

ключает необходимость использования отдельного измельчителя, уменьшает численность обслуживающего персонала, продолжительность процесса и энергозатраты на стадии приготовления концентрированных композиций присадок.

Окончательный выбор варианта реконструкции может быть сделан на основании результатов технико-экономических расчетов с учетом финансовых возможностей предприятия.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щербин С.А., Акуленок В.А. Аппаратурное оформление процесса приготовления композиций присадок для технических масел. // Сборник научных трудов АНГТУ,

2017. – № 14. – С. 78-81.

2. Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками. – Л.: Химия, 1975. – 384 с.

УДК 66.021.1

*Щербин Сергей Анатольевич,*

*к.т.н., доцент, декан факультета технической кибернетики,  
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,  
e-mail: dekan\_ftk@angtu.ru*

*Подоплелов Евгений Викторович,*

*к.т.н., доцент, зав. кафедрой «Машины и аппараты химических производств»,  
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,  
e-mail: uch\_sovet@angtu.ru*

*Дементьев Анатолий Иванович,*

*к.т.н., доцент, профессор кафедры «Машины и аппараты химических производств»,  
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,  
e-mail: anatdementev@mail.ru*

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ФАКЕЛЬНОГО СЕПАРАТОРА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ КОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИИ СУЗУНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

*Shcherbin S.A., Podoplelov E.V., Dementev A.I.*

**TECHNOLOGICAL CALCULATION AND EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF FLARE SEPARATOR HIGH-PRESSURE COMPRESSOR STATION OF THE SUZUN FIELD**

**Аннотация.** В работе выполнен технологический расчет факельного сепаратора высокого давления компрессорной станции Сузунского месторождения с целью подтверждения заданной производительности по газу, а также оценки эффективности отделения капельной жидкости от газа. Предложен новый подход к определению минимального диаметра капель жидкости, соответствующего условию гравитационного осаждения, который может быть использован в оценке эффективности работы нефтегазовых сепараторов.

**Ключевые слова:** сепаратор, газ, нефть, гравитационное осаждение, каплеуловитель.

**Abstract.** In the process design of flare separator high-pressure compressor station of the Suzun field to verify the specified performance parameters for gas and assess the effectiveness of the separation of liquid droplets from the gas. A new approach to determining the minimum diameter of liquid droplets corresponding to the gravitational deposition condition, which can be used in assessing the efficiency of oil and gas separators, is proposed.

**Keywords:** separator, gas, oil, gravitational deposition, droplet catcher.

Факельный сепаратор высокого давления расположен на установке подготовки газа с дожимной компрессорной станцией Сузунского месторождения и предназначен для отделения капельной жидкости от газа.

Сепаратор (рисунок 1) представляет собой горизонтальный цилиндрический аппарат с эллиптическими днищами, объемом 140 м<sup>3</sup>, с внутренним диаметром корпуса 3200 мм. Для эффективного обезвоживания газа внутри

сепаратора имеются брызгоотбойник (1), узел фильтров (2) и каплеуловители (4). Газ поступает через входной штуцер и проходит сначала через брызгоотбойник, где происходит первичное отделение капельной жидкости. Дальнейшее отделение капельной влаги осуществляется в зоне гравитационного осаждения (3) и в каплеуловителях марки КСУ-430, установленных на выходе из сепаратора. Под действием силы тяжести капельная жидкость оседает в нижнюю часть сепаратора и отводится снизу через штуцер для выхода жидкости. Очищенный газ выходит через штуцер, расположенный в верхней части корпуса.

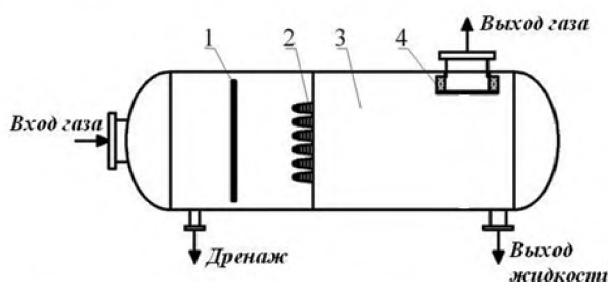


Рисунок 1 – Схема факельного сепаратора:  
1 – брызгоотбойник; 2 – узел фильтров;  
3 – зона гравитационного осаждения;  
4 – каплеуловители.

В работе были поставлены следующие задачи: проанализировать работу сепаратора, произвести проверочный расчет на заданную производительность по газу, а также оценить эффективность отделения капельной жидкости от газа. В расчетах принимались данные, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Технологические данные

Наименование параметра, единица измерения	Значение
Производительность по газу, м <sup>3</sup> /ч	7280-56530
Рабочее давление, МПа (изб.)	0,2-0,23
Рабочая температура, °С	5-140
Допустимая массовая концентрация жидкости в газе на выходе из сепаратора, г/м <sup>3</sup>	0,001
Унос свободного газа жидкостью, не более, %	0,01
Плотность газа при рабочих условиях, кг/м <sup>3</sup>	2,5-3,57
Вязкость газа при рабочих условиях, сПз	0,0078-0,011

Состав газа на входе в сепаратор приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Компонентный состав газа на входе в сепаратор, % мол.

Наименование компонента	Состав газа
Метан	CH <sub>4</sub> 82,04-98,31
Этан	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> 0,08-4,51
Пропан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> 0,03-5,28
и-Бутан	i-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> 0,01-1,53
н-Бутан	n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> 0,02-2,24
и-Пентан	i-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> 0,01-0,56
н-Пентан	n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> 0,01-0,50
н-Гексан	n-C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> 0,04-0,72
Азот	N <sub>2</sub> 1,06-1,82
Диоксид углерода	CO <sub>2</sub> 0-0,30
Вода	H <sub>2</sub> O 0-1,26
Метанол	CH <sub>3</sub> OH 0-0,02

*Анализ исходных данных*

Расход газа, поступающего в сепаратор, является одним из основных технологических параметров, влияющих на эффективность отделения жидкости от газа. С увеличением расхода газа возрастает скорость движения газового потока в сепараторе и при превышении некоторого предельного значения скорости начнется унос жидкости газом, поэтому в расчетах принята максимальная производительность по газу 56530 м<sup>3</sup>/ч.

В пределах указанных рабочих условий (температура, давление) наибольшее влияние на физические свойства газа имеет температура. Рабочий диапазон температуры находится в пределах от 5 °С до 140 °С. Таким образом, среднее значение рабочей температуры принималось равным 72,5 °С.

Изменения физических свойств газа в рабочем диапазоне абсолютного давления от 0,3 МПа до 0,33 МПа незначительны.

Таким образом, для расчета физических свойств среды были приняты следующие средние значения параметров состояния газа:

- температура: 72,5 °С;
- давление: 0,33 МПа;
- плотность: 3,03 кг/м<sup>3</sup>.

Размер капель жидкости (конденсата) исходными данными не задавался. По опытным данным Р.И. Щищенко [1] в нефтяных трапах преобладают капли диаметром 100 мкм, однако для сепараторов природных газов таких данных нет. Поэтому в работе определялся размер капель жидкости, которые будут полностью осаждаться на дно аппарата за время пребывания в сепараторе.

*Определение пропускной способности факельного сепаратора*

В факельном сепараторе имеются две зоны-секции: осадительная и отбойная. В осадительной секции поднимающийся газ освобождается от сравнительно крупных частичек жидкости под действием гравитационных сил. В отбойной секции происходит окончательная очистка газа от мелких частичек жидкости под влиянием сил инерции и адгезии. Эффективность процесса сепарации определяется степенью очистки газа от капельной жидкости, что характеризуется коэффициентами уноса жидкости потоком газа  $K_{ж}$ .

Коэффициент уноса жидкости рассчитывался по следующей формуле [2]:

$$K_{жс} = \frac{q_{жс}}{V_2},$$

где  $q_{жс}$  – объемный расход капельной жидкости, уносимой потоком газа из сепаратора,  $м^3/ч$ ;  $V_2$  – объемный расход газа на выходе из сепаратора,  $м^3/ч$ .

Объемный расход капельной жидкости, уносимой потоком газа из сепаратора:

$$q_{жс} = c \cdot \frac{V_2}{\rho_{жс}},$$

где  $c = 0,001 \text{ г}/\text{м}^3 = 0,001 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{м}^3$  – допустимая массовая концентрация жидкости в газе на выходе из сепаратора;  $\rho_{жс} = 926 \text{ кг}/\text{м}^3$  – плотность жидкости [3].

$$q_{жс} = 0,001 \cdot 10^{-3} \frac{56530}{926} = 6,1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{ч}.$$

$$K_{жс} = \frac{6,1 \cdot 10^{-5}}{56530} = 1,08 \cdot 10^{-9}.$$

Полученное значение коэффициента уноса жидкости хорошо согласуется с практическими данными, в соответствии с которыми коэффициент уноса жидкости имеет следующее ориентировочное значение  $K_{жс} \leq 50 \text{ см}^3/1000 \text{ м}^3$  газа ( $K_{жс} \leq 5 \cdot 10^{-8}$ ) [2].

В основу расчета сепараторов гравитационного типа положен выбор допустимой скорости газа, при которой осаждаются частицы заданного размера. Расчетная формула при заданном поперечном сечении аппарата  $S$  имеет вид:

$$V_2 = 86400 S W_2,$$

или

$$V_2 = 67858 D^2 W_2,$$

где  $V_2$  – производительность сепаратора по газу,  $м^3/\text{сут}$ ;  $W_2$  – допустимая скорость газа,  $м/с$ ;  $D$  – диаметр аппарата,  $м$ .

Практика эксплуатации гравитационных сепараторов на газоконденсатных месторождениях показала, что при давлении 6,0 МПа оптимальная скорость движения газа в

свободном сечении аппарата не должна превышать 0,1 м/с [2]. Если давление в сепараторе иное, оптимальную скорость движения газа в свободном сечении гравитационного сепаратора можно определить по формуле:

$$W_{онм} = W_{1онм} \sqrt{p_1/p},$$

где  $W_{1онм}$  – оптимальная скорость газа при  $p_1$ , для  $p_1 = 6$  МПа значение  $W_{1онм} = 0,1$  м/с;  $p$  – абсолютное давление в сепараторе ( $p = p_{изб} + p_{атм} = 0,23 + 0,1 = 0,33$  МПа).

$$W_{онм} = 0,1 \cdot \sqrt{6/0,33} = 0,426 \text{ м/с}.$$

Рабочая скорость газа при максимальной производительности по газу составит:

$$W = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{0,785 \cdot D^2},$$

$$W = \frac{56530}{0,785 \cdot 3,2^2 \cdot 3600} = 1,95 \text{ м/с}.$$

Допустимую скорость газа можно определить по эмпирической формуле:

$$W_2 = A_1 \sqrt{\frac{\rho_{жс} - \rho_г}{\rho_г}} \cdot K_0,$$

где  $\rho_г$  – плотность газа,  $кг/м^3$ ;  $A_1$  – постоянный коэффициент. Значение  $A_1$  для вертикальных сепараторов принимается равным 0,047. Для горизонтальных аппаратов с длиной сепарационной камеры не более 3 м  $A_1 = 0,117$  [2].

Для горизонтальных сепараторов длиной более 3 м при определении допустимой скорости газа вводится поправочный коэффициент (множитель)  $K_0$ :

$$K_0 = (l/3)^{0,52} = (15,7/3)^{0,52} = 2,365,$$

где  $l$  – фактическое расстояние между патрубками входа и выхода газа,  $м$ .

Тогда:

$$W_2 = 0,117 \sqrt{\frac{926 - 3,03}{3,03}} \cdot 2,365 = 4,83 \text{ м/с}.$$

По результатам расчетов значение рабочей скорости газа находится в диапазоне между оптимальной и допустимой скоростью газа, следовательно, при максимальной производительности по газу частицы жидкости будут осаждаться под действием силы тяжести.

Производительность сепаратора в расчете по допустимой скорости газа:

$$V_2 = 67858 \cdot 3,2^2 \cdot 4,83 = 3356202,39 \text{ м}^3/\text{сут} = 139841,77 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Производительность сепаратора в расчете по оптимальной скорости газа:

$$V_2 = 67858 \cdot 3,2^2 \cdot 0,426 = 296012,88 \text{ м}^3/\text{сут} = 12328 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Полученные результаты расчета производительности сепаратора подтверждают, что аппарат обеспечит эффективное отделение жидкости от газа при максимальной производительности по газу 56530 м<sup>3</sup>/ч, поскольку максимальное значение производительности меньше производительности сепаратора в расчете по допустимой скорости газа (139841,77 м<sup>3</sup>/ч). Значение оптимального расхода 12328 м<sup>3</sup>/ч входит в интервал производительности по газу 7280...56530 м<sup>3</sup>/ч и может быть рекомендованным при эксплуатации сепаратора компрессорной станции Сузунского месторождения.

*Определение минимального диаметра капле жидкости, соответствующего условию гравитационного осаждения в сепараторе*

В работе была поставлена цель определения минимального диаметра капле жидкости, соответствующего условию гравитационного осаждения, при различных режимах работы сепаратора.

В соответствии с данными таблицы 1, производительность сепаратора по газу изменяется в диапазоне от 7280 м<sup>3</sup>/ч до 56530 м<sup>3</sup>/ч. Поэтому расчет был сделан для трех режимов работы сепаратора:

- при максимальном расходе газа;
- при оптимальной скорости движения газового потока  $W_{opt} = 0,426$  м/с;
- при минимальном расходе газа.

Линейная скорость газа при максимальной производительности сепаратора:

$$W_{e,max} = \frac{4V_{e,max}}{\pi D^2},$$

где  $V_{e,max} = 56530$  м<sup>3</sup>/ч – максимальная производительность по газу;  $D = 3,2$  м – внутренний диаметр разделительной камеры.

$$W_{e,max} = \frac{4 \cdot 56530}{3,14 \cdot 3,2^2 \cdot 3600} = 1,95 \text{ м/с.}$$

Время пребывания газа в разделительной камере:

$$\tau = \frac{L}{W_{e,max}},$$

где  $L = 15,7$  м – фактическое расстояние между патрубками входа и выхода газа.

$$\tau = \frac{15,7}{1,95} = 8 \text{ с.}$$

Требуемая скорость осаждения частиц жидкости, соответствующая времени пребывания газа в разделительной камере:

$$W_{oc,mp.} = \frac{D}{\tau},$$

$$W_{oc,mp.} = \frac{3,2}{8} = 0,4 \text{ м/с.}$$

Значение критерия Рейнольдса, соответствующее требуемой скорости осаждения:

$$Re_{mp.} = \frac{W_{oc,mp.} \cdot d \cdot \rho_g}{\mu_g},$$

где  $d$  – диаметр шарообразных частиц жидкости, м;  $\rho_g = 3,03$  кг/м<sup>3</sup> – плотность газа при расчетной температуре;  $\mu_g = 0,011$  сП =  $0,011 \cdot 10^{-3}$  Па · с – коэффициент динамической вязкости газа при расчетной температуре.

$$Re_{mp.} = \frac{0,4 \cdot d \cdot 3,03}{0,011 \cdot 10^{-3}} = 110182 \cdot d.$$

Критерий Архимеда:

$$Ar = \frac{gd^3 \rho_g^2}{\mu_g^2} \left( \frac{\rho_{жс} - \rho_g}{\rho_g} \right),$$

где  $\rho_{жс} = 926$  кг/м<sup>3</sup> – плотность жидкости при расчетной температуре.

Связь между критериями Рейнольдса и Архимеда [4]:

$$\zeta Re^2 = \frac{4}{3} Ar,$$

где  $\zeta$  – коэффициент сопротивления шарообразных частиц жидкости. При турбулентном режиме [4]:

$$\zeta = \frac{18,5}{Re^{0,6}}.$$

Выразим значение минимального диаметра частиц жидкости, удовлетворяющего условию гравитационного осаждения:

$$\begin{aligned} 18,5 Re_{mp.}^{1,4} &= \frac{4}{3} \frac{gd^3 \rho_g^2}{\mu_g^2} \left( \frac{\rho_{жс} - \rho_g}{\rho_g} \right), \\ &= \frac{18,5(110182 \cdot d)^{1,4}}{3} = \\ &= \frac{4}{3} \frac{9,81 d^3 3,03^2}{(0,011 \cdot 10^{-3})^2} \left( \frac{926 - 3,03}{3,03} \right), \\ 211897894 d^{1,4} &= 302310051471074 d^3, \\ d &= 142 \cdot 10^{-6} \text{ м.} \end{aligned}$$

Уточненное значение критерия Архимеда:

$$\begin{aligned} Ar &= \frac{gd^3 \rho_g^2}{\mu_g^2} \left( \frac{\rho_{жс} - \rho_g}{\rho_g} \right), Ar = \\ &= \frac{9,81 \cdot (142 \cdot 10^{-6})^3 \cdot 3,03^2}{(0,011 \cdot 10^{-3})^2} \left( \frac{926 - 3,03}{3,03} \right) = \\ &= 649. \end{aligned}$$

Поскольку  $36 < Ar = 649 < 83000$ , режим осаждения турбулентный.

Уточненное значение критерия Рейнольдса при турбулентном режиме осаждения:

$$Re = \sqrt[1,4]{\frac{4}{3} \cdot \frac{Ar}{18,5}},$$

$$Re = \sqrt[1,4]{\frac{4}{3} \cdot \frac{649}{18,5}} = 15,6.$$

Уточненная скорость гравитационного осаждения частиц жидкости в разделительной камере:

$$W_{oc} = \frac{Re\mu_z}{d_{min}\rho_z},$$

$$W_{oc} = \frac{15,6 \cdot 0,011 \cdot 10^{-3}}{142 \cdot 10^{-6} \cdot 3,03} = 0,4 \text{ м/с}.$$

Условие отделения частиц жидкости от газа выполняется:

$$W_{oc} \geq W_{oc,mp},$$

$$0,4 \text{ м/с} = 0,4 \text{ м/с}.$$

Минимальный диаметр капель жидкости, соответствующий условию гравитационного осаждения при максимальной производительности сепаратора, составляет:

$$d_{min} = 142 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Подобным образом определялся минимальный диаметр капель жидкости, соответствующий условию гравитационного осаждения в сепараторе при оптимальной скорости движения газового потока и при минимальном расходе газа. Результаты расчетов представлены в таблице 3.

*Расчет максимальной производительности каплеуловителей*

Для отделения от газа частиц капель-

ной жидкости с размерами, менее указанных в таблице 3, факельный сепаратор оснащен каплеуловителями марки КСУ-430 в количестве 24 шт.

Каплеуловители КСУ-430 предназначены для очистки попутного газа в установках сбора и подготовки продукции нефтяных месторождений, а также в других аппаратах технологии отделения газа от жидкостей. Основные технологические параметры каплеуловителей КСУ-430 приведены в таблице 4.

Максимальная производительность каплеуловителя КСУ-430 по газу при заданных рабочих параметрах факельного сепаратора определялась по формуле:

$$V_{e,max} = V_{o,max} \cdot \frac{T p_o}{T_o p}, \text{ м}^3/\text{ч},$$

где  $V_{o,max} = 440000 \text{ м}^3/\text{ч}$  – максимальная производительность каплеуловителя по газу при нормальных условиях;  $T_o$  и  $p_o$  – соответственно температура (К) и давление (МПа) при нормальных условиях;  $T$  и  $p$  – соответственно температура (К) и абсолютное давление (МПа) при рабочих условиях.

$$V_{e,max} = 440000 \cdot \frac{345,65 \cdot 0,1}{273,15 \cdot 0,33} = 168723 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Таблица 3 – Результаты расчета минимального диаметра капель жидкости, соответствующего условию гравитационного осаждения

Наименование параметра, единицы измерения	Значение		
	Режим работы сепаратора		
	максимальный расход газа	оптимальная скорость газа	минимальный расход газа
Объемный расход газа, м <sup>3</sup> /ч	56530	12328	7280
Скорость газа в зоне осаждения, м/с	1,95	0,43	0,25
Время пребывания газа в разделительной камере, с	8	37	62
Скорость гравитационного осаждения частиц жидкости, м/с	0,40	0,086	0,053
Критерий Рейнольдса	15,6	1	0,5
Критерий Архимеда	649	18,0	8,9
Минимальный диаметр частиц жидкости, отделяемых за счет гравитационного осаждения, мкм	142	43	34

Таблица 4 – Основные технологические параметры каплеуловителя КСУ-430

Наименование параметра	Значение
Диаметр сепаратора, мм	1000-3400
Производительность по газу при нормальных условиях, м <sup>3</sup> /ч	20700-440000
Давление расчетное, МПа	0,6-16
Минимальный размер улавливаемых капель жидкости, мкм	3-5
Эффективность сепарации, г/м <sup>3</sup> , не более	0,1
Гидравлическое сопротивление, МПа, не более	1,0·10 <sup>-3</sup>

В соответствии с данными таблицы 4 и по результатам расчета производительности каплеуловителя КСУ-430 можно сделать следующие выводы:

– использование каплеуловителей в факельном сепараторе целесообразно, поскольку это обеспечит отделение от газа капель жидкости размером 5 мкм и более, уносимых газовым потоком из зоны гравитационного осаждения;

– для уменьшения нагрузки каплеуловителя целесообразно установить в зоне выхода газового потока из сепаратора после отделения капель жидкости сравнительно

крупного размера, указанного в таблице 3, в зоне гравитационного осаждения капельной жидкости;

– значение максимальной производительности каплеуловителя КСУ-430 по газу составляет 168723 м<sup>3</sup>/ч и превышает заданное значение максимальной производительности факельного сепаратора 56530 м<sup>3</sup>/ч. Поэтому при заданных рабочих параметрах факельного сепаратора используемые каплеуловители КСУ-430 способны обеспечить эффективное отделение капельной жидкости от газа.

Анализ исходных данных, поверочный технологический расчет факельного сепаратора показали:

– аппарат обеспечит эффективное отделение жидкости от газа при максимальной производительности по газу 56530 м<sup>3</sup>/ч, поскольку максимальное значение производительности меньше производительности сепаратора (139841,77 м<sup>3</sup>/ч) в расчете по допустимой скорости газа;

– рассчитанный оптимальный расход газа 12328 м<sup>3</sup>/ч входит в интервал производительности по газу 7280-56530 м<sup>3</sup>/ч и может быть рекомендованным при эксплуатации сепаратора.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Базлов М.Н. Подготовка природного газа и конденсата к транспорту / М.Н. Базлов, А.И. Жуков, Т.С. Алексеев – М.: Из-во «Недра», 1968. – 215 с.

2. Леонтьев С.А. Технологический расчет и подбор стандартного оборудования для установок системы сбора и подготовки скважинной продукции: учебное пособие / Леонтьев С.А., Галикеев Р.М., Тарасов М.Ю. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2015. – 124 с.

3. Павлов К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. – М.: Альянс, 2006. – 576 с.

4. Ульянов Б.А. Процессы и аппараты химической технологии. В примерах и задачах: учебное пособие / Ульянов Б.А., Бадеников В.Я., Ликучев В.Г. – Ангарск: АнГТУ, 2006. – 743 с.