УДК 532.5:665.6

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ЧАСТИЦ НА СКОРОСТЬ ГРАВИТАЦИОННОГО ОСАЖДЕНИЯ ТВЕРДЫХ ПРИМЕСЕЙ В НЕФТИ

INFLUENCE OF PARTICLE SHAPE ON THE RATE OF SOLID IMPURITIES GRAVITATIONAL PRECIPITATION IN THE OIL

Наумов Владимир Аркадьевич
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой водных ресурсов
и водопользования,
Калининградский государственный
технический университет
van-old@rambler.ru

Аннотация. Статья посвящена исследованию скорости осаждения твердых частиц в нефти. Показано, что при расчете скорости установившегося гравитационного осаждения в нефти частиц любого размера необходимо учитывать их форму. В противном случае погрешность расчета может достигать 35 %. Осаждение твердых частиц в нефти незначительной вязкости или маловязкой может происходить в переходной области гидродинамического сопротивления; в более вязкой нефти – в линейной области сопротивления.

Ключевые слова: нефть, твердые примеси, гравитационное осаждение, коэффициент формы частиц, установившаяся скорость.

Naumov Vladimir Arkadyevich
Doctor of technical science, Professor,
Head of the department of water resources
and water use,
Kaliningrad state technical university
van-old@rambler.ru

Annotation. The article is devoted to study the rate of sedimentation of solid particles in the oil. It is shown that the calculation of the rate of steady state gravitational settling in the oil particles of any size need to consider their shape. Otherwise, the calculation error may reach 35 %. Deposition of solid particles in oil a slight viscosity or low-viscosity may occur in the transition region of hydrodynamic drag; the more viscous the oil is in the linear drag region.

Keywords: oil, solid impurities, gravitational deposition, shape factor of particles, steady-state speed.

Транспортируемая по нефтепроводам жидкость представляет собой сложную смесь самой нефти, растворенного и свободного газа, пластовой воды, твердых дисперсных частиц [1]. Содержание минеральных примесей сказывается на стоимости товарной нефти и измеряется методами, определенными нормативными документами [2–3]. Кроме того, твердые примеси могут повлиять на режим течения нефти в трубопроводе. Вот почему процесс диффузии и осаждения дисперсных частиц в нефтепроводах и нефтехранилищах является объектом изучения многих исследователей (см. [4–7] и библиографию в них).

Так, в [6–7] рассмотрены проблемы осаждения частиц на внутренней поверхности трубопроводов при течении вязких нефтей. Предложены уравнения для расчета скорости диффузионного осаждения и толщины отложений на поверхности. Правильно указывается, что в горизонтальных трубах существенно влияние гравитационного осаждения (рис. 1). Однако количественные оценки данного процесса [6] нельзя признать удовлетворительными: используются эмпирические формулы, справедливые в узком диапазоне параметров, при расчете плотность частиц вольфрама занижена более чем в 10 раз. Ни в одной из указанных работ [4–7] не учтено отличие формы дисперсных частиц от сферической, тогда как этот фактор может заметно влиять на динамику твердых примесей в вязкой среде [8].

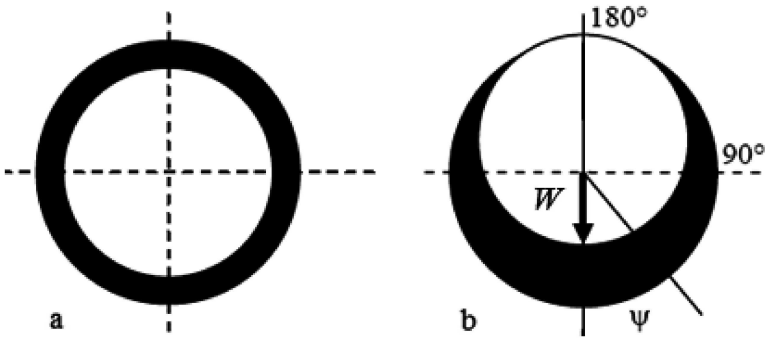

Рисунок 1 – Картина осаждения частиц [6]:
a – в вертикальном трубопроводе; b – в горизонтальном трубопроводе

Данная статья посвящена исследованию скорости осаждения твердых частиц в нефти. Указанная скорость непосредственно влияет на эффективность отстаивания, а так же должна учитываться при транспортировке нефти по трубопроводу.

Величина силы гидродинамического сопротивления, действующей в вязкой среде на сферическую частицу, вычисляется по известной формуле:

$$\vec{F}_\mu = 0{,}5 \cdot C_R \cdot S_M \cdot \rho_f \cdot \vec{W}\left|\vec{W}\right|, \quad \vec{W} \equiv \vec{V}_f - \vec{V}_p \,, \tag{1}$$

где W – скорость частицы относительно жидкости, м/с; S_M – площадь наибольшего сечения частицы, перпендикулярного вектору скорости, м^2 (для сферической частицы S_M = 0,25πd^2); d – диаметр сферы; ρ_f – плотность жидкости; C_R – коэффициент гидродинамического сопротивления.

В простейшем случае равномерного обтекания единичной, гладкой, сферической частицы неограниченным ламинарным потоком несжимаемой влияет изотермической жидкости коэффициент сопротивления C_R^o является однозначной функцией числа Рейнольдса $Re = Wd/\nu$, где ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м^2/с. Функция C_R^o (Re) для этих условий называют стандартной кривой сопротивления. Известно [8, 9], что стандартную кривую сопротивления сферической частицы хорошо описывают зависимости

$$C_R^o = \begin{cases} \dfrac{24}{\mathrm{Re}} \cdot \left(1 + 0{,}15 \cdot \mathrm{Re}^{0{,}687}\right) \text{ при } \mathrm{Re} < 1000 \\ 0{,}44 \quad \text{при } 1000 \le \mathrm{Re} < 2 \cdot 10^5 \end{cases}. \tag{2}$$

При малых числах Рейнольдса (линейная область сопротивления) для сферических частиц справедлива формула Стокса:

$$C_R^o = 24 / Re \,, \; F_\mu = 3\pi \cdot \rho_f \cdot \nu \cdot d \cdot W \,. \tag{3}$$

На практике условия обтекания частиц могут существенно отличаться от условий, в которых применима стандартная кривая сопротивления. В нефти «реальные дисперсные частицы практически далеки от идеальной сферической формы» [10, С. 283]. Некоторые авторы не принимают это во внимание, пользуются формулами (2)–(3) для несферических частиц, что может привести к серьезным ошибкам расчета.

Многочисленные опыты (см. [11–14] и библиографию в них) показали, что для твердых частиц неправильной формы сопротивление выше по сравнению сшарообразными частицами равного объема. Конечно, гидродинамическое сопротивление отдельной несферической частицы может быть и меньше, чем у шарообразной частицы. Например, если вытянутая частица движется поступательно по направлению своей длинной оси. Однако нас интересуют массовые явления, при которых положение частицы неправильной формы по отношению к направлению поступательного движения является случайным.

Для учета формы частиц используется геометрический коэффициент формы (коэффициент несферичности)

$$\xi = S/S_0, \; S_0 = (36\pi V^2)^{1/3},$$

где S, V – площадь поверхности и объем произвольной частицы; S_0 – площадь поверхности сферической частицы равного объема. В англоязычных изданиях, как правило, используют коэффициент сферичности ϕ = 1/ξ.

Влияние несферичности на величину коэффициента гидродинамического сопротивления [11–14] учитывалось динамическим коэффициентом формы Γ:

$$C_R = \Gamma \cdot C_R^o \,. \tag{4}$$

Установлено [8–9, 11–14], что в общем случае динамический коэффициент формы зависит от геометрического коэффициента формы частицы и числа Рейнольдса. Причем в линейной и квадратичной области сопротивления зависимостью от Re можно пренебречь, рассчитывать динамический коэффициент по формулам:

$$\Gamma_1(\xi) = 1 + 0{,}348 \cdot (\xi - 1) \,, \Gamma_2(\xi) = 10{,}0 - 9{,}0 / \xi \,. \tag{5}$$

Предложенные нами формулы (6), (7) для переходной области сопротивления нужно рассматривать как первое приближение, требующее дальнейшего теоретического и экспериментального исследования

$$\Gamma(\xi,\mathrm{Re}) = \begin{cases} \Gamma_1(\xi), & \text{при} \mathrm{Re} < 0{,}2; \\ \Gamma_3(\xi,\mathrm{Re}), & \text{при} 0{,}2 \le \mathrm{Re} \le 1000; \\ \Gamma_2(\xi), & \text{при} \mathrm{Re} > 1000. \end{cases} \quad (6)$$

$$\Gamma_3(\xi,\mathrm{Re}) = \Gamma_1(\xi) + (\Gamma_1(\xi) - \Gamma_1(\xi)) \cdot \left(\frac{\mathrm{Re} - 0{,}2}{999{,}8} \right)^{0{,}44}. \quad (7)$$

Установившаяся скорость осаждения дисперсной частицы может быть найдена из нелинейного уравнения, в общем случае не имеющего аналитического решения,

$$W = \sqrt{\frac{4g \cdot (1-\lambda)}{3\delta \cdot \lambda \cdot C_R \cdot (Wd/\nu, \xi)}}. \quad (8)$$

В линейной области сопротивления (Re < 1) для сферической частицы (ξ = 1) из (8) следует известная формула Стокса

$$W_1 = \frac{g \cdot (1-\lambda) \cdot d^2}{18\nu \cdot \lambda}. \quad (9)$$

В переходной области сопротивления для несферических частиц величина *W* находится с помощью численного решения уравнения (8).

Определим диапазон расчетных параметров. Вязкость нефти существенно зависит от месторождения, к тому же меняется с температурой. Изменчивость плотности нефти не столь значительна, но также должна учитываться. В данной статье будем пользоваться классификацией и абсолютными величинами, приведенными в Методических рекомендациях [15] (табл. 1, табл. 2).

Таблица 1 – Классификация нефтей по плотности [15]

Плотность нефти при 20 ºС и 0,1 МПа, г/см^3	Типы нефти
до 0,830	особо легкая
0,831–0,850	легкая
0,851–0,870	средняя
0,871–0,895	тяжелая
более 0,895	битуминозная

Таблица 2 – Классификация нефтей по вязкости [15]

Вязкость нефти в пластовых условиях, мПа · с*	Типы нефти
до 5,0	незначительной вязкости
от 5,1 до 10,0	маловязкая
от 10,1 до 30,0	повышенной вязкости
от 30,1 до 200,0	высоковязкая
более 200,0	сверхвязкая

* В [15] ошибочно указана единица измерения МПа · с.

Что касается содержания минеральных загрязнений в нефти, то они также сильно зависят от месторождения. Будем ориентироваться на данные, приведенные в [10, 16–17]. Например, по таблице 3 видно, что основными компонентами загрязнений нефти, исследованной в [16], являются оксиды кремния (кварц), алюминия (корунд) и железа (гематит).

Таблица 3 – Диапазон содержания минеральных загрязнений в нефти [16]

Наименование вещества	Содержание в золе нефти, % массы
оксид кремния (кварц) SiO_2	5,40 – 60,50
оксид железа (гематит) Fe_2O_3	7,70 – 48,90
оксид алюминия (корунд) Al_2O_3	7,50 – 38,80
оксид натрия Na_2O	0,80 – 12,40
оксид кальция CaO	1,00 – 11,00

Продолжение таблицы 3

оксид никеля NiO	0,03 – 4,30
оксид магния MgO	0,80 – 4,26
оксид марганца MnO_2	0,16 – 0,45
оксид ванадия V_2O_5	0,00 – 5,00
оксид калия K_2O	0,00 – 1,80
оксид лития Li_2O	0,00 – 0,14

Гранулометрический состав твердых примесей в нефти изменяется в широких пределах [10, 18–19]. Основная масса примеси имеет размеры менее 0,1 мм [10], но встречаются частицы более 0,5 мм [19].

На рисунке 2 показаны рассчитанные по формуле (8) скорости установившегося осаждения частиц гематита в нефти незначительной вязкости (μ = 5 мПа · с). Видно, что несферичность уменьшает ее величину. Рассчитаем относительную погрешность расчета скорости, если считать частицу сферической:

$$\varepsilon_i = \left(1 - W_i / W_1\right) \cdot 100\,\%, \qquad (10)$$

где W_1 – скорость установившегося осаждения сферической частицы.

Вопреки распространенному заблуждению погрешность расчета ε при уменьшении размера частиц только увеличивается (рис. 2b).

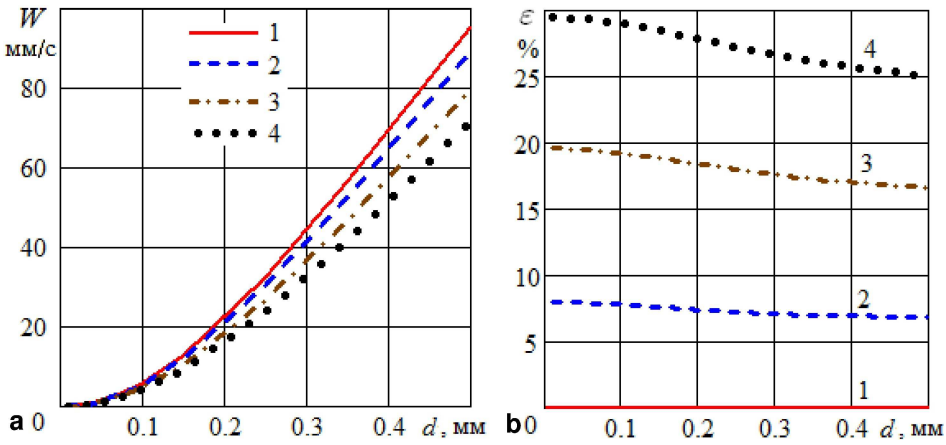

Рисунок 2 – Скорость установившегося осаждения частиц гематита в нефти незначительной вязкости:
a – абсолютное значение; **b** – погрешность расчета при различных коэффициентах формы:
1 – ξ = 1; 2 – ξ = 1,25; 3 – ξ = 1,7; 4 – ξ = 2,2

По рисунку 3 при незначительной вязкости нефти в линейной области сопротивления (Re < 1) осаждаются частицы гематита примерно до размеров 0,22 мм; большие – уже в переходной области.

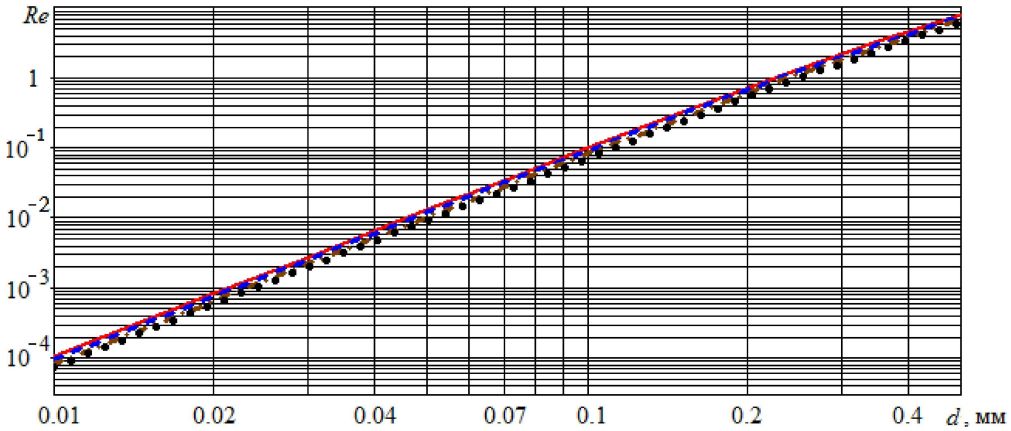

Рисунок 3 – Числа Рейнольдса при установившемся осаждении частиц гематита в нефти незначительной вязкости
(обозначения, как на рис. 2)

На рисунках 4–5 представлены расчеты скорости установившегося осаждения частиц гематита в нефти повышенной вязкости (μ = 30 мПа · с). По рисунку 5 видно, что в этом случае осаждение происходит в линейной области сопротивления.

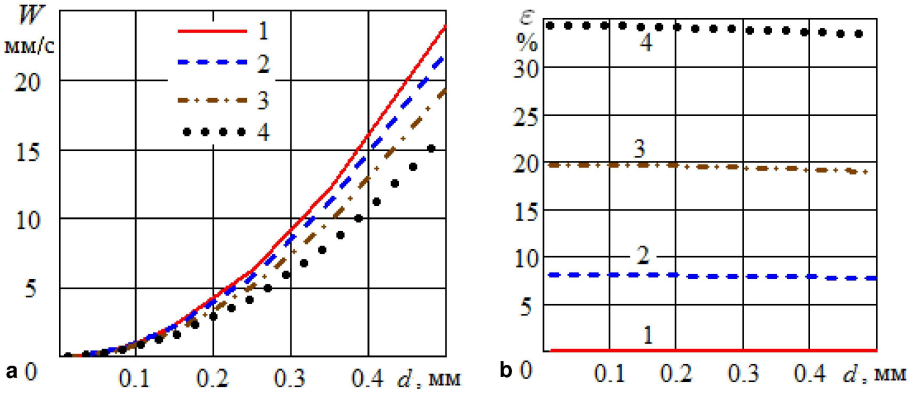

Рисунок 4 – Скорость установившегося осаждения частиц гематита в нефти незначительной вязкости:
a – абсолютное значение; **b** – погрешность расчета при различных коэффициентах формы:
1 – ξ = 1; 2 – ξ = 1,25; 3 – ξ = 1,7; 4 – ξ = 2,2

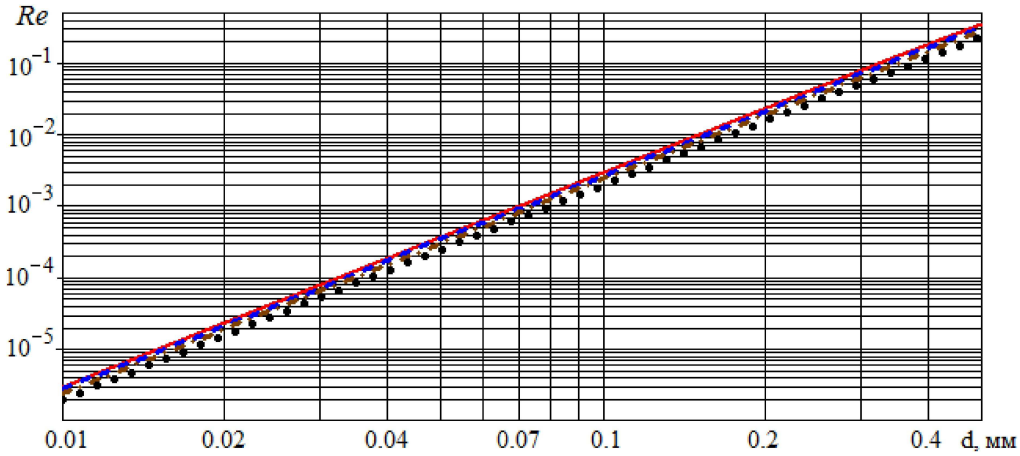

Рисунок 5 – Числа Рейнольдса при установившемся осаждении частиц гематита в нефти повышенной вязкости
(обозначения, как на рис. 4)

Таким образом, при расчете скорости установившегося гравитационного осаждения в нефти частиц любого размера необходимо учитывать их форму. В противном случае погрешность расчета может достигать 35 %. Осаждение твердых частиц в нефти незначительной вязкости или маловязкой может происходить в переходной области сопротивления; в более вязкой нефти – в линейной области сопротивления.

Литература:

1. Куликовский К.Л., Якунина В.В. Ультразвуковая информационно-измерительная система объемного расхода чистой нефти // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2012. – № 1 (21). – С. 141–150.
2. ГОСТ 2517-85. Нефть и нефтепродукты. Методы отбора проб. – М. : Изд-во стандартов, 2003. – 27 с.
3. ГОСТ 6370-83. Нефть, нефтепродукты и присадки. Метод определения механических примесей. – М. : Стандартинформ, 2007. – 7 с.
4. Жаворонкин В.П., Гусев Д.В. Численное моделирование осаждения твердых примесей в нефтепроводе // Транспорт нефти. – 2009. – № 4. – С. 64–67.
5. Vakili-Nezhaad G., Al-Rawahi N., Mansoori G.A., Fatemi A. Effect of fluid viscosity on asphalthene deposition rate during turbulent flow in oil wells // American Journal of Chemical Engineering. – 2013. – V. 1. – No 2. – P. 45–49.
6. Гусейнова Л.В. Осаждение частиц на внутренней поверхности горизонтальных трубопроводов // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2014. – № 2. – С. 46–49.
7. Келбалиев Г.И., Гусейнова Л.В., Расулов С.Р., Сулейманов Г.З. Моделирование процессов осаждения частиц различной природы на поверхности трубопроводов // Нефтепромысловое дело. – 2014. – № 5. – С. 25–28.
8. Shraiber A.A., Gavin L.B., Naumov V.A., Yatsenko V.P. Turbulent flows in gas suspensions. – New York, Hemisphere Corporation, 1990. – 242 p.

9. Crowe C.T., Sommerfeld M., Tsuji Y. Multiphase Flows with Droplets and Particles. – Florida, CRC Press, 1998. – 471 p.
10. Хамидуллин Р.Ф., Мингазов Р.Х., Хамиди М.Р. и др. Оценка количественного содержания дисперсных частиц – как стабилизаторов нефтяной эмульсии (суспензии) // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – № 16. – С. 281–286.
11. Наумов В.А., Маркова Л.В. Скорость осаждения несферических частиц в линейной области гидродинамического сопротивления // Вестник Российской академии естественных наук : сборник научных трудов. – Вып. VII. – Калининград : Изд-во ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2013. – С. 94–00.
12. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Корягин С.И. Моделирование форм твердых частиц, перемещаемых гидротранспортом // Вестник машиностроения. – 2014. – № 4. – С. 50–52.
13. Наумов В.А. Зависимость силы гидродинамического сопротивления твердых частиц от показателя их несферичности // Вестник науки и образования Северо-Запада России : электронный журнал, 2015. – Т. 1, № 1. – С. 95–104. – URL : http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2015/10/2015-№1-Наумов.pdf (дата обращения: 03.03.2017).
14. Великанов Н.Л., Наумов В.А., Корягин С.И. Осаждение несферических частиц в смазывающих жидкостях // Вестник машиностроения. – 2016. – № 10. – С. 67–70.
15. Методические рекомендации по применению классификации запасов и ресурсов нефти и горючих газов. Утверждены распоряжением Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 01.02.2016. – № 3-р.
16. Добрянский А.Ф. Химия нефти. – Л. : Гостоптехиздат, 1961. – 224 с.
17. Рыбак Б.М. Анализ нефти и нефтепродуктов. – М. : Гостоптехиздат, 1962. – 888 с.
18. Купавых В.А., Мерзляков В.Ф., Валеев М.Д., Лысенков А.В. Гранулометрический анализ механических примесей в продукции нефтяных скважин и технология их фильтрации // Нефтегазовое дело. – 2016. – Т. 14. – № 5 – С. 74–79.
19. СТК ГЕОСТАР. Приборы и оборудование для нефтегазовой промышленности. – URL : http://www.gstar.ru/files/oilproduction.pdf (дата обращения: 08.03.2017).

References:

1. Kulikovsky K.L., Yakunina V.V. Ultrasonic information and measuring system of a volume consumption of clean oil // News of higher educational institutions. Volga region. Technical science. – 2012. – No. 1 (21). – P. 141–150.
2. GOST 2517-85. Oil and oil products. Sampling methods. – M. : Publishing house of standards, 2003. – 27 p.
3. GOST 6370-83. Oil, oil products and additives. Method of definition of mechanical impurity. – M. : Standartinform, 2007. – 7 p.
4. Zhavoronkin V.P., Gusev D.V. Numerical modeling of sedimentation of solid impurity in the oil pipeline // Oil transport. – 2009. – No. 4. – P. 64–67.
5. Vakili-Nezhaad G., Al-Rawahi N., Mansoori G.A., Fatemi A. Effect of fluid viscosity on asphalthene deposition rate during turbulent flow in oil wells // American Journal of Chemical Engineering. – 2013. – V. 1. – No 2. – P. 45–49.
6. Guseynova L.V. Sedimentation of particles on the internal surface of horizontal pipelines // the Equipment and technologies for an oil and gas complex. – 2014. – No. 2. – P. 46–49.
7. Kelbaliyev G.I., Guseynova L.V., Rasulov S.R., Suleymanov G.Z. Modeling of processes of sedimentation of particles of various nature on the surface of pipelines // Oil-field business. – 2014. – No. 5. – P. 25–28.
8. Shraiber A.A., Gavin L.B, Naumov V.A., Yatsenko V.P. Turbulent flows in gas suspensions. – New York, Hemisphere Corporation, 1990. – 242 p.
9. Crowe C.T., Sommerfeld M., Tsuji Y. Multiphase Flows with Droplets and Particles. – Florida, CRC Press, 1998. – 471 p.
10. Hamidullin R.F., Mingazov R.H., Hamidi M.R., etc. An assessment of quantitative maintenance of disperse particles – as stabilizers of an oil emulsion (suspension) // the Bulletin of the Kazan technological university. – 2013. – No. 16. – P. 281–286.
11. Naumov V.A., Markova L.V. Speed of sedimentation of non-spherical particles in linear area of hydrodynamic resistance // Messenger of the Russian Academy of Natural Sciences: collection of scientific works. – Issue VII. – Kaliningrad : Publishing house of KGTU, 2013. – P. 94–00.
12. Velikanov N.L., Naumov V.A., Koryagin S.I. Modeling of forms of the firm particles moved by hydra transport // the Messenger of mechanical engineering. – 2014. – No. 4. – P. 50–52.
13. Naumov V.A. Dependence of force of hydrodynamic resistance of firm particles on an indicator of their not sphericity // Messenger of science and education of the Northwest of Russia : online magazine, 2015. – T. 1, No. 1. – P. 95–104. – URL: http://vestnik-nauki.ru/wp-content/uploads/2015/10/2015-¹1-Наумов.pdf (date of the address: 3/3/2017).
14. Velikanov N.L., Naumov V.A., Koryagin S.I. Sedimentation of asheric particles in the greasing liquids // the Messenger of mechanical engineering. – 2016. – No. 10. – P. 67–70.
15. Methodical recommendations about application of classification of stocks and resources of oil and combustible gases. Are approved by the order of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Russian Federation from 01.02.2016. – No. 3-r.
16. Dobryansky A.F. Oil chemistry. – L. : Gostoptekhizdat, 1961. – 224 p.
17. Rybak B.M. Analysis of oil and oil products. – M. : Gostoptekhizdat, 1962. – 888 p.
18. Kupavykh V.A., Merzlyakov V.F., Valeev M.D., Lysenkov A.V. The granulometric analysis of mechanical impurity in production of oil wells and technology of their filtration // Oil and gas business. – 2016. – T. 14. – No. 5 – P. 74–79.
19. STK GEOSTAR. Devices and equipment for the oil and gas industry. – URL : http://www.gstar.ru/files/oilproduction.pdf (date of the address: 08.03.2017).