

## ДИАГНОСТИКА ОСАЖДЕНИЯ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ В МУЛЬТИФАЗНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ПОТОКАХ

**Ф. Б. ИСМАЙЛОВА<sup>1</sup>, М. М. АГАСЕНЛИ<sup>1</sup>, П. А. ГЯБИБЛИ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности,  
Баку, Азербайджан

<sup>2</sup> Институт нефтегазовых научных исследований и проектирования, SOCAR,  
Баку, Азербайджан

**Аннотация.** В нефтяных и газовых трубопроводах при гравитационных потоках, в зависимости от структурной формы потока и его мультифазности (наличие фаз, таких как песок, глина, вода, газ, конденсат), часто происходят различные процессы осаждения, что может привести к образованию засоров. Эти процессы негативно влияют на эксплуатационную эффективность трубопроводов и увеличивают энергозатраты.

В статье проведено обобщение и исследование процессов осаждения в потоках, содержащих дисперсную среду (газ, жидкость) и дисперсную фазу (песок, вода), а также определены условия возникновения осаждения дисперсной фазы. Оценены факторы, влияющие на процесс осаждения, и показана возможность диагностики осаждения в зоне перехода гравитационного движения снизу вверх.

**Ключевые слова:** дисперсная фаза, осаждение, гравитация, мультифаза, радиус кривизны.

**Введение.** Известно, что морские месторождения углеводородов, расположенные на значительном расстоянии от берега и в глубоководных бассейнах, создают серьезные трудности при их эксплуатации [1–3]. Исследования показали, что в трубопроводах с низким давлением при гравитационных потоках в участке трубопровода, поднимающемся от морского дна к платформе (в вертикальной трубе), происходит накопление механических примесей и жидкости, отделяющейся от газа. Это вызывает значительное сопротивление движению транспортируемой жидкости или газа, что, в свою очередь, приводит к повышению давления в трубопроводах с низким давлением. На следующем этапе смесь газа, жидкости и механических примесей поступает в систему с пульсациями, что приводит к ускоренному износу дорогостоящих рабочих узлов машин и оборудования, а также к быстрому выходу из строя подводного трубопровода [4–6].

Надежность и эффективность эксплуатации промысловых и магистральных нефтегазовых трубопроводов, а также вопросы контроля их энергетических характеристик в процессе эксплуатации имеют немаловажное значение. Практика эксплуатации трубопроводов показывает, что в них наблюдаются нерегулярные колебания давления и пульсации потока. Волны высокого и низкого ударного давления распространяются вдоль трубопровода. Дополнительное давление, возникающее в системе под воздействием различных гидродинамических факторов, приводит к упругому сжатию транспортируемой среды и упругому расширению трубопровода. В результате динамических воздействий, возникающих при транспортировке многофазных смесей, происходят изменения параметров транспортировки и гидравлических характеристик трубопровода [7–10].

В целом, опыт разработки морских месторождений показывает, что сбор и транспортировка многофазной продукции скважин с больших глубин посредством гравитационных потоков сопряжены с различными трудностями [3–5].

Учитывая вышеизложенное, рассмотрим сначала исследование сил, действующих на жидкость и твердые частицы в вертикальной трубе, на основе принципа Даламбера.

Известно, что принцип Даламбера упрощает уравнения движения за счет использования простых методов статики, позволяя записывать уравнения движения в форме уравнений равновесия. Это достигается путем добавления к системе инерционных сил [11].

Если принять во внимание, что в месте подъема газопровода с низким давлением на платформу по дуге радиуса R на жидкость и твердые частицы (например, песок) действуют в основном силы тяжести, силы Архимеда и силы сопротивления (см. рисунок 1).

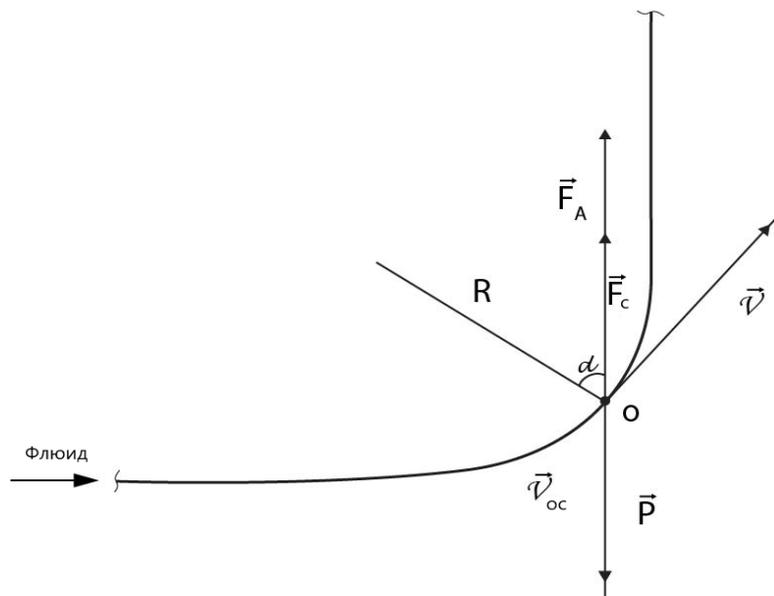


Рисунок 1. – Силы, действующие на механические частицы в восходящей части флюидного столба у скважины

Тогда, согласно принципу Даламбера, можно записать:

$$\vec{F} = \vec{P} + \vec{F}_A + \vec{F}_C \quad (1)$$

Здесь,  $\vec{F}$  – сила, действующая на частицу сферической формы диаметром d, согласно второму закону Ньютона:

$$F = m \cdot a = m \frac{dv}{dt} = \frac{\pi d^3}{\delta} \rho_{\text{мч}} \frac{v^2}{R} \quad (2)$$

Здесь, m – масса частицы, кг; a – ускорение частицы,  $m^2/\text{сек}$ ; t – время, с;

R – радиус кривизны трубы, поднимающейся к площадке, м;  $\rho_{\text{мч}}$  – плотность твердых механических частиц; P – сила тяжести, действующая на частицу (Н), которая рассчитывается следующим образом:

$$P = \frac{\pi d^3}{\delta} \rho_{\text{мч}} g \quad (3)$$

$F_A$  – сила Архимеда, действующая на частицу (Н), определяется по следующему выражению:

$$F_A = \frac{\pi d^3}{\delta} \rho_{g.c} g \quad (4)$$

$\rho_{g.c}$  – плотность дисперсной среды (основной жидкости или газовой среды);  $F_c$  – сила сопротивления потоку, действующая на частицу, Н;

$$F_m = \varphi \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{v_{oc}^2}{2} \rho_{gc} \quad (5)$$

$\varphi$  – коэффициент сопротивления, при больших значениях числа Рейнольдса ( $R_e > 500$ ) является постоянным для сферической частицы  $\varphi = 0.44$ ;  $v_{oc}$  – скорость осаждения частицы в неподвижной среде,  $m^2/сек$ ;

Как видно, на частицу (песчинку или каплю воды) действуют силы, состоящие в основном из суммы силы тяжести, силы Архимеда и силы сопротивления.

Если разность между механической силой и суммой остальных сил меньше силы тяжести, то отделившаяся жидкость и механические примеси оседают в восходящей части трубопровода (в вертикальных трубах), создавая засоры и препятствуя движению многофазного потока.

При низком давлении потока (например, в трубопроводе с низким давлением газа) возможно даже полное прекращение движения.

Возникновение осадков приводит к усилению процессов коррозии, эрозии, износа и, как следствие, к сокращению срока эксплуатации, поэтому гидродинамическое исследование этих процессов является важным.

Учитывая вышеизложенное, для изучения процессов осаждения рассмотрено следующее условие равновесия действующих сил:

$$P > F - (F_A + F_C) \quad (6)$$

Учитывая вышеуказанные выражения для действующих сил, условие равновесия можно записать следующим образом:

$$\rho_{мч} \frac{\pi d^3}{\delta} g = \rho_{мч} \frac{\pi d^3}{\delta} \frac{v^2}{R} - \frac{\pi d^3}{\delta} \rho_{gc} \cdot g - \varphi \frac{\pi d^2}{4} \rho_{gc} \frac{v_{oc}^2}{2} \quad (7)$$

Разделив последнее выражение на выражение  $\frac{\pi d^3}{\delta}$  в предельном случае и проведя несколько преобразований, для определения скорости осаждения в вертикальных трубах получаем следующее выражение:

$$v_{oc} = 1.74 \cdot \sqrt{d \cdot \frac{\rho_{мч}}{\rho_{gc}} \left[ \frac{v^2}{R} - g \left( 1 + \frac{\rho_{gc}}{\rho_{мч}} \right) \right]} \quad (8)$$

Из выражения (8) видно, что для отсутствия осаждения должно выполняться условие  $\left( \frac{v^2}{R} = g \left( 1 + \frac{\rho_{gc}}{\rho_{мч}} \right) \right)$ . То есть, чтобы избежать осаждения, необходимо, чтобы линейная скорость потока удовлетворяла следующему неравенству:

$$v \geq \sqrt{gR \left( 1 + \frac{\rho_{gc}}{\rho_{мч}} \right)} \quad (9)$$

На основе последнего выражения были проведены расчеты для определения зависимости скорости (касательной) от плотности дисперсной среды и твердых механических частиц при заданном радиусе кривизны R.

Расчеты выполнены для различных значений радиуса кривизны (R) и отношения плотностей ( $\rho_{gc}/\rho_{мч}$ ).

Результаты расчетов приведены в таблице.

Таблица. – Расчетные значения скорости  $v$  (м/сек) при различных значениях радиуса кривизны  $R$  и  $\rho_{gc}/\rho_{мч}$

$\frac{\rho_{gc}}{\rho_{мч}}$	Радиус кривизны, $R$ , m			
	0,5	1,0	1,5	2,0
0,01	2,23	3,15	3,85	4,45
0,05	2,27	3,21	3,93	4,54
0,1	2,32	3,28	4,02	4,64
0,2	2,42	3,43	4,20	4,85
0,3	2,52	3,57	4,37	5,05
0,4	2,62	3,71	4,54	5,24
0,5	2,71	3,84	4,70	5,42
0,6	2,80	3,96	4,85	5,60

На основе данных таблицы построены зависимости  $v = f(\rho_{gc}/\rho_{мч})$  при различных радиусах кривизны (рисунок 2) и  $v = f(R)$  при различных значениях отношения плотностей  $\rho_{gc}/\rho_{мч}$  (рисунок 3).

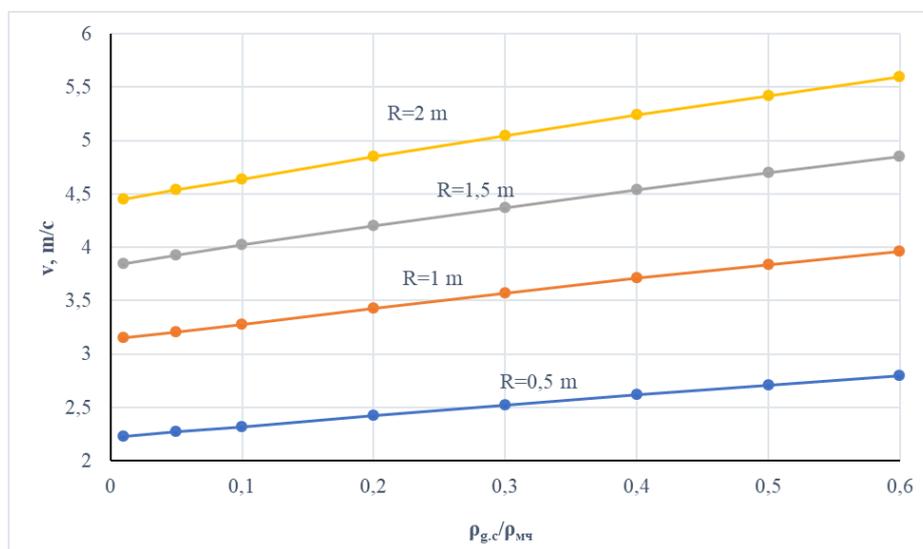
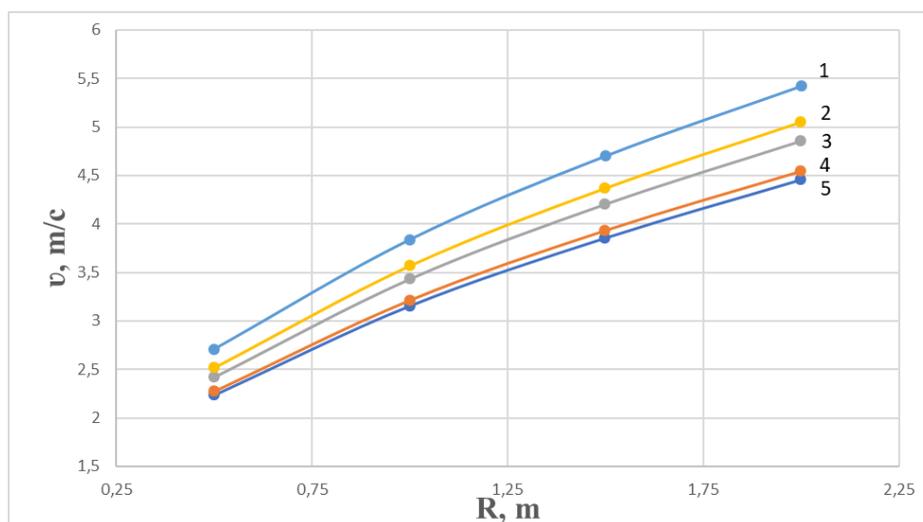


Рисунок 2. – Зависимости  $v = f(\rho_{gc}/\rho_{мч})$  при различных радиусах кривизны



1 –  $\rho_{gc}/\rho_{мч} = 0,5$ ; 2 –  $\rho_{gc}/\rho_{мч} = 0,3$ ; 3 –  $\rho_{gc}/\rho_{мч} = 0,2$ ; 4 –  $\rho_{gc}/\rho_{мч} = 0,05$ ; 5 –  $\rho_{gc}/\rho_{мч} = 0,01$

Рисунок 3. – Зависимости  $v = f(R)$  при различных значениях отношения плотностей  $\rho_{gc}/\rho_{мч}$

Как видно из рисунков 2 и 3, в обоих случаях линейная скорость ( $v$ ) практически пропорционально увеличивается в зависимости от указанных параметров ( $\rho_{gc}/\rho_{мч}$  и  $R$ ), причем эта зависимость проявляется более интенсивно при увеличении параметра  $\rho_{gc}/\rho_{мч}$  по сравнению с  $R$ .

Таким образом, в результате проведенных расчетов и анализа установлено, что для предотвращения осаждения твердых механических частиц в вертикальных трубах скорость потока должна быть выше значений, приведенных в таблице и на рисунках 2 и 3, в зависимости от радиуса кривизны и соотношения фаз.

Иными словами, при скоростях потока, находящихся ниже кривых зависимости, вероятность осаждения частиц и образования засоров значительно возрастает.

#### **Выводы:**

– Проведено исследование сил, действующих на механические и жидкие частицы при многофазных потоках в подводном трубопроводе, и на основе принципа Даламбера определено уравнение равновесия.

– Для анализа и оценки процессов осаждения на основе условия равновесия сил, действующих на частицы дисперсной фазы в восходящей части многофазного потока к морской платформе, предложено математическое выражение для определения скорости осаждения.

– Диагностика осаждения дисперсной фазы выполнена с учетом зависимости от диаметра механических частиц, радиуса кривизны места соединения с вертикальной трубой, скорости потока и плотностей фаз.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Мирзаджанзаде А.Х., Сулейманов А.Б. Морской нефти большое будущее // Известия ВУЗов. «Нефть и газ», 1980, № 6, 37–40 с.
2. Гусейнов Ч.С., Иванец Д.В. Обустройство морских нефтегазовых месторождений. М.: Нефть и газ, 2003, 608с.
3. İsmayılov Q.Q., İsmayılova F.B., İskəndərov E.X., Neftqazçıxarmada multifazalı texnologiyalar, Bakı, Elm, 2018, s. 248.
4. Движение газожидкостных смесей в трубах / Мамаев В.А., Одишария Г.Э., Клапчук О.В. и др. М.: Недра, 1978, 272 с.
5. Mənsur Şahlarlı. Xəzər dənizində 300 m dərinlikdə dik borulara təsir edən hidrodinamik qüvvələrin tədqiqi. Bakı, ANT, 10, 2022, s 60–64.
6. İsmayılova F.B. Multifazalı relyefli boru kəmərlərində qravitasiya itkilərinin təyini // ANT, 17.05.2021, s. 38–42.
7. G.G. İsmayılov, E.K. İskenderov, F.B İsmayılova, G.A. Zeinalova. Controlled methods to suppress pressure pulsations in multiphase pipelines. Journal of Engineering Physics and Thermophysics 93 (1), p. 216–222.
8. F.B. İsmayılova, G.G. İsmayılov, É.K. İskenderov, K.T. Dzhakhangirova. Construction of a mathematical model of the flow characteristics of a multiphase pipeline with regard for the phase transitions in it. Journal of Engineering Physics and Thermophysics 96 (1), p. 73–79.
9. G.G. İsmayılov, V.H. Nurullayev, E.K. İskenderov. The role of saturated vapor pressure of cavitations in the process of oil supply. Bull. Environ., Pharmacol. Life Sci 5, p. 15–24.
10. E.X.İskəndərov, F.B. İsmayılova, G.A.Zeynalova, M.F. Şükürlü. Laminar axınlarda sürət-sərf xarakteristikalarının diaqnostikası. Azərbaycan Neft təsərrüfatı, June - iyul 2024, № 6–7, s. 32–37.
11. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики для вузов, 18-е изд. М.: Высшая школа, 2010, 418 с.