



УДК 502.21:665.71

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ОТКАЧКИ ВЫСОКОВЯЗКИХ ОСТАТКОВ НЕФТЕПРОДУКТОВ ВАКУУМНОЙ УСТАНОВКОЙ



CALCULATION OF PARAMETERS FOR PUMPING HIGH-VISCOSITY RESIDUES OF PETROLEUM PRODUCTS WITH THE VACUUM UNIT

Наумов Владимир Аркадьевич

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой водных ресурсов и водопользования,
Калининградский государственный технический университет

Землянов Антон Алексеевич

студент строительного факультета,
Калининградский государственный технический университет
van-old@mail.ru

Naumov Vladimir Arkadievich

Doctor of Technical Science, Professor,
Chairman of The Water Resources
Subdepartment,
Kaliningrad State Technical University

Zemlyanov Anton Alekseevich

student of the Construction Faculty,
Kaliningrad State Technical University
van-old@mail.ru

Аннотация. Сформирована математическая модель процесса откачки высоковязких остатков нефтепродуктов вакуумной установкой. В статье показано, что режим течения в рукаве является ламинарным. Максимальный объем жидкости, перекачанной за один цикл, и конечное значение давления в цистерне не зависят от вязкости. Они определяются величинами начального вакуума в цистерне, объема цистерны и перепада уровней. Увеличение вязкости жидкости приводит к уменьшению расхода и возрастанию времени заполнения цистерны.

Annotation. The mathematical model of the process of pumping out high-viscosity residues of petroleum products by the vacuum unit was formed. The article shows that the flow mode in the sleeve is laminar. The maximum volume of liquid pumped in one cycle and the final pressure in the tank do not depend on the viscosity. They are determined by the values of the initial vacuum in the tank, the volume of the tank, and the level difference. Increasing the viscosity of the liquid reduces the flow rate and increases the filling time of the tank.

Ключевые слова: остатки нефтепродуктов, высокая вязкость, вакуумная установка, откачка, математическая модель, расчет.

Keywords: residues of petroleum products, high viscosity, vacuum unit, pumping, mathematical model, calculation.

Проблема сбора и утилизации отходов нефтепродуктов (ОНП) является актуальной для науки и практики (см. [1, 2] и библиографию в них). К таким отходам, в первую очередь, относятся нефтепродукты, утратившие потребительские свойства при их хранении или использовании. Кроме того, ОНП образуются также при зачистке средств транспортировки и хранения нефти и нефтепродуктов, очистке загрязненных сточных вод. Объемы ОНП в России за 2015 год, по статистическим данным, составили 530,6 тысяч тонн [2, с. 7].

Слабо исследованной остается проблема сбора остатков высоковязких нефтепродуктов (ОВН). Для ее решения ряд предприятий (например, компания Геоцентроспас [3]) предлагают использовать установки вакуумной откачки (УВО). Теория работы УВО в настоящее время не разработана. В данной статье предложен метод расчета параметров процесса откачки ОВН с помощью УВО.

На рисунках 1–2 представлены общий вид УВО-1 и гидравлическая схема процесса откачки ОВН. УВО-1 установлена на автомобильном шасси, что позволяет транспортировать ОВН непосредственно к точке слива (утилизации). Емкость цистерны $V_0 = 3,25 \text{ м}^3$.

Работу УВО-1 можно разбить на этапы. На первом этапе откачивается воздух из цистерны 2 с помощью вакуумного насоса PNR-122D, производства итальянской компании Juror. При этом клапан 4 закрыт. Динамика процесса откачки зависит от нагрузочных характеристик вакуумного насоса и коэффициента утечки воздуха. Моделирование этого этапа рассмотрено в [4, 5]. Полагаем, что коэффициент утечки мал, а в цистерне в конце первого этапа устанавливается давление, наименьшее для данного вакуумного насоса $p_0 = 20 \text{ кПа}$ [6].

Далее рассматриваем процесс с разделением этапов: в начале второго этапа насос 5 выключается, клапан 6 закрывается, открывается клапан 4. ОВН за счет разности давлений поступает из резервуара 1 по рукаву 3 в цистерну 4. Третий этап – транспортировка и слив ОВН.

Сформулируем математическую модель процесса откачки ОВН (второй этап работы УВО). Она включает дифференциальное уравнение притока жидкости в цистерну и начальное условие к нему:

$$\frac{dV}{dt} = S_0 \cdot W(t), \quad V(0) = 0, \quad (1)$$

где $V(t)$ – объем ОВН, перекачанный в цистерну за время t , S_0 – площадь поперечного сечения рукава, W – скорость жидкости в рукаве (средняя по сечению трубы).



Рисунок 1 – Установка вакуумной откачки УВО-1 [3]

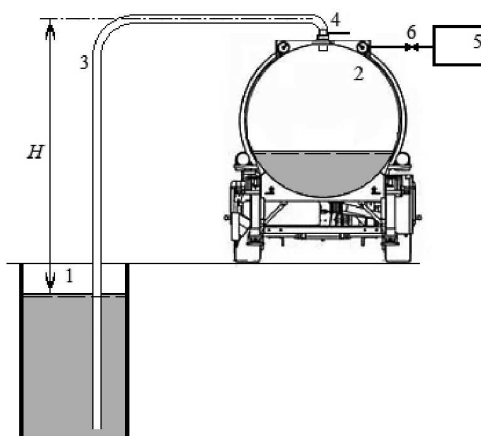


Рисунок 2 – Схема откачки ОВН:

1 – резервуар с ОВН; 2 – цистерна; 3 – рукав; 4 – люк и вентиль; 5 – вакуумный насос; 6 – вентиль

Уравнение Бернулли в квазистационарном приближении:

$$0,5 \cdot \rho \cdot (\alpha + \zeta) \cdot W^2 = p_A - p(t) - \rho g H(t); \tag{2}$$

$$p(t) = \frac{p_0 \cdot V_0}{V(t) - V_0}, \quad H(t) = H_0 + \frac{V(t)}{S_1}, \quad \zeta = \sum \zeta_M + \lambda \frac{L}{d}. \tag{3}$$

где $H(t)$, $p(t)$ – перепад уровней и давление в цистерне в момент времени t , соответственно, p_A – атмосферное давление, g – ускорение свободного падения, α – коэффициент неравномерности профиля скорости в трубе, L , d – длина и внутренний диаметр рукава, соответственно, S_1 – площадь поперечного сечения резервуара с ОВН, H_0 – начальный перепад уровней, ζ – обобщенный коэффициент гидравлических потерь, ζ_M – коэффициент местных гидравлических потерь, λ – коэффициент гидравлических потерь по длине трубы.

Первая из формул (3) записана в предположении изотермического характера сжатия газа во время закачки ОВН. Из уравнения (2) невозможно выразить скорость W в явном виде, так как от величины скорости зависит λ . Для расчета λ были использованы предложения [7, 8]. При этом необходимо знать вязкость нефтепродуктов.

В диссертации [9] приведены значения коэффициента динамической вязкости μ , полученные экспериментально для битуминозной Ашальчинской нефти, в которую в качестве растворителя добавляли Девонскую нефть. Коэффициент кинематической вязкости смеси вычисляется по формуле:

$$\nu = \eta / \rho, \quad \rho = k \cdot \rho_D(T) + (1 - k) \cdot \rho_A(T), \tag{4}$$

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

В таблице 1 представлены результаты расчета коэффициента кинематической вязкости смеси по формуле (4) при различных долях растворителя и температурах. Полученные значения далее использованы для расчета чисел Рейнольдса и λ .

Задача Коши (1)–(3) была решена численным методом при следующих значениях размерных параметров: $d = 100$ мм; $T = 20$ °С; $p_0 = 20$ кПа; $H_0 = 3,2$ м; $L = 10$ м; $S_1 = 2$ м²; $V_0 = 3,25$ м³. На рисунках 3–6 представлены результаты расчета при различных значениях массовой доли Девонской нефти в смеси.



Таблица 1 – Плотность и коэффициент киематической вязкости смеси Ашальчинской и Девонской нефти

k	Температура смеси, T °C					
	10		20		30	
	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\nu, \text{мм}^2/\text{с}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\nu, \text{мм}^2/\text{с}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\nu, \text{мм}^2/\text{с}$
0,05	966	25660	960	3843	954	1132
0,1	963	20570	956	2676	950	780,8
0,15	959	6454	953	1816	946	561,0
0,2	955	2857	949	1096	943	384,0

Видно, что не изменяются максимальная величина объема ОВП, перекачанного за один цикл, V_1 (рис. 3) и конечное значение давления в цистерне p_1 (рис. 4). Их можно найти из системы уравнений:

$$p_A - p_1 = \rho g \left(H_0 + \frac{V_1}{S_1} \right); \quad p_1 = \frac{p_0 \cdot V_0}{V_1 - V_0} \quad (5)$$

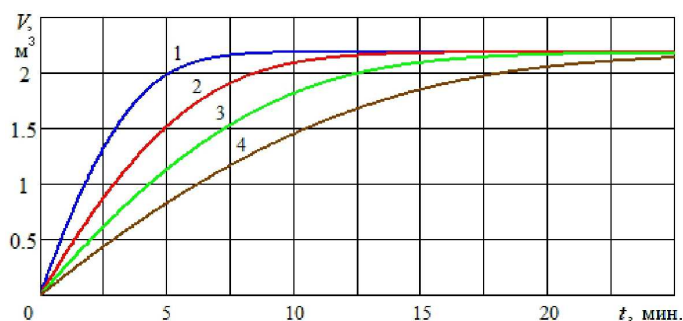


Рисунок 3 – Объем перекачиваемой вязкой жидкости при 20 °C, $p_0 = 20$ кПа:
 1 – $\nu = 1096$ мм²/с; 2 – $\nu = 1816$ мм²/с; 3 – $\nu = 2676$ мм²/с; 4 – $\nu = 3843$ мм²/с

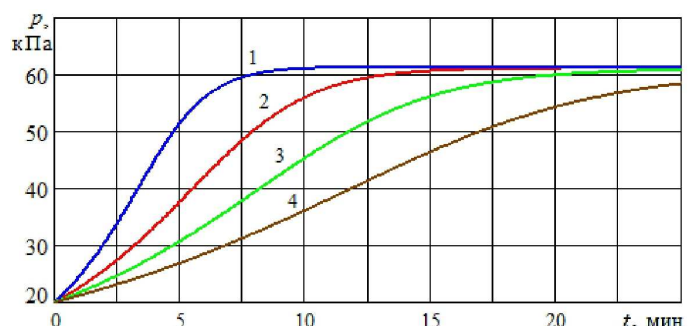


Рисунок 4 –Изменение давления в цистерне в процессе перекачивания.
 Условия и обозначения, как на рисунке 3

В рассматриваемом случае из (5) следует $V_1 = 2,19$ м³; $p_1 = 61,3$ кПа.

При увеличении вязкости смеси возрастает гидравлическое сопротивление трубопровода. Из-за этого уменьшается расход и скорость движения ОВП по рукаву (рис. 5). В результате растет время заполнения цистерны с 8 примерно до 25 минут. По рисунку 6 во всех рассмотренных случаях режим течения жидкости в рукаве был ламинарным.

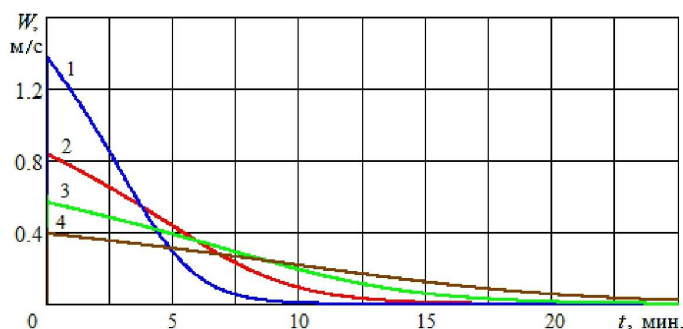


Рисунок 5 – Изменение скорости в трубопроводе в процессе перекачивания.
 Условия и обозначения, как на рисунке 3

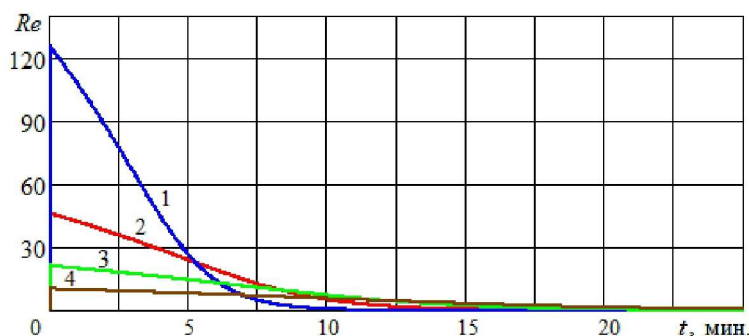


Рисунок 6 – Изменение чисел Рейнольдса в трубопроводе в процессе перекачивания. Условия и обозначения, как на рисунке 3

Таким образом, при откачке высоковязких остатков нефтепродуктов вакуумной установкой в рукаве устанавливается ламинарный режим течения. Максимальный объем жидкости, перекачанной за один цикл, и конечное значение давления в цистерне не зависят от вязкости. Они определяются величинами начального вакуума в цистерне, объема цистерны и перепада уровней. Увеличение вязкости жидкости приводит к уменьшению расхода и возрастанию времени заполнения цистерны.

Литература:

1. Соколов Л.И. Переработка и утилизация нефтесодержащих отходов : монография. – М. : Инфра-Инженерия, 2017. – 161 с.
2. Утилизации и обезвреживанию отходов. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. – М. : Бюро НДТ, 2016. – 208 с.
3. Геоцентроспас. Откачка остатков вязких нефтепродуктов вакуумной машиной [Электронный ресурс]. – URL : <http://www.geocentrspas.ru/ru/uslugi/tank> (дата обращения 08.03.2020).
4. Великанов Н.Л., Наумов В.А. Моделирование характеристик водокольцевых вакуумных насосов // Известия вузов. Машиностроение. – 2019. – № 10. – С. 70–77.
5. Великанов Н.Л., Наумов В.А. Динамические характеристики вакуумных насосов и компрессоров рыбо-насосных установок // Рыбное хозяйство. – 2019. – № 1. – С. 79–83.
6. Руководство по работе и техническому обслуживанию вакуумного насоса PNR/PNE [Электронный ресурс]. – URL : <http://www.cometa-rvd.ru/juopdoc> (дата обращения 08.03.2020).
7. Булатов А.И. Системный анализ исследований течения вязко-пластичных жидкостей – глинистых и цементных растворов. Ч. 1 // Бурение и нефть. – 2016. – № 3. – С. 18–23.
8. Хайруллин А.А. Нелинейные модели при решении прикладных задач добычи нефти : монография. – Тюмень : Изд-во ТИУ, 2016. – 157 с.
9. Рахимова Ш.Г. Исследование применения теплового воздействия совместно с углеводородными растворителями для разработки залежей тяжелых нефтей: дис. ... канд. техн. 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. Sokolov L.I. Processing and utilization of oil-containing waste : monograph. – M. : Infra-Engineering, 2017. – 161 p.
2. Recycling and disposal of waste. Information and technical guide to the best available technologies. – M. : Bureau of NDT, 2016. – 208 p.
3. Geocentrists. Pumping out the remains of viscous petroleum products by the vacuum machine [Electronic resource]. – URL : <http://www.geocentrspas.ru/ru/uslugi/tank> (accessed 08.03.2020).
4. Velikanov N.L., Naumov V.A. Modeling of the characteristics of liquid ring vacuum pumps // Proceedings of the universities. Engineering. – 2019. – № 10. – P. 70–77.
5. Velikanov N. L., Naumov V. A. Dynamic characteristics of vacuum pumps and compressors of fish-pumping plants // Fish farm. – 2019. – № 1. – P. 79–83.
6. Manual for operation and maintenance of the PNR/PNE vacuum pump [Electronic resource]. – URL : <http://www.cometa-rvd.ru/juopdoc> (accessed 08.03.2020).
7. Bulatov A.I. System analysis of studies of the flow of visco-plastic liquids-clay and cement solutions. Part 1 // Drilling and oil. – 2016. – № 3. – P. 18–23.
8. Khairullin A.A. Non-linear models when solving applied tasks of oil production : monograph. – Tyumen : Publishing house of TIU, 2016. – 157 p.
9. Rakhimova Sh.G. Study of application of thermal effect in conjunction with the hydrocarbon solvents for development of deposits of heavy oils : dis.... cand. technical. sciences. Specialty 25.00.17 – Development and operation of oil and gas fields. – Bugulma : Tatar oil research and design Institute, 2009. – 121 p.