



## Расчетные и действительные перепады давления при двухфазном транспорте нефти и газа

**Калашников О.В.**

*Институт газа НАН Украины, Киев*

На основе фактических данных по перепадам давления в нефтегазопроводах выполнен критический анализ достоверности расчетных формул, приведенных в «Нормах проектирования промышленных стальных трубопроводов». Сделан вывод, что для повышения надежности проектирования трубопроводов в дополнение к формулам «Норм» следует использовать альтернативные соотношения, в частности, для пробкового режима транспортировки газожидкостных смесей.

Ключевые слова: нефть, газ, газожидкостные смеси, трубопроводы, гидравлический расчет.

На основі фактичних даних по перепадам тиску в нафтогазопроводах був виконаний критичний аналіз вірогідності розрахункових формул, наведених в «Нормах проектування промислових сталевих трубопроводів». Зроблено висновок, що для підвищення надійності проектування трубопроводів в доповнення до формул «Норм» слідє використати альтернативні співвідношення, зокрема для пробкового режиму транспортування газорідних сумішей.

Ключові слова: нафта, газ, газорідні суміші, трубопроводи, гідравлічний розрахунок.

В ВСН 51-3-85 [1] даются формулы для расчета потерь давления при трубопроводном транспорте газожидкостных смесей. При кольцевом и пробковом движении таких смесей:

$$\Delta P / \Delta L = \lambda_{cm} w_{cm}^2 \rho_{pc} / 2D + \rho_{\phi} g \sin \alpha, \quad (1)$$

где  $\Delta P$  – перепад давления на отрезке трубопровода  $\Delta L$ ;  $D$  – внутренний диаметр трубы;  $w_{cm}$  – средняя (расходная) скорость газожидкостной смеси;  $\lambda_{cm}$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  $\rho_{pc}$  – псевдоплотность газожидкостной смеси, используемая для расчета динамического напора;  $\rho_{\phi}$  – усредненная масса единицы объема газожидкостного потока, взятого по всему поперечному сечению трубопровода;  $\alpha$  – угол наклона трубопровода.

Величины  $\rho_{pc}$  и  $\rho_{\phi}$  определяются по соотношениям:

$$\rho_{pc} = \beta_1^2 \rho_1 / \phi_1 + \beta_2^2 \rho_2 / \phi_2, \quad (2)$$

$$\rho_{\phi} = \phi_1 \rho_1 + \phi_2 \rho_2, \quad (3)$$

где  $\rho$ ,  $\beta$  и  $\phi$  – соответственно плотность, расходная и истинная доля (содержание) фазы (1 – жидкости, 2 – газа).

Величина  $\varphi$  вычисляется по эмпирическим формулам, различным для кольцевого, пробкового и расслоенного режимов течения газожидкостного потока. Граница между кольцевым и пробковым режимами находится по выражению:

$$V^* = 10 (0.82 - 0.0017 \mu_{от}^{-0.6})(Re_2 Fr_{см} \rho_2 / (\rho_1 - \rho_2))^{-0.333} \exp((8 + 62\mu_{от})\beta_1) \quad (4)$$

где  $\mu_{от}$  - отношение динамических вязкостей газа и жидкости;  $Re_2$  - критерий Рейнольдса;  $Fr_{см}$  - критерий Фруда.

$$Re_2 = w_{см} D / \nu_2, \quad (5)$$

где  $\nu_2$  - кинематическая вязкость газа.

$$Fr_{см} = w_{см}^2 / gD. \quad (6)$$

По [1] при  $V^* \leq 1$  режим течения кольцевой, при  $V^* > 1$  – пробковый или расслоенный.

Истинное объемное содержание жидкости определяется по следующим формулам. Для восходящего кольцевого потока

$$\varphi_{1,к,в} = \varphi_1^* / (1 + 200\beta_1) + 55 \beta_1^{0.5} / A, \quad (7)$$

$$\text{где } A = (Re_1 Fr_{см} \rho_2 / (\rho_1 - \rho_2))^{0.333}. \quad (8)$$

$$\text{При } W^* \geq 3.3 \quad \varphi_1^* = 0.$$

$$\text{При } W^* < 3.3$$

$$\varphi_1^* = 0.0053(3.3 - W^*) / A. \quad (9)$$

$$W^* = w_{см} ((\rho_1 - \rho_2) / \sigma g \sin \alpha)^{0.25} (\rho_2 / \rho_1)^{0.5}. \quad (10)$$

Для нисходящего кольцевого потока

$$\varphi_{1,к,н} = 55 (1 - 1/(1 + 3.84 \cdot 10^{-6} A^3 |\sin \alpha|^{-1.66})) \beta_1^{0.5} / A. \quad (11)$$

Истинное содержание жидкости при восходящем течении смеси в пробковом режиме.

$$\varphi_{1,п,в} = 1 - K_1 \beta_2 (1 - \exp(-4.4(Fr_{см} / Fr_a)^{0.5})), \quad (12)$$

где  $K_1$  – коэффициент, учитывающий вязкость жидкости;  $Fr_a$  - автомодельное число Фруда.

$$\text{При } \mu_{от} \leq 0.01$$

$$K_1 = 0.35 + 1.4 \mu_{от}^{0.25}, \quad (13)$$

при  $\mu_{от} > 0.01$   
 $K_1 = 0.77 + 0.23 \mu_{от}^{0.5}$ . (14)

При  $\mu_{от} < 0.001$   
 $Fr_a = 1150 \mu_{от}^{0.79}$ , (15)

при  $\mu_{от} \geq 0.001$   
 $Fr_a = 9.8 \mu_{от}^{0.1}$ . (16)

Истинное содержание жидкости в нисходящем пробковом потоке определяется по формуле:

$$\varphi_{1,п,н} = 1 - K_1 \beta_2. \quad (17)$$

(Заметим, что в данной формуле и в некоторых других в [1] имеются неточности и опечатки, которые здесь исправлены.)

Для величины  $\lambda_{см}$  предложено:

$$\lambda_{см} = \lambda_0 \psi, \quad (18)$$

где  $\lambda_0$  - коэффициент гидравлического сопротивления при течении однородной жидкости;  $\psi$  - приведенный коэффициент гидравлического сопротивления.

Величина  $\lambda_0$  определяется по формуле:

$$\lambda_0 = 0.067 (158 / Re_{см} + 2K_3 / D)^{0.2}, \quad (19)$$

где  $K_3$  – эквивалентная шероховатость трубы.

При расчете  $Re_{см}$  вязкость смеси принимается: для кольцевого режима равной вязкости жидкости, для пробкового – по формуле:

$$\nu_{см} = 1/(\beta / \nu_1 + \beta_2 / \nu_2). \quad (20)$$

При кольцевом режиме

$$\psi = 1 + 0.031(Re_2 Fr_{см} (\rho_1 - \rho_2) / \rho_2)^{0.333} \exp(-15 (\rho_2 / \rho_1 + \beta_1)) \beta_1^{0.5}. \quad (21)$$

При пробковом режиме

$$\psi = (1 - 0.78\beta_2 (1 - \exp(-4.4 Fr_{см}/Fr_a)) - 0.22\beta_2 (1 - \exp(-15 \rho_2/\rho_1))) / \beta_1. \quad (22)$$

Проверка точности расчета потерь давления выполнена по фактическим данным работы нефтегазопроводов, приведенным в [2]. В табл. 1 даются характеристики четырех трубопроводов, в табл. 2 и 3 – расчетные характеристики первых двух трубопроводов в четырех точках. Фазовые состояния и свойства смесей определялись по программной системе ГазКондНефть [3].

Таблица 1

**Параметры трубопроводов, нефтегазовых смесей и режимов их транспортировки**

Характеристики		1	2	3	4
Внутренний диаметр	м	0.3	0.3	0.3	0.3
Длина трубопровода, в т.ч.	м	1370	19100	16022	8390
восходящих участков	м	900	-	9046	7390
с подъемом,	м	45.3	-	46.1	19.5
нисходящих участков	м	470	-	6976	1000
со спуском	м	28.8	-	44.0	25.9
Расход нефти	м <sup>3</sup> /сутки	4100	1000	1350	710
Газовый фактор	нм <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	85	88.8	140	410
Температура	К	300	288	293	318
Начальное давление	МПа	0.63	1.02	1.21	1.22
Конечное давление	МПа	0.23	0.666	0.50	0.22

Таблица 2

**Результаты расчета характеристик двухфазного транспорта по трубопроводу 1 (см. табл. 1)**

№ п/п	Характеристика	Модель	Значения в начале отрезка (п.п. 2-8) и на отрезке			
			1	2	3	4
1	Длина отрезка трубопровода м		450	450	235	235
2	Режим течения		КОЛЬЦ.	КОЛЬЦ.	КОЛЬЦ.	КОЛЬЦ.
3	Объемный расход газожидкостной смеси м <sup>3</sup> /с	ВСН	0.574	0.805	2.02	-
		ВСН, $\psi \leq 3.2$	0.574	0.758	1.10	1.29
4	Скорость м/с	ВСН	8.1	11.4	28.6	-
		ВСН, $\psi \leq 3.2$	8.1	10.7	15.6	18.3
5	Расходное газосодержание	ВСН	0.909	0.936	0.975	-
		ВСН, $\psi \leq 3.2$	0.912	0.932	0.953	0.960
6	Истинное газосодержание	ВСН	0.590	0.724	0.907	-
		ВСН, $\psi \leq 3.2$	0.590	0.704	0.812	0.843
7	Приведенный коэффициент гидравлического сопротивления	ВСН	4.45	7.27	19.7	-
		ВСН, $\psi \leq 3.2$	3.2	3.2	3.2	3.2
8	Коэффициент гидравлического сопротивления	ВСН	0.0755	0.121	0.318	-
		ВСН, $\psi \leq 3.2$	0.0540	0.0535	0.0526	0.0523
9	Перепад давления на отрезке Мпа	ВСН	0.169	0.262	0.785	-
		ВСН, $\psi \leq 3.2$	0.143	0.143	0.0448	0.0605
10	Давление в конце отрезка МПа	ВСН	0.461	0.199	-	-
		ВСН, $\psi \leq 3.2$	0.487	0.344	0.300	0.239

Таблица 3

**Результаты расчета характеристик двухфазного  
транспорта по трубопроводу 2 (см. табл. 1)**

№ п/п	Характеристика	Модель	Значения в начале отрезка (п.п. 2-8) и на отрезке			
			1	2	3	4
1	Длина отрезка трубопровода м <sup>3</sup> /с		4775	4775	4775	4775
2	Объемный расход газожид- костной смеси м <sup>3</sup> /с	ВСН	0.0815	0.0857	0.0906	0.096
		[2]	0.0815	0.0897	0.101	0.119
3	Скорость м/с	ВСН	1.15	1.21	1.28	1.36
		[2]	1.15	1.27	1.43	1.69
4	Расходное газосодержание	ВСН	0.847	0.855	0.863	0.872
		[2]	0.847	0.862	0.878	0.897
5	Истинное газосодержание	ВСН	0.442	0.456	0.472	0.490
		[2]	0.590	0.614	0.643	0.679
6	Псевдоплотность	ВСН	48.7	45.4	42.0	38.5
		[2]	132.3	120.2	106.5	90.5
7	Приведенный коэффициент гидравлического сопротивления	ВСН	5.13	5.28	5.43	5.59
		[2]	2.13	2.17	2.22	2.29
8	Коэффициент гидравлического сопротивления	ВСН	0.0901	0.0926	0.0952	0.0978
		[2]	0.0639	0.0655	0.0676	0.0702
9	Перепад давления на отрезке МПа	ВСН	0.0474	0.050	0.053	0.057
		[2]	0.0894	0.101	0.118	0.114
10	Давление в конце отрезка МПа	ВСН	0.973	0.922	0.869	0.812
		[2]	0.991	0.830	0.712	0.568

Из табл. 2 и 3 видно, что формулы, приведенные в [1], приводят к завышенным расчетным перепадам давления для кольцевого режима и, наоборот, к заниженным значениям для пробкового режима. Формула (21) дает слишком высокие значения  $\psi$  при больших скоростях и малых давлениях. Удовлетворительные результаты расчета гидравлических потерь при кольцевом режиме получаются при значениях  $\psi$ , не превышающих 3.2.

В табл. 3 гидравлические потери, рассчитанные по ВСН, сравниваются с результатами, полученными по методике [2], предложенной для пробкового режима. Величины  $\rho_{пс}$ ,  $\phi$  и  $\psi$  в [2] определяются по соотношениям:

$$\rho_{пс} = \beta_1 \rho_1 + \beta_2 \rho_2, \quad (23)$$

$$\phi_2 = \beta_2 / (1 + w_{от} / w_{см}), \quad (24)$$

$$w_{от} = C (gD (\rho_1 - \rho_2) / \rho_1)^{0.5} K_c / K_y, \quad (25)$$

$$C = 0.35 (2 \cos \alpha^{0.5} + \sin \alpha^{0.5})^{0.5}, \quad (26)$$

$$K_c = (1 + K_p)^{0.5}, \quad (27)$$

$$K_y = 1 + 0.0002 (PD / \sigma)^{0.5}, \quad (28)$$

$$\psi = 1 + (0.5\beta_2 (\rho_1 + \rho_2) / \rho_{\text{лс}})(w_{\text{от}} / w_{\text{см}}), \quad (29)$$

где  $w_{\text{от}}$  - скорость газа относительно жидкости;  $\sigma$  - поверхностное натяжение жидкости;  $K_p$  - коэффициент растворимости газа;  $P$  - давление, Па.

При расчете числа Рейнольдса (для величины  $\lambda_0$ ) вязкость смеси принимается равной вязкости жидкости.

Как видно из табл. 3, принятые в [1] и [2] расчетные модели течения газожидкостной смеси и методы обработки экспериментальных данных с целью получения эмпирических соотношений для величин  $\phi$  и  $\psi$ , различаются, и довольно существенно. По трубопроводу 2 методика [2] дает лучший результат по сравнению с [1]. Поскольку сведения о вязкости перекачиваемых нефтей в [2] не приведены, выполнена оценка расчетных конечных давлений в трубопроводе при различных значениях вязкости. В табл. 3 приводятся конечные давления при вязкости нефти 5 мПа\*с. С уменьшением вязкости нефти в 3 раза гидравлические потери снижаются на 15%. Напомним, что в методике [1] вязкость газожидкостной смеси рассчитывается по формуле (20). Если, так же, как и при расчете по методике [2], ее принять равной вязкости жидкости, то расчетное конечное давление снизится с 0.812 МПа до 0.78 МПа.

Результаты расчета гидравлических потерь при движении газонефтяной смеси по трубопроводу 2 при других газовых факторах приводятся в табл. 4. Погрешности расчета по методике [2] во всех случаях ниже, чем по [1].

Таблица 4

**Результаты расчета гидравлических потерь при пробковой структуре течения нефтегазовой смеси. Длина горизонтального трубопровода 19100 м, внутренний диаметр 0.3 м.**

Расход нефти, м <sup>3</sup> /сутки	Газовый фактор, нм <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	Начальное давление, МПа	Фактич. перепад $\Delta P$ , МПа	Расчет			
				Нач. скорость, м/с	$\Delta P$ по [1]	$\Delta P$ по [1] ( $v_{\text{см}}=v_1$ )	$\Delta P$ по [2]
1060	28	0.695	0.295	0.57	0.083	0.106	0.230
1100	30.5	0.735	0.265	0.60	0.091	0.117	0.246
1500	51.2	1.33	0.350	0.79	0.148	0.19	0.283
1000	88.5	1.09	0.355	1.07	0.185	0.23	0.452

Рассмотрим пример расчета трубопровода 3 (табл.1). В начале трубопровода объемный расход газожидкостной смеси 0.149 м<sup>3</sup>/с, скорость 2.1м/с, расходные газосодержание 0.883. Формула (4) дает  $V^* = 0.837$ , т.е. по методике [1] в трубопроводе кольцевой режим течения. Однако такой вывод вызывает сомнение (невысокая скорость течения). Следуя далее методике [1], по формуле (7) получаем ошибочное значение  $\phi_{1,к,в} = 1.36$ .

Обратимся к ранее опубликованным критериям оценки режима течения двухфазных потоков [4]. Величины

$$W_{гр}^* = (0.82 - 0.0017\mu_{от}^{-0.6}) 10^{(5.3 + 115\mu_{от}\beta_1)} \quad (30)$$

для восходящих трубопроводов и

$$W_{гр}^* = (2.2 - 0.0017\mu_{от}^{-0.6}) 10^{(5.3 + 115\mu_{от}\beta_1)} \quad (31)$$

для горизонтальных и нисходящих сравниваются со значением  $W^*$ :

$$W^* = (Fr_{см} / We^{0.5})(\rho_2 / \rho_1)^{0.5}, \quad (32)$$

где  $We$  - критерий Вебера:

$$We = \sigma / (\rho_1 - \rho_2)D^2. \quad (33)$$

При  $W^* \leq W_{гр}^*$  режим течения смеси пробковый, при  $W^* > W_{гр}^*$  - кольцевой.

В нашем случае в начале трубопровода (разбитом для упрощения на 2 участка – восходящий и нисходящий)  $W^* = 1.04$ ;  $W_{гр}^* = 3.45$ , т.е. режим движения потока пробковый. Для расчета гидравлических потерь на восходящем участке используем методику [2] (формулы (23) – (29)). Получаем расчетный перепад давления на восходящем участке  $\Delta P_v = 0.51$  МПа.

На нисходящем участке вначале определяем структуру потока. Критерий Фруда для всей смеси  $Fr_{см}$  сравнивается с величиной

$$Fr^* = (0.2 + 2\sin \alpha / \lambda_{ж}) \exp(-2.5\beta_2) / \beta_1^2, \quad (34)$$

где  $\lambda_{ж}$  определяется из системы уравнений:

$$\begin{aligned} \lambda_{ж} &= 2\sin \alpha gD / w_{ж}^2 \\ \lambda_{ж} &= 0.067 (158 / Re_{ж} + 2K_3 / D)^{0.2}, \end{aligned} \quad (35)$$

где

$$Re_{ж} = w_{ж} D / \nu_{ж}. \quad (36)$$

В нашем случае скорость в начале нисходящего участка 3,81 м/с,  $Fr_{см} = 4.94$ ,  $Fr^* = 19.4$  ( $\beta_2 = 0.937$ ;  $\sin \alpha = 0.00631$ ;  $w_{ж} = 5.16$  м/с;  $\lambda_{ж} = 0.0209$ ). По [1] при  $Fr_{см} < Fr^*$  режим движения смеси – расслоенный. По формулам из [1] для расслоенного режима определяем перепад давления на нисходящем участке:  $\Delta P_n = 0.04$  МПа. Общий расчетный перепад  $\Delta P = 0.55$  МПа.

Остановимся на величине  $Fr^*$ . Если в последнем примере принять второй участок трубопровода горизонтальным, получаем  $Fr_{см} = 4.94$ ;  $Fr^* = 4.84$  (режим движения – пробковый). При использовании соответствующих расчетных формул гидравлическое сопротивление участка получаем равным 0.72 МПа (при

ресурсе 0.6 МПа по избыточному давлению). Но уже при спуске 1 м (т.е. участок остается практически горизонтальным) по формулам (41) – (43)  $Fr^* = 5.07$ , и, в соответствии с [1], следует перейти к формулам для расслоенного режима. Получаем перепад давления на втором участке всего 0.08 МПа. Отсюда очевидна большая приближенность расчетов перепадов давления на стыке расслоенного и пробкового режимов.

В работе [2] отмечается, что «в реальных условиях нефтегазопроводы, проложенные по местности даже со сравнительно спокойным рельефом, имеют волнообразный профиль. Это является одной из причин раннего перехода раздельной структуры потока в пробковую. Поэтому раздельная структура наблюдается только при весьма низких скоростях движения газонефтяной смеси и преимущественно на нисходящих участках трубопровода».

Этот вывод подтверждается фактическим перепадом давления в трубопроводе № 2. Если строго следовать указаниям [1], то, поскольку в начале трубопровода  $Fr_{см} = 0.454$ , а  $Fr^* = 1.04$ , необходимо было бы использовать модель расслоенного режима движения, и в результате расчетный перепад давления составил бы всего 0.025 МПа вместо 0.354 МПа в действительности (как видно из табл. 3, гидравлические потери по модели пробкового режима [2] 0.452 МПа).

Весьма существенные отступления расчетных данных от фактических могут иметь место и на стыке пробкового и кольцевого режимов. Рассмотрим пример 4 (табл. 1). В начале трубопровода  $\beta_2 = 0.963$ ;  $w_{см} = 3.77$  м/с;  $W^* = 2.01$ ;  $W_{гр}^* = 1.28$ , т.е. режим движения по [4] – кольцевой (по [1]  $V^* = 0.238$ ). Получаем в конце первого подъемного участка 0.973 МПа. В начале второго нисходящего участка  $W^* = 2.14$ ;  $W_{гр}^* = 3.22$ ;  $Fr_{см} = 6.97$ ;  $Fr^* = 226$  - расслоенная структура. В конце трубопровода  $P_{расч} = 0.966$  МПа. Расчет по пробковой модели [2] дает  $P_{расч} = 0.71$  МПа при  $K_c = 1$  и  $P_{расч} = 0.45$  МПа, при  $K_c = 1.7$ , что ближе к фактическим данным. В [2] по данному примеру расчетным перепад практически совпадает с фактическим (погрешность всего 2%, хотя по другим примерам погрешности достигают 50 – 80%). Несовпадение расчетных результатов может быть объяснено различием в принятых значениях свойств нефти. Заметим, что данные о свойствах транспортируемых нефтей в [2] не приведены, что существенно затрудняет сравнительный анализ расчетных моделей.

## Выводы

1. При кольцевом режиме движения газожидкостных смесей предпочтительно использование расчетных формул из [1], при пробковом – формул из [2], причем для определения границы перехода одного режима в другой предпочтительно применение критериев, приведенных в [4].
2. Для повышения надежности расчетов перепадов давления, в случае попадания в приграничные области кольцевого и расслоенного режимов (в частности, при горизонтальной прокладке трубопроводов и при незначительном спуске), расчет рекомендуется повторить по пробковой модели, и принять большие перепады.



## Литература

1. ВСН 51-3-85 (МИНГАЗПРОМ), ВСН 51-2. 38-85 (МИННЕФТЕПРОМ).  
Ведомственные строительные нормы. Проектирование промышленных стальных трубопроводов. М., 1985
2. Гужов А.И. Совместный сбор и транспорт нефти и газа. М.: Недра, 1973. – 280с.
3. Калашников О.В., Иванов Ю.В., Будняк С.В. Инженерные расчетные модели технологических сред нефтяных и газовых промыслов. Программная система ГАЗКОНДНЕФТЬ. Экотехнологии и ресурсосбережение. – 1995. - № 3. – С. 50-51.
4. Одишария Г.В., Мамаев В.А., Клапчук О.В., Толасов Ю.А. Двухфазный транспорт нефти и газа. М.: ВНИИОЭНГ, 1977. - 57с.

## Calculation and Actual Pressure Differentials at Two-phase Oil and Gas Transportation

*Kalashnikov O.V.*

*The Gas Institute of National Academy of Science of Ukraine, Kiev*

On the basis of actual data on pressure differentials in oil-gas pipelines the critical analysis of reliability of the calculation formulas indicated in "Norms of designing of field steel pipelines" is executed. It is shown, that for increase of reliability of designing of pipelines in addition to the formulas of "Norms" it is necessary to use alternate equations, in particular for cork modes of transportation of gas-liquid mixtures.

Key words: oil, gas, gas-liquid mixtures, pipelines, hydraulic calculation.