot 10^{-3} \cdot 3600}} = 0.717 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}.$$

M-in hesablanma qiymətinə və diametrə ($D=300 \text{ mm}$) uyğun cədvəldən $M_0=0.7051$, $M_1=0.7593$, $K_d(M_1)=0.70$ və $K_d(M_0)=0.65$ qiymətlərinə əsasən (12) ifadəsinə uyğun dolma əmsalını hesablamaq olar.

$$K_d(M) = 0.70 \cdot \frac{(0.7593 - 0.717)}{(0.7593 - 0.7051)} + 0.65 \cdot \frac{(0.717 - 0.7051)}{(0.7593 - 0.7051)} = 0.68 = 68 \text{ \%}.$$

Beləliklə, multifazalı axında en kəsiyin maye ilə dolma dərəcəsi 68 % təşkil etdiyindən qazla dolan boşluğun həcmi (13) ifadəsinə uyğun olaraq aşağıdakı kimi olacaq:

$$V_{\text{boş}} = (1 - 0.68) \frac{3.14 \cdot (0.3)^2}{4} \cdot 10^4 = 226 \text{ m}^3.$$

Nəticə

Maye qazların boru kəməri ilə nəqli zamanı qərarlaşmış hərəkət rejimində basqılar balansına və hid-

ravlik mailliyə əsasən relyefdən asılı olaraq kəmərdə multifazalı axın zonalarının mövcudluğu və onların koordinatlarının təyini üçün diaqnostika üsulu işlənmiş və şərti maye qaz kəmərinin təmsalında sınaqdan çıxarılmışdır.

Ədəbiyyat siyahısı

1. İsmayilov Q.Q., Zeynalov E.A. Relyefli neft kəmərlərinin boşaldılması zamanı boşluqların həcmi təyini // "Neftin, qazın geotexnoloji problemləri və kimya" ETİ-nin məqalələr toplusu. Bakı, 2014, s. 36-40.
2. Ильинский А.А. Транспорт и хранение промышленных сжиженных газов. – М.: Химия, 1976, 210 с.
3. Полозов А.Е., Жмакин В.А. Пределение двухфазности течения транспортируемого сжиженного природного газа по трубопроводу // Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова, 2005, № 12, с. 58-61.
4. Алиев Р.А., Белоусов Б.Д., Немудров А.Г. и др. Трубопроводный транспорт нефти и газа / учеб. для ВУЗов. – М.: Недра, 1988, 368 с.
5. Ишмухаметов И.Т., Исаев С.Л. и др. Трубопроводный транспорт нефтепродуктов. – М.: Нефть и газ, 1999, 270 с.
6. Гужов А.И. Совместный сбор и транспорт нефти и газа. – М.: Недра, 1973, 280 с.

References

1. İsmayilov Q.Q., Zeynalov E.A. Relyefli neft kəmərlərinin boşaldılması zamanı boşluqların həcmi təyini // "Neftin, qazın geotexnoloji problemləri və kimya" ETİ-nin məqalələr toplusu. Bakı, 2014, s. 36-40.
2. Ильинский А.А. Транспорт и хранение промышленных сжиженных газов. – М.: Химия, 1976, 210 с.
3. Полозов А.Е., Жмакин В.А. Пределение двухфазности течения транспортируемого сжиженного природного газа по трубопроводу // Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова, 2005, № 12, с. 58-61.
4. Алиев Р.А., Белоусов Б.Д., Немудров А.Г., и др. Трубопроводный транспорт нефти и газа / Учебник для ВУЗов. – М.: Недра, 1988, 368 с.
5. Ишмухаметов И.Т., Исаев С.Л., и др. Трубопроводный транспорт нефтепродуктов. – М.: Нефть и газ, 1999, 270 с.
6. Гужов А.И. Совместный сбор и транспорт нефти и газа. – М.: Недра, 1973, 280 с.