

ОСУШКА И УДАЛЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ ФРАКЦИЙ ИЗ ПРИРОДНОГО ГАЗА МЕТОДОМ СВЕРХЗВУКОВОЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИИ

Коробченко К.В., Ляпощенко А.А.

Украина, г. Сумы, Сумский государственный университет

Представлена область применения сверхзвуковой низкотемпературной газодинамической сепарации природных газов и математическая модель движения углеводородной смеси через сверхзвуковой сепаратор. Рассмотрены уравнения состояния для описания поведения углеводородных систем. Приведены основные преимущества, результаты экспериментальных исследований и опыт внедрения сверхзвуковых сепараторов.

Добываемый природный газ, как правило, содержит такие примеси, как углекислый газ, сероводород и влагу. Углекислый газ и сероводород в соединении с водой образуют кислоты, вызывающие коррозию металла. Сероводород может вызывать и сульфидное растрескивание металла. По этим причинам углеводородные газы следует осушать и очищать от кислых компонентов. С этой целью их подвергают тщательной обработке с применением комплекса сооружений и технологических схем извлечения водяных паров, кислых и углеводородных компонентов, которые способны в условиях транспортировки конденсироваться с образованием гидратов в трубопроводах. Такая подготовка включает отделение от газа механических примесей, капельной воды и конденсата и последующую осушку. Также возможно при подготовке к переработке извлечение из газа тяжелых углеводородов [1]. Применение абсорбции, адсорбции, низкотемпературной сепарации газа, а также других методов в процессе подготовки природного и попутного нефтяного газов к транспорту и переработке характеризуется сложным аппаратным оформлением и требует значительных капитальных затрат.

В этом плане, несомненно, актуальной представляется новая технология, так называемая сверхзвуковая низкотемпературная газодинамическая сепарация природных газов [2]. Суть этой технологии заключается в том, что при адиабатическом расширении газа в сверхзвуковых соплах происходит его сильное охлаждение за счет перехода тепловой энергии газа в кинетическую энергию потока, а при закрутке потока сконденсировавшиеся при охлаждении потока компоненты за счет центробежной силы отбрасываются к стенкам сепаратора, где и отбираются [3, 4].

На рисунке 1 представлена схема движения потоков в сверхзвуковом сепараторе конструкции голландской компании Twister BV, давшей название такой технологии 3S сепарации (SuperSonic Separation).

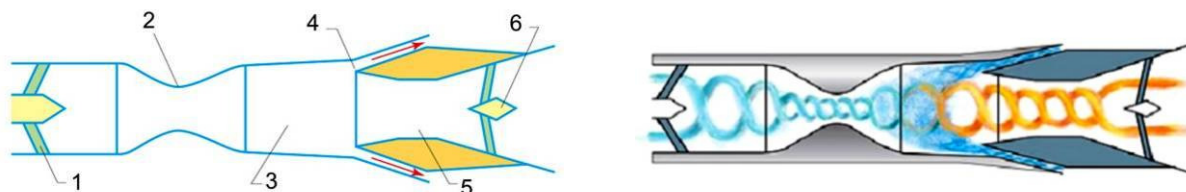


Рисунок 1 – Конструкция и схема движения потоков в 3S-сепараторах:

1 – завихряющее устройство; 2 – сопло Лаваля; 3 – рабочая секция; 4 – двухфазный сепаратор газ-жидкость; 5 – диффузор; 6 – направляющий аппарат

В процессе сверхзвуковой сепарации температура изменяется от пластовой температуры до низких температур, вплоть до криогенных. Изменение термобарических условий приводит к изменению фазового состояния смеси от однофазного в пласте до двухфазного (жидкость - пар). Для построения математической модели движения углеводородной смеси через сверхзвуковой сепаратор необходимо уметь описывать фазовое состояние системы в условиях термодинамического равновесия. С некоторыми упрощениями система уравнений Эйлера описывает сверхзвуковые течения [5]:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (1) \qquad \frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla) V + \frac{1}{\rho} \nabla p = 0 \quad (2)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + V \cdot \nabla \right) \left(c_v T + \frac{|V|^2}{2} \right) + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (pV) = 0 \quad (3) \qquad p = \rho RT \quad (4)$$

где V – значение вектора скорости; ρ – плотность массы; T – температура; c_v – теплоемкость при постоянной плотности; R – универсальная газовая постоянная.

Первое уравнение - следствие закона сохранения массы, второе - закона сохранения импульса, третье - закона сохранения энергии, четвертое - уравнение Клапейрона. Эти уравнения выводятся из общих законов природы, постулированных в виде интегральных законов баланса массы, импульса, энергии. «Внутренними» границами в области определения сверхзвукового течения являются кусочно гладкие поверхности сильного разрыва - скачки уплотнения и поверхности тангенциального разрыва, в частности, свободные поверхности. На них задаются соотношения между V , p , ρ , T («условия Гюгонио»), которые следуют из интегральных законов сохранения [5].

К настоящему времени предложено большое число уравнений состояния [6, 7]. Большинство из них предназначены для описания поведения углеводородных систем.

Эти уравнения можно условно разделить на два основных вида: многокоэффициентные и кубические. Для инженерных расчетов более удобны кубические уравнения состояния, большинство из которых основаны на самом простом из кубических уравнений - уравнении Ван-дер-Ваальса [1]:

$$p = \frac{AT}{v-b} - \frac{a}{v^2},$$

где a и b – постоянные коэффициенты; v – мольный объем вещества; T – температура; A – эмпирический коэффициент.

Перед сверхзвуковым сепаратором давление, температура и скорость газа равны соответственно p_1 , T_1 и u_1 , а на выходе - p_2 , T_2 и u_2 ($p_2 < p_1$, $T_2 < T_1$ и $u_2 > u_1$). Понижение давления и температуры приводит к конденсации паров воды и тяжелых углеводородных компонентов. Основным параметром, характеризующим возможность и скорость нуклеации жидкой фазы, является пересыщение s , равное отношению давления пара p_v к давлению насыщения $p_{sat(T)}$ при температуре T [1]:

$$s = \frac{p_v}{p_{sat(T)}},$$

Необходимое условие конденсации пара - выполнение неравенства $s > 1$. Но этого недостаточно. Нужно также, чтобы пересыщение было больше критического значения [1]:

$$s > s_{cr} = \exp\left[1,74 \cdot 10^7 \frac{M_L}{\rho_L} \left(\frac{\Sigma}{T}\right)^2\right],$$

где M_L, ρ_L - молекулярная масса и плотность конденсирующегося компонента; Σ - коэффициент поверхностного натяжения жидкой фазы.

Если параметры сверхзвукового сепаратора таковы, что p_1, T_1 и p_2, T_2 удовлетворяют неравенству $s > s_{cr}$, то при сужении потока в сепараторе, а возможно, и сразу за ним происходит образование новой фазы, интенсивность которого зависит от степени пересыщения смеси.

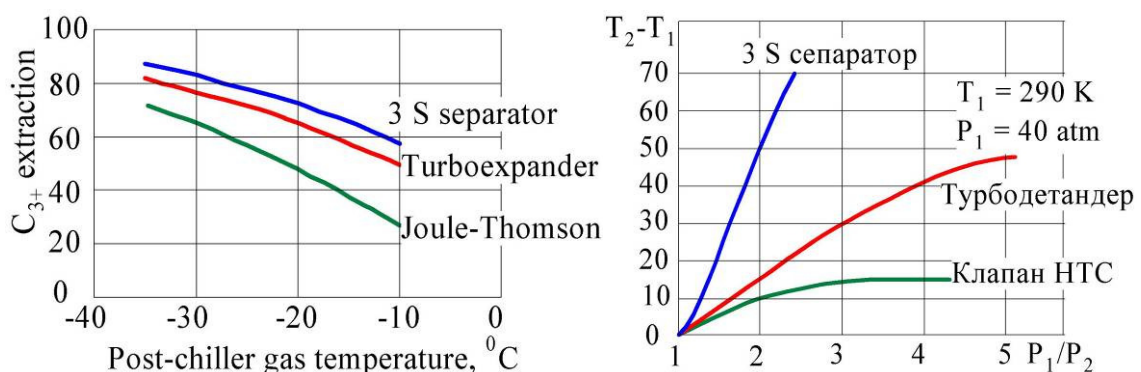


Рисунок 2 - Сравнительная оценка характеристик НТС природного газа

Опытно-промышленные образцы сверхзвуковых сепараторов сегодня проходят промысловую апробацию как за рубежом, так и в странах СНГ, в частности, на УКПГ промыслов Ямбургского и Губкинского месторождений (рис.2, 3).

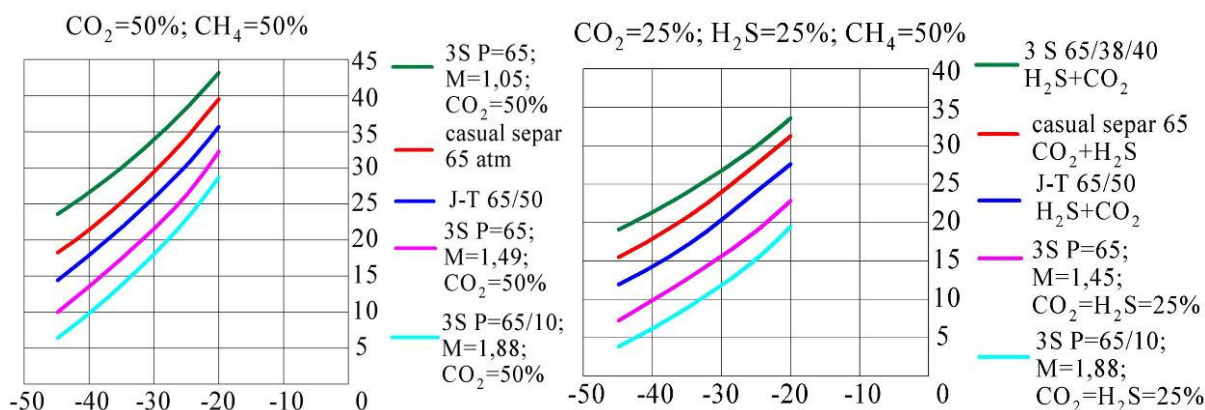


Рисунок 3 – Эффективность извлечения кислых компонентов в 3S сепараторе

Использование 3S сепараторов для осушки и удаления тяжелых фракций из природного газа ведет к следующим положительным эффектам: отказ от использования химикатов для борьбы с гидратообразованием (время пребывания газожидкостной смеси внутри сепаратора составляет тысячные доли секунды, гидраты не успевают сформироваться); малая занимаемая площадь и масса установки, высокая транспортабельность и монтажеспособность; в 3S сепараторе отсутствуют движущиеся элементы; углубленное извлечение пропан-бутанов и этана; предотвращение уноса конденсата из сепараторов НТС за счет увеличения степени извлечения фракций C₅₊; эффективное извлечение CO₂ и H₂S из кислых природных газов.

1. Синайский Э.Г., Лапига Е.Я., Зайцев Ю.В. Сепарация многофазных многокомпонентных систем. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. – 621 с.: ил.
2. Логвина А.В., Склабинський В.І., Ляпоценко О.О. Використання стрибка густини для покращення сепарації газорідних систем // Технології XXI століття - Суми 2009. - 41 с.
3. Alfayrov V., Bagirov L., Imaev S., Lacey J., Dmitriev L., Feygin V. Supersonic nozzle efficiently separates natural gas components // Oil & Gas Journal. - 2005. - V. 103. N 20.
4. Okimoto F.T., Brouwer J.M. Supersonic gas conditioning // World Oil Magazine. - 2002. - V. 223, N. 8.
5. Шифрин Э.Г. Потенциальные и вихревые трансзвуковые течения идеального газа. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 320 с. – ISBN 5-9221-0038-6.
6. Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. – М.: Мир, 1972. – 440 с.
7. Waholder E., Weihs D. Slow motion of fluid sphere in the vicinity of another sphere or a plan boundary // Chem. Eng. Sci. – 1972. V. 27. - № 10. – P. 1817 – 1827.