

Подоплелов Евгений Викторович,

к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,

e-mail: uch_sovet@angtu.ru

Ершов Егор Витальевич,

студент гр. ТМм-24-1, ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»

ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА КАПЕЛЬНОЙ ЖИДКОСТИ В ГАЗЕ НА ПРОЦЕСС СЕПАРАЦИИ

Podoplelov E.V., Ershov E.V.

EFFECT OF THE QUANTITY OF DROP LIQUID IN GAS ON THE SEPARATION PROCESS

Аннотация. В работе оценено влияние содержания капельной жидкости в газовом потоке на эффективность процесса сепарации.

Ключевые слова: газожидкостной поток, капельная жидкость, сепарация, стесненное осаждение.

Abstract. The paper evaluates the effect of the liquid droplet content in the gas stream on the efficiency of the separation process.

Keywords: gas-liquid flow, drip liquid, separation, and constrained precipitation.

Разделение газо-жидкостных систем широко распространено в нефтегазодобыче и нефтегазопереработке, и влияет на качество получаемых продуктов. В связи с этим актуальной задачей является повышение надежности методики по расчету и проектированию газожидкостных сепараторов.

Одними из наиболее распространенных устройств для разделения газа и жидкости являются горизонтальные полые газожидкостные сепараторы. Сепарация углеводородного газа – ключевой этап подготовки сырья к транспортировке и переработке. Она позволяет отделить газ от капельной жидкости (углеводородного конденсата, воды и механических примесей). Эффективность этого процесса напрямую зависит от множества факторов, среди которых особенно важно содержание капельной жидкости в исходном газовом потоке.

В работах [1-5] предложена методика расчета длины зоны сепарации аппарата, предназначенного для отделения капельной жидкости от газа. В расчетах принимались следующие исходные данные: диаметр аппарата (D) варьировался от 1,2 до 5,2 м, объемный расход газа ($V=56530 \text{ м}^3/\text{ч}$), плотность газа (ρ_r) $3,03 \text{ кг/м}^3$, коэффициент динамической вязкости газа (μ_r) $0,011 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$, плотность жидкости ($\rho_{ж}$) 926 кг/м^3 . По опытным данным в нефтяных трапах преобладают капли диаметром (d) 100 мкм (0,1 мм), однако для сепараторов природных газов таких данных нет. Поэтому в работе произвольно задавались рядом значений d от 0,05 до 0,8 мм.

Время осаждения капелек жидкости в зоне сепарации может быть определено:

$$\tau_{\text{ос}} = D/W_{\text{ос}}, \quad (1)$$

где W_{oc} – скорость осаждения, м/с.

Для определения скорости осаждения, входящей в формулу (1), предварительно рассчитывался критерий Архимеда (Ar) по значению которого определялся режим осаждения капелек жидкости в сепараторе, а затем, в зависимости от режима осаждения, рассчитывался критерий Рейнольдса (Re) по соответствующей формуле.

Скорость осаждения капелек жидкости в сепараторе рассчитывалась [6]:

$$W_{oc} = Re \cdot \mu_r / (d \cdot \rho_r).$$

Далее по формуле (1) определялось время осаждения капелек жидкости, длина зоны сепарации: $L = W_r \cdot \tau_{oc}$, где $W_r = 4V/\pi D^2$ – линейная скорость газа.

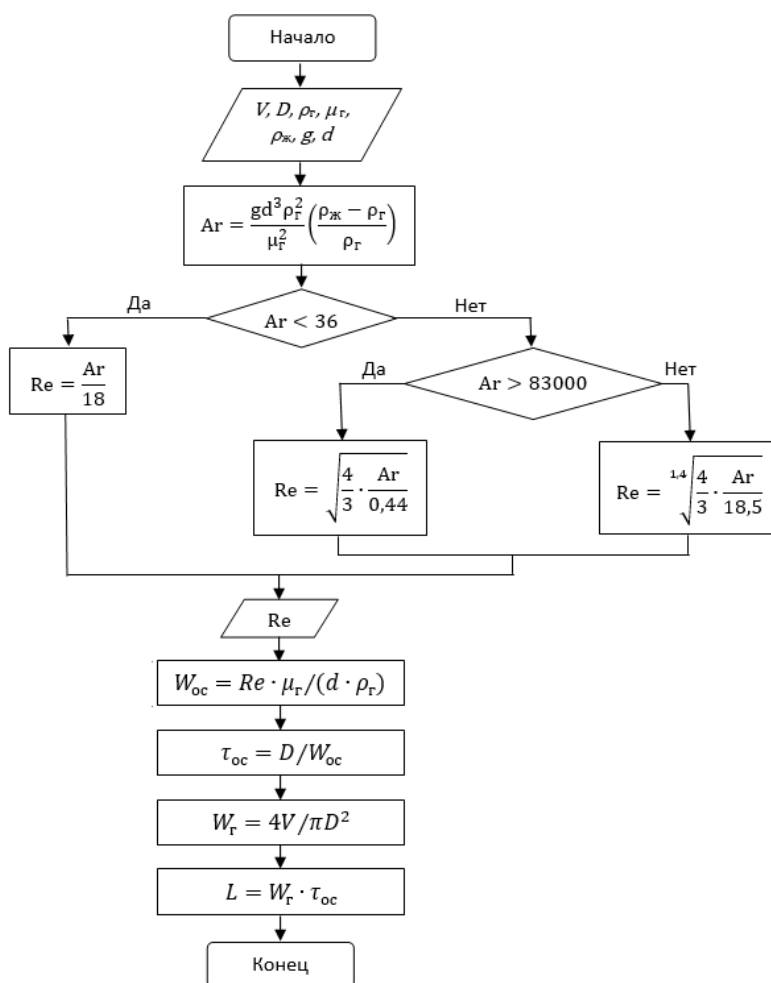


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма расчета длины зоны сепарации

На рисунке 1 представлена блок-схема алгоритма расчета длины зоны сепарации. В качестве исходных данных для расчета принимались следующие: V , D , ρ_r , μ_r , $\rho_{ж}$, d и g , где g – ускорение силы тяжести. Затем рассчитывался критерий Архимеда, по значению которого определялся режим осаждения. Из литературных данных [7, 8], известно, что при $Re < 2$, или при $\psi \cdot Ar < 36$, где ψ

– это коэффициент формы (принимался равным 1), имеет место ламинарный режим осаждения. Переходный режим возникает при $2 \leq Re \leq 500$, или при $36 \leq \psi \cdot Ar \leq 83000$. Турбулентный режим наблюдается при $Re > 500$, или при $\psi \cdot Ar > 83000$. Затем рассчитывался критерий Рейнольдса (Re) в зависимости от режима по соответствующей формуле (рисунок 1), далее определялась скорость осаждения капелек жидкости W_{oc} , время осаждения τ_{oc} , линейная скорость газа W_r и длина зоны сепарации L .

Расчет выполнялся с помощью средств Microsoft Office Excel. Результаты расчетов для аппарата диаметром $D = 3,2$ м представлены в таблице 1. Расчет производился для диаметра капелек жидкости от 0,05 мм до 0,8 мм. При диаметре капелек жидкости до 0,05 мм и меньше будет наблюдаться ламинарный режим осаждения, при диаметре от 0,8 мм и больше – турбулентный режим, при диаметре от 0,08 мм до 0,7 мм – переходный режим.

Таблица 1

Результаты расчетов для аппарата $D=3,2$ м

d , мм	0,05	0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
Ar	28,3	116,1	226,7	1813,9	6121,8	14510,9	28341,6	48974,2	77769,3	116087,1
Режим	ламинарный	переходный								турбулентный
Re	1,6	4,6	7,4	32,5	77,5	143,5	231,4	342,1	475,9	593,1
W_{oc} , м/с	0,11	0,21	0,27	0,59	0,94	1,30	1,68	2,07	2,47	2,69
τ_{oc} , с	28,0	15,5	12,0	5,4	3,4	2,5	1,9	1,5	1,3	1,2
W_r , м/с	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
L , м	7,04	3,89	3,01	1,37	0,86	0,62	0,48	0,39	0,33	0,30

По результатам расчетов по блок схеме (рисунок 1) построена графическая зависимость длины зоны сепарации от диаметра капель жидкости (рисунок 2) при разных значениях диаметров аппаратов.

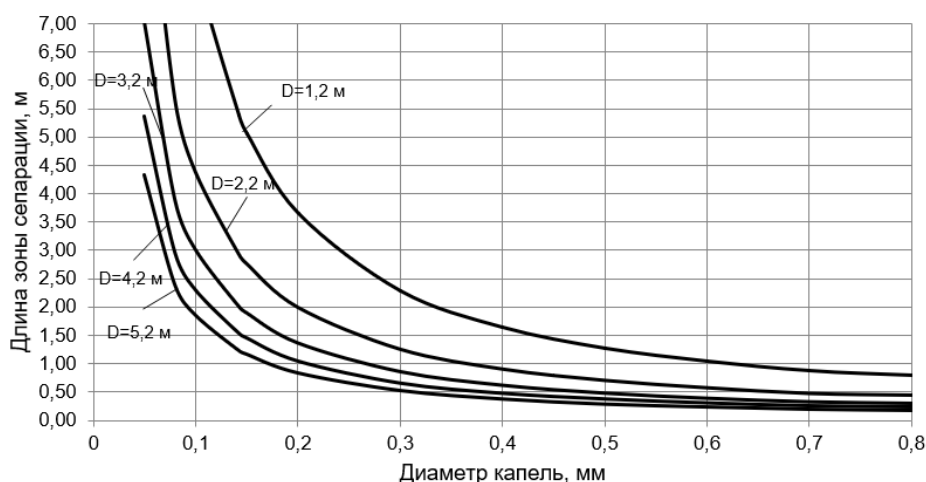


Рисунок 2 – Зависимость длины зоны сепарации от диаметра капель при различных значениях диаметров аппарата

Однако, выполненный расчет не учитывает стесненного осаждения капелек жидкости в газе. Скорость осаждения капелек жидкости в газе определяется критерием Архимеда, являющимся мерой отношения подъемной силы к вязкостным силам. Значение критерия Архимеда определяется разностью плотностей фаз. Стесненное осаждение может быть учтено плотностью газожидкостного потока: $\rho_{гж} = \varphi_{г} \cdot \rho_{г} + (1 - \varphi_{г}) \cdot \rho_{ж}$. Примем, что в газовом потоке содержится 1 % капельной жидкости по объему, тогда газосодержание $\varphi_{г}=0,99$.

Критерий Архимеда с учетом плотности газожидкостного потока:

$$Ar = \frac{gd^3 \rho_{гж}^2}{\mu_{г}^2} \left(\frac{\rho_{ж} - \rho_{гж}}{\rho_{гж}} \right).$$

Поскольку небольшое количество жидкости, как правило, не оказывает существенного влияния на вязкость газовой смеси, которая в первую очередь определяется другими факторами, такими как температура, давление и природа самого газа, поэтому вязкость определялась только по газовой фазе, без учета капельной жидкости. Результаты расчетов сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Результаты расчетов с учетом стесненного осаждения капель жидкости

<i>d</i> , мм	0,05	0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
<i>Ar</i>	113,5	465,0	908,2	7265,9	24522,3	58126,8	113529,0	196178,1	311523,5	465014,7
Режим	переходный						турбулентный			
<i>Re</i>	4,5	12,3	19,8	87,5	208,7	386,6	586,5	771,0	971,6	1187,1
<i>W</i> _{ос} , м/с	0,08	0,14	0,18	0,39	0,62	0,87	1,05	1,15	1,25	1,33
$\tau_{ос}$, с	39,7	23,2	18,0	8,1	5,1	3,7	3,0	2,8	2,6	2,4
<i>W</i> _г , м/с	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
<i>L</i> , м	10,00	5,84	4,53	2,05	1,29	0,93	0,76	0,70	0,65	0,60

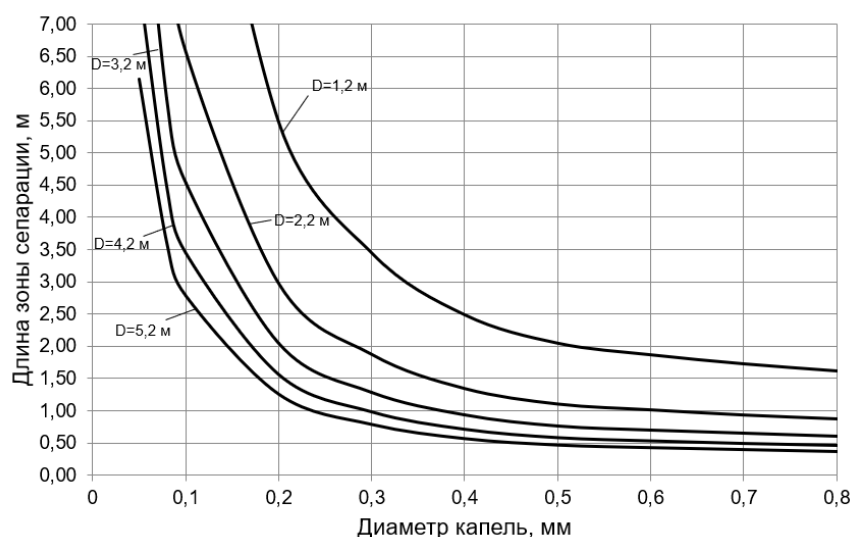


Рисунок 3 – Зависимость длины зоны сепарации от диаметра капель при различных значениях диаметра аппарата в условиях стесненного осаждения

По результатам расчетов по блок схеме (рисунок 1) построена графическая зависимость (рисунок 3) с учетом стесненного осаждения капелек жидкости в газе.

В работе сопоставлены результаты 2-х расчетов длины зоны сепарации при газосодержании $\varphi_{\Gamma} = 1$ и $\varphi_{\Gamma} = 0,99$ (таблица 3).

Таблица 3

Сравнение расчетов

d , мм	0,05	0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
L , м ($\varphi_{\Gamma} = 1$)	7,04	3,89	3,01	1,37	0,86	0,62	0,48	0,39	0,33	0,30
L , м ($\varphi_{\Gamma} = 0,99$)	10,00	5,84	4,53	2,05	1,29	0,93	0,76	0,70	0,65	0,60
Увеличение L , %	29,6	33,4	33,5	33,2	33,3	33,3	36,8	44,3	49,2	50,0

Очевидно, что с увеличением количества капельной жидкости в газе возрастает время осаждения, а следовательно, и длина зоны сепарации. Увеличение количества капельной жидкости в газе может приводить к увеличению времени осаждения по нескольким причинам, связанным с динамикой системы, взаимодействием частиц и физическими процессами:

1. Стесненное осаждение. При высокой концентрации капель в газе возможно стесненное осаждение, когда частицы начинают влиять друг на друга. Это может замедлять скорость осаждения из-за трения между каплями и их взаимных столкновений. В таких условиях время, необходимое для осаждения всех частиц, увеличивается;
2. Увеличение числа столкновений и коалесценции. С ростом количества капель возрастает вероятность их столкновений и коалесценции (укрупнения). Этот процесс может, как ускорять, так и замедлять общее время осаждения в зависимости от конкретных условий;
3. Изменение аэродинамических условий. При увеличении концентрации капель в газе могут возникать более сложные потоки и турбулентность, что влияет на траекторию движения и скорость осаждения. Например, при стесненном движении частиц возможно образование зон с разной скоростью осаждения, что усложняет общий процесс;
4. Влияние на распределение давления и скорости потока. При высокой концентрации капель может происходить вытеснение газа или изменение распределения давления в объеме, что влияет на скорость и направление движения капель. Это, в свою очередь, может увеличить время, необходимое для их осаждения;
5. Изменение условий на границе раздела фаз. Наличие поверхностно-активных веществ, примесей или изменение температуры и давления

может влиять на подвижность границы раздела фаз, сопротивление движению капель и, соответственно, на скорость их осаждения.

Таким образом, увеличение количества капелек в газе создает более сложные условия для осаждения, что может приводить к замедлению этого процесса по сравнению с ситуацией с меньшим количеством частиц, а при расчете газожидкостных сепараторов следует учитывать количество капельной жидкости в газовом потоке.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Подоплелов, Е.В.** Методика расчета факельного сепаратора / Е.В. Подоплелов, Л.С. Федоров // Современные технологии и научно-технический прогресс. – 2025. – № 12. – С. 57-58.
2. **Подоплелов, Е.В.** Алгоритм расчета длины зоны сепарации аппарата для отделения капельной жидкости от газа / Е.В. Подоплелов, Л.С. Федоров // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. – 2025. – № 22. – С. 92-95.
3. **Подоплелов, Е.В.** Моделирование факельного сепаратора высокого давления / Е.В. Подоплелов, А.И. Дементьев, К.П. Качан // Вестник Ангарского государственного технического университета. – 2024. – № 18. – С. 95-101.
4. **Подоплелов, Е.В.** Расчет длины зоны сепарации гравитационного газового сепаратора / Е.В. Подоплелов, А.И. Дементьев, Р.Д. Лойко // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. – 2024. – № 21. – С. 136-139.
5. **Ершов, Е.В.** Расчет длины зоны гравитационного осаждения факельного сепаратора / Е.В. Ершов // Проблемы геологии и освоения недр. Труды XXIX Международного молодежного научного симпозиума имени академика М.А. Усова, посвященного 80-летию Победы в Великой Отечественной войне. – 2025. – Т. II. – С. 104-106.
6. **Набока, В.В.** Методические указания по выполнению лабораторных работ по курсу "Процессы и аппараты химической технологии" / В.В. Набока, Е.В. Подоплелов, А.И. Дементьев, В.М. Соломонова. – Ангарск : АНГТУ, 2018. – 44 с.
7. **Рыбалко, Л.И.** Процессы и аппараты химической технологии. Учебное пособие с примерами решения задач / Л.И. Рыбалко, Е.В. Подоплелов, А.И. Дементьев. – Ангарск : АГТА, 2009. – 134 с.
8. **Рыбалко, Л.И.** Программа, примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Учебное пособие / Л.И. Рыбалко, Е.В. Подоплелов, Л.В. Щукина. – Ангарск : АГТА, 2007. – 120 с.