



ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОСЕДАНИЯ ЧАСТИЦ ПРИ СЕПАРАЦИИ КОНДЕНСИРУЮЩИХ ГАЗОВ

Г. Г. Исмайлов¹, Р. А. Исмайлов¹, Х. Н. Бабиров²

¹Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Баку, Азербайджан;

²НИПИ «Нефтегаз», SOCAR, Баку, Азербайджан

Investigation of the dynamics of particle settling during separation condensing gases

G. G. Ismayilov¹, R. A. Ismailov¹, X. N. Babirov²

¹Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan; ²«OilGasScientificResearchProject» Institute, SOCAR, Baku, Azerbaijan

ABSTRACT

The experience of operating gas separation process units shows that it is not always possible to achieve effective separation of liquid particles. Traditional calculation formulas for determining the settling rate of particles in separators are based on the thermodynamic equilibrium of the main parameters of the incoming gas flow (pressure, density). At the same time, well production, in particular condensing gases, is a nonequilibrium system, which is characterized by a certain delay (relaxation times) in changing parameters. As a result of this delay, the settling rate of particles in the separator does not have time to reach the steady state Stokes regime corresponding to effective separation. The paper proposes a nonequilibrium model for the sedimentation rate of particles and developed an algorithm for its numerical implementation. Using this algorithm, multivariate computational experiments were carried out to study the dynamics of particle settling. It was found that for the effective separation of liquid particles in a gravity separator, the relaxation time for the settling velocity of the particles should not exceed 10 sec.

KEYWORDS

Gas separation;
Gravity separator;
Particle settling rate;
Relaxation time.

© 2022 «OilGasScientificResearchProject» Institute. All rights reserved.

Введение

Технологический расчет сепараторов обычно проводится для несколько упрощенных условий, в которых пренебрегают некоторыми обстоятельствами, характеризующими действительный процесс сепарации.

Действительная картина движения частиц в сепараторе является более сложной. Поток газа, входя в сепаратор, несет с собой частицы с определенной скоростью. В сепараторе скорость газа и скорость движения частиц изменяются, что занимает некоторый промежуток времени и имеет определенное значение для отделения частиц. Анализ многочисленных исследований показывает, что такая картина характерна для конденсирующих газов, обладающих неравновесными свойствами [1-3]. Ввиду малости пребывания частиц в сепараторе не всегда удается достичь постоянной скорости оседания. Отмеченное обстоятельство необходимо учитывать при расчете гравитационных сепараторов. За время пребывания частиц в сепараторе они не всегда могут достичь постоянной скорости осаждения, что следует учитывать при расчете гравитационных сепараторов.

При расчетах гравитационных сепараторов по газу

скорость движения частиц принимается постоянной, допускается, что частицы имеют шарообразную форму и в процессе сепарации не происходит ни их дробление, ни коагуляция [4]. В общем случае, в гравитационном сепараторе скорость оседания частиц произвольного размера определяется из условия равенства сил тяжести и сопротивления. При этом для практических расчетов традиционно применяются различные расчетные формулы, которые справедливы в основном для установившейся скорости движения частиц.

Если принимать, что величина плотности газа не меняется и размеры частиц не превышают 80 мкм, то расчет, как правило, производится по формуле Стокса:

$$W = \frac{d^2(\rho_v - \rho_i)g}{18\mu_i}, \quad (1)$$

где W – относительная скорость оседания частиц, м/с; d – диаметр частиц, м; ρ_v , ρ_i – плотности соответственно частицы и газа, кг/м³; μ_i – динамическая вязкость газа, кг/(м×с); g – ускорение свободного падения, м/с².

Ниже была исследована динамика оседания частиц в гравитационном сепараторе с учетом неравновесных свойств конденсирующих газов. С учетом особенностей сепарируемых газов и введением соответствующих нерав-

*E-mail: ramismaylov@mail.ru

<http://dx.doi.org/10.5510/OGP2022SI100654>

новесных параметров для скорости оседания частиц в формулу Стокса можно написать обобщенное соотношение в виде:

$$\alpha \frac{dW}{dt} + W = a(\rho_v - \rho_l) + \beta \frac{a(\rho_v - \rho_l)}{dt}, \quad (2)$$

где α – неравновесный параметр, учитывающий релаксацию для изменения скорости оседания; β – неравновесный параметр, учитывающий релаксацию для изменения разности плотностей частиц жидкости и газа; a – обобщенный параметр который заменяет выражение $d^2g/18\mu$, в соотношении (1).

При допущении, что скорость оседания и разность плотностей газа и частиц остаются постоянными, формула (2) превращаются в традиционную формулу Стокса. Если же считать постоянной только разность плотностей частиц и газа, то соотношение (2) можно записать в следующем виде:

$$\alpha \frac{dW}{dt} + W = a(\rho_v - \rho_l) \quad (3)$$

Соотношение (3) представляет собой относительно изменения скорости осаждения частиц в сепараторе линейное неоднородное дифференциальное уравнение первого порядка. Общее решение этого уравнения при начальном условии

$$W(0) = W_0 \quad (4)$$

запишется в следующем виде [5]:

$$W(t) = a(\rho_v - \rho_l) + Ce^{-\frac{t}{\alpha}} \quad (5)$$

С учетом начального условия (4) в соотношении (5) получаем:

$$W_0 = a(\rho_v - \rho_l) + Ce^{-\frac{0}{\alpha}}$$

или

$$C = W_0 - a(\rho_v - \rho_l)$$

Тогда соотношение (5) будет иметь вид:

$$W(t) = a(\rho_v - \rho_l) - [a(\rho_v - \rho_l) - W_0] e^{-\frac{t}{\alpha}} \quad (6)$$

Если принять, что в начальный момент времени скорость оседания частиц равна нулю $W_0 = 0$, то перейдем к следующему соотношению:

$$W(t) = a(\rho_v - \rho_l) - [a(\rho_v - \rho_l)] e^{-\frac{t}{\alpha}}$$

или

$$W(t) = a(\rho_v - \rho_l) \left(1 - e^{-\frac{t}{\alpha}}\right) \quad (7)$$

Используя, что формулу Стокса (1) для скорости оседания частиц в сепараторе можно представить как $W_{c_r} = a(\rho_v - \rho_l)$, то формулу (7) можно переписать в следующем виде:

$$W(t) = W_{c_r} \left(1 - e^{-\frac{t}{\alpha}}\right) \quad (8)$$

Анализ последнего соотношения (8) показывает, что при $t \rightarrow \infty$ скорость оседания частиц приближается к значению, определяемому по формуле Стокса (1). Также видно, что чем меньше значение неравновесного параметра α , тем быстрее будет достигаться значение скорости оседания частиц по Стоксу. В случае $\alpha = 0$, то есть без учета возможного проявления неравновесных свойств, входящего в сепаратор газового потока, получаем также формулу Стокса.

Особенностью процесса сепарации неравновесных газов является то, что при прохождении газового потока через сепаратор, его термодинамические параметры выходят на равновесный режим не сразу, а с некоторым запаздыванием, свойственным поведению неравновесных систем. Это в свою очередь сказывается на скорости осаждения частиц в сепараторе.

Таким образом, было получено расчетное соотношение (8) для скорости оседания частиц в гравитационном сепараторе. Полученное соотношение позволяет исследовать динамику осаждения частиц в сепараторе. На основе этого соотношения были произведены вычислительные эксперименты при различных вариантах исходных данных. Для удобства проведения дальнейших расчетов был разработан вычислительный алгоритм, который дается ниже.

1. Вычислительный алгоритм для исследования динамики скорости оседания частиц в гравитационном сепараторе

Ввод исходных данных

- Давление на входе сепаратора, P (МПа);
- Температура газа на входе, T (К);
- Диаметр частиц, d (мкм);
- Плотность частиц жидкости, ρ_v (кг/м³);
- Плотность газа при стандартных условиях, ρ_c (кг/м³);
- Давление при стандартных условиях, P_c (МПа);
- Температура при стандартных условиях, T_c (К);
- Ускорение силы тяжести, g (м/сек²);
- Время релаксации для природного газа, α (сек).

2. Расчетная часть

2.1 Определение плотности газа при заданной температуре (T) и заданном давлении (P)

Расчет производится согласно ГОСТ 30319.1-96. Газ природный. Методы расчета физических свойств [6]:

$$\rho_l - \rho_{p,T} = \frac{\rho_c \times T_c \times P}{P_c \times T}$$

2.2 Определение абсолютной вязкости газа при заданной температуре (T) и заданном давлении (P)

Соответствующие расчеты производятся также согласно ГОСТ 30319.2-2015. Газ природный. Методы расчета физических свойств [6].

Определяется абсолютная вязкость газа при заданной температуре (T) и атмосферном давлении с достаточной точностью по соотношению:

$$\mu_T = 3.24 \times \frac{T^{0.5} + 1.37 - 9.09 \times \rho_c^{0.125}}{\rho_c^{0.5} + 2.08}$$

Абсолютная вязкость газа при заданной температуре (T) и повышенных значениях давления (P , до 12 МПа) определяется по следующим соотношениям:

$$\mu_l = \mu_{T,P} = \mu_T \times C_\mu,$$

где C_μ - поправочный коэффициент, определяемый по значениям приведенного давления P_n и приведенной температуры T_n :

$$C_\mu = 1 + \frac{P_n^2}{30 \times (T_n - 1)}$$

Приведенные давление P_n и приведенная температура T_n вычисляются по формулам:

$$P_n = \frac{P}{P_{нк}} \text{ и } T_n = \frac{T}{T_{нк}}$$

где значения псевдокритического давления $P_{нк}$ и псевдокритической температуры $T_{нк}$ вычисляются соответственно следующим образом:

$$P_{нк} \approx 2.9585 \times (1.608 - 0.05994 \times \rho_c)$$

2.3 Определение скорости оседания частиц по Стоксу при заданной температуре (T) и заданном давлении (P)

Расчет производится по формуле (1):

$$W_{ct} = \frac{d^2(\rho_v - \rho_l)g}{18\mu_u}$$

2.4 Определение расчетных значений скорости оседания частиц в сепараторе в зависимости от времени

Расчет производится по соотношению (8):

$$W(t) = W_c \left(1 - e^{-\frac{t}{\alpha}}\right)$$

Задавая последовательно для t времена 1, 2, 3, ... сек, получаем соответствующие расчетные значения для скорости оседания частиц в гравитационном сепараторе.

3. Вывод результатов расчетов на печать

Давление газа – P ; МПа

Температура газа – T ; К

Время релаксации – α ; сек

Скорость оседания по Стоксу – W_{ct} ; м/сек

Динамика оседания частиц в сепараторе:	
Время, t	Скорость оседания частиц
1	$W(1)$
2	$W(2)$
3	$W(3)$
---	---

Разработанный алгоритм позволяет исследовать динамику оседания частиц в гравитационном сепараторе при различных значениях давления и температуры газа, а также значениях времен релаксации для мультифазного газового потока с учетом проявления неравновесных свойств. Для получения более полной картины вычисли-

тельные эксперименты были проведены при различных вариантах исходных данных.

Режим давления газа на входе сепаратора последовательно принимался в 2; 4 и 6 МПа. Температура газа была рассмотрена также на 3-ех уровнях: 250; 273 и 293 К. Времена релаксации для изменения скорости оседания частиц жидкости принимались соответственно 1; 5 сек и далее с шагом 5 до 100 сек включительно.

Результаты проведенных вычислительных экспериментов сведены в таблицу. Как видно из результатов расчетов, проведенных по варианту 1. (давление газа $P = 2$ МПа; температура газа $T = 273$ К; время релаксации для изменения скорости оседания $\alpha = 1$ сек), расчетное значение по Стоксу $W_{ct} = 0.33$ м/сек достигается уже через 5 сек. При этих же режимах давления и температуры, но при запаздывании для изменения скорости оседания в 10 сек, выход на установившийся режим оседания частиц происходит через 42 сек. Приняв время релаксации для скорости оседания частиц в гравитационном сепараторе в 100 сек, получаем для времени достижения установившегося режима оседания довольно большое значение 419 сек. То есть должно пройти около 7 минут, чтобы достигнуть режима эффективной сепарации по Стоксу. Если учесть, что время прохождения газового потока через сепаратор составляет порядка 50 сек, то однозначно максимально эффективный режим сепарации не достигается.

Для получения полной картины оседания частиц в сепараторе были построены кривые для зависимости времени выхода на режим по Стоксу (T_{san}) от релаксации для скорости оседания (α) при различных режимах температуры и давления (рис.1 и 2).

Как видно из рисунков, для выхода на установившийся режим оседания по Стоксу, релаксация для скорости оседания частиц в сепараторе не должна превышать промежутка времени в 10 секунд. Это наиболее благоприятный режим, при котором будет достигаться максимальный эффект отделения частиц в сепараторе за время прохождения газового потока через сепаратор. Здесь следует отметить, что релаксация для изменения скорости оседания частиц в сепараторе, по всей видимости, связана с релаксацией плотности и давления газового потока за время пребывания в сепараторе. Установление характера этой связи будет являться объектом исследования планируемых авторами дальнейших исследований.

Результаты обработки результатов проведенных вычислительных экспериментов позволяют сформулировать нижеследующие основные выводы.

Выводы

- Результаты многовариантных вычислительных экспериментов для исследования динамики оседания частиц в гравитационном сепараторе, позволили оценить времена выхода на установившийся режим по Стоксу, соответствующего эффективной сепарации.
- Установлено, что ввиду проявления неравновесных свойств у конденсирующих газов, скорость оседания частиц в сепараторе не успевает выходить на установившийся режим.
- С целью повышения эффективности сепарации мультифазных конденсирующих газов, необходимо изыскание новых конструктивных решений для усовершенствования сепарационных установок. Эти решения, должны обеспечить необходимое время прохождения газового потока через сепаратор с целью достижения установившегося режима сепарации. В противном случае желаемая эффективность сепарации отмеченных газов, несмотря на улучшение отделения частиц за счет закручивания потока и центробежных ускорений, а также за счет эффекта дросселирования не будет достигнута.

Результаты вычислительных экспериментов для оценки скорости оседания частиц в гравитационном сепараторе						Таблица
Вариант №	Давление, МПа	Температура, К	Значение α	W_{cr} м/сек	Время выхода на W_{cr} , сек	
1	2	273	1	0.33	5	
2	2	273	10	0.33	42	
3	2	273	100	0.33	419	
4	2	250	1	0.35	5	
5	2	250	10	0.35	43	
6	2	250	100	0.35	425	
7	2	293	1	0.31	5	
8	2	293	10	0.31	42	
9	2	293	100	0.31	413	
10	4	273	1	0.31	5	
11	4	273	10	0.31	42	
12	4	273	100	0.31	413	
13	4	250	1	0.33	5	
14	4	250	10	0.33	42	
15	4	250	100	0.33	419	
16	4	293	1	0.29	5	
17	4	293	10	0.29	41	
18	4	293	100	0.29	407	
19	6	273	1	0.29	5	
20	6	273	10	0.29	41	
21	6	273	100	0.29	407	
22	6	250	1	0.29	5	
23	6	250	10	0.29	41	
24	6	250	100	0.29	407	
25	6	293	1	0.28	5	
26	6	293	10	0.28	41	
27	6	293	100	0.28	403	

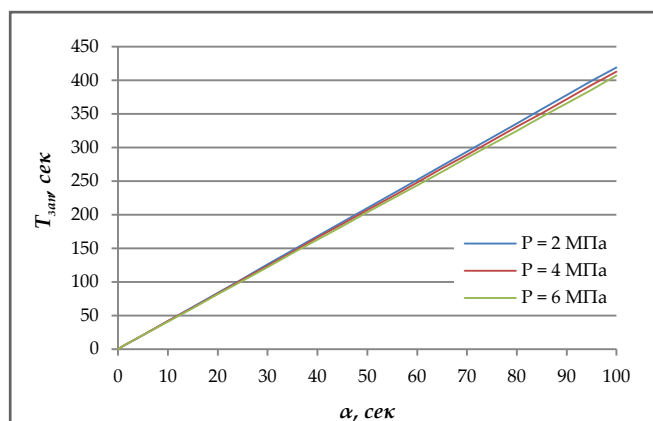


Рис. 1. Зависимость времени выхода на режим по Стоксу от времени релаксации для скорости оседания частиц при различных температурах

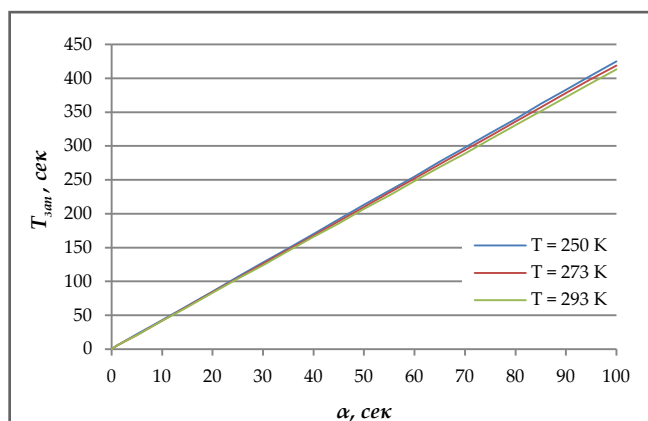


Рис. 2. Зависимость времени выхода на режим по Стоксу от времени релаксации для скорости оседания частиц при различных режимах давления

Литература

1. Исмаилов, Р. А. (2007). Влияние неравновесных свойств газов на технологические процессы их сепарации. Известия ВТУЗ Азербайджана, 6(52), 11-13.
2. Исмаилов, Р. А. (2009). Особенности сепарации неравновесных газов. Азербайджанское нефтяное хозяйство, 11, 37-39.
3. Исмаилов, Р. А. (2017). Исследования неравновесных свойств природных газов. Нефтегазовое дело, 15(3), 85-90.
4. Гужов, А. И., Титов, В. Г., Медведев, В. Ф., Васильев, В. А. (1978). Сбор, транспорт и хранение природных углеводородных газов. Москва: Недра.
5. Корн, Г., Корн, Т. (1974). Справочник по математике для научных работников и инженеров. Москва: Наука.
6. ГОСТ 30319.2-2015. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Москва: Стандартиформ.

References

1. Ismayilov, R. A. (2007). Influence of nonequilibrium properties of gases on technological processes of their separation. Proceedings of Azerbaijan High Technical Educational Institutes, 6(52), 11-13.
2. Ismayilov, R. A. (2009). Features of separation of nonequilibrium gases. Azerbaijan Oil Industry, 11, 37-39.
3. Ismayilov, R. A. (2017). Study of nonequilibrium properties of natural gases. Oil and Gas Business, 15(3), 85-90.
4. Guzhov, A. I., Titov, V. G., Medvedev, V. F., Vasilyev, V. A. (1978). Collection, transportation and storage of natural hydrocarbons. Moscow: Nedra.
5. Korn, G. A., Korn, T. M. (1974). Handbook of mathematics for engineers and scientists. Moscow: Nauka.
6. GOST 30319.2-2015. Natural gas. Methods of calculation of physical properties. Moscow: Standartinform.

Исследование динамики оседания частиц при сепарации конденсирующих газов

Г. Г. Исмаилов¹, Р. А. Исмаилов¹, Х. Н. Бабиров²

¹Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Баку, Азербайджан; ²НИПИ «Нефтегаз», SOCAR, Баку, Азербайджан

Реферат

Опыт эксплуатации технологических установок сепарации газа показывает, что не всегда удается достичь эффективного отделения частиц жидкости. Традиционные расчетные формулы для определения скорости оседания частиц в сепараторах основаны на термодинамическом равновесии основных параметров входящего газового потока (давления, плотности). Вместе с тем, продукция скважин, в частности конденсирующие газы, представляют собой неравновесную систему, которым свойственны некоторая задержка (времена релаксации) в изменении параметров. Как результат этой задержки, скорость оседания частиц в сепараторе не успевает выходить на установившийся режим по Стоксу, соответствующий эффективной сепарации. В работе предложена неравновесная модель для скорости оседания частиц и разработан алгоритм для ее численной реализации. С помощью этого алгоритма проведены многовариантные вычислительные эксперименты для исследования динамики оседания частиц. Установлено, что для эффективной сепарации частиц жидкости в гравитационном сепараторе, время релаксации для скорости оседания частиц не должна превышать 10 сек.

Ключевые слова: сепарация газа; гравитационный сепаратор; скорость оседания частиц; время релаксации.

Kondensləşən qazların separasiyası zamanı hissəciklərin çökməsi dinamikasının tədqiqi

Q. Q. İsmayılov¹, R. Ə. İsmayılov¹, H. N. Bəbirov²

¹Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti, Bakı, Azərbaycan;

²«Neftqazəlmətdəqiqatlayih» İnstitutu, Bakı, Azərbaycan

Xülasə

Separasiya texnoloji qurğularının istismar təcrübəsi göstərir ki, maye hissəciklərin effektiv çökməsini heç də həmişə əldə etmək olmur. Separatorlarda hissəciklərin çökməsi sürətinin təyini üçün mövcud hesabi düsturlar daxil olan qaz axınının əsas parametrlərinin (təzyiq və sıxlığın) termodinamiki tarazlılığına asaslanır. Lakin quyu məhsulu, məsələn kondensləşən qazlar parametrləri müəyyən gecikmə (relaksasiya müddəti) ilə dəyişə bilən qeyri-tarazlı sistemlər kimi səciyyələnir. Həmin gecikmə nəticəsində separatorada hissəciklərin çökmə sürəti effektiv separasiyanı təmin edən Stoksa görə qararlaşmış rejimə çata bilmir. İşdə hissəciklərin çökmə sürətinin təyini üçün qeyri-tarazlı model təklif olunmuş və onun icrası üçün xüsusi alqoritm tərtib olunmuşdur. Təyin olunmuşdur ki, qravitasiya separatorunda maye hissəciklərinin effektiv ayrılması üçün, çökmə sürətinin relaksasiya müddəti 10 san aşmamalıdır.

Açar sözlər: qazın separasiyası; qravitasiya separatoru; hissəciklərin çökmə sürəti; relaksasiya müddəti.