

- тренных и полных потерь в кольцевых диффузорных участках сепарационной камеры определяются на основе характеристик пограничного слоя. Закрученность потока учитывается введением дополнительного коэффициента.
- Показано, что при использовании предлагаемого метода относительная погрешность расчета потерь давления в аппарате не превышает 9,3 %.
 - Установлено, что с увеличением диаметра выхлопного патрубка до 0,68 от диаметра циклона точность прогноза гидравлического сопротивления увеличивается. Для относительного диаметра выхлопного патрубка 0,48 примерно 47,5 % от общих потерь давления составляют потери в закручивателе, 20,6 % потерь приходится на гидравлические потери в сепарационной камере и 31,9 % – потери в выхлопном патрубке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Асламова В.С. Сопоставление результатов расчета коэффициента гидравлического сопротивления и потерь давления прямого циклона с промежуточным отбором с экспериментом // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313. – № 4. – С. 51–53.
- Приходько В.П., Пирогова О.А., Прохоров Е.М. Основные принципы создания энергосберегающих устройств циклонного типа // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2006. – № 10. – С. 32–33.
- Асламова В.С., Шерстюк А.Н. Влияние геометрических и режимных параметров прямого циклона на его эффективность // Теплоэнергетика. – 1991. – № 10. – С. 63–67.
- А.с. 1386309 СССР. Прямочный циклон / А.Н. Шерстюк, В.С. Асламова и др. Патент. 7.04.1988, Бюл. № 13. – 4 с.: ил.
- Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
- Дейч М.Е., Зарянкин Л.Е. Газодинамика диффузоров и выхлопных патрубков турбомашин. – М.: Энергия, 1970. – 384 с.
- Дейч М.Е. Техническая газодинамика. – М.: Энергия, 1974. – 592 с.
- Болтенко Э.А. Потери давления в парогенерирующих каналах с закруткой потока // Теплоэнергетика. – 2004. – № 2. – С. 11–12.
- Брэдшоу П. Введение в турбулентность и ее измерение. – М.: Мир, 1974. – 278 с.
- Идельчик И.Е., Коган Э.И. К исследованию прямоочных циклонов // Проблемы циркуляции и кондиционирования воздуха. – Минск: Высшая школа, 1969. – С. 318–326.
- Сабуров Э.Н., Карпов С.В., Остаев С.И. Теплообмен и аэродинамика закрученного потока в циклонных устройствах. – Л.: ЛГУ, 1989. – 276 с.

Поступила 28.04.2008 г.

УДК 620.9:662.6

ИССЛЕДОВАНИЕ АДсорбЦИОННОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА К СЖИГАНИЮ

М.Н. Ильина, И.А. Иванова

Томский политехнический университет
E-mail: marishka1999@sibmail.com

Приведены данные по использованию адсорбционного устройства в энергетических установках в качестве предгорелочной подготовки попутного нефтяного газа непосредственно на месте добычи. Приведен сравнительный анализ состава попутного нефтяного газа до и после адсорбционного устройства. Для заданных условий проанализирован эксплуатационный запас адсорбирующего наполнителя-шабазита.

Ключевые слова:

Энергетическая установка, нефтяной попутный газ, адсорбция.

Введение

Сжигание нефтяного газа, содержащего значительное количество целевых углеводородных компонентов, в качестве топлива в промышленных условиях на простейших газогорелочных устройствах, как правило, происходит в детонирующем режиме с низким КПД, сопровождается неполным сгоранием газа и значительным выбросом загрязняющих веществ в атмосферу. В качестве решения дан-

ной проблемы предложено использовать адсорбционное устройство с цеолитовым наполнителем как элемент предгорелочной подготовки топлива.

Задачи работы

Процесс адсорбции известен и широко применяется в нефтяной промышленности. Можно рассчитать скорость адсорбции, время насыщения, однако в случае, когда газ, такой как попутный нефтя-

ной (ПНГ), имеет сложный химический состав, который меняется во времени и в зависимости от температуры окружающей среды, достоверными могут быть лишь данные, полученные непосредственно в ходе эксперимента в натуральных условиях.

Задачей натурального эксперимента является проверка эффективности работы цеолитового фильтра в качестве предвключенного адсорбционного устройства при сжигании ПНГ в энергетических установках непосредственно на месте добычи.

Методическое обеспечение и описание экспериментальной установки

Методика исследования эффективности адсорбционного устройства заключается в определении эксплуатационного ресурса цеолитового фильтра в зависимости от количества регенераций и времени работы в заданных условиях. Конструктивный расчет адсорбционного устройства осуществлен по известной схеме [1, 2].

В качестве опытной установки принята когенерационная установка фирмы «CATERPILLAR» (США), далее энергоустановка (ЭУ), предназначенная для автономного производства собственной электроэнергии. Основными составляющими ЭУ являются четырехтактный двигатель внутреннего сгорания, работающий на газообразном топливе, и генераторная установка.

Добытый ПНГ Соболиного месторождения Томской области после предварительной подготовки в сепарационных установках, которая включает в себя процесс отделения газа от нефти, попадает в газопровод потребителя [3]. Перед ЭУ газ проходит газораспределительный пункт шкафной, где происходит первичная очистка газа через сетчатый фильтр и регулирование до рабочего давления. На входе в ЭУ перед и после фильтрующего элемента находятся манометры для определения перепада давления. Далее по схеме следуют свеча продувочная, вихревой газовый счетчик для определения расхода газа, клапаны отсекающие (рис. 1).

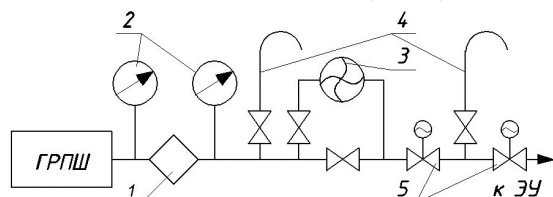


Рис. 1. Схема подвода топливного газа к ЭУ. ГРПШ – газораспределительный пункт шкафной, 1) фильтрующая вставка, 2) манометры, 3) счетчик газовый, 4) свечи продувочные, 5) электромагнитные клапаны газовые

Конструктивные и эксплуатационные номинальные характеристики ЭУ: тип установки САТ G3516, расход газа 274 м³/ч.

В соответствии с задачей эксперимента ЭУ оснащается адсорбционным устройством, которое устанавливается в качестве ступени дополнительной очистки газа после стандартного фильтра, входяще-

го в состав газорегуляторного устройства (рис. 2). Адсорбирующее составляющее – цеолит, в данном случае шабазит, было выбрано исходя из исследования адсорбционных равновесий, энергетики и кинетики адсорбции дегидратированного шабазита.

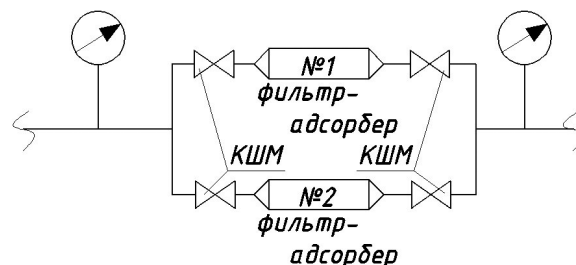


Рис. 2. Схема подключения вставки с адсорбционным устройством. КШМ – кран шаровой муфтовый

Адсорбционное устройство позволит очистить газ от тяжелых углеводородов, осушить и «сгладить» перепады в составе газа, связанные с изменением температуры окружающей среды. Масса цеолита составляет 49,46 кг (поставщик ООО «Цеолит-Трейд», г. Санкт-Петербург). Адсорбционное устройство изготовлено на заводе ОАО «Манотомь» (г. Томск). Регенерация адсорбционного устройства осуществлялась путем продувки его горячим воздухом с температурой до 400 °С на установке для регенерации цеолита (АОЗТ ПКТБ «Электротехмонтаж», Украина).

Для бесперебойной работы ЭУ, исходя из общих требований, предъявляемых к газовому топливу и ПНГ, в частности, необходимо соблюдать следующие условия [4, 5]: ПНГ перед системой подачи газа в энергоустановку должен быть максимально отсепарирован от примесей и обезвожен с целью предотвращения образования кристаллогидратов при подаче газа (допустимое значение наличия влаги не более 9 мг/нм³); газ должен быть очищен от сероводорода и двуокиси углерода с целью предотвращения их коррозирующего воздействия на оборудование и трубопроводные коммуникации и приведения их содержания в газе в соответствие с требованиями санитарных норм; из газа должны быть удалены пропан-бутановые и более тяжелые углеводородные компоненты с целью предотвращения образования жидкостных пробок и появления неустойчивого режима горения газа (детонационный режим).

Результаты работы адсорбционного устройства оценивались по характеристике перепада давления согласно показаниям установленных манометров и по химическому анализу проб, отобранных через свечи продувки топливоподдачи в ЭУ до и после фильтра. Компонентный состав ПНГ определен методом газоадсорбционной хроматографии на хроматографе «Кристалл-2000М». Продолжительность эксперимента составила 84 сут. и соответствовала временному интервалу регламента проведения очередного технического обслуживания ЭУ, что позволяет судить о работе цеолитового фильтра в условиях межсезонья и при требуемых нагрузках.

Результаты эксперимента

Непосредственно перед началом эксперимента 30 января 2007 г. на Соболином месторождении Томской области был сделан дополнительный, корректирующий анализ ПНГ при температуре забора 15 °С, давлении 1,03 кгс/см².

В дни максимального понижения температуры окружающей среды тяжелые углеводороды ПНГ конденсируются на стенках труб, пропускная способность при этом изменяется. При повышении температуры газ максимально обогащен парафинистыми компонентами. Наличие адсорбционного устройства в данном случае помогло предотвратить аварийную остановку в работе ЭУ, связанную с изменением состава газа.

За время работы показания манометров были в норме, аварийных остановок в работе ЭУ не зафиксировано. При использовании адсорбционного устройства наблюдается изменение в составе ПНГ в сторону уменьшения содержания тяжелых углеводородов и влаги (таблица).

Результаты эксперимента по натурному исследованию адсорбционного устройства представлены на графиках (рис. 3).

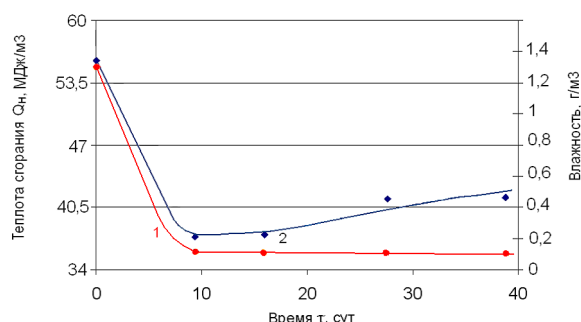


Рис. 3. Изменение нижней теплоты сгорания (2) и содержания влаги (1) в процессе использования адсорбционного устройства

Результаты лабораторных анализов химического состава ПНГ позволяют сказать, что применение адсорберов на основе шабазита снижает содержание тяжелых углеводородов и тем самым увеличивает межремонтный период при эксплуатации энергетического оборудования.

Полученные данные по перепаду давления на адсорбционном устройстве обобщены в виде функциональной зависимости, которая приближенно соответствует исходной информации. Используемый метод построения аппроксимирующей функции из условия минимума величины Q – метод наименьших квадратов. В качестве аппроксимирующей зависимости выбрана квадратичная.

$$f(X) = C_1 + C_2 X_j + C_3 X_j^2,$$

в которой значения коэффициентов C_1, C_2, C_3 соответствуют минимальному значению суммы координат экспериментальных точек от области эксперимента. Узлы таблицы экспериментальных данных обозначены через X_j , где $1 \leq j \leq N$ – номер узла, N – число узлов.

$$Q = \sum_{j=1}^N (Y_j - f(X_j))^2 = \sum_{j=1}^N (Y_j - C_1 - C_2 \cdot X_j - C_3 \cdot X_j^2)^2.$$

Рассматривая Q как функцию C_1 и приравнявая к нулю частную производную от Q по C_1 , получим:

$$\frac{\partial Q}{\partial C_1} = -2 \sum_{j=1}^N (Y_j - C_1 - C_2 \cdot X_j - C_3 \cdot X_j^2),$$

а после преобразований получаем

$$N \cdot C_1 + \left(\sum_{j=1}^N X_j\right) \cdot C_2 + \left(\sum_{j=1}^N X_j^2\right) \cdot C_3 = \sum_{j=1}^N Y_j.$$

Аналогичным образом, дифференцируя Q по C_2 и по C_3 и приравнявая нулю соответствующие выражения, получаем еще два уравнения для определения неизвестных C_1, C_2, C_3 :

Таблица. Состав и свойства ПНГ Соболиного месторождения Томской области до и после адсорбционного устройства

Определяемый компонент, свойства	Ед. изм.	Результат анализа				
		Перед началом эксперимента	225 ч	384 ч	662 ч	932 ч
Углекислый газ	об. %	0,032	0,037	0,035	0,035	0,036
Азот		3,485	3,962	3,960	3,961	3,962
Метан		66,104	74,749	74,652	74,737	74,740
Этан		3,567	4,039	4,021	4,037	4,038
Пропан		14,324	14,309	14,307	14,315	14,308
Изобутан		3,040	0,982	0,988	0,986	0,981
Н-бутан		6,782	1,745	1,826	1,755	1,757
Изопентан		1,096	0,098	0,107	0,096	0,097
Н-пентан		1,141	0,059	0,073	0,055	0,054
Сумма гексанов		0,388	0,011	0,014	0,012	0,013
Сумма гептанов		0,041	0,009	0,017	0,011	0,014
Плотность абсолютная при 20 °С и 101,325 кПа		кг/м ³	1,111	0,188	0,193	0,203
Плотность относительная	–	0,922	0,124	0,247	0,264	0,273
Низшая теплота сгорания при 20 °С и 101,325 кПа	кДж/м ³	55860	37475	37685	41401	41476
Содержание сероводорода	г/м ³	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Содержание воды	г/м ³	1,3	0,1	0,1	0,1	0,1

$$\left\{ \begin{aligned} N \cdot C_1 + \left(\sum_{j=1}^N X_j \right) \cdot C_2 + \left(\sum_{j=1}^N X_j^2 \right) \cdot C_3 &= \sum_{j=1}^N Y_j \\ \left(\sum_{j=1}^N X_j \right) \cdot C_1 + \left(\sum_{j=1}^N X_j^2 \right) \cdot C_2 + \left(\sum_{j=1}^N X_j^3 \right) \cdot C_3 &= \sum_{j=1}^N X_j Y_j \\ \left(\sum_{j=1}^N X_j^2 \right) \cdot C_1 + \left(\sum_{j=1}^N X_j^3 \right) \cdot C_2 + \left(\sum_{j=1}^N X_j^4 \right) \cdot C_3 &= \sum_{j=1}^N X_j^2 Y_j \end{aligned} \right.$$

Решение системы уравнений методом Гаусса позволило получить аппроксимирующие зависимости (рис. 4, 5).

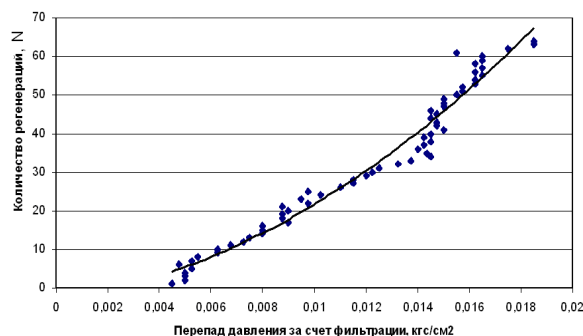


Рис. 4. Зависимость перепада давления за счет фильтрации от количества регенераций фильтрующего элемента

В данном случае число регенераций, соответствующих максимальному перепаду давления, находится из формулы

$$N = 156579\tau^2 + 903,94\tau - 3,033$$

со средним квадратичным отклонением функции $R^2=0,967$.

График зависимости $\Delta p=f(\tau)$ имеет вид (рис. 5).

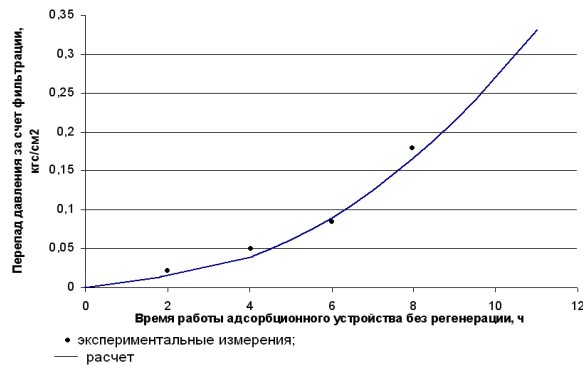


Рис. 5. Зависимость давления Δp от времени работы адсорбционного устройства τ

Благодаря полученным выше данным, можно найти время насыщения цеолита в заданных условиях без регенерации до достижения максимального перепада давления – оно составляет около 10,6 ч. В ходе работы адсорбционного устройства было отмечено, что периодически повторяющийся процесс регенерации негативно влияет на способность цеолита к поглощению. Максимальное значение числа регенераций для поддержания оптимальной величины перепада давления до и после адсорбционного устройства согласно графику на рис. 5 и техническим условиям ЭУ – 97 раз. При

соблюдении необходимых мер по контролю состава очищенного газа и показаний манометров становится возможным оптимизировать процесс сжигания ПНГ в энергоустановке.

Для унифицирования расчета габаритных размеров устройства составлена компьютерная программа ads.exe (рис. 6) на языке CLARION, который наиболее подходит для последующего хранения и обработки табличных данных. Программа работает в среде операционной системы Window без инсталляции, поэтому может быть установлена не только на жесткий диск ПК, но и на любой сменный носитель информации – флеш-карту и т. п.

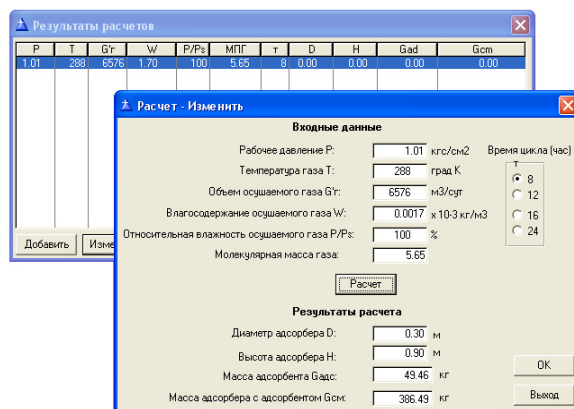


Рис. 6. Интерфейс программы ads.exe

Начальными данными для расчета адсорбционного устройства являются: рабочее давление, температура, объем осушаемого газа, влагосодержание, значение относительной влажности и молекулярная масса газа. Время цикла работы адсорбционного устройства выбирается произвольно: 8, 12, 16 или 24 ч. В результате, расчетными значениями будут диаметр, высота устройства, масса цеолита и масса адсорбционного устройства с цеолитом. Материал кожуха устройства – свариваемая без ограничений универсальная конструкционная низколегированная сталь марки 09Г2С, предназначенная для работы под давлением и в большом диапазоне температур; адсорбирующий цеолит – шабазит с размером зерна 0,0025 м.

Выводы

1. Для подготовки попутных нефтяных газов к сжиганию предложена конструкция адсорбционного устройства, позволяющая снизить образование нефтепарафиновых отложений на деталях конструкции газовых горелок, минимизировать скопление продуктов неполного сгорания топлива на теплонагревательных элементах ЭУ.
2. Методами газожидкостной хроматографии исследована эффективность предлагаемого адсорбционного устройства в качестве подготовки газа к сжиганию.
3. Установлено, что попутный газ нефтяных месторождений Томской области характеризуется повышенным содержанием этан-бутановых фрак-

- ций, поэтому исследование процессов изменения в составе, связанных с временным фактором, изменением температуры окружающей среды, целесообразно проводить в натуральных условиях.
4. Полученные данные позволяют судить об эффективной работе цеолитового фильтра:
 - за время эксперимента (свыше 800 ч) адсорбционные свойства цеолита практически не изменились;
 - значение давления после устройства оставалось в пределах нормы, т. е. не превышало 15 % от рабочего.
 5. Полученная в результате эксперимента зависимость перепада давления от времени работы фильтрующего элемента в условиях межсезонья позволяет спрогнозировать ситуацию поведения цеолита в заданных условиях:
 - время насыщения цеолита без регенерации до достижения максимального перепада давления составляет 10,6 ч;
 - максимальное значение числа регенераций для поддержания оптимального значения перепада давления до и после адсорбционного устройства порядка 100 раз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Танатаров М.А., Ахмедшина М.Н., Фасхутдинов Р.А. и др. Технологические расчеты установок переработки нефти. – М.: Химия, 1987. – 352 с.
2. Гриценко А.И., Александров И.А., Галанин И.А. Физические методы переработки и использования газа. – М.: Недра, 1981. – 224 с.
3. Мурина В.И. Технология переработки природного газа и конденсата: Справочник. В 2 ч., Ч. 1. – М.: Недра, 2002. – 194 с.
4. Ильина М.Н. Требования к подготовке попутного нефтяного газа для малой энергетики // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 310. – № 2. – С. 167–171.
5. Спейшер В.А., Горбаненко А.Д. Повышение эффективности использования газа и мазута в энергетических установках. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 183 с.

Поступила 06.10.2008 г.

УДК 538.56:538.542.001.24

ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МАССИВНЫХ ПРОВОДНИКОВ

Г.В. Носов

Томский политехнический университет
E-mail: nosov@elti.tpu.ru

Получены формулы для расчета эквивалентных импульсных параметров массивных проводников с учетом адиабатного нагрева и нелинейных магнитных свойств поверхностного слоя (при диффузии плоской одномерной электромагнитной волны в проводящее полупространство. Эквивалентные параметры (толщина и температура поверхностного слоя, давление магнитного поля и мощность тепловых потерь, сопротивление и индуктивность) принимаются усредненными и постоянными во время действия импульса напряженности магнитного поля на поверхности проводника. Форма этого импульса приближенно учитывается его длительностью, среднеквадратичным значением и числом положительных и отрицательных полуволн. Нелинейные магнитные свойства ферромагнитного проводника учитываются степенной зависимостью для его кривой намагничивания. Достоверность полученных формул подтверждается рассмотрением частых случаев для неферромагнитных проводников и рассчитанными зависимостями для магнитной проницаемости конструкционной стали.

Ключевые слова:

Эквивалентные импульсные параметры, массивные проводники, ферромагнитные проводники, поверхностный слой, скин-эффект, магнитное поле, магнитная проницаемость, кривая намагничивания, плоская электромагнитная волна.

При проектировании и оптимизации многих электрофизических устройств, работающих в импульсном режиме, возникает необходимость расчета их параметров с учетом проникновения (диффузии) электромагнитного поля (ЭМП) в массивные проводники. Такими проводниками могут быть электромагнитные экраны, обмотки и роторы электромашинных генераторов, а также нагреваемые детали в устройствах индукционного нагрева. В настоящее время при расчете диффузии ЭМП широкое применение получили численные методы прямого решения на ЭВМ уравнений электродина-

мики. Однако такое решение приводит к чрезмерно большим затратам машинного времени и во многих случаях затрудняет анализ влияния различных импульсов ЭМП на такие параметры проводников как сопротивление, индуктивность, глубина проникновения ЭМП в проводник, температура и давление магнитного поля [1]. Исследования электрофизических устройств при наличии поверхностного эффекта в проводниках существенно упрощаются с использованием эквивалентных параметров поверхностного слоя (скин-слоя) проводников [1–4]. Расчет импульсных параметров