

УСТОЙЧИВОСТЬ ВОДОГАЗОВОЙ СМЕСИ К РАССЛОЕНИЮ В ТРУБОПРОВОДЕ

Долгов Д.В.

В статье получено выражение параметра устойчивости газожидкостной смеси к расслоению в горизонтальном трубопроводе, позволяющий рассчитывать наибольший диаметр газовых пузырей, удерживаемых в турбулентном потоке от всплытия.

Получено опытное значение коэффициента пропорциональности в формуле зависимости наибольшего диаметра пузырей от параметра устойчивости, соответствующего значению 0,64.

Для расчета длины трубопровода, на котором произойдет расслоение смеси при заданных значениях диаметра пузырей, диаметра трубы, расхода жидкости, вязкости и плотности получена соответствующая зависимость.

Утилизация газа низкого давления на ДНС-13 Поточного нефтяного месторождения и погашение факела производится с помощью жидкостно-газового эжектора (ЖГЭ). Рабочей (активной) средой эжектора является подтоварная вода высокого давления, которая компримирует газ на прием сепаратора 1-ой ступени сепарации.

Перемешивание водогазовой смеси в эжекторе приводит к образованию высокодисперсных газоэмульсионных структур, которые могут осложнить сепарацию 1-ой ступени и сброс подтоварной воды на установке предварительного сброса воды на ДНС-13.

В работах [1, 2] было показано влияние газовой фазы, выделившейся в водной фазе на качество сепарации и отстой воды. Свободный газ, присутствующий в водных каплях, компенсирует разницу плотностей нефти и воды и не позволяет седиментировать глобулам воды в нефтяной среде. С другой стороны, в общем объеме жидкости сепаратора и отстойниках остается еще достаточное количество неотсепарированного свободного газа.

Для исследования формирования высокодисперсных газоэмульсионных структур и условий их расслоения в горизонтальном трубопроводе после ЖГЭ был смонтирован лабораторный стенд, показанный на рис. 1.

Основным элементом установки был эжектор 1, включающий сопло, камеру смешения, камеру для подвода эжектируемого газа и диффузор для преобразования кинетической энергии струи в потенциальную. В качестве газа был использован сжатый воздух, поступающий из баллона 2 через газовый

счетчик 3. Давление рабочей среды (воды) создавалось насосом 4, прием которого через счетчик расхода воды 5 был подведен к емкости 6. Водовоздушная смесь из ЖГЭ по трубопроводу поступала в отстойную емкость 7, в которой производилось расслоение смеси и отделение воздуха в атмосферу. На выходе ЖГЭ был врезан пробоотборный кран 8 для отбора водовоздушной смеси на предмет анализа дисперсного состава воздуха. Регулирование расхода воздуха производилось вентилем 9, а расхода воды – вентилем 10.

В горизонтальный трубопровод 11 были приварены 4 сальника 12, в которые входили щупы 13 с вентелями 14. Перемещение щупа по вертикали позволяло отбирать пробы смеси с любого уровня живого сечения трубопровода на предмет изучения структуры потока и определения положения поверхности раздела вода-воздух. На верхнем конце щуп имел Г-образный загиб во встречную сторону потока для забора пузырей воздуха вместе с водой. Резьбовый вход сопла в форкамеру позволял изменять расстояние ℓ_c .

Давление на выходе из аппарата P_c изменялось с помощью крана 15.

В качестве перекачивающего органа рабочей среды был использован центробежный насос числом оборотов 2900 мин^{-1} , подачей $30 \text{ м}^3/\text{час}$ и напором 200 м.

В качестве счетчиков расходов воды и воздуха использовались расходомеры «Взлет ПР» (г. Санкт-Петербург) и «RVG-G16» (г. Арзамас).

Длина трубопровода 11 составляла 12 м, внутренний диаметр трубопровода – 50 мм. Вертикальная часть трубопровода после ЖГЭ составляла 1,2 м.

Эксперименты проводились на различных диаметрах сопла, давлениях рабочей жидкости и длинах камеры смешения. Установка какого-либо значения давления P_p приводила к изменению расхода воды в диапазоне от 2,0 до $5,0 \text{ м}^3/\text{час}$. Значения P_p в опытах составили 1,43; 0,9; 0,48; 0,35; 0,20 МПа. При этом расходы воды составили соответственно 5,0; 4,2; 3,9; 3,0; 2,0 $\text{м}^3/\text{час}$.

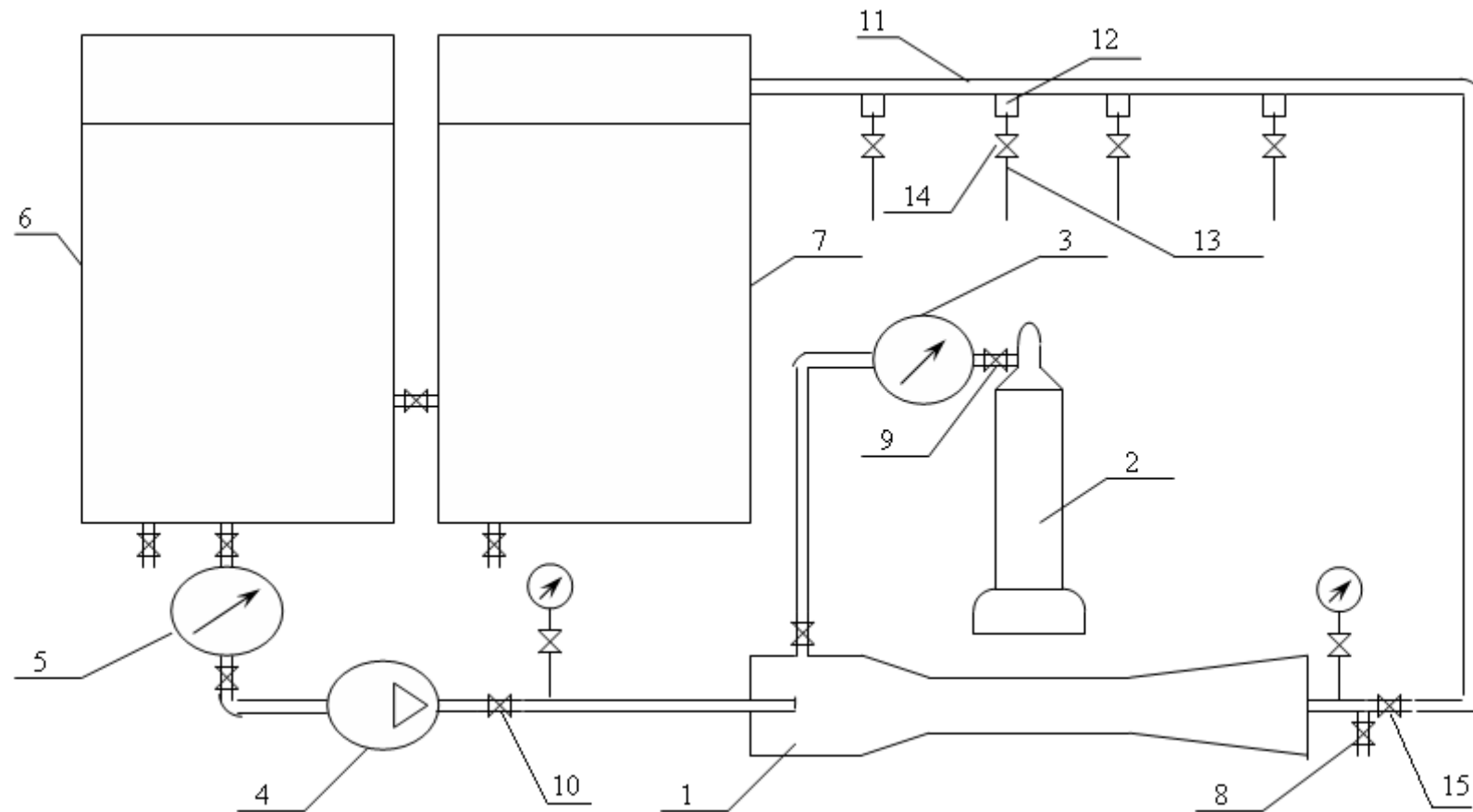


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки

Для измерения дисперсности воздушных пузырей отобранная из крана 8 смесь вводилась в цилиндрический стакан под слой прозрачной жидкости высокой вязкости. Воздушные пузыри всплывая быстро в воде попадая в слой высоковязкой жидкости теряют скорость всплытия и задерживаются в ней. Далее смесь осторожно перемешивалась стеклянной палочкой для равномерного распределения пузырьков воздуха в объеме вязкой жидкости и уменьшения их концентрации. Отобранная проба высоковязкой жидкости с воздушными пузырями рассматривалась на предметном стекле под микроскопом со шкалой объектмикрометра. Производился подсчет количества пузырей по фракциям, а также средневзвешенного диаметра пузырей.

Необходимо отметить, что такая методика замера дисперсности не позволяет определить крупнодисперсную фракцию пузырьков воздуха из-за их быстрого всплытия в воде уже при отборе пробы.

Поэтому крупные пузыри более 0,25 мм не участвуют в расчетах среднего диаметра капель. Однако, учитывая, что ухудшение сепарации может иметь место лишь при высокой степени диспергирования газа, первостепенным в анализе было определение мелкодисперсной фракции пузырей.

Кстати, в [3] отмечается, что средний размер газовых пузырей в ЖГЭ составляет от 1 до 2 мм.

Обработка результатов экспериментов позволила получить уравнение множественной регрессии в степенном виде для определения среднего диаметра пузырей воздуха d_{II} в водной фазе после ЖГЭ ($R^2 = 0,74$):

$$\frac{d_{II}}{D_K} = 1,15 \cdot 10^3 \cdot Re_{\epsilon}^{-1,05} \cdot U_o^{0,08} \cdot \left(\frac{d_c}{D_K}\right)^{-0,26} \cdot \left(\frac{L_K}{D_K}\right)^{-0,15}, \text{ м}, \quad (1)$$

справедливое для диапазонов изменения скоростей и геометрических параметров экспериментальной установки.

$$\text{В (1) } Re_{\epsilon} = \frac{V_{\epsilon} \cdot D_K \cdot \rho_{\epsilon}}{\mu_{\epsilon}}; U_o = Q_g/Q_w; Q_g - \text{расход газа}; Q_w - \text{расход воды};$$

D_K – диаметр камеры смешения; ρ_{ϵ} , μ_{ϵ} – плотность и вязкость воды; V_{ϵ} – скорость течения водной фазы ($V_{\epsilon} = Q_w/0,785 D_K^2$); d_c – диаметр сопла; L_K – длина камеры смешения.

Максимальные значения параметров в (1) в экспериментах составили: $Re_s = 1,1 \cdot 10^5$; $U_o = 1,8$; $\frac{d_c}{D_k} = 0,396$; $\frac{L_k}{D_k} = 30$.

В исследованных диапазонах изменения критериев величина среднего диаметра пузырей составляла 75...250 мкм.

Вместе с мелкодисперсной фракцией под микроскопом просматривались одиночные пузыри больших размеров 0,5...1,5 мм и более, количество которых было мало в связи с их быстрым отделением при отборе пробы.

Необходимо определить гидродинамические условия разделения водогазовой смеси заданной дисперсной структуры.

Щупы, расположенные по длине горизонтального трубопровода имели Г-образные окончания, направленные противоположно течению газожидкостной смеси. Случаи, когда из щупа отбирался только воздух, соответствовали наличию воздушного слоя над водным слоем с диспергированными пузырями воздуха, которые не успели всплыть. Щупы позволяли определить высоту поверхности раздела «воздух-водовоздушная смесь» их смещением по вертикали. При подходе к этой поверхности из щупа начиналась отбираться водовоздушная смесь. Высота поверхности раздела «вода-воздух» составляла от 0,35 до 0,90 диаметра трубы.

Экспериментами установлено существование такой поверхности на всех режимах работы ЖГЭ. При этом высота поверхности по сечению трубы на каждом режиме была различной, но постоянной по длине трубопровода. Образование верхнего воздушного слоя происходило, главным образом, за счет быстрого отделения крупнодисперсной фракции пузырей в потоке.

При малых скоростях течения водовоздушной смеси основной объем воздушных пузырей (около 95 %) успевал в трубопроводе всплыть.

Отсутствие пузырьков воздуха в водном слое свидетельствовало о том, что гидродинамические условия потока способствуют расслоению смеси, т.е. структура потока неустойчива к расслоению. Устойчивость смеси определяется скоростью потока, разностью плотностей газа и жидкости, а также диаметром трубы и вязкостью жидкости.

Медведевым В.Ф. в [4] было показано, что при движении двухкомпонентной смеси в трубопроводе существуют определенные гидродинамические

условия, при которых диспергированные капля или пузыри газа удерживаются турбулентными пульсациями потока и не позволяют им оседать или всплывать.

В основу расчета максимального диаметра пузырьков газа, удерживаемого турбулентным потоком заложено условие превышения так называемой динамической скорости над архимедовой скоростью всплытия пузырей в воде. Закон гидравлического сопротивления в трубах при этом принят согласно формуле Блазиуса, т.е. режима гидравлически гладких труб.

Медведевым В.Ф. [4] получено выражение для расчета максимального диаметра пузырей в виде:

$$\frac{d}{D} = 1,9 \cdot F_r^{0.5} \cdot Re^{-0.56} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_g - \rho_r}}, \quad (2)$$

где: d – диаметр пузыря;

D – диаметр трубопровода;

$F_r = V_B^2 / gD$ – параметр Фруда;

g – ускорение силы тяжести;

$Re = \frac{V_B D \rho_B}{\mu_B}$ – параметр Рейнольдса;

$V_g = Q_g / 0,785 D^2$ – приведенная скорость течения жидкости.

Коэффициент пропорциональности 1,9 нуждается в опытной проверке из-за стесненности пузырей в реальных условиях неполного заполнения сечения трубопровода жидкостью и т.д.

Для упрощения дальнейших расчетов примем, что $F_r^{0.5} \cdot Re^{-0.56} \approx (F/Re)^{0.5}$. Тогда вывод формулы для расчета диаметра пузыря воздуха, удерживаемого турбулентными пульсациями потока приведет к новому виду выражения:

$$d_n = k \sqrt{\frac{V_B \cdot \mu_B}{g(\rho_g - \rho_r)}}, \text{ м} \quad (3)$$

Заметим, что в (3) уже отсутствует диаметр трубопровода, поскольку удерживающие силы в виде турбулентных пульсаций носят местный характер.

Правая часть формулы (3) представляет собой модернизированный параметр устойчивости смеси к расслоению.

Выражение (3) показывает, что с увеличением скорости потока и вязкости жидкости диаметр удерживаемого пузыря возрастает, а с ростом разности плотностей уменьшается.

Отборами проб водного слоя жидкости в горизонтальном трубопроводе было установлено, что при малых расходах воды (2,0...3,0 м³/час) на последнем участке трубопровода происходило всплытие более 95 % пузырей газа. Таким

образом, задаваясь $Q_v = 3,0$ м³/час, $U_o = 1,8$; $\frac{d_c}{D_k} = 0,396$; $\frac{L_k}{D_k} = 30$ расчетный средний диаметр образовавшихся пузырей газа в ЖГЭ по (1) составил $128 \cdot 10^{-6}$ м.

Расчет максимального диаметра капель, удерживаемых потоком по (3) на данном режиме составит:

$$d_{\Pi} = k \cdot 2 \cdot 10^{-4} \text{ м} \quad (4)$$

В таком случае, приравнявая значения $128 \cdot 10^{-6}$, м и $k \cdot 2 \cdot 10^{-4}$, м определим экспериментальное значение коэффициента пропорциональности в (4). Оно соответствует значению 0,64.

Для расчета длины горизонтального трубопровода диаметром D , на которой произойдет расслоение водогазовой смеси с пузырьками газа (воздуха) диаметром d_{Π} можно ориентировочно воспользоваться формулой Стокса для определения скорости всплытия сферической частицы в вязкой среде:

$$U = \frac{d_{\Pi}^2 (\rho_g - \rho_z) g}{18 \mu_g} \quad (5)$$

Располагая производительностью трубопровода Q_v можно рассчитывать длину L трубопровода, на котором происходит полное расслоение по формуле:

$$L = \frac{22,9 Q_v \mu_g}{d_{\Pi}^2 (\rho_g - \rho_z) g D} \quad (6)$$

Пример расчета

1. Задано: $d_n = 75 \cdot 10^{-6}$ м;

$D = 0,325$ м;

$Q_e = 180$ м³/час.

При заданных параметрах скорость всплытия составит 0,312 см/с. Время всплытия пузырька газа от нижней образующей трубы до верхней составит около 104 с. Длина трубопровода с полным расслоением смеси составит 62,7 м.

Расчеты при $Q_e = 180$ м³/час, $d_n = 75 \cdot 10^{-6}$ м показали, что на ДНС-13 Поточного нефтяного месторождения с длиной трубопровода 75 м до врезки в нефтепровод, ведущей в сепаратор I ступени сепарации при диаметре трубопровода 0,325 м происходит полное расслоение водогазовой смеси.

Такой методикой расчета следует пользоваться при проектировании ЖГЭ для утилизации газа низкого давления на площадках ДНС.

Выводы

1. Создан лабораторный стенд и проведены исследования интенсивности эмульгирования водогазовых смесей в жидкостно-газовых эжекторах и разделения этих смесей в горизонтальных трубопроводах после эжекторов.

2. Получено уравнение регрессии для расчета среднего диаметра пузырей газа газоземulsionного потока на выходе из ЖГЭ, показавшее, что к наиболее значимым факторам относятся скорость истечения водной фазы через камеру смешения и диаметр сопла аппарата.

3. Получено экспериментальное выражение для расчета длины горизонтального трубопровода, на котором произойдет расслоение водогазовой смеси после жидкостно-газового эжектора, которую необходимо учитывать при проектировании технологии утилизации газа низкого давления на площадках сепарации системы сбора нефти месторождений.

Литература

1. Абрамова А.А. Влияние множественной эмульсии на работу сепаратора // Тр. ВИИСПТ нефть. Вып. 31. 1982.
2. Мурыжников А.Н. Совершенствование методов измерения, передачи и обобщения параметров продукции нефтяных скважин // Автореферат дисс. на соиск. ученой ст. канд. Техн. наук. – Уфа. – 2005. – 26с.
3. Донец К.Г. Гидроприводные струйные компрессорные установки. М.: Недра. 1990. – 174 с.
4. Медведев В.Ф. Сбор и подготовка неустойчивых эмульсий на промыслах. М.: Недра, 1987. – 144с.