

УДК 533.6.011.5

С.З. Имаев¹, e-mail: imaevsalavat@mail.ru; М.И. Сафьянников¹, e-mail: safyannikov.matvey@gmail.com

¹ООО «ЭНГО Инжиниринг» (Москва, Россия).

Регулирование сверхзвуковых сепараторов

В статье приводится описание метода регулирования расхода газа в 3S-сепараторе посредством введения центрального тела (конуса) в сопло 3S-сепаратора. Проведен анализ опубликованных работ и патентов по теме «Сверхзвуковые сепараторы», описываются процессы создания модели сопла и моделирования течения в программном комплексе ANSYS CFX. Приводятся результаты численного моделирования для конкретного режима эксплуатации 3S-сепаратора, в котором давление и температура газа на входе в 3S-сепаратор составляли 60 атм и 250 К, соответственно. Рассмотрены распределения параметров потока (температуры, давления, числа Маха и скорости закрутки) для четырех различных сечений сопла (параллельного оси симметрии сопла и трех перпендикулярных оси симметрии: критического сечения; сечения, в котором располагается конец конусообразного тела; выходного сечения). Представлены результаты моделирования течения природного газа, состоящего из смеси метана и пентана, в сопле 3S-сепаратора для двух вариантов: без центрального тела и с центральным телом (конусом), введенным в сопло на максимальное расстояние. Сравниваются и анализируются параметры потока. Так, наибольшее влияние наличие конуса оказало на скорость закрутки и температуру в выходном сечении. Установлено, что снижение температуры газа с одновременным увеличением скорости закрутки для варианта с конусом позволяет обеспечить более качественную сепарацию конденсируемых в сопле фракций. Полученные результаты позволяют утверждать, что введение центрального тела дает возможность регулировать расход газа через 3S-сепаратор в качестве не только вынужденной меры для сохранения расчетного технологического режима при снижении дебитов газа, но и целенаправленного действия для повышения качества очистки газа при незначительном снижении расхода газа.

Ключевые слова: природный газ, 3S-сепаратор, сверхзвуковая сепарация, регулирование расхода, эффективность извлечения компонентов, ANSYS CFX.

.....

S.Z. Imaev¹, e-mail: imaevsalavat@mail.ru; M.I. Safyannikov¹, e-mail: safyannikov.matvey@gmail.com

¹ENGO Engineering Ltd. (Moscow, Russia).

Regulation of supersonic separators

The paper describes the method of gas flow control in the 3S-separator by setting a central body (cone) in 3S-separator's nozzle. The 3S-technology is based on the principle of gas mixture cooling by adiabatic expansion of the swirling gas flow in a supersonic nozzle. The paper and patents review of published papers on 'Supersonic separators' was made. This article describes how to create the model and nozzle flow simulation software package ANSYS CFX. The simulation was performed for the operating modes 3S-separator, where the pressure and the temperature of the gas entering the separator were 3S-60 atm. and 250 K, respectively. The results of numerical modeling: the distribution of flow parameters (temperature, pressure, Mach number and spin speed) for four different nozzle cross sections (parallel to the axis of the nozzle symmetry and three perpendicular to the axis of symmetry: the critical section, cross-section, which is the end of the cone-shaped body, and an output section). The paper presents the results of modeling the flow of natural gas consisting of a mixture of methane and pentane, in a nozzle of separator 3S for two variants without a central body and with the central body (cone) which was introduced at the maximum distance of the nozzle. The paper makes a comparison and analysis of flow parameters. The greatest influence on the presence of the cone had a spin speed and the temperature in the outlet section. Reducing the temperature of the gas at the same time increasing spin speed for the version with a cone allows a better separation of the condensable fractions in the nozzle. The results suggest that the introduction of a central body provides the ability to regulate the flow of gas through the 3S-separator not only in the form of forced measures to preserve the design of technological regime at lower flow rates of gas, but also as a purposeful action to increase gas cleaning quality with a slight decrease in gas consumption.

Keywords: natural gas, 3S-separator, supersonic separation, flow rate regulation, refining's efficiency, ANSYS CFX.

СВЕРХЗВУКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ГАЗОВ

В последние годы на объектах подготовки природного газа к транспорту и на газоперерабатывающих заводах начинают интенсивно использоваться сверхзвуковые технологии обработки природных и попутных газов, наиболее известной из которых является 3S-технология.

В ее основе лежит принцип охлаждения смеси газов при адиабатическом расширении закрученного потока газа в сверхзвуковом сопле. Закрутка потока осуществляется с помощью завихрителя тангенциального или лопаточного типа, устанавливаемого в форкамере сопла. В сверхзвуковом потоке температура газа значительно ниже температуры газа на входе в сопло из-за перераспределения кинетической и потенциальной энергии потока (кинетическая энергия потока возрастает, соответственно падает потенциальная энергия, линейно зависящая от температуры газа). За счет того, что скорость потока в сверхзвуковом сопле составляет 600–800 м/с даже при небольших числах Маха ($M \sim 1,3-2,0$), температура газа в сверхзвуковом потоке достигает 60–100 °С даже при положительной температуре газа на входе в сопло. При такой низкой температуре происходит конденсация не только компонентов тяжелее этана (пропана, бутана, пентана и т. д.), но и части метана с этаном. Поэтому такой способ охлаждения позволяет обеспечивать высокие степени извлечения различных компонентов природного газа. Образовавшиеся капли сконденсировавшихся фракций сепарируются к стенкам сопла за счет их движения в поле центробежных сил закрученного потока. Отбор двухфазного потока со стенок осуществляется в специальной разделительной секции, размещенной на выходе из сопла. На выходе из этой секции устанавливаются диффузоры, в которых за счет расширения геометрии канала происходит торможение потока, и соответственно, возрастает температура газа. Диффузоры устанавливаются как в потоке очищенного газа, так и в

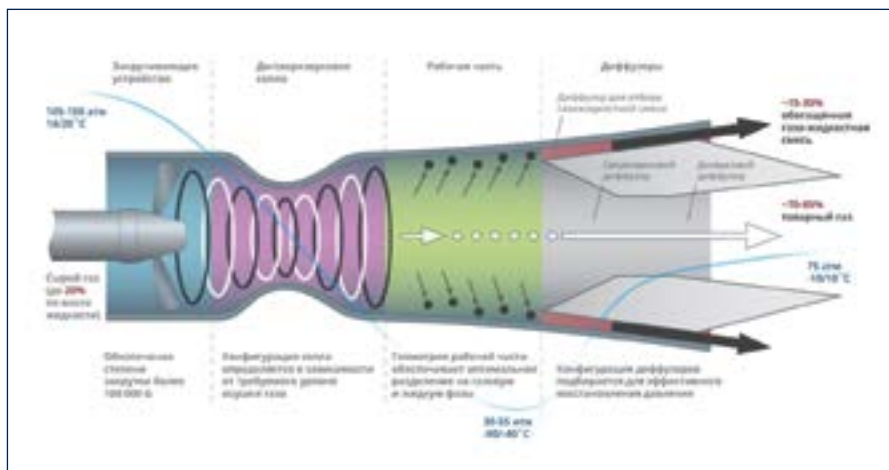


Рис. 1. Принципиальная схема 3S-сепаратора

Fig. 1. 3S-separator basic circuit diagram

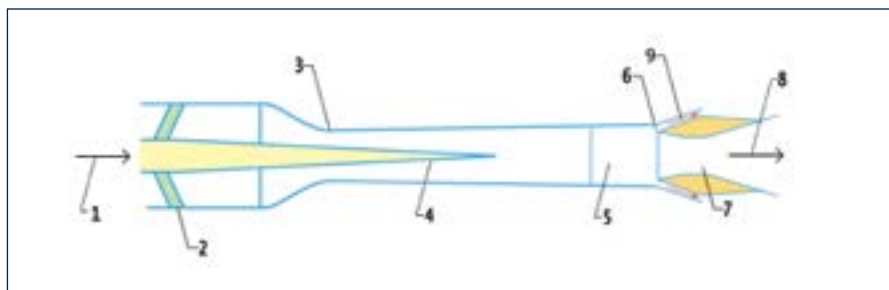


Рис. 2. Схема 3S-сепаратора с устройством регулирования расхода газа:

1 – входной поток; 2 – устройство закрутки; 3 – сопло; 4 – устройство регулирования расхода (конус); 5 – рабочая секция; 6 – разделитель «газ – жидкость»; 7 – диффузор; 8 – выходной поток; 9 – двухфазный поток

Fig. 2. 3S-separator diagram with gas flow rate control device:

1 – input flow; 2 – whirl device; 3 – nozzle; 4 – flow control device (cone); 5 – active section; 6 – separator “gas – liquid”; 7 – diffuser; 8 – output flow; 9 – two-phase flow

двухфазном потоке, содержащем извлеченные компоненты. Схематически устройство для реализации описанного способа сверхзвуковой сепарации (3S-сепаратор) показано на рисунке 1. В настоящее время установки 3S-сепарации эксплуатируются на Губкинской установке комплексной подготовки газа (УКПГ) ОАО «РН-Пурнефтегаз», Северо-Комсомольской УКПГ ОАО «РН-Пурнефтегаз», а также на УКПГ УАНА и ТЛМДВ месторождения Tarim компании PetroChina (Китай).

Все эти установки предназначены для подготовки газа к транспорту и обеспечения необходимых точек росы по воде и углеводородам в товарном газе. Последняя установка обеспечивает

извлечение из природного газа пропана и компонентов тяжелее пропана с дальнейшим производством смеси пропан-бутан технической.

Успешно проведены межведомственные испытания 3S-технологии на установке УПМТ Заполярного НГКМ ПАО «Газпром» [1–2] и на компрессорной станции компании TransCanada Pipelines (Канада). Обзор промышленных установок 3S-сепарации приведен в работе [3].

Результаты промышленного использования выявили такие эксплуатационные особенности 3S-сепараторов, как:

- надежность, обусловленная отсутствием движущихся или вращающихся элементов в конструкции;
- простота монтажа и эксплуатации;

Ссылка для цитирования (for citation):

Имаев С.З., Сафьянников М.И. Регулирование сверхзвуковых сепараторов // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2016. № 9. С. 98–104.

Imaev S.Z., Safyannikov M.I. Regulation of supersonic separators (In Russ.). Territorija «NEFTEGAZ» = Oil and Gas Territory, 2016, No. 9, P. 98–104.



Рис. 3. Рассматриваемые сечения
Fig. 3. Cross sections under consideration

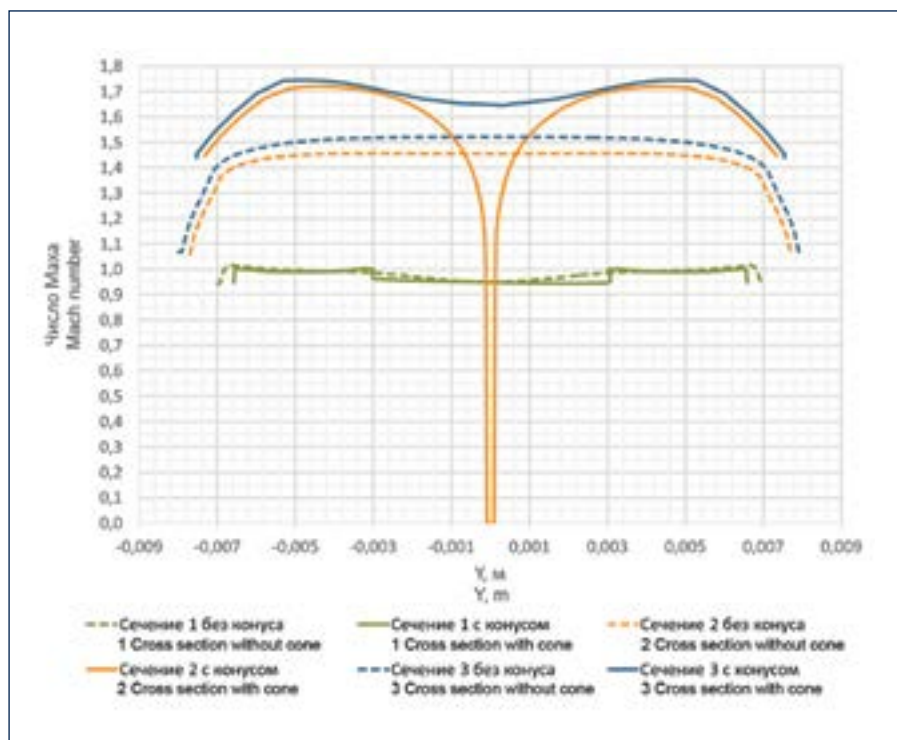


Рис. 4. Распределение числа Маха по сечениям вдоль сопла 3S-сепаратора для вариантов с конусом и без
Fig. 4. Mach number distribution along the cross sections of 3S-separator nozzle for the option with and without cone

- низкие капитальные и эксплуатационные затраты;
- более широкие по сравнению с турбодетандерами диапазоны рабочих параметров (изменения расходов, давлений, составов и т. п.);
- возможность работы при наличии жидкости во входном потоке газа (что абсолютно неприемлемо для турбодетандеров);
- возможность установки вне обогреваемых помещений (особенно важно в арктических районах);
- возможность установки на объектах без обслуживающего персонала (до-

бычные платформы), а также в подводных добычных комплексах. Технология 3S-сепарации может также применяться и для очистки природных газов от кислых компонентов, таких как сероводород и углекислый газ [4–5]. Изучению технологии сверхзвуковой сепарации посвящено множество научных работ как российских, так и зарубежных авторов. Так, в работе [6] изучена эффективность сепарации в сверхзвуковом сепараторе и рассмотрен двухфазный поток «газ – жидкость» без учета фазового перехода и процесса каплеобразования (размер

капель принимается постоянным). В работе приведено сравнение результатов математического моделирования турбулентности и эксперимента, в результате которого модель турбулентности Рейнольдсовых напряжений признается наиболее точно описывающей турбулентность в сверхзвуковом сепараторе. Результаты сравнений математического моделирования и эксперимента говорят о точном теоретическом описании процесса (погрешность не превышает 6%). В ходе экспериментов было показано, что чем больше перепад давления, тем выше скорость закрутки и больше эффективность сепарации.

В работе [7] представлено сравнение научно-технических разработок по повышению эффективности процессов газоочистки (насадочного сепаратора, комбинированных сепараторов, фильтров и сверхзвукового низкотемпературного сепаратора). В работе приводятся основные параметры природного газа при прохождении через сверхзвуковые сепараторы в установке низкотемпературной сепарации. Авторы констатируют, что сверхзвуковая сепарация является наиболее перспективным методом разделения газоконденсатных смесей.

В работе [8] исследован процесс конденсации в сверхзвуковом сепараторе с переменной длиной сопла, изучено изменение интенсивности закрутки, которая определялась как отношение средних по сечению тангенциальной и продольной скоростей, в зависимости от отношения длины сопла сверхзвукового сепаратора к длине закручивающего устройства. Показано, в частности, что при максимальном перепаде давлений на входе и на выходе оптимальное соотношение длин должно быть равно 8, а с уменьшением перепада давлений должно пропорционально уменьшаться. В статье [9] рассматриваются две технологии газодинамического метода разделения газовых смесей: 3S-сепаратор и трехпоточная вихревая труба (ТВТ). Авторы производят сравнение двух технологий подготовки попутного нефтяного газа, в результате которого приходят к выводу, что ТВТ эффективнее в связи с более низкой стоимостью и большей хладопроизводительностью.

Стоит отметить, что авторам не удалось произвести сравнение экспериментальных данных, поэтому анализ производился на теоретической базе.

ПРИНЦИП РЕГУЛИРОВАНИЯ РАСХОДА ОБРАБАТЫВАЕМОГО ГАЗА В 3S-СЕПАРАТОРЕ

Объекты подготовки и переработки газа (УКПГ, ГПЗ) работают в условиях изменения расхода газа, вызванных сезонностью и другими факторами. Поэтому в промышленных установках 3S-сепарации предусматриваются различные варианты регулирования расхода, в основном связанные с использованием нескольких параллельно расположенных 3S-сепараторов и регулированием входного давления. Важно также иметь возможность регулировать расход газа за счет автоматического изменения газодинамических характеристик внутреннего канала в 3S-сепараторе.

В данной работе анализируется возможность регулирования режимов работы сверхзвукового сепаратора посредством изменения положения специального конуса, вставленного в сверхзвуковое сопло. Вдвигая и выдвигая конус, можно изменять критическое сечение сопла, а значит, обеспечивать заданный технологический режим работы сепаратора при изменении расхода газа.

Схема 3S-сепаратора с центральным коническим телом показана на рисунке 2. Проводимый в работе анализ базируется на результатах численного моделирования течения газа в 3S-сепараторе при регулировании расхода обрабатываемого газа.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА ВНУТРИ 3S-СЕПАРАТОРА ПРИ РЕГУЛИРОВАНИИ РАСХОДА ГАЗА

Моделирование течения газа в 3S-сепараторе проводилось с помощью программного комплекса ANSYS CFX.

Была создана компьютерная трехмерная модель закрученного течения газа в канале 3S-сепаратора. Моделирование осуществлялось посредством решения уравнений Навье – Стокса с применением дифференциальной моделью Shared Stress Transport (SST) модели турбулентности. Исследования выполнены

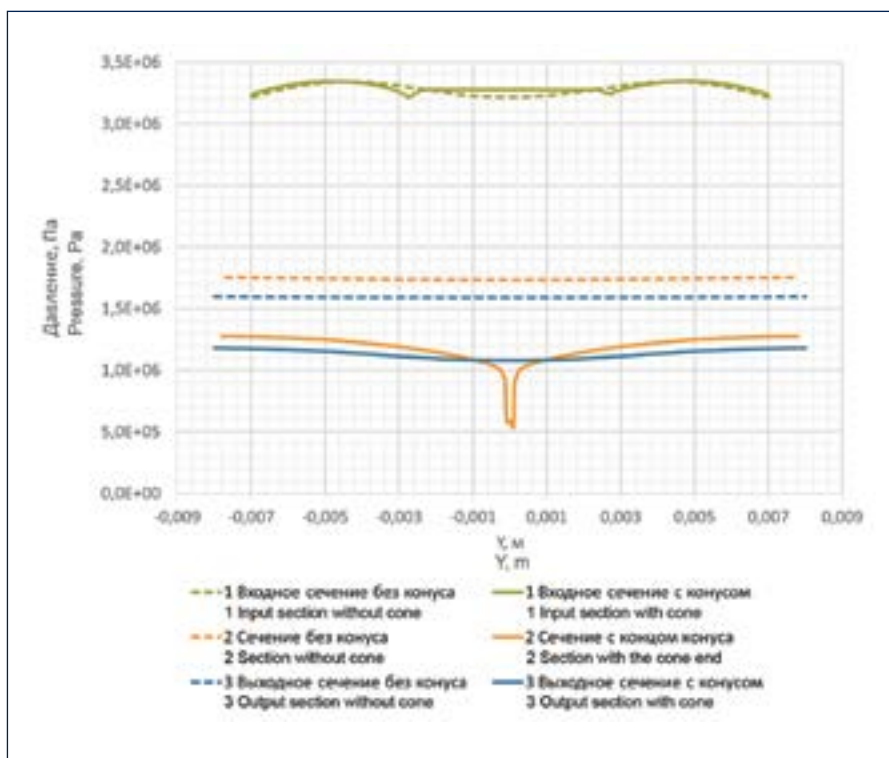


Рис. 5. Распределение статического давления по сечениям вдоль сопла 3S-сепаратора для вариантов с конусом и без

Fig. 5. Static pressure distribution along the cross sections of 3S-separator nozzle for the option with and without cone

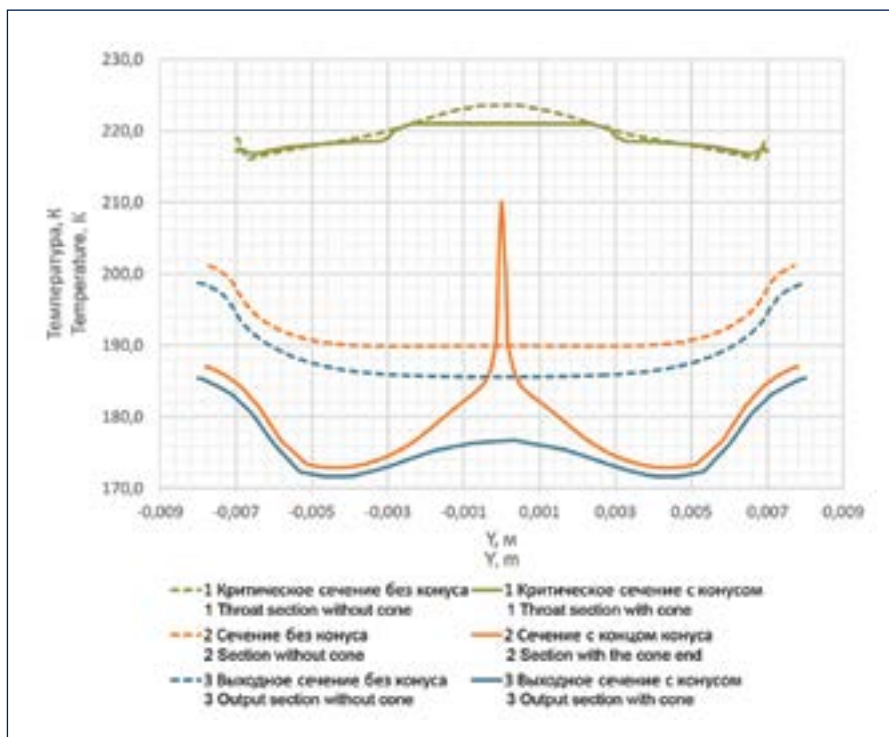


Рис. 6. Распределение температуры по сечениям вдоль сопла 3S-сепаратора для вариантов с конусом и без

Fig. 6. Temperature distribution along the cross sections of 3S-separator nozzle for the option with and without cone



Моделирование проводилось для конкретного режима эксплуатации 3S-сепаратора, в котором давление и температура газа на входе в 3S-сепаратор составляли 60 атм и 250 К, соответственно. Расчетное давление газа на выходе из 3S-сепаратора принималось равным 35 атм. Расчетное число Маха на выходе из сопла (без внутреннего конуса) принято равным 1,5.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Предварительные расчеты показали, что для обеспечения плавного регулирования расхода газа необходимо, чтобы раскрытие вдвигаемого в сопло конуса было минимальным, исходя из этого был выбран угол раскрытия конуса 2°С.

Результаты моделирования течения газа внутри 3S-сепаратора с центральным телом и без него приведены на рисунках 4–8, на которых представлены распределения основных газодинамических параметров потока (числа Маха, статического давления и температуры газа, полного давления и скорости закрутки) для наиболее характерных сечений сопла (критическое сечение сопла, сечение на конце конуса, выходное сечение сопла). В варианте с конусом параметры приведены для случая, когда конус перекрывает 16 % площади критического сечения сопла, при этом расход газа на 14 % ниже по сравнению со случаем без конуса. Сечения, для которых приводятся данные, показаны на рисунке 3.

На рисунке 4 приведено распределение числа Маха по сечениям вдоль сопла 3S-сепаратора для варианта с конусом и без него. Из представленных зависимостей следует, что в критическом сечении число Маха практически постоянно и равно $M = 1$. В сечении на конце конуса число Маха достигает значения 1,72, в то время как для варианта без конуса в том же сечении $M = 1,45$. При этом для варианта с конусом распределение скорости по сечению существенно неравномерно и включает два максимума. В выходном сечении сопла для варианта без конуса максимальное значение числа Маха достигает величины 1,52 с одним максимумом. Для варианта с конусом

для канала с адиабатической стенкой. В качестве рабочего газа принимался метан CH_4 с примесями пентана, состояние газа описывалось уравнением Пенга – Робинсона. Пограничный слой описывался SST-моделью.

При описании течения в канале сверхзвукового сепаратора была принята модель турбулентности, являющаяся комбинацией моделей $k-\epsilon$ и $k-\omega$. Математическая модель строится таким образом, чтобы она сочетала в себе сильные стороны обеих моделей. Для этого в SST-модели турбулентно-

сти реализована суперпозиция двух моделей турбулентности. Модель $k-\epsilon$ хорошо описывает свободные течения вдали от стенок, в то время как модель $k-\omega$ эффективнее при описании пристеночной области. Реализуется это с помощью введения эмпирической функции, которая является математической комбинацией уравнений, описывающих обе модели, что позволяет реализовать SST-модель. Вблизи поверхности турбулентность описывается $k-\omega$ -моделью, а вне пристеночных течений – с помощью модели $k-\epsilon$.

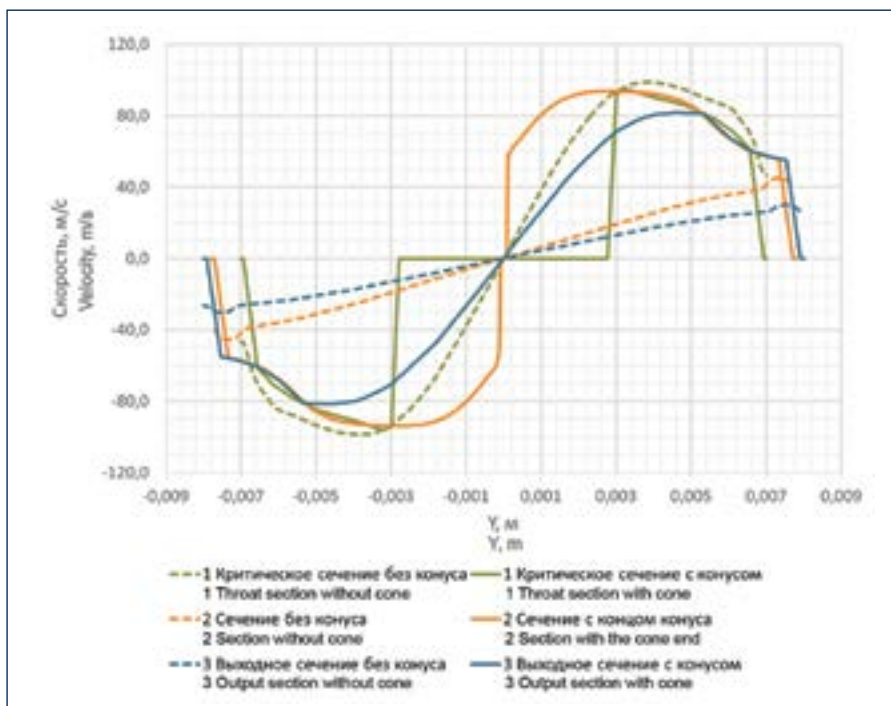


Рис. 7. Распределение скорости закрутки по сечениям в сопле 3S-сепаратора
Fig. 7. Whirl velocity distribution along the cross sections of 3S-separator nozzle

значение числа M достигает величины 1,72 и содержит два максимума.

Из распределения статического давления по сечениям (рис. 5) следует, что для варианта без конуса в критическом сечении статическое давление практически постоянно и изменяется от 32 до 33,5 атм, в выходном сечении давление по сечению постоянно и равно 16 атм. В то же время с конусом в сечении на конце конуса статическое давление изменяется от 9 до 12,8 атм, давление на выходе из сопла по сечению практически постоянно и на оси потока равно 11 атм.

В критическом сечении для варианта без конуса температура в центре потока достигает максимума 224 К (рис. 6), в то время как для варианта с конусом максимум температуры равен 221 К. В сечении на конце конуса для варианта без конуса распределение температуры носит U-образный характер с минимальным значением в центре потока 190 К. Для варианта с конусом максимальное значение достигается в центре потока и равно 210 К. В выходном сечении для варианта без конуса температура также носит U-образный характер с минимумом в центре сопла, равным 186 К. Для варианта с конусом температура в центре потока достигает величины 178 К.

Распределение скорости закрутки по сечениям в сопле 3S-сепаратора показано на рисунке 7. В критическом сечении для варианта без конуса скорость закрутки достигает 100 м/с, а для

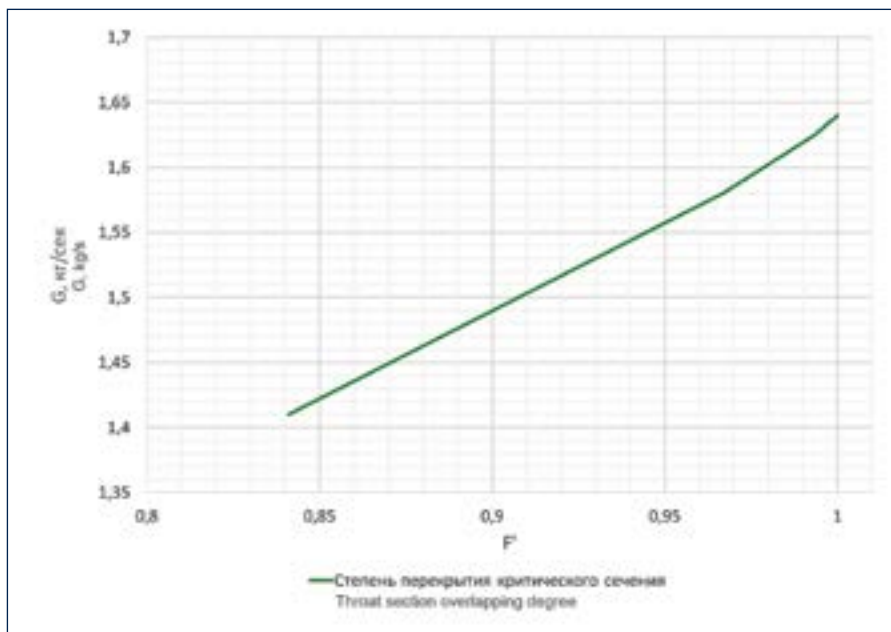


Рис. 8. Расчетная зависимость расхода газа от степени перекрытия конусом критического сечения сопла

Fig. 8. Designed dependence of gas flow rate on the degree of the nozzle throat overlapping with cone

варианта с конусом – 90 м/с. В сечении на конце конуса скорость закрутки – 93 м/с, в то время как без конуса скорость закрутки в этом сечении – 45 м/с. В выходном сечении сопла для варианта без конуса скорость закрутки – 30 м/с, для варианта с конусом скорость закрутки достигает 80 м/с.

На рисунке 8 приведена расчетная зависимость расхода газа от степени перекрытия конусом критического сечения сопла. Из рисунка следует, что

зависимость имеет почти линейный характер, что отвечает интегральному закону сохранения массы для стационарного потока.

Введение конусообразного тела в сопло не оказывает существенного влияния на параметры потока в критическом сечении сопла, различия в распределениях параметров в данном сечении укладываются в 5–6 %. В двух других рассматриваемых сечениях (на конце конуса и выходном сечении) для



Адрес:
101000, г. Москва,
Сретенский бульвар,
д. 6/1 стр. 1, оф. 43

Контакты:
☎ (495)540-46-36
☎ (495)540-46-37
✉ info@engo3s.com
🌐 http://engo3s.com

“ЭНГО ИНЖИНИРИНГ”

- Установки 3S-сепарации
- Проектирование и разработка установок
- Заказ и контроль за изготовлением и поставкой оборудования по проекту
- Сопровождение монтажа и пуско-наладочных работ
- Обучение персонала заказчика

РЕАЛИЗОВАННЫЕ ПРОЕКТЫ:

- Губкинское и Северо-Комсомольское месторождение
- Вынгапуровский ГПЗ
- Заполярное месторождение
- Месторождение Талими (Китай)



рассматриваемого варианта расположения центрального тела различия в параметрах потока носят более выраженный характер. Так, в варианте с конусообразным телом число Маха выше на 17 %, температура на 10 % ниже, скорость закрутки в 2,7 раза больше. Указанное снижение температуры газа с одновременным увеличением скорости закрутки позволяет в некоторых случаях уменьшить содержание целевых фракций в очищенном газе в 2 и более раз. Например, при содержании пентана во входном газе 6 % моль при понижении температуры газа в сопле с 185 до 175 К количество пентана в выходном потоке очищенного газа снижается с 0,6 до 0,3 % моль. Поэтому предлагаемый вариант изменения 3S-сепаратора следует рассматривать как способ не только регулирования расхода обрабатываемого газа, но и

повышения качества очистки природного газа от целевых фракций.

Выводы

В работе предложена новая схема сверхзвукового сепаратора с центральным телом, позволяющая эффективно регулировать расход обрабатываемого газа. Регулирование 3S-сепаратора осуществляется посредством изменения положения специального конуса, вставленного в сверхзвуковое сопло. Проведены моделирование течения природного газа в канале 3S-сепаратора при наличии центрального тела и сравнительный анализ параметров потоков внутри газодинамических элементов сверхзвукового сепаратора при наличии центрального тела и в его отсутствие. Наличие конуса наибольшее влияние оказало на скорость закрутки в выходном сечении: она увеличилась

в 2,7 раза, а также на статическую температуру газа в сопле, которая в среднем снизилась на 10 К. Снижение температуры газа с одновременным увеличением скорости закрутки для варианта с конусом позволяет обеспечить более качественную сепарацию конденсируемых в сопле фракций. Введение конуса можно применять не только как вынужденную меру для сохранения расчетного технологического режима при снижении дебитов газа, но и как целенаправленное действие для повышения качества очистки газа при незначительном снижении расхода газа. Важность этого вывода заслуживает внимания и дальнейшей всесторонней проверки как в теоретическом плане, так и при испытаниях опытно-промышленных сепараторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке ООО «ЭНГО Инжиниринг».

Литература:

1. 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. С. 4–10.
2. Корытников Р.В., Яхонтов Д.А., Багиров Л.А., Дмитриев Л.М., Имаев С.З. Промышленные испытания технологии сверхзвуковой сепарации на установке НТС УПМТ УКГП Заполярного НГКМ // Нефтепромысловое дело. 2012. № 6. С. 36–40.
3. Багиров Л.А., Имаев С.З. Опыт применения 3S-технологии для обработки природного газа на газовых объектах России и Китая: Доклад на Российской нефтегазовой технической конференции SPE, 26–28 октября, 2015, Москва // Society of Petroleum Engineers, SPE-176649-RU.
4. Feygin V., Imaev S., Alfuyorov V., Bagirov L., Dmitriev L., Lacey J. Supersonic Gas Technologies. TransLang Technologies Ltd., Calgary, Canada.
5. Alfuyorov V., Bagirov L., Dmitriev L., Feygin V., Imaev S., Lacey John R. Supersonic nozzle efficiently separates natural gas components. Oil & Gas Journal, May 23, 2005, pp. 53–58.
6. Liu Xingwei, Liu Zhongliang, Li Yanxia. Investigation on Separation Efficiency in Supersonic Separator with Gas-Droplet Flow Based on DPM Approach. Separation Science and Technology, 49: 2603–2612, 2014.
7. Фарахов Т.М., Исхаков А.Р., Минигулов Р.М. Высокоэффективное сепарационное оборудование очистки природного газа от дисперсной среды // Нефтегазовое дело. 2011. № 6. С. 263–277.
8. Liu Xingwei, Liu Zhongliang, Li Yanxia. Numerical Study of the High Speed Compressible Flow with Non-Equilibrium Condensation in a Supersonic Separator. Journal of Clean Energy Technologies, September 2015, Vol. 3, No. 5, pp. 360–366.
9. Девисилов В.А., Жидков Д.А. Газодинамическая очистка попутного нефтяного газа – путь к улучшению экологии планеты // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2014. Т. 16. № 1 (6). С. 1721–1727.

References:

1. Andreev O.P., Minigulov R.M., Korytnikov R.V., Bagirov L.A., Imaev S.Z. Process diagrams of GPP based on 3S-technology for the northern oil and gas fields. Nauka i tehnika v gazovoj promyshlennosti = Science and technology in the gas industry, 2009, No. 2, pp. 4–10. (In Russian)
2. Korytnikov R.V., Yakhontov D.A., Bagirov L.A., Dmitriev L.M., Imaev S.Z. Industrial tests of supersonic separation technology at NTS UPMT UKGP unit of Zapolyarny oil, gas and condensate field. Neftpromyslovoe delo = Petroleum Engineering, 2012, No. 6, pp. 36–40. (In Russian)
3. Bagirov L.A., Imaev S.Z. Experience of 3S-technology application for natural gas processing at gas facilities in Russia and China: Report on the Russian Oil and Gas Technical SPE Conference, dated October 26-28, 2015, Moscow, Society of Petroleum Engineers, SPE-176649-RU. (In Russian)
4. Feygin V., Imaev S., Alfuyorov V., Bagirov L., Dmitriev L., Lacey J. Supersonic Gas Technologies. TransLang Technologies Ltd., Calgary, Canada.
5. Alfuyorov V., Bagirov L., Dmitriev L., Feygin V., Imaev S., Lacey John R. Supersonic nozzle efficiently separates natural gas components. Oil & Gas Journal, May 23, 2005, pp. 53–58.
6. Liu Xingwei, Liu Zhongliang, Li Yanxia. Investigation on Separation Efficiency in Supersonic Separator with Gas-Droplet Flow Based on DPM Approach. Separation Science and Technology, 49: 2603–2612, 2014.
7. Farakhov T.M., Iskhakov A.R., Minigulov R.M. Highly efficient separation equipment for natural gas purification from the dispersion media. Neftgazovoe delo = Oil and gas business, 2011, No. 6, pp. 263–277. (In Russian)
8. Liu Xingwei, Liu Zhongliang, Li Yanxia. Numerical Study of the High Speed Compressible Flow with Non-Equilibrium Condensation in a Supersonic Separator. Journal of Clean Energy Technologies, September 2015, Vol. 3, No. 5, pp. 360–366.
9. Devisilov V.A., Zhydkov D.A. Gas-dynamic treatment of associated petroleum gas – a way to improve the planet ecology. Bulletin of Samara Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, 2014, Vol. 16, No. 1 (6), pp. 1721–1727. (In Russian)