

УДК 504.064.4; 504.064.43; 658.567

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ

Венгеров А.А.¹, Гладенко А.А.², Соколов С.М.¹, Земенкова М.Ю.¹

¹ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», Тюмень, Россия (625000, Тюмень, ул. Володарского, 38), e-mail: vengerov_tsogu@mail.ru

²ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет», Омск, Россия (644050, Омск, пр-т Мира, 11) e-mail: thngss@rambler.ru

Понимание процессов теплопереноса, происходящих в системе «трубопровод – окружающая среда», становится более актуальным с ростом спроса на нефти с аномальными реологическими свойствами, требующими особого подхода к организации их транспортировки. Одним из основных способов перекачки таких нефтей является транспортировка с путевым прогревом трубопровода. В ходе работы были разработаны математические модели процессов тепло-массопереноса в горячем трубопроводе с целью определения оптимальных параметров подогрева, обеспечивающих наименьшие энергозатраты на транспорт высоковязких нефтей. По результатам работы даны рекомендации по моделированию тепловых процессов, имеющих место при магистральном транспорте нефти и нефтепродуктов с подогревом

Ключевые слова: высоковязкая нефть; аномалии течения; специальные методы трубопроводного транспорта; подогрев нефти; критериальные уравнения; математическое моделирование.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF OPERATION MODE NON-ISOTHERMAL PIPELINES

Vengerov A.A.¹, Gladenko A.A.², Sokolov S.M.¹, Zemenkova M.Y.¹

¹FGBO of higher professional education "Tyumen State Oil and Gas University, Tyumen, Russia, (625000, Tyumen, Volodarskogo street, 38), e-mail: vengerov_tsogu@mail.ru

²FGBO of higher professional education "Omsk State Technical Unoversity, Omsk, Russia, (644050, Omsk, Mira av, 11), e-mail: thngss@rambler.ru

Understanding the processes of heat and mass transfer occurring in the "pipeline - environment" is becoming increasingly important with the growth of demand for oil from the abnormal flow properties, requiring a special approach to the organization of their transportation. One of the main ways to transfer these oils is transported from the roadway by heating the pipeline. During the developed mathematical models of processes of heat and mass transfer in the hot pipe to determine the optimal parameters of heating, providing the lowest energy consumption for transport high-viscosity oil. The result of the recommendations on the modeling of thermal processes taking place in the main transport oil and petroleum products heated

Keywords: heavy oil; flow anomalies; Special methods of pipeline transport; heating oil; criteria equations; math modeling.

Обеспечение надежной и безопасной транспортировки «аномальных» нефтей является сложной технической и технологической задачей. Все многообразие процессов, возникающих при транспортировке «аномальных» нефтей еще недостаточно изучено.

Точное определение реологических характеристик структурированных дисперсных систем, к которым относятся высоковязкие и высокопарафинистые нефти, необходимо для выявления общих закономерностей их образования, разрушения, устойчивости. Наиболее полную информацию о реологических свойствах подобных систем несет кривая течения, т.е. зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига при сдвиговой деформации.

Как известно, все неньютоновские жидкости отличаются от классической ньютоновской жидкости видом зависимости скорости сдвига от величины касательного напряжения.

Иногда кривые течения жидкостей могут иметь более сложный нетрадиционный вид. Общую характеристику течения неньютоновских жидкостей составили Г.В. Виноградов и В.П. Павлов. Они же сформулировали понятие сверханомалии вязкости как явления снижения сопротивления сдвигу в условиях перехода между установившимися режимами деформирования – от течения дисперсной системы практически без разрушения коагулятивной структуры к другому режиму – с интенсивным необратимым разрушением структурного каркаса [1].

В данной работе проводились исследования смеси нефтей Усинского и Ярегского месторождений в большом диапазоне температур и при различном их соотношении (от 5 до 30% ярегской нефти), а также высокопарафинистой нефти Харьягинского месторождения.

В ходе экспериментов установлено, что данные нефти и смеси нефтей имеют тиксотропные свойства. Степень разрушения структурной решетки в аномальной нефти зависит от скорости сдвига (скорости перекачки) и от времени воздействия нагрузки. При остановке перекачки структура высокопарафинистой нефти начинает восстанавливаться. Способность вещества с течением времени восстанавливать разрушенную структуру называется тиксотропией. Восстановление структуры для каждой нефти происходит через разное время. Полное восстановление разрушенной структуры происходит через значительный промежуток времени [3].

При определенных температурах и определенных концентрациях нефтей выявлено явление сверханомалии вязкости.

Одним из методов подготовки таких нефтей к транспорту является путевой подогрев. Именно данный метод и будет рассматриваться далее, как наиболее просто реализуемый в рамках существующей трубопроводной системы обозначенных месторождений.

Анализ работы трубопровода, оснащенного системой электроподогрева, и вывод критериальных уравнений должны базироваться на мощной теоретической базе. Моделирование гидродинамических и тепловых процессов может помочь в установлении взаимодействия между теоретической базой и «полевым» экспериментом.

Внутритрубное неизотермическое течение нефти представляет собой сложную систему, коэффициент теплоотдачи которой зависит от множества параметров:

$$\alpha = f(t_{н.ср}, t_c, c_p, v_n, d_{вн}, \lambda_n, v_n, \rho_n), \quad (1)$$

где $t_{н.ср}$ – начальная средняя температура, °С

λ_n – коэффициент теплопроводности нефти, Вт/(м·К);

ν_n – средняя вязкость нефтепродукта, сСт

u_n – средняя скорость потока нефти, м/с;

ρ_n – средняя плотность нефти, кг/м³.

При проведении экспериментов, полученные данные зависимостей зачастую носят частный характер, их справедливость может быть обусловлена только в тех условиях, при которых проводился данный опыт. Чтобы выйти из сложившейся ситуации, применяется теория подобия, которая позволяет эти частные результаты обобщить с целью расчета коэффициента теплообмена [1].

Критериальное уравнение, характеризующее теплообмен при внутритрубном течении нефти с учетом эффекта подогрева пристеночного слоя потока могут быть записаны следующим образом:

$$Nu_{ж} = C_1 Re_{ж}^A Pr_{ж}^B \quad (2)$$

где A, B, C₁ – коэффициенты

Также, при использовании анализа размерностей и теорию подобия, было получено уравнение, с помощью которого можно найти значение температуры стенки в зависимости от мощности системы электроподогрева, используемой при нагреве нефти, и средней температуры стенки трубы по поперечному сечению:

$$\frac{t_c}{t_{н,ср}} = C_2 Re_{ж}^D \cdot f(P_K) \quad (3)$$

где C₂, D – коэффициенты,

Используемый параметр P_K – безразмерный параметр, определяемый как:

$$P_K = \frac{C_3 P_L}{10000 \alpha_{жн}}, \quad (4)$$

где C₃ – коэффициент,

P_L – линейная мощность системы электроподогрева, идущая на нагрев нефти, Вт/м.

Для получения функциональной зависимости Nu_ж и t_c/t_{н,ср} было решено использовать комбинационные квадраты для ламинарного и турбулентного режимов течения нефти во время эксперимента [5].

Поставленный эксперимент был выполнен в программном комплексе ANSYS 14.0, в котором была создана компьютерная математическая модель трубопровода. Рассматриваемые варьируемые величины находились в следующих пределах:

- для ламинарного режима течения: 400 < Re_ж < 2000; 882 < Pr_ж < 20588 и 20 < P_L < 350;

- для турбулентного режима течения: 2850 < Re_ж < 10000; 588 < Pr_ж < 5588; 20 < P_L < 350

Критерий Нуссельта Nu_ж при средней температуре нефти определялся по формуле:

$$Nu_{ж} = \frac{\alpha_{жн} d_{жн}}{\lambda_{жн}} = \frac{Q d_{жн}}{F(t_c - t_{н,ср}) \lambda_{жн}} = \frac{P_L}{\pi(t_c - t_{н,ср}) d_{жн}} \quad (5)$$

где Q — тепловая мощность, переданная жидкости, Вт.

$d_{вн}$ – внутренний диаметр трубопровода, м.

F – площадь внутренней поверхности стенки трубы, м².

Во время проведения моделированного процесса значения t_c и $t_{н ср}$ регистрировались для ламинарного и турбулентного режимов течения, после чего устанавливались значения $Nu_{ж}$ заносились в таблицу. В Табл. 3 представлены результаты.

Значения коэффициентов A, B и C₁ были определены следующим образом.

Приведем уравнение (2) к виду:

$$\lg Nu_{ж} = \lg C_1 + A \lg Re_{ж} + B \lg Pr_{ж} \quad (6)$$

Таблица 1

Комбинационный квадрат проведения экспериментов при ламинарном режиме течения нефти

			P_L					
			20	50	100	200	350	
$Pr_{ж}$	828.4	$Re_{ж}$	2000	1				
			1600				5	
			1200				4	
			800		2			
			400			3		
	2647.1		2000			8		
			1600	6				
			1200					10
			800				9	
			400		7			
	5588.2		2000		12			
			1600			13		
			1200	11				
			800					15
			400				14	
	11029.4		2000					20
			1600			18	19	
			1200		17			
			800					
			400	16				
20588.2	2000				24			
	1600		22					
	1200			23				
	800	21						
	400					25		

Таблица 2

Комбинационный квадрат проведения экспериментов при турбулентном режиме течения нефти

			P_L				
			20	50	100	200	350
$Pr_{ж}$	5588,2	$Re_{ж}$	10000				
		7000			3		

	2647,1	5000		2				
		3500	1					
		2850					4	
		10000				8		
		7000		7				
	882,4	5000	6					
		3500					9	
		2850						10
		10000					14	
		7000						15
	735,3	5000				13		
		3500		12				
		2850	11					
		10000	16					
		7000					19	
	588,2	5000						20
		3500				18		
		2850		17				
		10000		22				
		7000	21					
		5000				24		
		3500					25	
		2850			23			

Таблица 3

Результаты экспериментов

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$Nu_{ж}$ при ламинарном режиме	93,6	55,8	37,4	69,0	71,6	112,3	57,1	113,1	71,4
$Nu_{ж}$ при турбулентном режиме	248,7	333,1	397,7	201,9	564,5	286,6	338,2	472,4	189,6
№ опыта	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$Nu_{ж}$ при ламинарном режиме	96,9	101,9	143,4	118,7	69,7	85,3	77,0	142,4	111,8
$Nu_{ж}$ при турбулентном режиме	169,5	114,3	129,4	189,8	329,1	274,3	363,3	123,0	142,3
№ опыта	19	20	21	22	23	24	25		
$Nu_{ж}$ при ламинарном режиме	155,0	166,2	115,0	143,6	169,0	243,3	89,3		
$Nu_{ж}$ при турбулентном режиме	237,4	173,0	233,2	330,9	173,8	162,1	127,8		

Была построена зависимость числа Нуссельта $Nu_{ж}$ от числа Рейнольдса $Re_{ж}$ в логарифмических координатах. При графическом отображении критериальной зависимости на графике отображается семейство линейных зависимостей.

При критерии $Re_{ж}$ коэффициент A определяется по анализу графика зависимостей (прямых линий) и является тангенсом угла наклона прямой линии к оси абсцисс [2].

Для ламинарного потока $A = 0,521$; для турбулентного потока $A = 0,863$. Дальнейший расчет (6) сводится к виду:

$$\lg \frac{Nu_{ж}}{Re_{ж}^A} = \lg C_1 + B \lg Pr_{ж} \quad (7)$$

При критерии $Pr_{ж}$ коэффициент B определяется по анализу графика зависимостей (прямых линий) и является тангенсом угла наклона прямой линии к оси абсцисс. Для ламинарного потока $B = 0,252$; для турбулентного потока $B = 0,258$.

Постоянную C_1 найдем из уравнения (2), приведя его к виду

$$C_1 = \frac{Nu_{ж}}{Re_{ж}^A Pr_{ж}^B} \quad (8)$$

Тогда для ламинарного потока $C_1 = 0,283$; для турбулентного потока $C_1 = 0,026$.

В конечном итоге, были найдены неизвестные коэффициенты, что позволило получить критериальные уравнения следующего вида:

- для ламинарного потока

$$Nu_{ж} = 0,283 Re_{ж}^{0,543} Pr_{ж}^{0,248} \quad (9)$$

- для турбулентного потока

$$Nu_{ж} = 0,026 Re_{ж}^{0,851} Pr_{ж}^{0,252} \quad (10)$$

Среднеквадратичная погрешность расчета составила 1,9% по формуле (9) и 0,9% по формуле (10)

Приведенный метод не подходит для определения функциональной зависимости $t_c/t_{н,ср}$, так как $t_c/t_{н,ср} = f(P_k)$ описывается уравнением не степенного вида. Для получения зависимости $t_c/t_{н,ср} = f(Re_{ж}, P_k)$ использовался метод получения эмпирических формул, предложенный В.М. Мордашевым [6].

Для нахождения средних геометрических значений $t_c/t_{н,ср}$ значения $t_c/t_{н,ср}$ сначала были прологарифмированы, а далее найдены средние значения логарифмов при одинаковых значениях $Re_{ж}$ и P_k . Полученные данные представлены на (Рис. 1, 2).

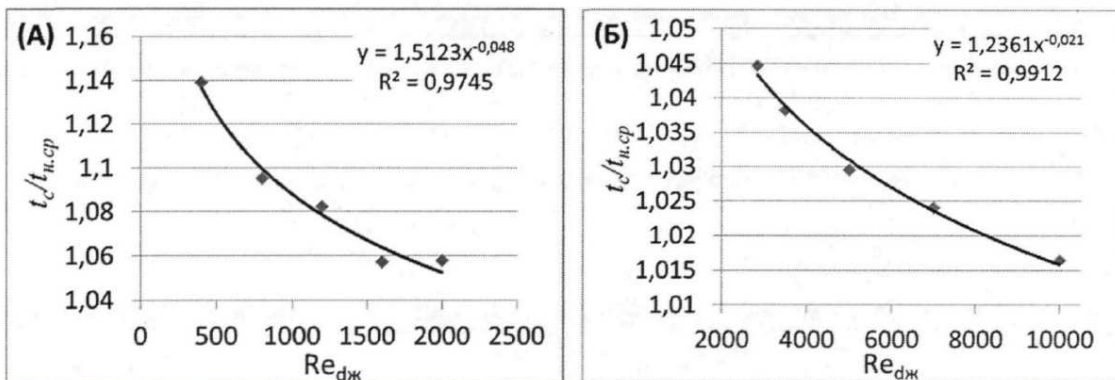


Рис. 1. Зависимость средних геометрических значений $t_c/t_{н,сп}$ от $Re_{дж}$ для: ламинарного режима (А), турбулентного режима (Б)

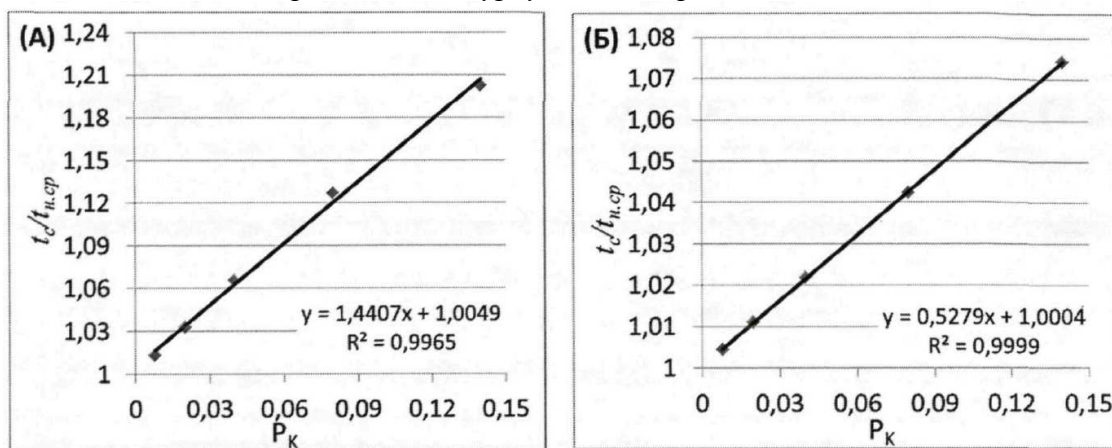


Рис. 2 Зависимости средних геометрических значений $t_c/t_{н,сп}$ от P_K для: ламинарного режима (А), турбулентного режима (Б)

Полученные зависимости были аппроксимированы степенными и линейными уравнениями:

- для ламинарного потока

$$\frac{t_c}{t_{н,сп}} = 1,5123 Re_{дж}^{-0,048} \quad (11)$$

$$\frac{t_c}{t_{н,сп}} = 1,4407 P_K + 1,0049 \quad (12)$$

- для турбулентного потока

$$\frac{t_c}{t_{н,сп}} = 1,2361 Re_{дж}^{-0,021} \quad (13)$$

$$\frac{t_c}{t_{н,сп}} = 0,5279 P_K + 1,0004 \quad (14)$$

После преобразований выявлены следующие зависимости для ламинарного и турбулентного потока:

- для ламинарного потока

$$\frac{t_c}{t_{н,сп}} = 1,4 Re_{дж}^{-0,048} \cdot \left(\frac{1,441 P_L}{10000 d_{дж}} + 1 \right) \quad (15)$$

- для турбулентного потока

$$\frac{t_c}{t_{н,сп}} = 1,2 Re_{дж}^{-0,021} \cdot \left(\frac{0,528 P_L}{10000 d_{дж}} + 1 \right) \quad (16)$$

Среднеквадратичная погрешность расчета, произведенная по формуле (15), составляет 2,5 % и по формуле (16) – составляет 0,9%. Исходя их перечисленного можно подвести, что были найдены все неизвестные коэффициенты в искомым уравнениях (2) и (3).

Необходимо уточнить, что в уравнениях (9) и (10) числа Прандтля (Pr) и Рейнольдса (Re) расчет производится при средних температурах нефти, которые вычисляются по длине участка трубопровода. А уравнения (15) и (16) справедливы при средних температурах стенки трубы и потока нефти в поперечном сечении определенной точки трубопровода [4].

Построенная модель трубопровода, оснащенная системой электроподогрева в программном комплексе ANSYS 14.0, может быть использована при дальнейших расчетах на предприятиях для установления зависимостей теплообмена потока жидкости с окружающей средой и стенкой.

Список литературы

1. Дульнев Г.Н. Теория тепло- и массообмена / Г.Н. Дульнев. – СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 195 с.
2. Земенков Ю.Д., Моисеев Б.В., Илюхин К.Н., Налобин Н.В.. Математическое моделирование взаимодействия наземных трубопроводов с окружающей средой//Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 201. – № 2. – С. 51-56.
3. Земенков Ю.Д., Моисеев Б.В., Дудин С.М., Налобин Н.В.. Определение оптимальной толщины изоляции наземных трубопроводов. Территория нефтегаз. – 2014. – № 3. – С. 79-83.
4. Земенкова М.Ю., Шиповалов А.Н., Дудин С.М., Земенков Ю.Д. Системный анализ в процессах контроля и управления нефтегазовых объектов//Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2007. – № 5. – С. 116-119.
5. 2. Теория и техника теплофизического эксперимента: Уч. пособие для вузов /Ю.Ф. Гортышов, Ф.Н. Дресвянников и др.; Под ред. В. К. Щукина. – М.:Энергоатомиздат, 1985. – 360 с.
6. 3. Протодяконов М.М. Методика рационального планирования экспериментов / М.М. Протодяконов, Р.И. Тедер. – М.: Наука, 1970. – 76 с.

Рецензенты:

Земенков Ю.Д., д.т.н., заведующий кафедрой «Транспорт углеводородных ресурсов» ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г. Тюмень;

Торопов С.Ю., д.т.н., профессор, ФГБОУ ВПО «Тюменский государственный нефтегазовый университет», г. Тюмень.