

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

М. М. Малышкина, Методика исследования эффективности очистки природных газов в сверхзвуковом сепараторе, *ТВТ*, 2010, том 48, выпуск 2, 262–268

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.9.173

10 декабря 2024 г., 09:12:08



УДК 533.17

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ПРИРОДНЫХ ГАЗОВ В СВЕРХЗВУКОВОМ СЕПАРАТОРЕ

© 2010 г. М. М. Малышкина

Московский физико-технический институт

Поступила в редакцию 01.08.2008 г.

Предложена методика определения области применения сверхзвуковых сепараторов. Приведена постановка задачи по выбору оптимальных чисел Маха. Определены составы газожидкостных смесей в зависимости от начальных параметров (состава газа, температуры, давления и числа Маха). Результаты представлены в виде зависимостей покомпонентного состава жидкой фазы газожидкостной смеси. Проведена первичная оценка эффективности очистки природных газов в зависимости от их начальных параметров.

ВВЕДЕНИЕ

В основе мировой энергетики лежит использование природного газа и нефти. Природный газ в газовых залежах, и особенно попутный газ, после добычи в большинстве случаев не пригоден ни для использования сразу на промысле в качестве технологического топлива, ни для транспортировки на большие расстояния к потребителю, ни для применения в промышленности. Он представляет собой смесь различных углеводородов, в основном метана (порядка 90%), в меньшей части этана, пропана и более тяжелых углеводородов, паров воды, а иногда углекислоты и сероводорода [1]. Наличие водяных паров в газе снижает его теплотворную способность, эффективность его использования в качестве технологического топлива, способствует образованию гидратов и т.п. Транспортировать природный газ на большие расстояния по трубопроводам нельзя, так как водяные пары и тяжелые углеводороды при понижении температуры конденсируются, образуя жидкостные, ледяные и гидратные пробки.

Метан в основном используется в качестве экономичного топлива. Остальные компоненты природного газа представляет интерес для различных отраслей промышленности. Этан используется для производства полиэтилена. Пропан и бутан используются как энергоемкие топлива для двигателей и бытовых нужд. Также из газа получают аммиак, ацетилен, метанол и этиловый спирт, которые в свою очередь служат сырьем для выработки многочисленных продуктов.

Основная задача газопереработки состоит в удалении из газа, получаемого с месторождений, посторонних примесей, кислых компонент, влаги и в последующем извлечении из этого газа этана, пропана, бутана, пентана и более тяжелых компонент.

В течении долгого времени основными установками для извлечения целевых компонент, таких, как этан, пропан, бутан, из природного газа являлись холодильные агрегаты, турбодетандеры, дроссельные устройства.

Принцип работы всех этих установок основан на охлаждении газа до температур конденсации целевых компонент. Каждая из установок эффективна в одних условиях и неэффективна или неприменима в других.

Все месторождения газа можно условно разделить на два типа по величине давления пласта: 1) давление газа в пласте значительно превышает давление транспортировки газа; 2) давление газа в пласте сравнимо с давлением транспортировки газа или ниже его. При малом пластовом давлении для охлаждения газа до температур конденсации целевых компонент используют холодильные агрегаты.

При пластовом давлении природного газа намного превышающем давление, необходимое для его транспортировки, в процессах низкотемпературной переработки используют устройства, в которых низкие температуры природного газа достигаются за счет эффекта Джоуля–Томсона при его расширении. Другими словами при высоком давлении пласта целесообразно использование его энергии для реализации условий низкотемпературных процессов. К аппаратам, основанным на данном принципе, относятся: газодинамические осушители, вихревые сепараторы, трубы Леонтьева, сверхзвуковые сепараторы Twister и 3S. При дросселировании газа хотя и реализуются низкие температуры, однако имеют место потери полного давления газа, что термодинамически невыгодно. В последнее время активно разрабатывается новая технология реализации низких температур, основанная на охлаждении газа при

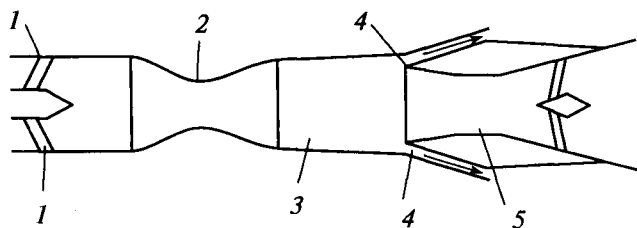


Рис. 1. Принципиальная схема сверхзвукового сепаратора: 1 – закручивающее устройство, 2 – сверхзвуковое сопло, 3 – рабочая часть, 4 – устройство отбора газожидкостной смеси, 5 – диффузор.

преобразовании потенциальной энергии давления в кинетическую энергию потока с последующим восстановлением давления при его торможении.

Наиболее перспективными из них являются сверхзвуковые сепараторы, в которых низкие температуры достигаются при расширении газа в сверхзвуковом сопле с последующим восстановлением давления при помощи комбинации сверхзвукового и дозвукового диффузоров. Отбор сконденсировавшегося газа осуществляется в поле центробежных сил, реализуемых в сопле тем или иным способом.

Данная работа посвящена новому направлению выделения целевых компонент из природного газа – сверхзвуковой сепарации.

Известно, что в сверхзвуковых соплах аэродинамических труб происходит конденсация первоначально влаги, а затем кислорода и азота из воздуха.

Низкотемпературная газодинамическая сепарация привлекала внимание многих зарубежных специалистов и отечественных инженеров из ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, МГТУ им. Н.Э. Баумана, АН СССР, “ВНИИГАЗ”, “ЦКБН” ОАО “Газпром”, ОАО “НИПИгазпереработка” [2].

Первые разработки газодинамических сепараторов были выполнены во “ВНИИГАЗ” в 1975 г. под руководством д. т. н. Берго Б.Г. В ОАО “НИПИгазпереработка” в 1986–1988 гг. под руководством к. т. н. Фридланда В.Я. был разработан и изготовлен опытно-промышленный образец газодинамического сепаратора. В настоящее время интенсивные изыскания улучшения работы сверхзвуковых центробежных сепараторов ведутся в фирмах “ВНИИГАЗ”, “Аэрогаз” [3], “Twister BV” [4]. Принципиальная схема сверхзвукового сепаратора показана на рис. 1.

Преимуществами сверхзвуковых сепараторов является возможность достижения существенно более низких температур при одинаковом перепаде давлений по сравнению с дроссельными устройствами, низкотемпературной абсорбцией и низкотемпературной конденсацией, турбодетан-

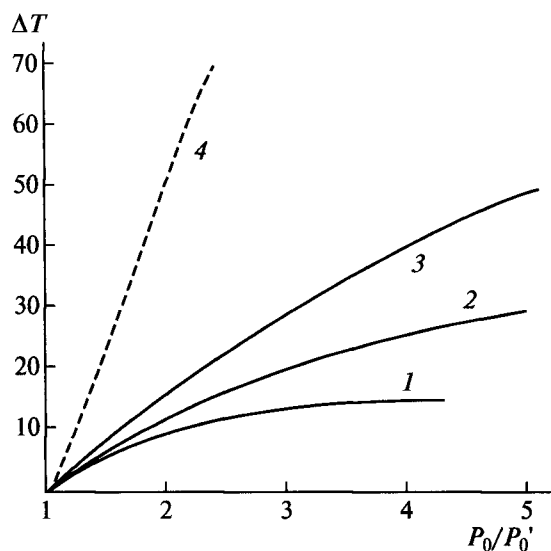


Рис. 2. Падение температуры газа в различных расширительных устройствах: 1 – дроссель, 2 – труба Ранка, 3 – турбодетандер, 4 – сопло Лавалья; $T_0 = 290$ К, $P_0 = 40$ бар.

дерами. В сверхзвуковых и дозвуковых диффузорах после отбора капль сконденсировавшейся компоненты происходит преобразование кинетической энергии потока в энергию давления. На рис. 2 представлены расчетные графики изменения температуры природного газа с высоким содержанием метана в случае снижения давления в дросселе и турбодетандере при различных степенях расширения газа и одинаковых перепадах давления.

Перепад температур в детандере при любых перепадах давлений газа намного превышает перепад температур в дроссельных устройствах. Увеличение начального давления природного газа ведет к увеличению перепада температур в дроссельных устройствах и почти не сказывается на перепаде температур в детандерах. Наличие низкой статической температуры газа в сопле позволяет существенно повысить эффективность выделения из него целевых компонентов. Небольшие размеры установок помогают размещать их не только на суше, но и на морских платформах, что является дополнительным преимуществом. В связи с этим открываются широкие перспективы развития сверхзвуковых сепараторов. В настоящее время в России опытно-промышленные установки внедрены, например, на Муравленковском газоперерабатывающем заводе. За рубежом фирмой “Twister BV” внедрены газодинамические сепараторы на морских платформах в Нидерландах для низкотемпературной подготовки газа и ведутся работы по их совершенствованию.

Однако детального анализа области эффективного применения сверхзвуковых сепараторов до сих пор проведено не было.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данной работе предлагается методика определения области применения сверхзвуковых сепараторов, которую можно использовать на практике.

Методика разрабатывается с целью определения оптимальных чисел Маха для извлечения определенных фракций, преимущественно пентана, пропана, бутана, этана и т.п., а также для выбора числа M в зависимости от начальных термодинамических условий P_0 и T_0 и начального состава смеси. С учетом зависимости эффективности очистки природных газов от чисел Маха можно выбрать геометрию сопла сепаратора, соответствующую наилучшему извлечению данных целевых компонент.

Предварительный анализ течения проводится в предположении локального термодинамического равновесия, отсутствия влияния центробежных сил на уравнение состояния и отсутствия химических реакций в газе, что соответствует абсолютному большинству процессов разработки и эксплуатации месторождений природных газов [5].

Пусть сконденсировавшиеся компоненты удаляются из потока за время, сопоставимое со временем изменения фазового состояния газа. Анализ течения проводится по предполагаемым струйкам тока.

Основная масса газа проходит вблизи стенки сепаратора, где скорость закрутки потока относительно невелика, поэтому мы можем воспользоваться моделью равномерного течения. В закрученном потоке продвижение газа по продольной оси сепаратора медленнее в 1.3 раза, чем в незакрученном потоке, что экспериментально доказано [6]. Но в любом случае закрутка потока может влиять на процессы сепарации как положительно, так и отрицательно. Положительный момент — снижение продольной скорости газа, следовательно, больше времени затрачивается на конденсацию целевых компонент. Отрицательный — перемешивание слоев газа.

Методика экспериментально проверяется на примере конкретной геометрии сверхзвукового сепаратора и конкретного состава смеси газов, аналогичной смеси газа с месторождения. Разработка методики проводится в предположении ее дальнейшей применимости с использованием параметров подобия для других геометрий сверхзвуковых сепараторов и иных составов смеси газов.

Исследуются типичные для сверхзвуковых сепараторов начальные термодинамические условия. Начальная температура в форкамере находится

в диапазоне возможных температур, которые можно получить на промысле, $T_0 = 200\text{--}300$ К [6]. Давление на входе в сепаратор чуть меньше давления в пласте, $P_0 = 60$ бар. Мольный состав газа сходен с составом газов уренгойского месторождения: $N_2 - 0.89\%$, $CH_4 - 97.42\%$, $C_2H_6 - 0.48\%$, $C_3H_8 - 0.10\%$, $i-C_4H_{10} - 0.01\%$, $n-C_4H_{10} - 0.01\%$, $i-C_5H_{12} - 0.10\%$, $n-C_5H_{12} - 0.99\%$, что дает молярную массу 1.67 кг/моль и $C_p = 3.7R$, т.е. $\gamma = 1.37$. С помощью этой методики можно исследовать и другие близкие по составу газы. Геометрия сопел рассмотрена для чисел M в диапазоне 1–3. Чтобы получить требуемые числа Маха, достаточно изменить геометрию сопла.

При исследовании течения мы исходим из ряда упрощающих предположений:

- 1) течение изоэнтропическое $S_0 = \text{const}$;
- 2) уравнение состояния газа описывается программой, представленной в работе [7].

Также предполагается, что при переходе через возникающую ударную волну состав газа за ней определяется по программе [7] с учетом термодинамического равновесия. До отборного устройства вычисляются основные параметры газа. Оценивается максимально возможный при таком способе процент сконденсировавшихся компонент. В дальнейшем это предположение учитывается с помощью поправочных коэффициентов. Значения γ при переходе через ударную волну принимаются соответствующими значениям $P_{\text{стат}}$, $T_{\text{стат}}$ перед ударной волной для очищенного газа.

Расчет газодинамических параметров и состава образовавшейся смеси газа и жидкости проводится с использованием программы А.И. Брусиловского методом последовательных приближений в предположении, что процесс является изоэнтропическим.

По формулам для газа с постоянным γ находятся значения статических температуры и давления в области отбора капельной компоненты:

$$\frac{T}{T_0} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2}, \quad \frac{P}{P_0} = \left(\frac{1}{1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

Далее по начальным давлению P_0 и температуре T_0 определяются начальные значения энтропии S_0 и энтальпии H_0 . По $P_{\text{стат}}$ и $T_{\text{стат}}$, найденным по формулам для идеального газа, в секции отбора сжиженного газа находится величина $S_{\text{стат}}$. Значение энтропии, вычисленной таким образом, несколько отличается от S_0 . Далее методом последовательных приближений путем сравнения значений S_0 и $S_{\text{стат}}$ уточняются значения последней.

После уточнения значений $P_{\text{стат}}$, $T_{\text{стат}}$ и $S_{\text{стат}}$ с помощью программы Брусиловского определяются параметры газа до ударной волны, а именно:

энтальпия $H_{\text{стат}}$, скорость звука $a_{\text{зв}}$, состав образовавшейся газожидкостной смеси.

Расчеты по исходному числу Маха производятся следующим образом:

$$H_0 = H_{\text{стат}} + \frac{V^2}{2},$$

$$V = \sqrt{2(H_0 - H_{\text{стат}})},$$

$$M = \frac{V}{a_{\text{зв}}}.$$

Вычисленное число M меньше, чем выбранное исходное, определенное по соотношению для идеального газа, что обусловлено наличием процессов конденсации части компонент природного газа.

Перед устройством отбора жидкости имеет место ударная волна, в которой давление и температура возрастают, что приводит к изменению фазового состояния отбираемой газожидкостной смеси. В приведенном ниже анализе предполагается, что характерное время испарения жидкости много больше характерного аэродинамического времени, определяемого как время движения объема газа от ударной волны, возникающей на устройстве отбора, до отверстия, через которое осуществляется отбор.

Вычисление давления и температуры очищенного газа за ударной волной проводится в предположении, что энтальпия заторможенного очищенного газа равна сумме энтальпии очищенного газа до ударной волны и кинетической энергии потока.

АНАЛИЗ

Количество образующейся жидкости. Результаты расчета зависимости количества образующейся жидкости (в мольных долях) от начальной температуры и числа M при начальном давлении $P_0 = 60$ бар представлены на рис. 3.

При низких температурах, до 250 К, бутаны начинают испаряться и конденсироваться вновь. При этом оценочная погрешность данной методики для температур ниже 250 К может превышать 30%. Поэтому на графике отображены только T от 250 до 300 К.

Из графика видно, что при понижении температуры и увеличении числа Маха количество образовавшейся жидкости повышается с 1% до 16%. При числе Маха $M = 1.5$ и температуре 250 К доля жидкости составляет 2%. А если учесть, что в ее составе более половины целевых компонент, которых в исходном газе порядка 1.5%, это дает неплохую степень очистки газа. Доля жидкости — 2%, из них 60% — целевые компоненты, значит, в жидком состоянии — 1.2% жидких целевых компонент, а изначально в газе их было 1.6%. Таким об-

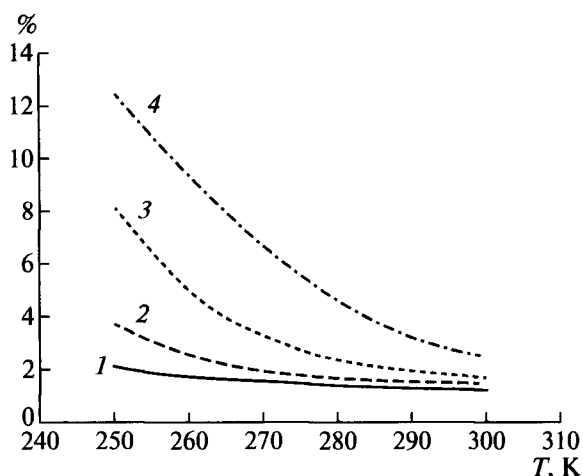


Рис. 3. Количество жидкости: 1 — $M = 1.5$, 2 — 2, 3 — 2.5, 4 — 3.

разом, глубина очистки составит 75%, что больше, чем при обычной степени очистки для такого класса устройств (50%). Следует заметить, что, данная методика позволяет оценить максимальное количество жидкости, которое можно извлечь в рамках идеальной схемы разделения компонент.

Состав образующейся жидкости. Результаты расчета зависимостей составов жидких фаз газожидкостных смесей в зависимости от чисел M и начальных температур, реализуемых в сепараторе, представлены на рис. 4. В качестве исходных параметров приняты значения давления на входе в сепаратор $P_0 = 60$ бар и температуры $T_0 = 300, 275, 250, 225$ К.

Из рис. 4 видно, что при малых числах M и высоких температурах конденсируются сначала тяжелые компоненты, а потом, с увеличением чисел M и понижением температуры, последовательно конденсируются все более легкие компоненты вплоть до метана.

При низких температурах конденсация тяжелых компонент природного газа происходит уже в форкамере. А при числе $M = 2$, $T_{\text{стат}} = 180$ К и $P_{\text{стат}} = 16$ бар начинается конденсация метана. Конденсация метана при нормальном давлении идет при температуре 120 К. При сильной конденсации необходимо учитывать тепловыделение при фазовых превращениях.

Анализ течения позволяет оценить влияние начальной температуры на входе в сепаратор. Ее оценка очень важна, так как именно ее можно изменить вместе с режимом предварительного охлаждения. А другие параметры, число Маха и давление, изменять на промысле сложнее. Число Маха можно варьировать, меняя геометрию сопла. Давление обычно остается постоянным в течение достаточно длительного времени эксплуатации сепаратора.

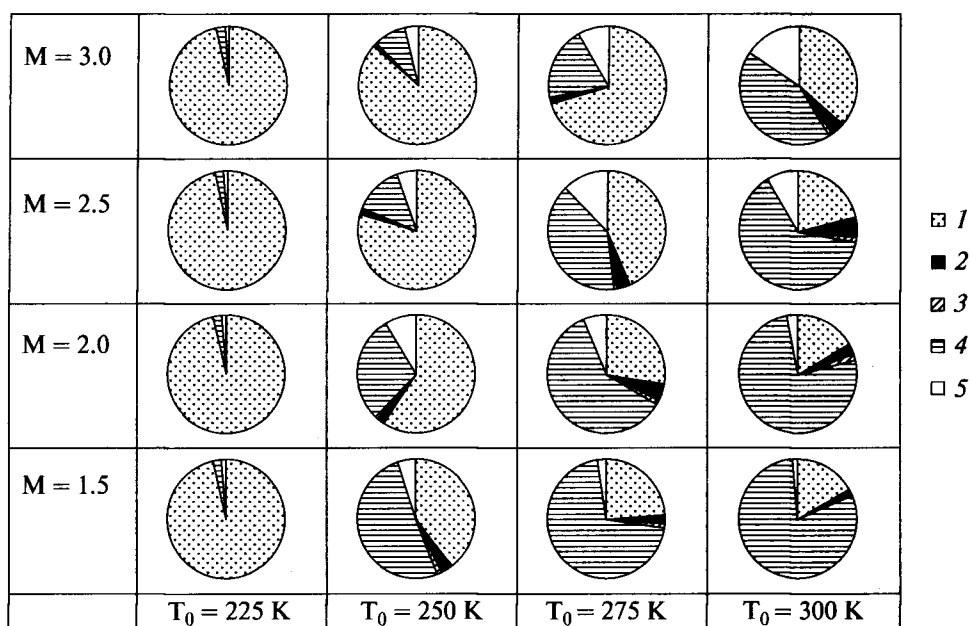


Рис. 4. Составы жидких фаз газожидкостных смесей: 1 – CH_4 , 2 – C_3H_8 , 3 – $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$, 4 – $i\text{-C}_5\text{H}_{12}$, 5 – остальные компоненты.

При числе $M > 2$ увеличиваются потери полного давления, в результате уменьшается давление на выходе из устройства.

Восстановление полного давления. Известно, что давление P'_0 за ударной волной слабо зависит от вида уравнения состояния и термодинамической модели течения и определяется в основном потоком импульса [8, 9]. В отличие от давления, температура восстановления и плотность газа существенно зависят как от уравнения состояния, так и от характера процесса за ударной волной, а именно от того, является ли течение замороженным или равновесным. В приведенных ниже расчетах предполагалось, что течение газа за ударной волной является равновесным, а отличие давления от ее величины, рассчитанной при фиксированном значении γ набегающего потока, незначительно.

Таблица 1. Зависимость γ от начальной температуры

$T_0(\text{K}) \backslash M$	1.5	2	2.5	3
300	1.46	1.43	1.40	1.37
275	1.52	1.46	1.41	1.38
250	1.63	1.51	1.42	1.38

В табл. 1 указаны значения γ перед ударной волной для различных начальных температур и различных чисел Маха.

В табл. 2 указана разница величин полного давления P'_0 за ударной волной при $P_0 = 60$ бар на входе в установку для случаев, когда γ сохраняет постоянное значение 1.37, равное значению на входе в сепаратор, и для случаев, когда принимается во внимание изменение γ в потоке, указанное в табл. 1.

Согласно многочисленным экспериментам, проведенным в сверхзвуковых аэродинамических трубах в данном диапазоне скоростей, величину $\frac{P'_0}{P_0}$ ориентировочно можно считать коэффициентом восстановления давления.

Различия при подсчете полного давления за ударной волной с учетом изменения γ и без него не превышают 7%, поэтому для грубой оценки

Таблица 2. Коэффициент восстановления давления $\frac{P'_0}{P_0}$

$T_0(\text{K}) \backslash M$	1.5	2	2.5	3
300	0.93	0.73	0.50	0.32
275	0.93	0.73	0.50	0.32
250	0.94	0.74	0.51	0.32
$\gamma = 1.37$	0.93	0.72	0.49	0.32

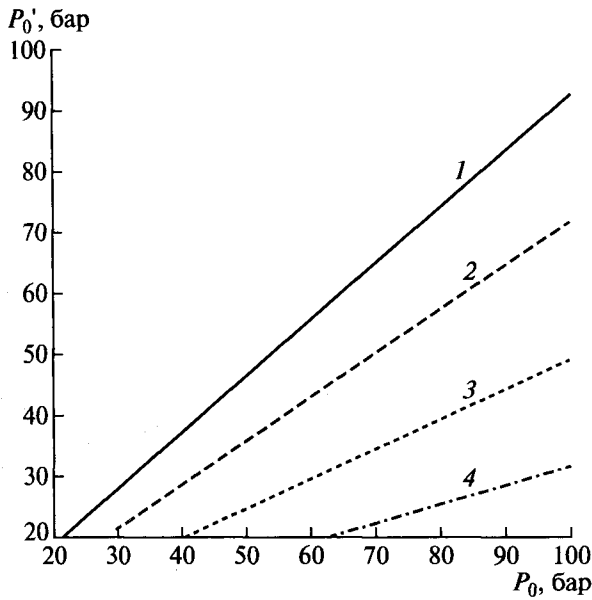


Рис. 5. Полное давление: 1 – $M = 1.5$, 2 – 2, 3 – 2.5, 4 – 3.

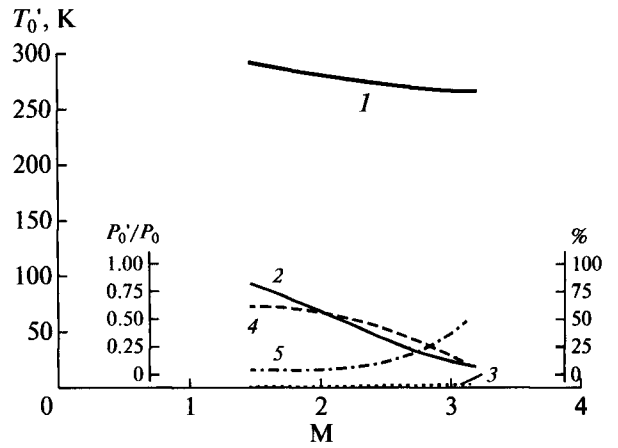


Рис. 6. Сопоставление конденсации целевых компонент и коэффициента восстановления давления при $T_0 = 300$ К: 1 – T_0' , 2 – P_0'/P_0 , 3 – жидкость, 4 – $n\text{-C}_5\text{H}_{12}$, 5 – CH_4 .

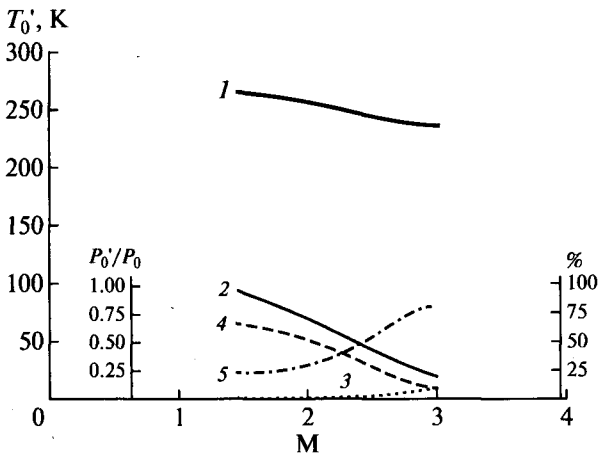


Рис. 7. Сопоставление конденсации целевых компонент и коэффициента восстановления давления при $T_0 = 275$ К. Обозначения те же, что на рис. 6.

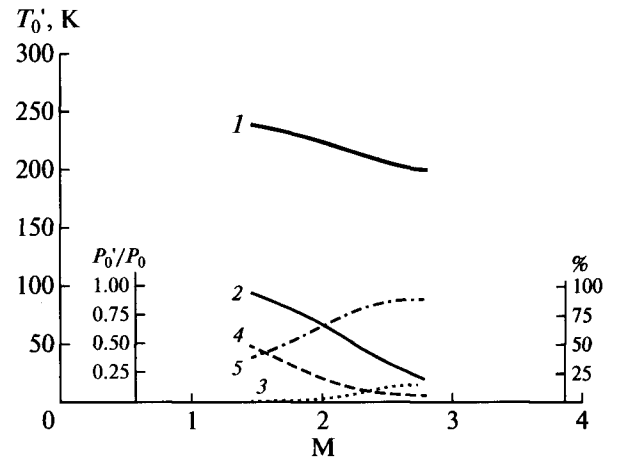


Рис. 8. Сопоставление конденсации целевых компонент и коэффициента восстановления давления при $T_0 = 250$ К. Обозначения те же, что на рис. 6.

можно использовать зависимость восстановления давления для газа с постоянной γ . Зависимость полного давления за ударной волной от начального полного давления и числа M при постоянной $\gamma = 1.37$ представлена на рис. 5.

Таким образом, коэффициент восстановления полного давления при изменяющейся γ выше, чем при ее постоянном значении, и его можно считать приблизительно равным 0.93 при $M = 1.5$, 0.72 при $M = 2$, 0.50 при $M = 2.5$, 0.32 при $M = 3$.

При $M > 2.5$ падение полного давления превышает 50%, что экономически невыгодно, так как требуется установка дополнительных компрессоров для очищенного газа. Более того, при получа-

емых при понижении давления весьма низких температурах начинается конденсация метана, что мешает очистке газа от тяжелых компонент.

Потери давления, связанные с закруткой потока вдоль линий тока в данных расчетах, не учитываются, так как предполагается, что на выходе стоит раскручивающее устройство.

На рис. 6–8 можно сопоставить одновременно коэффициент восстановления полного давления (т.е. потери давления) с количеством образовавшейся жидкости и процентом содержания в ней целевых компонент. Также на этих рисунках показано изменение температуры торможения за ударной волной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренная методика может применяться для первичной оценки эффективности очистки природных газов в сверхзвуковом сепараторе в зависимости от числа Маха при следующих условиях: начальная температура – 250–300 К, начальное давление – 60 бар, состав газа – с высоким содержанием метана и без сероводорода.

Для низкотемпературного разделения природного газа на компоненты в указанном диапазоне давлений, температур и концентраций целевых компонент предпочтительно использовать сепараторы с числами Маха 1.4–1.8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Басниев К.С.* Энциклопедия газовой промышленности. М.: АО "Твант", 1994. 901 с.
2. *Запорожец Е.П., Зиберт Г.К., Валиуллин И.М., Зиберт А.Г.* Основные направления совершенствования низкотемпературной газодинамической конденсации // Нефть. Газ. промышленность. 2007. № 4 (32). С. 8.
3. *Alfyorov V., Bagirov L., Imayev S. et al.* Supersonic Nozzle Efficiently Separates Natural Gas Components // Oil&Gas Journal. 2005. V. 103. Issue 20. P. 53.
4. *Okimoto F.T., Brouwer J.M.* Supersonic Gas Conditioning // World Oil Magazine. 2002. V. 223, № 8. P. 89.
5. *Гуревич Г.Р., Брусиловский А.И.* Справочное пособие по расчету фазового состояния и свойств газоконденсатных смесей. М.: Недра, 1984. 264 с.
6. *Малышкина М.М.* О структуре газодинамического потока в сверхзвуковом сепараторе природного газа // ТВТ. 2008. Т. 46. № 1. С. 76.
7. *Брусиловский А.И.* Фазовые превращения при разработке месторождений нефти и газа. М.: Грааль, 2002. 575 с.
8. *Майкапар Г.И.* Неравновесные физико-химические процессы в аэродинамике. М.: Машиностроение, 1972. 344 с.
9. *Vinocur M.* On Stagnation-Point Conditions in Non-Equilibrium Inviscid Blunt-Body Flows // J. Fluid Mech. 1970. V. 43. P. 1.