



УДК 622.692

## О КОЭФФИЦИЕНТЕ РАСХОДА ИСТЕЧЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ ЧЕРЕЗ МАЛОЕ ОТВЕРСТИЕ ПРИ НИЗКИХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА

### ABOUT THE FLOW COEFFICIENT OF THE EXPIRATION OF OIL PRODUCTS FROM PINHOLE AT LOW REYNOLDS NUMBERS

**Наумов Владимир Аркадьевич**

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

**Пыленок Дмитрий Андреевич**

аспирант,  
Калининградский государственный  
технический университет  
dimon39.94@mail.ru

**Аннотация.** Расчет объемов нефти, вытекающей из трубопровода при аварии, важен для оценки ущерба. В статье показано, что при истечении через малое отверстие в тонкой стенке сверхвязкой нефти числа Рейнольдса могут быть меньше 25. При этом формулы, рекомендуемые методическими материалами, занижают коэффициент расхода до 50 % по сравнению с экспериментальными данными. Необходимо исключить разрыв функции зависимости коэффициента расхода от числа Рейнольдса, так как он затрудняет компьютерную реализацию алгоритма расчета.

**Ключевые слова:** нефтепродукты, трубопровод, аварии, истечение, коэффициент расхода, формулы, эксперименты.

**Naumov Vladimir Arkad'evich**

Doctor of Technical Science, Professor,  
Chairman of the Water Resources  
Subdepartment,  
Kaliningrad State Technical University  
van-old@mail.ru

**Pylenok Dmitry Andreevich**

Graduate student,  
Kaliningrad State Technical University  
dimon39.94@mail.ru

**Annotation.** The volume calculation of the pipeline oil flowing out in the event of an accident is important for assessing the damage. In the article it is shown that the Reynolds number may be less than 25 if a small hole in the thin wall of the super-viscous oil passes through. In the formula, recommended teaching materials, underestimate the expense ratio to 50 % in comparison with the experimental data. It is necessary to exclude the discontinuity of the function of the dependence of the flow coefficient on the Reynolds number, since it complicates the computer implementation of the calculation algorithm.

**Keywords:** oil products, pipeline, accidents, outflow, flow coefficient, formulas, experiments.

Расчет объемов утечки нефти или нефтепродуктов при нарушении герметичности трубопровода является ключевым вопросом для определения материальных потерь и ущерба окружающей среде (см. [1–4] и библиографию в них). В настоящее время для таких расчетов используются довольно сложные математические модели, которые учитывают влияние турбулентности [5], нестационарный характер процесса, возможности образования пустот и других факторов [6–7] при интенсивных утечках. Вместе с тем при небольших отверстиях, когда потери не фиксируются приборами нефтеперекачивающих станций, главную роль играет правильное определение коэффициента расхода истекающей жидкости  $\mu$ . В указанном случае действующая Методика [8] предписывает пользоваться одной из следующих формул:

$$\mu = Re/48, \text{ при } Re < 25; \quad (1)$$

$$\mu = Re/(1,5 + 1,4 \cdot Re), \text{ при } 25 \leq Re < 400; \quad (2)$$

$$\mu = 0,592 + 0,27 / \sqrt[6]{Re}, \text{ при } 400 \leq Re < 10000; \quad (3)$$

$$\mu = 0,592 + 5,5 / \sqrt{Re}, \text{ при } 10000 \leq Re < 300000; \quad (4)$$

$$\mu = 0,595, \text{ при } Re \geq 300000. \quad (5)$$

Здесь и далее число Рейнольдса рассчитывается по идеальной скорости жидкости, истекающей через отверстие в тонкой стенке с эквивалентным диаметром  $d$  при перепаде давления  $\Delta p$ :

$$Re = \sqrt{2\Delta p / \rho} \cdot d / \nu. \quad (6)$$



Обратим внимание, что в [8] формулы (1)–(5) предназначены именно для расчета расхода при авариях на нефтепроводах, так как появились пособия для студентов, в которых предлагается использовать указанные формулы только «для маловязких жидкостей» (см., например [9]). А в остальных случаях пользоваться сложными формулами, полученными в [10] для нестабильных нефтегазо-конденсатных сред.

В известной работе А.Д. Альтшуля [11] при  $Re < 25$  рекомендуется использовать либо формулу:

$$\mu = \sqrt{Re / (Re + 25,2)}; (7)$$

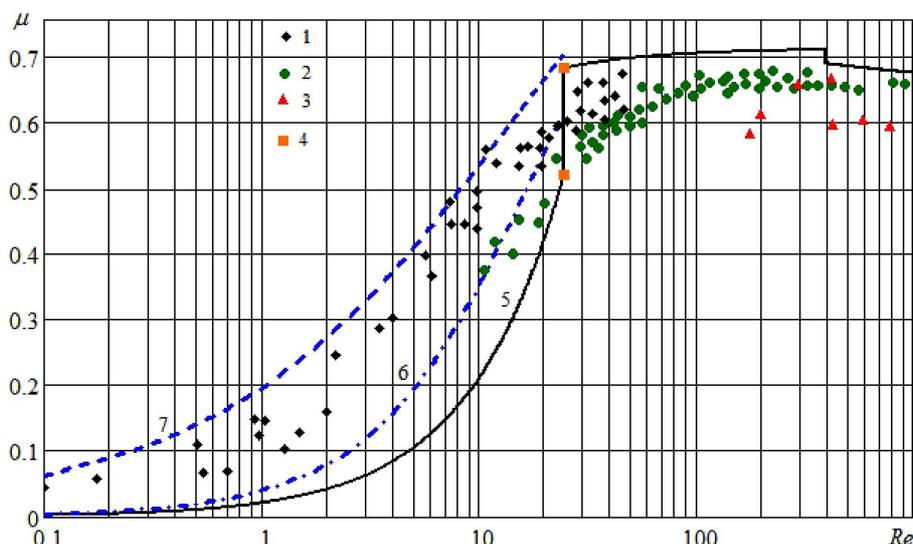
либо уточненную:

$$\mu = Re / (\mu \cdot Re + 25,2); (8)$$

Из (8) после решения квадратного уравнения следует:

$$\mu = \sqrt{1 + (12,6 / Re)^2} - 12,6 / Re; (9)$$

На рисунке 1 результаты расчета по вышеприведенным формулам сравниваются с экспериментальными данными из [11, 12] при  $Re < 1000$ .



**Рисунок 1** – Зависимость коэффициента расхода от числа Рейнольдса;  
 Экспериментальные данные: 1 и 2 – из [11], 3 – [12];  
 Результаты расчета: 5 – по формулам (1)–(5) из [8], 6 – (9), 7 – (7)

На рисунке 1 двумя точками 4 показан конечный разрыв зависимости  $\mu(Re)$  по формулам (1)–(2) при  $Re = 25$ , который составляет 31,5 %. Необходимо исключить такой разрыв. Последнее особенно важно для компьютерной реализации алгоритма. Так как при разрывах аппроксимирующей функции возможны аварийные остановки итерационной процедуры. Второй разрыв функции ( $Re = 400$ ) – невелик. При  $Re > 25$  результаты расчета по формулам (2)–(3) находятся вблизи экспериментальных точек. А вот при меньших числах Рейнольдса (1) занижает коэффициент расхода в 1,5–2 раза.

В большинстве исследований рассматривается случай достаточно больших чисел Рейнольдса, что характерно для нефтепродуктов с невысокой вязкостью. Однако и в России, и в зарубежных странах значительно возросла доля добычи, транспортировки и переработки трудно извлекаемых запасов (сверх вязкая нефть, природный битум и др.). Оценка таких ресурсов в Российской Федерации – 30–75 млрд тонн [13]. Для транспортировки по трубопроводам тяжелой и битуминозной нефти широко используется технология с применением разбавителей. При этом вязкость полученной смеси может изменяться в широких пределах.

В диссертации [14] приведены значения коэффициента динамической вязкости  $\eta$ , полученные экспериментально для битуминозной Ашальчинской нефти, в которую в качестве растворителя добавляли до 20 % Девонской нефти; при этом смесь постепенно нагревалась до температуры 90 °С. Коэффициент кинематической вязкости смеси можно вычислить по формуле:

$$\nu = \eta / \rho, \quad \rho = k \cdot \rho_D(t) + (1 - k) \cdot \rho_A(t), \quad (10)$$

где  $k$  – массовая доля Девонской нефти (растворителя);  $\rho$  – плотность смеси;  $\rho_A(t)$ ,  $\rho_D(t)$  – зависящие от температуры плотности Ашальчинской и Девонской нефти, соответственно.

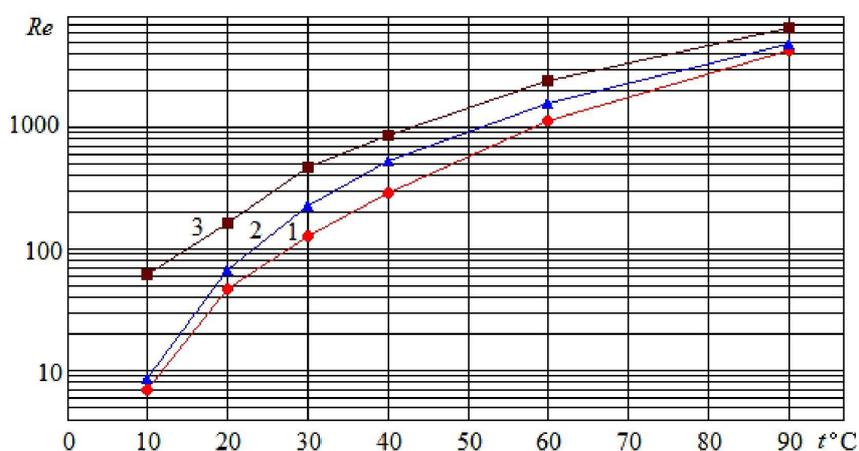


В таблице 1 представлены результаты расчета коэффициента кинематической вязкости смеси по формуле (10) при различных долях растворителя и температурах. Полученные значения далее использованы для расчета чисел Рейнольдса.

**Таблица 1** – Коэффициент кинематической вязкости смеси  $\eta$ , мм<sup>2</sup>/с

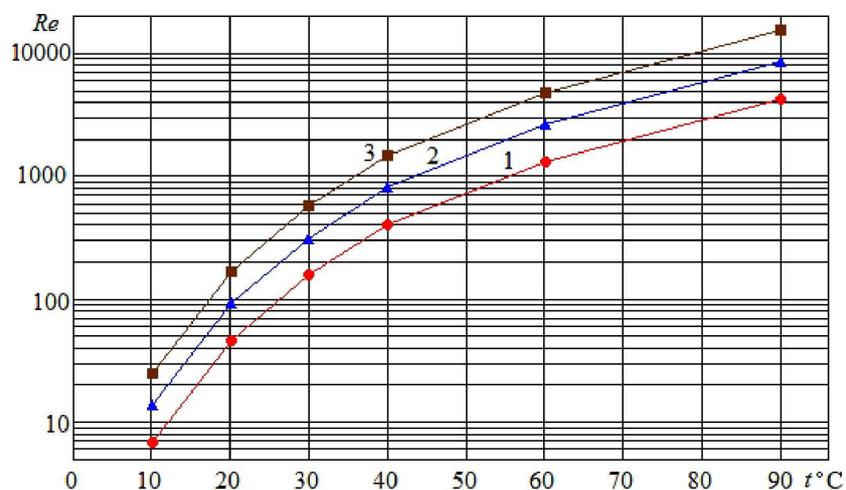
К	Температура смеси, °С					
	10	20	30	40	60	90
0	25460	3734	1399	616,6	158,5	42,3
0,05	25660	3843	1132	439,8	135,7	42,5
0,1	20570	2676	780,8	340,0	113,7	37,2
0,15	6454	1816	561,0	256,3	108,8	34,0
0,2	2857	1096	384,0	211,5	75,8	27,6

На рисунке 2–3 показаны результаты расчета чисел Рейнольдса при истечении нефтепродуктов через малое отверстие в тонкой стенке.



**Рисунок 2** – Числа Рейнольдса, рассчитанные для смеси нефти при  $d = 1$  см,  $\Delta p = 0,15$  МПа: 1 –  $k = 0$ ; 2 –  $k = 0,1$ ; 3 –  $k = 0,2$

Видно, что при истечении сильно вязких жидкостей ( $t \leq 20$  °С) числа Рейнольдса могут быть меньше 100, а без растворителя – и меньше 25. Тогда расчет по формуле (1) приведет к занижению расхода истекающей жидкости до 50 %. При больших перепадах давления в магистральном трубопроводе ( $\Delta p > 2,5$  МПа), значительных долях растворителя в смеси ( $k > 0,2$ ) или высокой температуре ( $t > 60$  °С), действительно, можно полагать коэффициент расхода постоянным.



**Рисунок 3** – Числа Рейнольдса, рассчитанные для смеси нефти при  $k = 0,1$ : 1 –  $\Delta p = 0,15$  МПа; 2 –  $\Delta p = 0,6$  МПа; 3 –  $\Delta p = 2,0$  МПа



Таким образом, при истечении через малое отверстие сверхтяжелой и битуминозной нефти (или смесей на их основе) числа Рейнольдса могут быть весьма малыми ( $Re < 25$ ), что не позволяет считать коэффициент расхода постоянной величиной. В указанной области формулы, рекомендуемые методическими материалами, занижают коэффициент расхода до 50 % по сравнению с имеющимися экспериментальными данными. Что может привести к недооценке объемов вытекающих нефтепродуктов при аварии трубопровода. Кроме того, необходимо исключить разрыв функции зависимости коэффициента расхода от числа Рейнольдса, так как он затрудняет компьютерную реализацию алгоритма расчета. Требуются дальнейшие экспериментальные исследования истечения через отверстия и насадки смесей на основе сверх вязкой нефти.

### Литература:

1. Бахтизин Р.Н., Атнабаев А.Ф., Павлов С.В., Сайфутдинова Г.М. Оценка последствий аварийных разливов нефти на магистральных нефтепроводах // Нефтегазовое дело. – 2006. – № 1. – С. 239–242.
2. Лурье М.В. Экспертиза потерь нефти и газа при авариях на трубопроводах // Эксперт-криминалист. – 2009. – № 2. – С. 9–14.
3. Чуб И.А., Неронов А.А. Моделирование потерь нефти при авариях на трубопроводах // Проблемы чрезвычайных ситуаций: сборник научных трудов. – Харьков : Изд-во Национального университета гражданской защиты Украины, 2012. – Вып. 16. – С. 131–138.
4. Липский В.К. Управление защитой водных объектов при авариях на нефтепроводах // Актуальные проблемы природообустройства региона : сборник научных трудов. – Калининград : Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2017. – С. 103–108.
5. Shraiber A.A., Gavin L.B., Naumov V.A., Yatsenko V.P. Turbulent flows in gas suspensions. – New York, Hemisphere Corporation, 1990. – 242 p.
6. Рахматуллин Ш.И., Карамышев В.Г., Коркишко А.Н., Султанов М.Х. Расчет истечения жидкости из щели при разрыве стенки трубопровода в неквадратичной области гидравлического сопротивления // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2010. – № 4. – С. 135–140.
7. Дидковская А.С., Лурье М.В. Истечение нефти через сквозное отверстие в поверхности трубопровода // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 2. – С. 104–107.
8. Методика определения ущерба окружающей природной среде при авариях на магистральных нефтепроводах; Утверждена Минтопэнерго Российской Федерации 1 ноября 1995 года. – 68 с.
9. Сафаров А.М., Гильмутдинов А.Т. Определение степени загрязнения при аварийных утечках нефти и нефтепродуктов : учебно-методическое пособие. – Уфа : Изд-во Уфимского государственного нефтяного техн. университета, 2013. – 16 с.
10. Коршак А.А., Забазнов А.И., Новоселов В.В. и др. Трубопроводный транспорт нестабильного газового конденсата. – М. : Изд-во ВНИИОЭНГ, 1994. – 224 с.
11. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления. – М. : Недра, 1982. – 224 с.
12. Пильгунов В.Н., Ефремова К.Д. Истечение вязкой жидкости через круглые отверстия при малых числах Рейнольдса // Аэрокосмический научный журнал. – 2015. – № 1. – С. 31–57.
13. Николаев А.К., Пшенин В.В., Закиров А.И., Зарипова Н.А. Обоснование режимов трубопроводного транспорта битуминозной нефти // Территория «НЕФТЕГАЗ». – 2016. – № 11. – С. 108–114.
14. Рахимова Ш.Г. Исследование применения теплового воздействия совместно с углеводородными растворителями для разработки залежей тяжелых нефтей : дис. ... канд. технич. наук. – Специальность 25.00.17 – Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений. – Бугульма : Татарский научно-исследовательский и проектный институт нефти, 2009. – 121 с.

### References:

1. Bakhtizin R.N., Atnabayev A.F., Pavlov S.V., Sayfutdinova G.M. Assessment of consequences of emergency oil spills on the main oil pipelines // Oil and gas business. – 2006. – No. 1. – P. 239–242.
2. Lurye M.V. Examination of losses of oil and gas at accidents on pipelines // the Forensic expert. – 2009. – No. 2. – P. 9–14.
3. Forelock I.A., Neronov A.A. Modeling of losses of oil at accidents on pipelines // Problems of emergency situations : collection of scientific works. – Kharkiv : Publishing house of the National university of civil protection of Ukraine, 2012. – Issue 16. – P. 131–138.
4. Lipsky V.K. Management of protection of water objects at accidents on oil pipelines // Current problems of environmental engineering of the region : collection of scientific works. – Kaliningrad : KGTU VO FGBOU publishing house, 2017. – P. 103–108.
5. Shraiber A.A., Gavin L.B., Naumov V.A., Yatsenko V.P. Turbulent flows in gas suspensions. – New York, Hemisphere Corporation, 1990. – 242 p.
6. Rakhmatullin Sh.I., Karamyshev V.G., Korkishko A.N., Sultanov M.H. Calculation of the expiration of liquid from a crack at a rupture of a wall of the pipeline in not square area of hydraulic resistance // Problem of collecting, preparation and transport of oil and oil products. – 2010. – No. 4. – P. 135–140.
7. Didkovskaya A.S., Lurye M.V. The expiration of oil through a through opening in the surface of the pipeline // Oil economy. – 2017. – No. 2. – P. 104–107.
8. A technique of determination of damage to the surrounding environment at accidents on the main oil pipelines; It is approved by Ministry of Fuel and Energy of the Russian Federation on November 1, 1995. – 68 p.



9. Safarov A.M., Gilmutdinov A.T. Definition of extent of pollution at emergency leak of oil and oil products : educational and methodical grant. – Ufa : Publishing house Ufa state oil technical university, 2013. – 16 p.
10. Korshak A.A., Zabaznov A.I., Novoselov V.V., etc. Pipeline transport of unstable gas condensate. – M. : VNIIOENG publishing house, 1994. – 224 p.
11. Altshul A.D. Hydraulic resistance. – M. : Nedra, 1982. – 224 p.
12. Pilgunov V.N., Efremova K.D. The expiration of viscous liquid through round openings at small Reynolds numbers // the Space scientific magazine. – 2015. – No. 1. – P. 31–57.
13. Nikolaev A.K., Pshenin V.V., Zakirov A.I., Zaripova N.A. Justification of the modes of pipeline transport of bituminous oil // Territory NEFTEGAZ. – 2016. – No. 11. – P. 108–114.
14. Rakhimova Sh.G. A research of application of thermal influence together with hydrocarbonic solvents for development of deposits heavy nefty : yew. ... edging. technical sciences. – Specialty 25.00.17 – Development and operation of oil and gas fields. – Bugulma : Tatar research and design institute of oil, 2009. – 121 p.