

**МЕТОД РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМБИНИРОВАННОГО
СЕПАРАТОРА ОЧИСТКИ ГАЗОВ ОТ КАПЕЛЬНОЙ ВЛАГИ**

А.Р. ИСХАКОВ, М.М. БАШАРОВ

Казанский государственный энергетический университет

В статье уделяется внимание очистке различных газообразных сред от дисперсной фазы, наличие которой неблагоприятно влияет на протекание технологических процессов. Приведены конструкция и схема работы разработанного авторами сепаратора осушки газов от капельной влаги и метод его расчета. Получена зависимость комплекса энергоэффективности от скорости газа для различных насадок, которая показывает, что наиболее оптимальным является использование насадки «Инжехим-2000» с удельной поверхностью насадки равной $800 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Произведены расчеты эффективности сепарации капель воды из природного газа сеноманской газоносной толщи и масляного аэрозоля этилен-хладоагента в рассматриваемом аппарате. Установлено, что предлагаемый комбинированный сепаратор обеспечивает высокую эффективность (98–99%) удаления жидкой фазы размером более 3 мкм, а масляного аэрозоля – более 1 мкм. При этом комбинированный сепаратор имеет относительно небольшие геометрические размеры. Аппарат характеризуется низким гидродинамическим сопротивлением, за счет чего снижаются энергетические затраты на его эксплуатацию.

Ключевые слова: газосепаратор, осушка газов, насадка, трубка с ленточным завихрителем, эффективность сепарации.

Введение

На предприятиях химической и нефтехимической промышленности в различных технологических процессах используются газообразные среды. Как правило, наличие жидкой дисперсной фазы в газах негативно влияет на технологические процессы, поэтому ее извлекают. Также в процессе производства тепловой энергии на большинстве тепловых электростанциях России в качестве энергетического топлива в настоящее время используется природный газ. В природном газе содержится некоторое количество капельной влаги (до 5% масс.), что негативно сказывается на его горении, приводит к коррозии внутренних поверхностей трубопроводов и теплоэнергетического оборудования. Более того, при движении газожидкостной смеси вдоль стенок аппаратов происходит осаждение дисперсной фазы на поверхностях оборудования, в результате повышается гидравлическое сопротивление и, соответственно, энергозатраты на проведение процессов. Со временем количество этих отложений увеличивается вследствие коалесценции или коагуляции. Таким образом, при турбулентном движении потока рабочей среды мелкие капельки, в результате поступательного и броуновского движений, образования вихрей, сталкиваются между собой, со стенками различного оборудования и образуют более крупный аэрозоль, прилипающий к стенке и увеличивающий, тем самым, толщину отложений. Наличие таких отложений и дополнительная фаза не лучшим образом сказываются на работе аппаратов и различного оборудования [1–3].

Сепаратор осушки газов от капельной влаги

Для улавливания частиц из газового потока применяют аппараты различного принципа действия и конструкции [4]: устройства, работа которых основана на использовании силы тяжести; устройства, основанные на использовании центробежной силы; мокрые пылеуловители; электрофильтры; тканевые фильтры.

По принципу действия почти все применяемые в промышленности сепараторы являются комбинированными, так как в каждом из них при осаждении капель жидкости из газового потока используется несколько механизмов [4]. Удаление капельной влаги из газовых сред осуществляется в так называемых сепараторах осушки газа.

Разработан [5] комбинированный сепаратор осушки газов от капельной влаги (рис. 1) и методы расчета эффективности сепарации капельной влаги [2, 6].

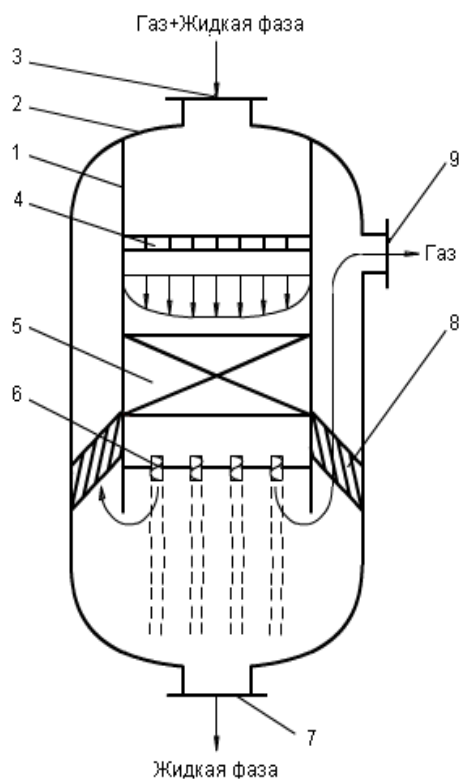


Рис. 1. Сепаратор осушки газов от капельной влаги:

1 – внутренняя труба; 2 – корпус; 3 – входной патрубок; 4 – направляющая решетка; 5 – секция нерегулярных насадок; 6 – трубки с ленточным завихрителем; 7 – патрубок выхода отделенной жидкой фазы; 8 – сетчатый демистер; 9 – патрубок выхода осушенного газа

Сепаратор работает следующим образом. Исходная газообразная смесь поступает во внутреннюю трубу 1 сепаратора через патрубок 3. Далее смесь, минуя направляющую решетку 4, на которой происходит выравнивание потока, поступает на секцию нерегулярных насадок «Инжехим-2000» [1, 4] 5, где происходит укрупнение капель жидкости. После секции насадок смесь проходит через трубки с ленточным завихрителем 6. Жидкая фаза осаждается на внутренней стороне стенок трубок за счет центробежной силы (при скорости газа больше 30 м/с), вызванной ленточным завихрителем, и стекает в нижнюю часть аппарата под действием силы тяжести. Через

патрубок 7 отделенная жидкость покидает аппарат. Очищенный газ через сетчатый демистер 8, предотвращающий вторичный унос жидкой фазы, покидает внутреннюю трубу 1 и выходит из аппарата через патрубок 9.

Направляющая решетка представляет собой проницаемую поперечную перегородку из металлического листа с отверстиями. Коэффициент сопротивления направляющей решетки ξ от 4,9 до 5,9, вследствие чего за решеткой не наблюдается зоны циркуляции потока [4]. В качестве контактных устройств в насадочной секции используются нерегулярные металлические насадки «Инжехим-2000» [7] (рис. 2).

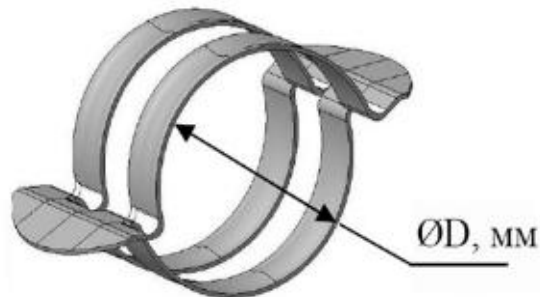


Рис. 2. Нерегулярная насадка «Инжехим-2000»

Трубки с ленточным завихрителем установлены на тарелке. Сетчатый демистер расположен по периметру между центральной трубой и корпусом аппарата под углом 45° и состоит из мелкой сетки, уложенной в пакет.

Порядок расчета эффективности сепарации

Для расчета эффективности сепарации капельной влаги в аппарате необходимо знать физические характеристики сплошной и дисперсной фаз, концентрацию и диаметр капель влаги, расход газовой смеси, геометрические размеры аппарата. Принимается допущение, что частицы влаги, отделенные в насадочном слое, идут на орошение трубок с ленточным завихрителем.

Долю осевших частиц или эффективность сепарации слабо инерционных частиц можно выразить величиной эффективности турбулентного осаждения [1, 2, 8]:

$$\eta_t = 1 - \exp\left(\frac{-4Hu_t}{d_3 u_{cp}}\right), \quad (1)$$

где H – высота насадочного слоя или длина трубок в зависимости от секции, м; u_t – скорость турбулентного осаждения (миграции) частиц, м/с; d_3 – эквивалентный диаметр канала, м; u_{cp} – средняя скорость газа в канале, м/с.

Это выражение справедливо как для насадочного слоя, так и для слоя с трубками. Вначале проводится расчет эффективности сепарации в насадочном слое $\eta_{тн}$, так как по ходу движения газовой смеси он встречается первым, далее рассчитывается секция, состоящая из трубок с ленточным завихрителем.

Перемещаясь по потоку, аэрозольные частицы на том или ином этапе своего движения достигают пристеночной области и, когда расстояние до стенки становится равным их радиусу, касаются ее и осаждаются на ней, если поверхность стенки удерживает частицы, то есть является смачиваемой. Мерой интенсивности осаждения частиц из турбулентного потока газа на стенках является так называемая скорость турбулентного осаждения частиц [2, 8]:

$$u_t = \frac{j_w}{c_m}, \quad (2)$$

где j_w – удельный поток частиц к стенке, $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$; c_m – средняя по поперечному сечению концентрация частиц, $\text{кг}/\text{м}^3$.

В теоретических исследованиях процесса турбулентного осаждения аэрозолей часто используется безразмерный эквивалент скорости осаждения:

$$u_{t+} = \frac{u_t}{u_*}, \quad (3)$$

где u_* – динамическая скорость, $\text{м}/\text{с}$.

Медниковым [8] предлагается обобщающая эмпирическая формула для расчета u_{t+} :

$$u_{t+} = 7,25 \cdot 10^{-4} \left(\frac{\tau_+}{1 + \omega_E \tau_p} \right)^2, \quad (4)$$

где τ_+ – безразмерное время релаксации; τ_p – время релаксации, с ; ω_E – угловая частота энергоемких пульсаций, с^{-1} . $\tau_+ = \frac{\tau_p u_*^2}{\nu_\Gamma}$, где ν_Γ – кинематическая вязкость газа, $\text{м}^2/\text{с}$;

$\tau_p = \frac{d_c^2 \rho_c}{18 \mu_\Gamma}$, где d_c – диаметр частицы, м ; ρ_c – плотность вещества частицы, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 μ_Γ – коэффициент динамической вязкости газа, $\text{Па} \cdot \text{с}$; $\omega_E = \frac{u_*}{0,05 d_3}$, где d_3 – эквивалентный диаметр канала, м .

Таким образом, расчет каждой секции сводится к определению динамической скорости потока u_* , зная которую можно вычислить скорость турбулентного осаждения частиц по формулам (3), (4) и далее, по формуле (1), рассчитать эффективность сепарации для каждой секции [9].

Расчет насадочного слоя

Расчет эффективности сепарации в насадочном слое начинается с вычисления средней скорости через фактор скорости F :

$$u_{\text{ср}} = \frac{F}{\sqrt{\rho_\Gamma}}, \quad (5)$$

где ρ_Γ – плотность газа, $\text{кг}/\text{м}^3$. Для прямотока задают $F = 5 - 10$.

Имея массовый расход газовой смеси на входе в аппарат G и зная среднюю скорость потока газожидкостной смеси, можно вычислить площадь поперечного сечения $S_{\text{в.т.}}$ и диаметр $D_{\text{в.т.}}$ внутренней трубы:

$$S_{\text{в.т.}} = \frac{G}{\rho_\Gamma u_{\text{ср}}}, \quad (6)$$

$$D_{\text{в.т.}} = 2 \sqrt{\frac{S_{\text{к.}}}{\pi}}. \quad (7)$$

Плотность орошения равна:

$$q = \frac{L}{S_{\text{в.т.}} \rho_c}, \quad (10)$$

где L – расход частиц влаги, $\text{кг}/\text{с}$, $L = G \frac{C_{\text{ч}}}{100}$, где $C_{\text{ч}}$ – концентрация частиц, % (масс.).

При малых концентрациях частиц плотность орошения является очень низкой, поэтому ею можно пренебречь и считать, что насадки практически не орошаются, а

сопротивление насадочного слоя считать как для сухой насадки. Таким образом, сопротивление сухого насадочного слоя высотой 1 м [10, 11] определяется по следующей зависимости:

$$\Delta P_{\text{сух}}^{1\text{м}} = \frac{\lambda u_{\text{ср}}^2 \rho_{\Gamma} a_{\nu}}{8V_{\text{св}}^3}, \quad (11)$$

где λ – коэффициент гидравлического сопротивления насадочного слоя; $V_{\text{св}}$ – свободный объем насадки, м³/м³; a_{ν} – удельная поверхность насадки, м²/м³.

Коэффициент гидравлического сопротивления насадочного слоя определяется, в зависимости от режима движения потока:

- для колец [1, 10]:

$$\text{при } Re_{\Gamma} < 40 \quad \lambda = \frac{140}{Re_{\Gamma}}; \quad \text{при } Re_{\Gamma} > 40 \quad \lambda = \frac{16}{Re_{\Gamma}^{0,2}}; \quad (12)$$

- для нерегулярных насадок «Инжехим» [11–13]:

$$\text{при } Re_{\Gamma} > 500 \quad \lambda = 4,99 Re_{\Gamma}^{-0,04}, \quad (13)$$

где Re_{Γ} – число Рейнольдса для газа, $Re_{\Gamma} = \frac{4u_{\text{ср}}\rho_{\Gamma}}{a_{\nu}\mu_{\Gamma}}$.

Динамическая скорость газовой смеси в насадке определяется по следующей полуэмпирической зависимости [1, 11]:

$$u_* = 1,8 \left(\frac{\Delta P_{\Gamma-\text{ж}} u_{\text{ср}} V_{\Gamma}}{H_{\text{н}} \rho_{\Gamma}} \right)^{0,25}, \quad (14)$$

где $H_{\text{н}}$ – высота слоя насадки, м.

Расчет секции, состоящей из трубок с ленточным завихрителем

Величина эффективности сепарации в насадочном слое влияет на значения расходов газовой смеси G_{T} и отделенной, то есть орошающей, жидкости L_{T} на входе в трубки:

$$G_{\text{T}} = G - L \eta_{\text{гн}}, \quad (15)$$

$$L_{\text{T}} = G - G_{\text{T}}, \quad (16)$$

где $\eta_{\text{гн}}$ – эффективность сепарации в насадочном слое.

Количество трубок можно найти по формуле

$$n_{\text{T}} = \frac{G_{\text{T}}}{\rho_{\Gamma} u_{\text{ср}} S_{\text{T}}^1}, \quad (17)$$

где S_{T}^1 – площадь сечения одной трубки, м, $S_{\text{T}}^1 = \frac{3,14 d_{\text{T}}^2}{4}$, где d_{T} – диаметр одной трубки, м.

Средняя скорость в трубке $u_{\text{ср}}$ должна быть больше 30 м/с; она задается в пределах 35–50 м/с.

Перепад давления $\Delta P_{\Gamma-\text{ж}}$, обусловленный трением газа и жидкости, находится в зависимости от плотности орошения трубок q по выражению

$$q = 3600 \frac{L_{\text{T}}}{(S_{\text{в.т.}} - S_{\text{T}}) \rho_{\text{ч}}}, \quad (18)$$

где S_T – общая площадь поперечного сечения трубок, м, $S_T = S_T^1 n_T$.

При $q > 1 \text{ м}^3/\text{м ч}$ перепад давления находится экспериментально [1, 2], при $q < 1 \text{ м}^3/\text{м ч}$ считается, что трубки практически не орошаются:

$$\Delta P_{\Gamma\text{-ж}} = \Delta P_{\text{сух}} = \lambda_3 \frac{H_T}{d_3} \frac{\rho_{\Gamma} u_{\text{ср}}^2}{2}, \quad (19)$$

где λ_3 – коэффициент гидравлического сопротивления, вызванный закруткой; d_3 – эквивалентный диаметр канала с ленточным завихрителем, м, $d_3 = \frac{(\pi d_T - 4\delta_{\text{лн}})d_T}{\pi d_T + 2d_T}$,

где $\delta_{\text{лн}}$ – толщина ленты, м.

В зависимости от критического значения числа Рейнольдса:

$$\text{Re}_{\text{кр}} = 2300 + 8700 \left(\frac{d_T}{S_{\text{ЛЗ}}} \right)^{1,16}, \quad (20)$$

расчет коэффициентов сопротивления можно выполнить по уравнениям Щукина [11] при $\text{Re} \leq \text{Re}_{\text{кр}}$:

$$\lambda_3 = \frac{6,34}{\text{Re}^{0,474}} \left(\frac{d_T}{d_3} \right)^{0,263} + \frac{25,6}{\text{Re}}. \quad (21)$$

При турбулентном режиме $\text{Re} > \text{Re}_{\text{кр}}$

$$\lambda_3 = \frac{0,705}{\text{Re}^{0,28}} \left(\frac{d_T}{d_3} \right)^{0,09} + 0,009 \left(\frac{d_T}{d_3} \right)^{0,65}, \quad (22)$$

где $\text{Re} = \frac{u_{\text{ср}} d_3}{\nu_{\Gamma}}$, d_3 – диаметр кривизны спирального канала, м. $\frac{d_3}{d_T} = \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi^2} \left(\frac{S_{\text{ЛЗ}}}{d_T} \right)^2$,

где $S_{\text{ЛЗ}}$ – шаг ленточного завихрителя, м.

Зависимость для λ_3 справедлива при $\frac{S_{\text{ЛЗ}}}{d_T} = 3,6 - 22$.

Динамическая скорость газовой смеси в трубках определяется по следующей зависимости, полученной из уравнения баланса сил:

$$u_* = d_T \left(\frac{\pi \Delta P_{\Gamma\text{-ж}}}{4 F_T \rho_{\Gamma} \cos \theta} \right)^{0,5}, \quad (23)$$

где F_T – поверхность трубки, м²; θ – угол подъема винтовой линии: $\theta = \arctan \left(\frac{\pi d_T}{S_{\text{ЛЗ}}} \right)$.

Результаты расчета различных процессов сепарации

По представленному алгоритму произведены расчеты эффективности сепарации различных смесей в рассматриваемом аппарате. В табл. 1 приведены конструкционные характеристики сепаратора.

На рис.3 показана зависимость эффективности сепарации дисперсной фазы в насадочной секции от удельной поверхности a_v насадки «Инжехим» для частиц размером от 1 до 3 мкм. В расчете использовалась модельная система воздух + вода при скорости газа 5 м/с.

Геометрические размеры сепаратора

Величина	Значение
Высота насадочной секции H_n , м	0,5
Длина трубок H_T , м	0,2
Диаметр трубок d_T , м	0,017
Шаг ленточного завихрителя $S_{ЛЗ}$, м	0,118

Таким образом, чем больше удельная поверхность насадочного слоя, тем выше эффективность очистки. В дальнейших расчетах будем пользоваться удельной поверхностью насадки равной $800 \text{ м}^2/\text{м}^3$, что соответствует минимальному размеру одного насадочного элемента $\sim 8 \text{ мм}$.

На рис. 4 показана зависимость комплекса энергоэффективности газоочистки $\eta/\Delta P$ от скорости газожидкостной смеси в насадочной секции для различных насадок. Видно, что оптимальным является использование насадки «Инжехим-2000» 8 мм.

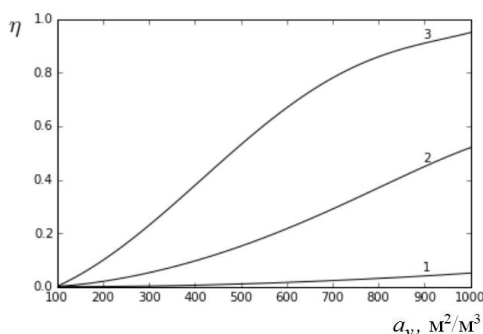


Рис. 3. Зависимость эффективности сепарации в насадочной секции от удельной поверхности насадки для частиц различного размера: 1 – 1 мкм; 2 – 2 мкм; 3 – 3 мкм

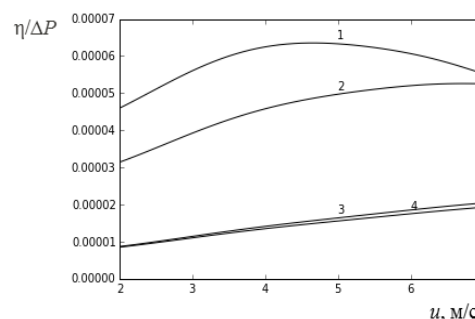


Рис. 4. Зависимость $\eta/\Delta P$ от скорости газа в насадочной секции для различных насадок: 1 – «Инжехим-2000» 8 мм; 2 – кольца Рашига 8мм; 3 – «Инжехим-2000» 24 мм; 4 – кольца Рашига 25мм

На рисунках 5, 6 показана зависимость $\eta/\Delta P$: от высоты трубок с ленточным завихрителем при различных скоростях газожидкостного потока при скорости газа 4–5 м/с (рис. 5); от скорости газожидкостного потока в секции трубок при различных шагах ленточного завихрителя (рис. 6).

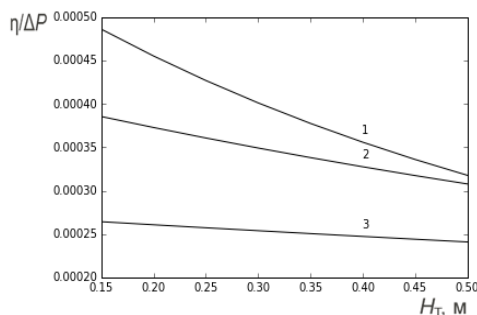


Рис. 5. Зависимость $\eta/\Delta P$ от высоты трубок при различных скоростях газа: 1 – 50 м/с; 2 – 40 м/с; 3 – 30 м/с

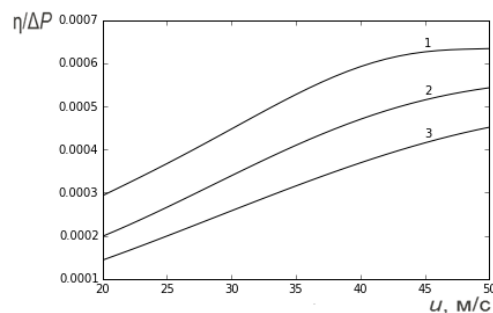


Рис. 6. Зависимость $\eta/\Delta P$ от скорости газожидкостного потока в секции трубок при различных шагах ленточного завихрителя $S_{ЛЗ}$: 1 – 0,065 м; 2 – 0,085 м; 3 – 0,120 м

На рис. 7 показана зависимость эффективности сепарации дисперсной фазы от размера извлекаемых частиц, на рис. 8 – зависимость эффективности сепарации частиц размером 3 мкм от скорости газожидкостного потока в секции трубок с ленточным завихрителем для частиц размером от 1 до 3 мкм.

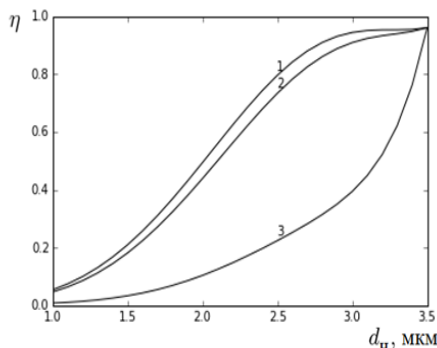


Рис. 7. Зависимость эффективности сепарации частиц воды из воздуха от их размера: 1 – на выходе из сепаратора; 2 – насадочная секция; 3 – секция с трубками

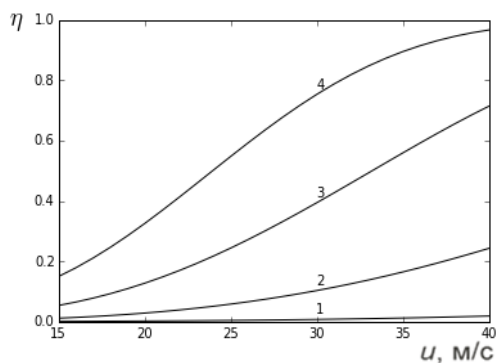


Рис. 8. Зависимость эффективности сепарации частиц воды от скорости газа в трубках: 1 – частицы размером 1 мкм; 2 – частицы размером 2 мкм; 3 – частицы размером 3 мкм; 4 – частицы размером 4 мкм

В данном примере (рис. 7) рассчитывалась система воздух с каплями воды при скорости газа в трубках 30 м/с. Видно, что эффективность сепарации частиц размером более 3 мкм выше 0,9.

Из графика рис. 8 видно, что высокая эффективность сепарации частиц размером 3 мкм достигается при скорости газа в трубках более 30 м/с. При скорости газа более 40 м/с эффективность сепарации достигает значений 0,98–0,99.

На рис. 9 показана зависимость общей эффективности сепарации масляного аэрозоля, попадающего в этилен-хладоагент при компримировании. Исходные данные взяты из работы [14].

Мельчайшие капли масляной фазы имеют размеры от 0,001 мкм до нескольких микрон [14–17]. На графике видно, что частицы размером более 0,6 мкм довольно хорошо улавливаются в сепараторе, что подтверждается внедрением аналогичного аппарата в производстве этилена [14].

Фракционная общая эффективность сепарации капель воды из природного газа сеноманской газоносной толщи, содержащего 5 % влаги, показана на рис. 10, состав газа представлен в табл. 2.

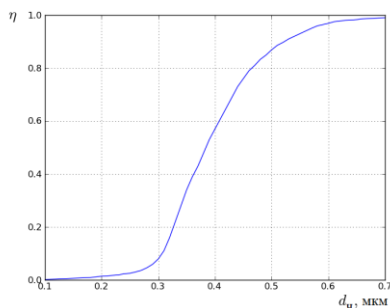


Рис. 9. Зависимость эффективности сепарации частиц масляного аэрозоля из этилен-хладоагента от их размера

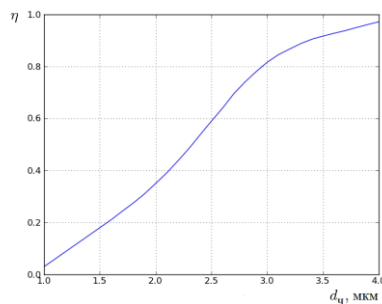


Рис. 10. Фракционная эффективность сепарации капель воды из природного газа

Из графика видно, что наиболее высокая эффективность очистки наблюдается для частиц размером более 3 мкм.

Таблица 2

Характеристика природного газа, поступающего в сепаратор

Состав газа, % об.				
CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	N ₂	CO ₂
98,43	0,11	0,02	1,1	0,34
Плотность газа по воздуху, относительная			0,56	

Выводы

1. Рассмотрен комбинированный сепаратор осушки газов и представлен порядок его расчета.
2. Произведены расчеты модельной системы воздух+вода при различных условиях, по результатам которых были выявлены оптимальные величины удельной поверхности насадки и скорости газа в секции с трубками для дальнейших расчетов.
3. Произведены расчеты реальных процессов: сепарация масляного аэрозоля из этилен-хладоагента; осушка природного газа. По результатам расчетов наблюдается высокая эффективность очистки газов в комбинированном сепараторе.
4. Таким образом, комбинированный сепаратор обеспечивает высокую эффективность (98-99%) удаления жидкой фазы размером более 3 мкм, а масляного аэрозоля – более 1 мкм, имея при этом относительно небольшие геометрические размеры и низкое гидродинамическое сопротивление, а следовательно, и энергозатраты на эксплуатацию.

Summary

The article focuses on the gases cleaning various methods from the dispersed phase, that adversely affects on the holding of technological processes. The design and scheme of the drying gas separator from condensed moisture and the method of its calculation are presented. The dependence of the energy complex of the gas velocity for different nozzles, which shows that the best is to use nozzles "Inzhekhim-2000" with a surface nozzle area of 800 m² / m³. The separation efficiency calculations of water drops from a natural gas-bearing strata gazasenomanskaya and oil aerosol ethylene –coolagents in this unit is calculated. Combined separator ensures high efficiency of the separator removal of the liquid phase (98-99%), larger than 3 microns and oil aerosol – more than 1 m. Thus, a combined separator has a relatively small geometrical dimensions. The device has a low hydrodynamic resistance, thereby energy costs for its operation are reduced.

Keywords: gas separator, drying gas, nozzle, tube with a ribbon screw, separation efficiency.

Литература

1. Лаптев А.Г., Фарахов М.И. Разделение гетерогенных систем в насадочных аппаратах. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2006. 342с.
2. Башаров М.М., Тараскин М.М. Очистка газов от дисперсной фазы в нефтегазохимическом комплексе и энергоресурсосбережение /Под ред. Лаптева А.Г. Казань: Отечество, 2014. 206 с.
3. Фарахов Т.М., Исхаков А.Р. Комплексная очистка газов на ТЭС. Повышение эффективности энергетического оборудования: Материалы конференции. Иваново: ИГЭУ, 2012. С.319–323.

4. Лаптев А.Г., Фарахов М.И. Гидромеханические процессы в нефтехимии и энергетике: пособие к расчету аппаратов. Казань: Изд-во Казанск. гос. ун-та, 2008. 729 с.
5. Сепаратор осушки газов от капельной влаги // Лаптев А.Г., Башаров М.М., Тараскин М.М., Исаков А.Р. пат. 111023 Российская Федерация. № 2011125495/05; заявл. 21.06.2011; опубл. 10.12.11, Бюл. № 34. 2 с.
6. Фарахов Т.М., Исаков А.Р., Минигулов Р.М. Высокоэффективное сепарационное оборудование очистки природного газа от дисперсной среды // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2011. №6. С. 263–277. URL:http://www.ogbus.ru/authors/Farakhov/Farakhov_2.pdf.
7. Фарахов Т.М., Башаров М.М., Шигапов И.М. Гидравлические характеристики новых высокоэффективных нерегулярных теплообменных насадок // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2011. №2. С. 192–207. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Farakhov/Farakhov_1.pdf.
8. Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. М.: Наука, 1980. 176 с.
9. Лаптев А.Г., Исаков А.Р. Математическая модель определения эффективности сепарации аэрозолей в сухих и орошаемых каналах // Инженерно-физический журнал. 2014. Т. 87, № 3. С. 564–569.
10. Рамм В.М. Абсорбция газов: 2-е изд. М.: Химия, 1976. 656 с.
11. Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Минеев Н.Г. Основы расчета и модернизация теплообменных установок в нефтехимии. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2010. 574 с.
12. Фарахов М.И. Энергоресурсосберегающие модернизации установок разделения и очистки газов и жидкостей на предприятиях нефтегазохимического комплекса: дис. ... д-ра техн. наук. Казань: КГТУ, 2009. 380 с.
13. Каган А.М., Лаптев А.Г., Пушнов А.С., Фарахов М.И. Контактные насадки промышленных теплообменных аппаратов / Под ред. Лаптева А.Г. Казань: Отечество, 2013. 454 с.
14. Лаптев А.Г., Фарахов М.И., Миндубаев Р.Ф. Очистка газов от аэрозольных частиц сепараторами с насадками. Казань: Издательство «Печатный двор», 2003. 120 с.
15. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю. Подготовка промышленных газов к очистке. М.: Химия, 1975. 216 с.
16. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю. Очистка промышленных газов от пыли. М.: Химия, 1981. 392 с.
17. Ужов В.Н. Очистка промышленных газов электрофильтрами. М.: Химия, 1967. 344 с.

Поступила в редакцию

28 апреля 2016 г.

Исаков Альберт Рифкатович – младший научный сотрудник кафедры «Технология воды и топлива» (ТВТ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ). Тел.: 8(843)519-42-57; 8-927-458-76-08. . E-mail: aliskhakov@gmail.com.

Башаров Марат Миннахматович – канд. техн. наук, директор по техническому обслуживанию и инжинирингу ОАО «ТАНЕКО», г. Нижнекамск. Тел. 8(843)519-42-57. E-mail: tvt_kgeu@mail.ru.