DOI: 10.24892/RIJIE/20190205

Определение расхода неньютоновской жидкости в круглой трубе с пристенным газовым слоем*

Ильина Л., Васильев П., Краснодубровский М.
Волгоградский государственный
технический университет
г. Волгоград, Российская Федерация
vgtupaph@gmail.com, nestorvv@mail.com, m.krasnodubrovskiy@gmail.com

Аннотация. **Рассмотрены существующие модели течения высоковязких жидкостей с пристенным маловязким слоем в круглой трубе, применяемые для разработки устройств для создания такого процесса транспортировки вязких и высоковязких жидкостей. На основании известной математической модели двухслойного кольцевого течения неньютоновской жидкости с маловязким пограничным слоем получены численные параметры процесса течения мазута с пристенным газовым слоем. Разработана экспериментальная установка с устройством для создания двухслойного кольцевого течения. Проведено экспериментальное исследование данного процесса. Получены экспериментальные значения расхода основной жидкости и газа для обеспечения устойчивого кольцевого течения. Получено регрессионное уравнение для определения расходов транспортируемого мазута и воздуха, для создания пристенного газового слоя. Методами математической статистики подтверждена адекватность регрессионного уравнения для определения расхода мазута в круглой трубе с пристенным газовым слоем.**

Ключевые слова: **высоковязкая жидкость, неньютоновская жидкость, пристенный слой, кольцевое течение, газ, мазут.**

Введение

Разработка способов снижения гидравлического сопротивления с целью сокращения энергозатрат при транспортировке высоковязких жидкостей является актуальной задачей для химической, нефтехимической и нефтедобывающей промышленности [1-3].

В настоящее время предложено множество способов и устройств для снижения гидравлического сопротивления при течении вязких и высоковязких жидкостей в трубопроводах [4-9].

Перекачка высоковязких жидкостей, например, тяжелых нефтей или продуктов нефтепереработки, по трубопроводам обычным способом затруднена. Поэтому для их транспортировки в настоящее время применяют специальные методы [1, 2]: перекачку с разбавителями, перекачку термообработанных нефтей, перекачку нефтей с присадками, перекачку предварительно подогретых нефтей и нефтепродуктов, гидротранспорт высоковязких нефтей.

Одним из перспективных способов является перекачка высоковязких жидкостей с пристенным маловязким газовым слоем, после которой дальнейшее разделение смеси «жидкость-газ» осуществляется отстаиванием, что не требует значительных затрат.

При разработке новых устройств для определения оптимальных расходов основной вязкой жидкости и газа, создающего маловязкий пристенный слой, применяются математические модели, которые в своей основе опираются на теоретическую гидродинамику [10].

В гидродинамике принято объединять капельные жидкости, газы и пары под одним термином – жидкости. Это объясняется тем, что законы движения жидкостей и газов (паров) практически одинаковы, если их скорости значительно ниже скорости звука [11].

В настоящее время представлен ряд математических моделей, описывающих течения вязких жидкостей, которые обладают различными реологическими характеристиками, в кольце маловязких, вязких и вязкопластических жидкостей, текущих по горизонтальным и вертикальным участкам трубопроводах [10, 12-17].

Таким образом можно сказать, что оценка адекватности математических моделей двухслойного кольцевого течения высоковязкой жидкости с пристенным газовым слоем является весьма актуальной задачей для дальнейшего применения полученных достоверных результатов расчетов при проектировании промышленных и транспортных трубопроводов, а также при подборе оборудования.

В работе проведены экспериментальные исследования течения мазута в трубопроводе круглого сечения с пристенным газовым слоем. Для оценки результатов экспериментальных исследований с точки зрения математической статистики был проведен корреляционный и регрессионный анализ и получена теоретическая зависимость для прогнозирования расхода мазута в зависимости от расхода газа.

Модель течения неньютоновской вязкой жидкости с пристенным газовым слоем

Для основной, неньютоновской, жидкости, реологические свойства которой описываются степенным уравнением Оствальда-де Виля [18]:

$$\tau = -K\left(\frac{dv}{dr}\right)^n \qquad (1)$$

была разработана математическая модель течения в трубе неньютоновской жидкости с маловязким пограничным слоем [19] (рис. 1).

Согласно ей, расход $Q_{ж}$ степенной жидкости в трубе определяется по уравнению:

* Статья публикуется по рекомендации программного комитета Международной научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг" (ICIE-2019), http://icie-rus.org

$$Q_{ж} = \frac{\pi}{4\mu}\frac{\Delta p}{l}\left(R^2 - R_1^2\right)R_1^2 + \\ + \frac{2\pi\left(\frac{1}{2K}\frac{\Delta p}{l}\right)^{\frac{1}{n}}}{\left(1+\frac{1}{n}\right)}\left(\frac{R_1^{3+\frac{1}{n}}}{2} - \frac{R_1^{3+\frac{1}{n}}}{3+\frac{1}{n}}\right), \quad (2)$$

Где μ – динамическая вязкость жидкости, создающей пристенный слой, Па·с; $\Delta p\ /l$ – градиент давления, Па/м; K – коэффициент консистентности; n – индекс течения жидкости.

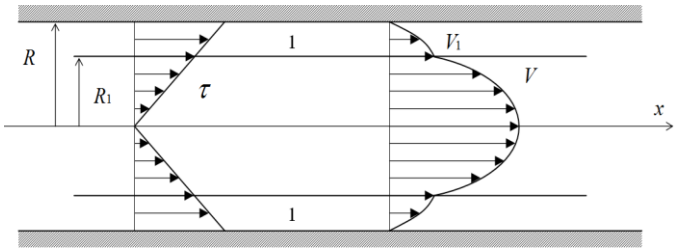

Рис. 1. Эпюры касательных напряжений τ и скоростей V_1, V при кольцевом двухслойном течении неньютоновской и вязкой жидкости в трубе [19]

Расход $Q_г$ пограничной вязкой жидкости (газа):

$$Q_г = \int_{R_1}^{R} 2\pi r v_1 dr = \frac{\pi}{8\mu}\frac{\Delta p}{l}\left(R^2 - R_1^2\right)^2 \quad (3)$$

Радиус границы слоев R_1 через расход вязкой жидкости в пограничном слое:

$$R_1 = \sqrt{R^2 - \left(\frac{8\mu Q_{ж}}{\pi\frac{\Delta p}{l}}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

Расход Q_0 неньютоновской степенной жидкости, заполняющей весь объем трубы ($R_1 = R$), определяется выражением:

$$Q_0 = \frac{2\pi}{\left(1+\frac{1}{n}\right)}\left(\frac{1}{2K}\frac{\Delta p}{l}\right)^{\frac{1}{n}}\left(\frac{R^{3+\frac{1}{n}}}{2} - \frac{R^{3+\frac{1}{n}}}{3+\frac{1}{n}}\right) \quad (5)$$

Для данной математической модели был предложен алгоритм расчета [10, 19], реализованный на ЭВМ для определения количественных параметров двухслойного кольцевого течения неньютоновской жидкости.

Экспериментальные исследования течения неньютоновской жидкости с пристенным газовым слоем

Экспериментальные исследования проводились для проверки адекватности теоретических результатов расчета технологических параметров кольцевого двухслойного течения жидкости, полученных с помощью разработанной математической модели [10, 19].

Экспериментальная установка (рис. 2) включает расходную мерную емкость для исследуемой жидкости 1, соединенную через кран 2 с тонкостенной стальной трубкой 3 длиной 300 мм и внутренним диаметром 8 мм, приемную емкость 4, газодувку 5 центробежного типа с приводом от электродвигателя переменного тока мощностью 140 Вт, соединенную резиновой трубкой 6 с ротаметром 7, снабженным вентилем 8 для регулировки расхода газа и соединенным резиновой трубкой 9 с устройством создания пристенного кольцевого газового слоя.

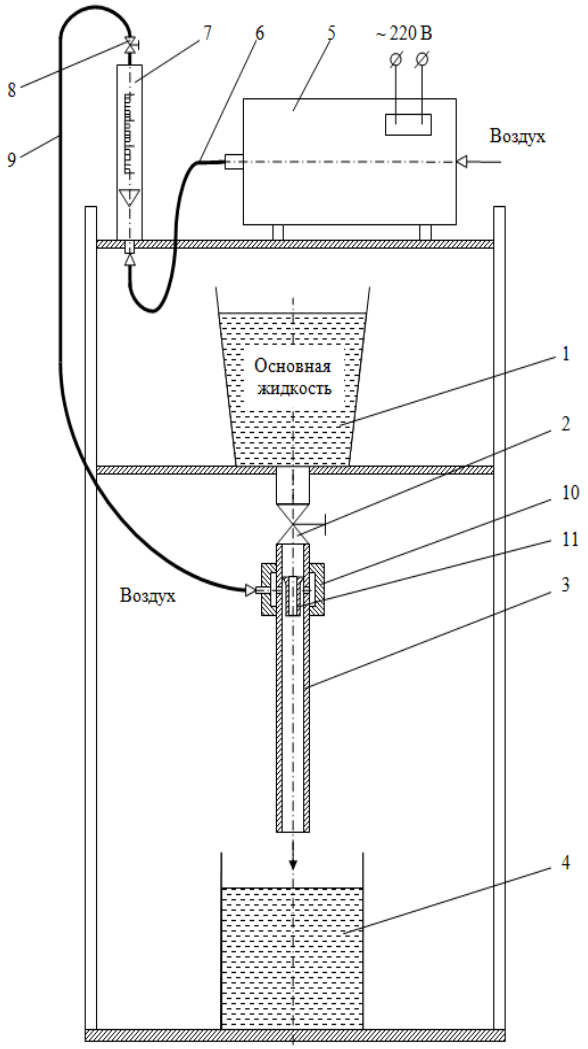

Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Устройство создания пристенного кольцевого газового слоя содержит смонтированный на стальной трубке 3 корпус 10, в котором выполнена полость, соединенная с одной стороны с системой подачи газа через резиновую трубку 9, а с другой стороны, через радиальные отверстия диаметром 1,5 мм (8 шт) в стенке стальной трубки, с кольцевой щелью шириной 0,5 мм в поперечном сечении, образованной гильзой 11 с внутренней поверхностью трубки 3. Внутри гильзы 11 выполнен канал диаметром 6 мм и длиной 20 мм для прохода исследуемой жидкости.

В качестве объекта исследования был выбран мазут флотский, основные физические свойства которого представлены в табл. 1.

Для создания пристенного кольцевого газового слоя использовался воздух.

Таблица 1

Характеристики мазута [20]

Наименование показателей	Значение
Вязкость кинематическая, мм^2/с при температуре 80 ^{o}C	20,5
Вязкость динамическая, Па·с при температуре 28^{0}C	1,376
Массовая доля механических примесей, %	0,018
Массовая доля воды, %	0,3
Температура вспышки, определяемая в открытом тигле, ^{o}C	172
Плотность при температуре 28 ^{o}C, кг/м^3	932

Методика проведения экспериментальных исследований

При проведении экспериментов исследовалось влияние расходов газа, образующего пристенный кольцевой газовый слой, на расход основной жидкости при течении в трубе [21].

В качестве модельной жидкостей был взят мазут флотский, а для создания пристенного кольцевого газового слоя использовался воздух.

Кинематическая вязкость ν и плотность ρ используемых в экспериментальных исследованиях физических сред определялись соответственно с помощью капиллярного вискозиметра ВПЖ-1 и ареометра АНТ-1 при температуре окружающей среды +28 ^{o}C. Вязкость и плотность воздуха, используемого для создания пристенного слоя, определялись из справочных таблиц [20].

Расходы основной жидкости $Q_ж$ определялись методом отсечки по времени истечения, измеряемым секундомером, а расход газа $Q_г$ – ротаметром РМА-1.

Эксперименты по исследованию влияния расхода газа (воздух) $Q_г$, используемого в качестве пограничного слоя, на расход основной жидкости (мазут) $Q_ж$ проводились в следующей последовательности:

- основная жидкость заливалась в расходную мерную емкость 1;
- включалась воздуходувка 5, по ротаметру 7 с помощью вентиля 8 устанавливался заданный объемный расход воздуха, который по резиновым трубкам 6, 9 через ротаметр 7 и вентиль 8 подавался в устройство создания пристенного кольцевого газового слоя;
- воздух поступал в полость корпуса 10 устройства создания пристенного кольцевого газового слоя и через радиальные отверстия в стенке стальной трубки 3 – в кольцевую щель между гильзой 11 и внутренней поверхностью трубки, образуя пристенный кольцевой газовый слой определенной толщины, в зависимости от расхода воздуха;
- включался секундомер, одновременно открывался кран 2 и основная жидкость из расходной мерной емкости 1 поступала через канал в гильзе 11 внутрь стальной трубки 3, где происходило течение жидкости с пристенным кольцевым газовым слоем под действием гравитационных сил;
- слив основной жидкости осуществлялся в приемную емкость 4;
- через определенное время секундомер останавливался, одновременно перекрывался кран 2, выключалась воздуходувка 5 и подача жидкости и воздуха прекращались;
- измерялся израсходованный объем основной жидкости за время эксперимента и определялся его объемный расход $Q_ж$;
- по ротаметру 7 с помощью вентиля 8 изменялся объемный расход газа (воздуха) и эксперимент повторялся.

Анализ результатов экспериментальных исследований

Результаты экспериментальных исследований влияния объемных расходов газа (воздух) $Q_г$, используемого в качестве пограничного слоя, на объемный расход основной жидкости (мазут) $Q_ж$ представлены в графической форме на рис. 3.

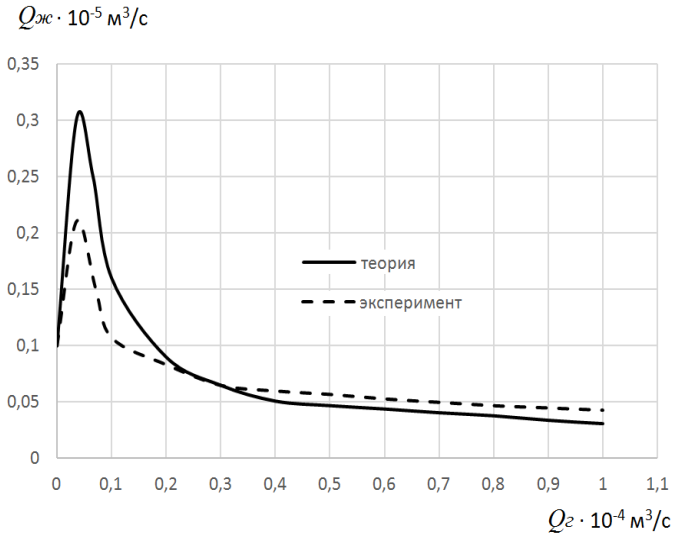

Рис. 3. Сравнение теоретической и экспериментальной зависимостей расхода основной жидкости от расхода газа

Установлено, что создание пристенных кольцевых газового (воздух) слоев при течении основной жидкости (мазут) в трубе способствует уменьшению гидравлического сопротивления трубы и увеличению расхода основной жидкости, причем зависимость расхода основной жидкости $Q_ж$ от расходов газа (воздуха) $Q_г$ носит экстремальный характер.

С увеличением расходов газа (воздуха) $Q_г$, образующего пристенный кольцевой газовый слой, расход основной жидкости (мазута) $Q_ж$ увеличивается до определенного предела, после которого при значительных расходах воздуха происходит его уменьшение, вследствие перемешивания и вытеснения основной жидкости возросшими потоками газа и создания тем самым сопротивления движению основной жидкости.

Экспериментальная проверка показала, что расхождение между расчетными значениями, полученными при помощи алгоритма расчета [10, 19], реализованного на ЭВМ для определения количественных параметров двухслойного кольцевого течения неньютоновской жидкости и экспериментальными значениями расходов основной жидкости в зависимости от расхода газа не превышает 26%.

Математическая обработка экспериментальных данных

Математическая обработка экспериментальных данных проводилась с целью получения достоверных значе-

ний расхода газа для создания устойчивого пристенного слоя при транспортировке мазута флотского по шероховатому стальному трубопроводу при заданной температуре.

Уравнение для прогнозирования расхода основной высоковязкой жидкости (мазута) в кольце маловязкой жидкости (газа) определялось в виде зависимости $Q_ж=f(Q_г)$, полученной с помощью метода наименьших квадратов:

$$Q_ж = Q_г/(0{,}1 - 1{,}8 \cdot Q_г + 121 \cdot Q_г^2 - 344 \cdot Q_г^3 + 522 \cdot Q_г^4 - 381 \cdot Q_г^5 + 107 \cdot Q_г^6) \quad (6)$$

В математической обработке участвовало 35 точек, полученных более чем в 100 независимых опытах (рис. 4). Закон распределения случайной величины не противоречил нормальному закону.

В табл. 2 представлены основные результаты корреляционного и регрессионного анализа: величины средней относительной ошибки $\delta_{ср}$ полученного уравнения, максимальное $\delta_{макс}$ и минимальное $\delta_{мин}$ отклонения экспериментальных данных от теоретических значений рассчитанных по уравнению (6), а также расчетные и табличные значения критериев Кохрена, Фишера и Стьюдента [22-25]. Для критерия Стьюдента выбрано меньшее из семи полученных для каждого из коэффициентов уравнений регрессии. Уровень значимости при расчете критериев был выбран 0,05. В табл. 2 также представлен коэффициент простой линейной корреляции $r_{ух.}$

Таблица 2

Основные значения статистических параметров

Критерий Кохрена		Критерий Фишера		Критерий Стьюдента	
расчет.	*табл.*	*расчет.*	*табл.*	*расчет.*	*табл.*
1,1711	1,1753	1,3873	1,6372	≥553	1,9944

$r_{ух}$	$\delta_{ср}$	$\delta_{макс}$	$\delta_{мин}$
0,9927	2,57	-11,96	11,50

Сравнение расчетных и табличных значений статистических критериев позволяет сделать вывод о том, что полученное уравнение регрессии адекватно и все его коэффициенты значимы.

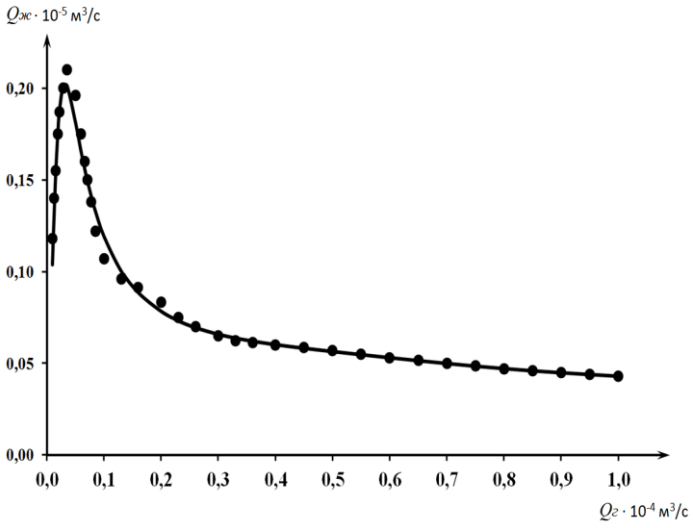

Рис. 4. Сравнение экспериментальных данных с расчетными по уравнению (6)

Выводы

В технологических процессах, связанных с транспортировкой трубопроводным транспортом мазутов принято говорить о транспортировке подогретого мазута, так как вязкость мазута в значительной степени зависит от температуры. При 30^0 - 40^0C он проявляет характеристики линейно- и нелинейно-вязкопластичной жидкости, по мере понижения температуры которая проявляет все более ярко выраженные тиксотропные свойства.

Экспериментальные данные, полученные при исследовании процесса течения в круглой шероховатой стальной трубе мазута с пристенным газовым слоем, подтверждают физическую возможность его транспортировки при температуре +28 ºС.

Сравнение расчетных значений разработанной математической модели течения неньютоновской жидкости в кольце маловязкой жидкости показала отклонение теоретических расчетных значений от экспериментальных на 26%.

Математическая обработка по уравнению (6), выполненная для полученного массива экспериментальных данных, показала хороший уровень корреляции для конкретного случая течения мазута флотского в стальном шероховатом трубопроводе с пристенным газовым слоем при заданной температуре.

Полученное регрессионное уравнение (6) может быть рекомендовано для определения расхода газа в пристенном слое в случае использования устойчивого кольцевого течения мазута в шероховатой круглой стальной трубе при проектировании производственных трубопроводов и сетей.

Литература

1. Мастобаев Б.Н. Химические средства и технологии в трубопроводном транспорте нефти / Б.Н. Мастобаев, А.М. Шаммазов, Э.М. Мовсумзаде. – М.: Химия, 2002. – 296 с.

2. Черникин В.И. Гидротранспорт нефтепродуктов по трубам // Труды МНИ им. И.М. Губкина. – 1949. – вып. 9 .

3. Снижение гидравлического сопротивления при двухслойном кольцевом течении высоковязкой жидкости в трубопроводе / Л.А. Ильина, А.Б. Голованчиков, А.В. Ильин, Е.В. Васильева // Известия ВолгГТУ. Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»: межвуз. сб. науч. ст. – Волгоград: ВолгГТУ, 2014. – № 1(128). – С. 114-117.

4. Транспортировка нефти и нефтепродуктов с газовым пограничным слоем / А.Б. Голованчиков, Л.А. Ильина, А.В. Ильин и др. // Технологии нефти и газа. – 2006. – №4. – С. 10-14.

5. Голованчиков А.Б., Дулькина Н.А., Васильева Е.В. и др. Устройство для уменьшения гидравлических потерь в трубопроводе // П. м. 120165 РФ , МПК F 15 D 1/06. – ВолгГТУ. – 2012.

6. Голованчиков А.Б., Конопальцева Е.Н., Ильин А.В. Устройство для уменьшения гидравлических потерь в трубопроводе // П. м. 84924 РФ , МПК F 15 D 1/06, F 17 D 1/20. – ВолгГТУ. – 2009.

7. Голованчиков А.Б., Ильина Л.А., Ильин А.В. и др. Способ транспорта жидкостей по трубопроводу // Патент РФ 2307975, МПК F 17 D 1/16. – ВолгГТУ. – 2007.

8. Голованчиков А.Б., Ильин А.В., Ильина Л.А. и др. Транспортный обогреваемый трубопровод // Патент РФ 2250870, МПК 7 B 65 G 53/52. – ВолгГТУ. – 2005.

9. Голованчиков А.Б., Ильин А.В., Ильина Л.А. и др. Способ перемещения вязких нефтей и нефтепродуктов // Патент РФ 2262035, МПК 7 F 17 D 1/14, F 15 D 1/02. – ВолгГТУ. – 2005.

10. Голованчиков А.Б. Теоретические основы течения жидкостей в трубопроводе с маловязким пограничным слоем / А.Б. Голованчиков, А.В. Ильин, Л.А. Ильина. – Волгоград: Волгоград. гос. техн. ун-т, 2007. – 108 с.

11. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1971. – 784 с.

12. Голованчиков А.Б. Граничная устойчивость гетерофазных жидкостей на макро- и микроуровнях: монография / А.Б. Голованчиков, Е.В. Васильева, Л.А. Ильина. – Волгоград: ВолгГТУ, 2017. – 131 с.

13. High viscous oil–water two–phase flow: experiments & numerical simulations / A. Archibong-Eso, J. Shi, Y.D. Baba et al. // Heat and Mass Transfer Journal. – 2019. DOI: 10.1007/s00231-018-2461-9

14. Isothermal and non-isothermal water and oil two-phase flow (core-flow) in curved pipes / T. H. F. Andrade, K.C.O. Crivelaro, S.R.F. Neto, A.G.B. Lima // International Journal of Multiphysics. – 2013. – Vol. 7, №2. DOI: 10.1260/1750-9548.7.3.167

15. Cazarez-Candia O. Modeling of heavy oil-water core-annular upward flow in vertical pipes using the two-fluid model / O. Cazarez-Candia, S. Piedra-González // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – Vol. 150. – 146 p. DOI: 10.1016/j.petrol.2016.12.004

16. Gupta R. Oil-Water Core-Annular Flow in Vertical Pipes: A CFD Study / R. Gupta, C.K. Turangan, R. Manica // The Canadian Journal of Chemical Engineering. – 2016. – Vol. 94. DOI: 10.1002/cjce.22451

17. Thermo-Hydrodynamics of Core-Annular Flow of Water, Heavy Oil and Air Using CFX / A.J.F. Gadelha, S.R. de Farias Neto, R. Swarnakar, A.G.B. de Lima // Advances in Chemical Engineering and Science. – 2013. – Vol. 3. – 37 p. DOI: 10.4236/aces.2013.34a1006

18. Тябин Н.В. Реологическая кибернетика. – Волгоград: Волгоградская правда, 1980. – 122 с.

19. Голованчиков А.Б. Течение в трубе неньютоновской жидкости с маловязким пограничным слоем / А.Б. Голованчиков, А.В. Ильин, Л.А. Ильина // Изв. ВолгГТУ. Сер. Концептуальное проектирование в образовании, технике и технологии: Межвуз. сб. науч. статей. – Волгоград: ВолгГТУ, 2004. – Вып.1, №5. – С. 19-21.

20. Павлов К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков. – 13-е изд., стереотип. – М.: Альянс, 2006. – 575 с.

21. Бондарь А.Г. Планирование эксперимента в химической технологии / А.Г. Бондарь, Г.А. Статюха. – Киев.: «Вища школа», 1976. – 184 с.

22. Новицкий П.В. Оценка погрешностей результатов измерений. / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1991. – С. 169-181.

23. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. Москва: Главная редакция физико-математической литературы, 1971. – 576 с.

24. Большев Л.Н. Таблицы математической статистики / Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов. – Москва: Наука, 1983. – С. 48-49.

25. Фёрстер Э. Методы корреляционного и регрессионного анализа. / Э. Фёрстер, Б. Рёнц. – Москва: Финансы и статистика, 1983. – 303 с.

DOI: 10.24892/RIJIE/20190205

Finding Flow of non-Newtonian Fluids in Circular Pipe with Wall-Adjacent Gas Layer

Ilina L., Vasilyev P., Krasnodubrovsky M.
Volgograd State Technical University
Volgograd, Russian Federation
vgtupaph@gmail.com, nestorvv@mail.com, m.krasnodubrovskiy@gmail.com

Abstract. **Existing models of the flow of highly viscous liquids with a near-viscous near-wall layer in a circular pipe, used to develop devices for creating such a process of transporting viscous and highly viscous liquids, are considered. Based on the well-known mathematical model of a two-layer ring flow of a non-Newtonian fluid with a low-viscosity boundary layer, the numerical parameters of the process of the flow of fuel oil with a near-gas layer are obtained. An experimental setup with a device for creating a two-layer ring flow has been developed. An experimental study of this process. The experimental values of the flow rate of the main fluid and gas to ensure a stable ring flow are obtained. A regression equation is obtained to determine the cost of transported fuel oil and air, to create a near-wall gas layer. Methods of mathematical statistics confirmed the adequacy of the regression equation for determining the consumption of fuel oil in a round pipe with a wall gas layer.**

Keywords: **highly viscous fluid, non-Newtonian fluid, surface layer, annular flow, gas, fuel oil.**

REFERENCES

1. Mastobayev B.N., Shammazov A.M., Movsumzade E.M. *Khimicheskiye sredstva i tekhnologii v truboprovodnom transporte nefti* [Chemical Agents and Technologies for Oil Transport by Pipelines], Moscow, Khimiya, 2002, 296 p. (in Russ.)

2. Chernikin V.I. Hydraulic Transport of Petroleum Products by Pipelines [Gidrotransport nefteproduktov po trubam], *Trudy MNI im. I.M. Gubkina [Proceedings of Gubkin]*, Moscow Petroleum Institute, 1949, iss. 9. (in Russ.)

3. Ilina L.A., Golovanchikov A.B., Ilin A.V., Vasilyeva Ye.V. Hydraulic-Resistance Reduction by Two-Layer Annular

Flow of High-Viscosity Fluids in Pipelines [Snizheniye gidravlicheskogo soprotivleniya pri dvukhsloynom koltsevom techenii vysokovyazkoy zhidkosti v truboprovode], *Izvestiya VolgGTU. Seriya "Reologiya, protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii": mezhvuz. sb. nauch. st. [Izvestia VSTU. Series: Rheology, Processes, and Devices in Chemistry: Inter-University Proceedings]*, Volgograd, VolgGTU, 2014, no. 1 (128), pp. 114-117. (in Russ.)

4. GolovanchikovA.B., Ilina L.A., Ilin A.V., Dulkina N.A., Dulkin A.B. Boundary Gas Layer in Oil and Petroleum-Product Transport [Transportirovka nefti i nefteproduktov s gazovym pogranichnym sloyem], Tekhnologii nefti i gaza [Oil and gas technology], 2006, no.4, pp.10-14. (in Russ.)

5. Golovanchikov A.B., Dulkina N.A., Vasilyeva Ye.V. et al. *Ustroystvo dlya umensheniya gidravlicheskikh poter v truboprovode* [Device to Reduce Hydraulic Losses in Pipelines], Patent 120165 Russia, IPC F 15 D 1/06, VSTU, 2012. (in Russ.)

6. Golovanchikov A.B., Konopaltseva Ye.N., Ilin A.V. et al. *Ustroystvo dlya umensheniya gidravlicheskikh poter v truboprovode* [Device to Reduce Hydraulic Losses in Pipelines], Patent 84924 Russia, IPC F 15 D 1/06, F 17 D 1/20, VSTU, 2009. (in Russ.)

7. GolovanchikovA.B., Ilina L.A., Ilin A.V. et al. *Sposob transporta zhidkostey po truboprovodu* [Method for Pipeline Transport of Fluids], Patent 2307975 Russia, IPC F 17 D 1/16, VSTU, 2007. (in Russ.)

8. GolovanchikovA.B., Ilina L.A., Ilin A.V. et al. *Transportny obogrevayemy truboprovod* [Heated Transport Pipeline], Patent 2250870 Russia, IPC 7 B 65 G 53/52, VSTU, 2005. (in Russ.)

9. GolovanchikovA.B., Ilina L.A., Ilin A.V. et al. *Sposob peremeshcheniya vyazkikh neftey i nefteproduktov* [Method for Transporting Viscous Oils and Petroleum Products], Patent 2262035 Russia , IPC 7 F 17 D 1/14, F 15 D 1/02, VSTU, 2005. (in Russ.)

10. GolovanchikovA.B., Ilina L.A., Ilin A.V. *Teoreticheskiye osnovy techeniya zhidkostey v truboprovode s malovyazkim pogranichnym sloyem* [Theory Behind Fluid Flow in Pipelines with Low-Viscosity Boundary Layers], VSTU, Volgograd, 2007, 108 p. (in Russ.)

11. Kasatkin A.G. *Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Basic Processes and Devices in Chemical Technology], Khimiya, Moscow, 1971, 784 p. (in Russ.)

12. Golovanchikov A.B., Vasilyeva Ye.V., Ilina L.A. *Granichnaya ustoychivost geterofaznykh zhidkostey na makro- i mikrourovnyakh* [Marginal Stability of Heterophase Lluids at Macro- and Micro-Levels], VSTU, Volgograd, 2017, 131 p. (in Russ.)

13. Archibong-Eso A., Shi J., Baba Y.D., Aliyu A.M., Raji Y.O., Yeung H. High viscous oil–water two–phase flow: experiments & numerical simulations, *Heat and Mass Transfer Journal*, 2019, Volume 55, Issue 3, pp. 755-767. DOI: 10.1007/s00231-018-2461-9

14. Andrade T.H.F., Crivelaro K.C.O., Neto S.R.F., Lima A.G.B. Isothermal and non-isothermal water and oil two-phase flow (core-flow) in curved pipes, *International Journal of Multiphysics*, 2013, vol. 7, no.2. DOI: 10.1260/1750-9548.7.3.167

15. Cazarez-Candia O., Piedra-González S. Modeling of heavy oil-water core-annular upward flow in vertical pipes using the two-fluid model, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 150, 146 p. DOI: 10.1016/j.petrol.2016.12.004

16. Gupta R., Turangan C.K., Manica R. Oil-Water Core-Annular Flow in Vertical Pipes: A CFD Study, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2016, vol. 94. DOI: 10.1002/cjce.22451

17. Gadelha A.J.F. et al. Thermo-Hydrodynamics of Core-Annular Flow of Water, *Heavy Oil and Air Using CFX. Advances in Chemical Engineering and Science*, 2013, vol. 3, 37 p. DOI: 10.4236/aces.2013.34a1006

18. Tyabin N.V. *Rheological Cybernetics* [Reologicheskaya kibernetikia], Volgograd, Volgogradskaya Pravda, 1980, 122 p. (in Russ.)

19. GolovanchikovA.B., Ilina L.A., Ilin A.V. Non-Newtonian Fluid: Pipe Flow with a Low-Viscosity Boundary Layer [Techeniye v trube nenyutonovskoy zhidkosti s malovyazkim pogranichnym sloyem], *Izv. VolgGTU. Ser. Kontseptual'noe proektirovanie v obrazovanii, tekhnike i tekhnologii: Mezhvuz. sb. nauch. statey [Izvestia VSTU. Series: Conceptual Design in Education, Engineering, and Technology: Inter-University Proceedings]*, 2004, no.5, pp. 19-21. (in Russ.)

20. Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A. *Primery i zadachi po kursu protsessov i apparatov khimicheskoy tekhnologii* [Examples and Problems for the Course in Chemical Processes and Devices], Moscow, AlianS, 2006, 575 p. (in Russ.)

21. Bondar A.G., Statyukha G.A. *Planirovaniye eksperimenta v khimicheskoy tekhnologii* [Experiment Planning in Chemistry], Kiev, Vishcha shkola, 1976, 184 p. (in Russ.)

22. Novitsky P.V., Zograf I.A. *Otsenka pogreshnostey rezultatov izmereny* [Measurement Error Evaluation], Leningrad, Energoatomizdat, 1991, pp. 169-181. (in Russ.)

23. Mitropolsky A.K. Tekhnika statisticheskikh vychisleny [Statistical Computing Technique], Moscow, Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1971, 576 p. (in Russ.)

24. Bolshev L.N., Smirnov N.V. Tablitsy matematicheskoy statistiki [Reference Tables for Mathematical Statistics], Moscow, Nauka, 1983, pp. 48-49. (in Russ.)

25. Förster E., Rönz B. *Metody korrelyatsionnogo i regressionnogo analiza* [Regressions- und Korrelationsanalyse], Moscow, Finansy i statistika, 1983, 303 p. (in Russ.)

Библиографическое описание статьи

Ильина Л. Определение расхода неньютоновской жидкости в круглой трубе с пристенным газовым слоем / Л. Ильина, П. Васильев, М. Краснодубровский // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2019. – Т.7, №2. – С. 29-34. DOI: 10.24892/RIJIE/20190205

Reference to article

Ilina L., Vasilyev P., Krasnodubrovsky M. Finding flow of non-Newtonian fluids in circular pipe with wall-adjacent gas layer, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2019, vol.7, no.2, pp. 29-34. DOI: 10.24892/RIJIE/20190205