УДК 622.276

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В КАНАЛЕ СВЕРХЗВУКОВОГО СЕПАРАТОРА

Имаев С.З., Николаев Е.А

ООО «ЭНГО Инжиниринг», Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

В работе изучается структура потока в сверхзвуковых сепараторах, предназначенных для разделения компонентов природных газов. В этих сепараторах за счет обеспечения в сверхзвуковых соплах высоких скоростей потока можно реализовать необходимые термодинамические условия для конденсации и сепарации отдельных фракций, входящих в состав газа. В последние годы особенно активно данный вид сепараторов начинают использовать для разделения компонентов природных и попутных нефтяных газов.

Изучение структуры потока в газодинамическом канале сверхзвукового сепаратора ключевая задача при конструировании промышленных образцов таких сепараторов.

В предлагаемой работе анализируются ключевые эффекты, оказывающие влияние на поведение основных газодинамических характеристик потока в канале сверхзвукового сепаратора.

ВВЕДЕНИЕ

Сверхзвуковой сепаратор - это циклонный сепаратор, в канале которого реализуются сверхзвуковые скорости потока. За счет реализации высоких скоростей, соответствующих по величине числу Маха М от 1.3 до 2, удается понизить температуру газа на 70 °С и более градусов, и таким образом обеспечить условия для конденсации и сепарации тяжелых фракций, содержащихся в газе. Данные сепараторы используются в нефтяной и газовой промышленности для извлечения из природного газа целевых фракций, таких как углеводородный конденсат, пропан-бутановая и этановая фракции, а также водяных паров. Технология сверхзвуковой сепарации в настоящее время успешно используется на нескольких промышленных объектах в России и за рубежом [1,2].

Схема сверхзвукового сепаратора показана на Рис.1. В таком сепараторе входной поток газа закручивается в лопатках неподвижного завихрителя 1, далее закрученный поток ускоряется до сверхзвуковой скорости в сверхзвуковом сопле Лаваля 2. В сверхзвуковом потоке за счет преобразования потенциальной энергии газа в кинетическую энергию происходит сильное охлаждение газа. Охлажденный поток направляется в рабочую часть 3, в которой происходит конденсация тяжелых фракций природного газа и воды. Образующиеся капли за счет центробежных сил, обусловленных закруткой потока, двигаются к стенкам рабочей части. На выходе из рабочей части формируется центральное ядро потока, очищенное от целевых фракций, и пристеночный двухфазный пограничный слой, состоящий из жидких углеводородов, воды и газа. Посредством щелевого отбора двухфазный пристеночный слой отделяется от ядра потока и направляется в диффузор 4, в котором происходит торможение потока, Очищенный газ из ядра потока поступает в диффузор 5 и также затормаживается.

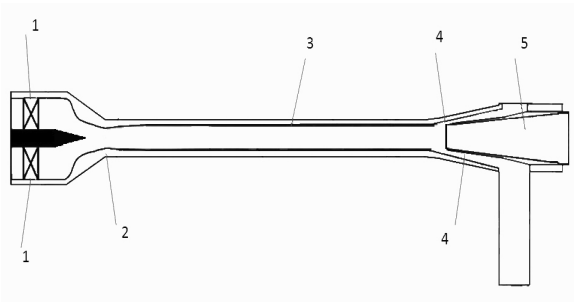

Рис.1 Схема сверхзвукового сепаратора.

Течения природного газа высокого давления в таких устройствах сопровождаются сложными физическими эффектами, основными из которых являются:

сильная нелинейная зависимость термодинамических параметров природного газа, таких как теплоемкость, энтальпия, скорость звука, сжимаемость и некоторых других, от давления и температуры, обусловленная высоким уровнем давлений (межмолекулярным взаимодействием) и многокомпонентным составом газа;

эффект Джоуля-Томсона;

конденсация компонентов природного газа, в высокоскоростном потоке газа;

эффект взаимного растворения компонентов природного газа в конденсате, образующемся при конденсации.

образование и рост двухфазного пограничного слоя на поверхности газодинамического канала сепаратора при наличии в нем высокоскоростного закрученного потока.

Поэтому создание эффективных сверхзвуковых сепараторов невозможно без точного моделирования процессов происходящих в их газодинамическом канале.

В данной работе представлены результаты численного моделирования течения газа в канале сверхзвукового сепаратора. Моделирование течения газа проводилось как с использованием вычислительных комплексов ANSYS CFX, так и с использованием численных кодов созданных в ООО «ЭНГО Инжиниринг».

Для моделирования закрученного течения природного газа в канале 3S-сепаратора была создана компьютерная трехмерная модель расчета с использованием специального программного комплекса созданного в Центре «ЭНГО». Моделирование осуществлялось посредством решения уранений Навье-Стокса с применением дифференциальной к-ε модели турбулентности. Исследования выполнены для канала с адиабатической стенкой. Зависимость закрутки потока в форкамере сопла от радиуса принималась линейной (вид зависимости зависит от типа закручивающего устройства).

ВЛИЯНИЯ РЕАЛЬНЫХ СВОЙСТВ ГАЗА НА ПАРАМЕТРЫ ТЕЧЕНИЯ В СВЕРХЗВУКОВОМ СЕПАРАТОРЕ

В подавляющем большинстве задач газовой динамики принято считать, что газы удовлетворяют уравнению состояния совершенного газа. В действительности для любого реального газа это уравнение является только приближением к точному уравнению состояния. Природный газ, представляющий собой смесь углеводородов метанового ряда (метана, этана, пропана, бутана и т.д.), диоксида углерода, сероводорода и азота, можно считать термически и калорически совершенным газом лишь при нормальных температурах и давлениях ($P \approx 1$ атм., $T \approx 290$К). При температурах 250-350 К и давлениях 40-150 атм. влияние эффектов реального газа, обусловленных высоким давлением (межмолекулярным взаимодействием) и многокомпонентным составом газа, является определяющим.

Обработка, переработка и транспорт природного газа, как правило, ведется при высоких давлениях природного газа, поэтому при исследовании высокоскоростных течений природного газа в сверхзвуковом сепараторе в первую очередь необходимо выяснить характер влияния реальных свойств газа на основные параметры течений. Для расчета термодинамических свойств реального газа необходимо знать его уравнение состояния. В настоящее время известно более двухсот уравнений, связывающих между собой давление, объем и температуру реального газа. В данной работе использовано уравнение Пенга-Робинсона.

Для определения влияния реальных свойств газа на структуру течения газа в канале сверхзвукового сепаратора, был выбран состав природного газа, состоящий из метана и паров воды. Принималось, что конденсация паров воды происходит равновесно.

Сравнение расчетных параметров потока в канале сверхзвукового сепаратора, полученных с использованием уравнения Пенга-Робинсона и Клайперона-Менделеева показывает, что влияние эффектов реального газа слабо сказывается на распределение статических давлений в канале сверхзвукового сепаратора (отклонения не превышают 5%). В тоже время плотность реального газа близка к плотности идельного газа только в областях, где давление ниже 10 атм. Особенно показательно в этой связи распределение плотности газа в критическом сечении сопла На Рис.2 сплошной линией показана плотность газа в критическом сечение, рассчитанная с использованием уравнения Клайперона Менделеева,

а пунктирной линией – уравнения Пенга-Робинсона. Плотность реального газа близка к плотности идеального газа только около оси сопла, где поток сильно разрежен.

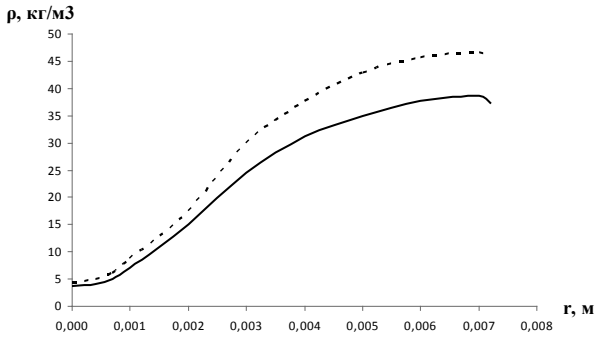

Рис.2 Распределение плотности газа по радиусу сопла в критическом сечении.

Разница в плотностях реального и идеального газа оказывает влияние на распределение скорости закрутки потока (тангенциальной скорости потока) вдоль радиуса сопла. Так, например, в критическом сечении сопла максимальная разница в плотности газа достигает 8% .

Температура газа, рассчитанная по уравнению состояния Пенга-Робинсона ниже, чем температура гза полученная из приближения идеального газа. Это связано с эффектом Джоуля-Томсона Разница температур для случаев реального и идеального газа может достигать 40 и более градусов.

Существенное влияние реальных свойств природных газов на структуру течения газа в канале сверхзвукового сепаратора приводит к необходимости расчета течения в любых условиях (за исключением вариантов с низкими давлениями газов неинтересных с практической точки зрения) с применением уравнений состояния реальных газов.

СТРУКТУРА ПОТОКА В КАНАЛЕ СВЕРХЗВУКОВОГО СЕПАРАТОРА

Некоторые результаты моделирования течения природного газа в канале сверхзвукового сепаратора, с использованием уравнения Пенга-Робинсона, показаны на нижеприведенном Рис.3. На нем показаны распределения основных газодинамических параметров вдоль рабочей части канала сепаратора, таких как статическая температура газа и числа Маха.

Рис.3 Распределение статических давлений и чисел Маха в канале сверхзвукового сепаратора Рис.4.

Даление и температура газа на входе в сверхзвуковой сепаратор для приведенного примера соответствукт 100 атм. и 25 °С. Состав газа соответствует составу газа сеноманских залежей Уренгойского месторождения (содержание метана свыше 98 % mol.)

Как видно из представленных материалов даже при небольших сверхзуковых скоростях потока (M~1.4) в канале 3S-сепаратора можно достичь скоростей потока превышающих 500 м/с. При таких скоростях потока статическое давление газа в канале 3S-сепаратора достигает величин меньших 30 атм., а температура газа порядка минус 100 °С.

В канале сверхзвукового сепаратора наблюдается сильная неоднородность скорости газа в поперечном сечении сепаратора. Так для периферийных слоев газа скорость потока с числом Маха близким к M=1.4 реализуется для заданной геометрии сопла уже в сечении, находящемся в непосредственной близости от критического сечения сопла. В центральной области сверхзвукового сопла наблюдаются дозвуковые области. Эти дозвуковые области исчезают только на расстоянии нескольких калибров от критического сечения сопла. На выходе из сопла сверхзвукового сепаратора реализуется довольно однородный профиль статического давления,

что благоприятно сказывается на работе выходных диффузоров.

За счет создания чрезвычайно высоких значений тангенциальной составляющей скорости потока (200 – 400 м/с) в канале сверхзвукового сепаратора, возможна организация сепарации капель субмикронного размера.

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ЗАКРУТКИ ПОТОКА НА СТРУКТУРУ ПОТОКА В СВЕРХЗВУКОВОМ СЕПАРАТОРЕ

Особый интерес представляет изучение влияния степени закрутки потока на газодинамические параметры потока в канале сверхзвукового сепаратора. В частности при конструировании сверхзвуковых сепараторов важно знать влияние закрутки на расход газа через сверхзвуковое сопло, а также влияние закрутки на потери полного давления в канале сепаратора.

На Рис.4 представлена расходная характеристика сопла, зависимость приведенного расхода газа от угла закрутки потока на входе в сопло сверхзвукового сепаратора. Под приведенным расходом понимается величина:

$$G = \frac{M}{M_н},$$

где $M_Н$ - расход газа без закрутки потока, M - расход газа при закрутке потока.

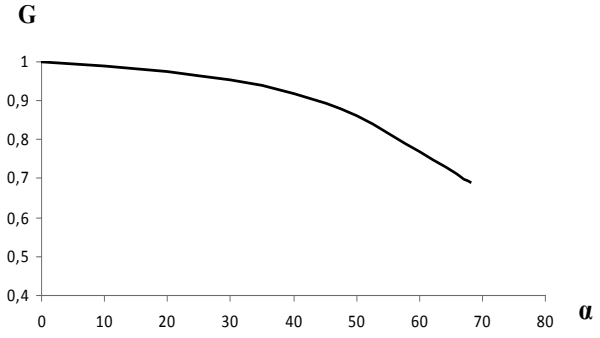

Рис.4 Зависимость безразмерного расхода газа G от угла закрутки потока в форкамере сопла.

Как видно из Рис.8, увеличение тангенциальной скорости потока может приводить к значительному уменьшению расхода газа через канал сверхзвукового сепаратора.

Для оценки влияния потерь энергии в канале сепаратора от тангенциальной скорости потока в канале сепаратора были выбраны два параметра E и E_1, которые вычислялись для каждого угла закрутки.

$$E = \frac{\int \rho U_x \frac{V_\varphi^2}{2} dS}{\int (H_0 - h)\rho U_x dS}, \qquad (2)$$

где U_x - аксиальная скорость (скорость вдоль оси сопла) в критике, V_φ - тангенциальная скорость в критике, H_0 -энтальпия на входе в сопло, h -энтальпия в критике, dS -элемент площади.

$$E_1 = \frac{W^2 M/2}{\int (H_0 - h)\rho U_x dS}, \qquad (3),$$

где $W = \frac{K}{d_{кр}/2}$ - приведенная скорость, $d_{кр}$ - диаметр критики сопла.

$K = \frac{\int \rho U_{0x} V_{0\varphi} r_0 dS_0}{\int \rho U_x dS}$ - приведенный импульс.

Индекс $_0$ указывает, что значения взяты на входе в сопло.

На Рис.5 приводится зависимость коэффициента E_1 от E.

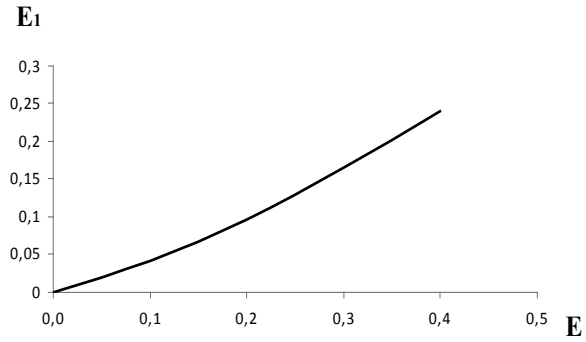

Рис.5 Зависимость параметра E_1 от E.

Зависимость потерь энергии в канале сверхзвукового сепаратора от тангенциальной скорости потока важна для определения максимальной величины закрутки потока, которую можно реализовать при заданном перепаде давления на устройстве.

Отдельно было исследовано влияние закрутки потока на потери полного давления в диффузоре сверхзвукового сепаратора.

На Рис.6 показаны потери полного давления в диффузоре сверхзвукового сепаратора в зависимости от угла закрутки газа в форкамере сепаратора. Потери полного давления рассчитывались по формуле:

$П = (P_c - P_т)/P_c$,

где P_c – полное давление в сопле перед диффузором, где $P_т$ – полное давление после диффузора.

Оптимальный угол раскрытия диффузора позволяет добиться стабильных потерь давления в канале сверхзвукового сепаратора при углах закрутки потока в форкамере сепаратора меньших 40 градусов, при превышении этого угла закрутки потери полного давления существенно возрастают.

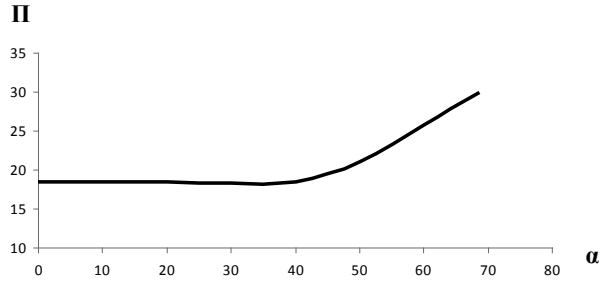

Рис.6 Зависимость потерь полного давленгия в диффузоре сверхзвукового сепаратора от угла закрутки потока в форкамере сопла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что даже при небольших сверхзвуковых скоростях потока (M~1.4) в канале сверхзвукового сепаратора можно достичь скоростей потока превышающих 500 м/с. В канале сверхзвукового сепаратора наблюдается чрезвычайно сильная неоднородность скорости газа в поперечном сечении сепаратора. Так для периферийных слоев газа скорость потока с числом Маха близким к M=1.4 реализуется для заданной геометрии сопла уже в сечении, находящемся в непосредственной близости от критического сечения сопла. В центральной области сверхзвукового сопла наблюдаются дозвуковые области. Эти дозвуковые области исчезают только на расстоянии нескольких калибров от критического сечения сопла. На выходе из сопла сверхзвукового сепаратора реализуется довольно однородный профиль статического давления, что благоприятно сказывается на работе выходных диффузоров.

За счет создания чрезвычайно высоких значений тангенциальной составляющей скорости потока (200 – 400 м/с) в канале сверхзвукового сепаратора, возможна организация сепарации капель субмикронного размера.

В работе приводятся зависимости потерь энергии в канале сверхзвукового сепаратора от тангенциальной скорости потока, необходимые для определения максимальной величины закрутки потока, которую можно реализовать при заданном перепаде давления на устройстве.

Результаты проведенного численного моделирования течения газа в канале сверхзвукового сепаратора были использованы при создании промышленных образцов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Р.В. Корытников, Д.А. Яхонтов, Л.А. Багиров, Дмитриев Л.М., Имаев С.З. Промышленные испытания технологии сверхзвуковой сепарации на установке НТС УПМТ УКПГ-1С Заполярного НГКМ // Нефтепромысловое дело.– 2012. – № 6. – Р. 36 – 40.
2. Андреев О.П., Минигулов Р.М., Корытников Р.В, Багиров Л.А., Имаев С.З. Технологические схемы УКПГ на основе 3S-технологии для северных нефтегазоконденсатных месторождений //Наука и техника в газовой промышленности.– 2009. – № 2. – Р. 4 – 10.