



**КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ имени К.И. САТПАЕВА
ИНСТИТУТ ХИМИЧЕСКИХ И БИОЛОГИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ
КАФЕДРА ХИМИЧЕСКОЙ И БИОХИМИЧЕСКОЙ ИНЖЕНЕРИИ**

ТАУБАЕВА Г. Ж.

ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ

«ИЗУЧЕНИЕ СПОСОБОВ И МЕТОДОВ ВЫДЕЛЕНИЯ МЕТАНА ИЗ
МЕТАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ »

5B072100– «ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ»

АЛМАТЫ 2020

КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени К.И. САТПАЕВА

САТБАЕВ
УНИВЕРСИТЕТИ



ИНСТИТУТ ХИМИЧЕСКИХ И
БИОЛОГИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

КАФЕДРА ХИМИЧЕСКОЙ И
БИОХИМИЧЕСКОЙ ИНЖЕНЕРИИ

«Допущена к защите»

Заведующий кафедрой

_____ Елигбаева Г. Ж.

ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ

на тему: «ИЗУЧЕНИЕ СПОСОБОВ И МЕТОДОВ ВЫДЕЛЕНИЯ МЕТАНА ИЗ
МЕТАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ»

по специальности 5В072100 – «Химическая технология органических веществ»

Выполнил выпускник

_____ *Г. Таубаева*

Таубаева Г. Ж.

Научный руководитель

_____ *Б. Селенова*

д.х.н., профессор
Селенова Б. С.

Алматы 2020

РЕФЕРАТ

Жұмыста 28 бет, 5 сурет, 6 кесте, 20 қолданылған әдебиеттер, 3 қосымша бар.

Түйінді сөздер: метан, метан-ауа қоспасы, бөлу әдістері, адсорбция, PSA, адсорбенттер.

Жұмыс мақсаты: Метан-ауа қоспасынан (МАҚ) метанды бөліп алу үшін өндірісте қолданылатын әдістердің ішінен ең жақсы нұсқаны таңдап, оңайланған техникалық-экономикалық негіздеме түрінде Қарағанды көмір кенішіндегі МАҚ - нан метанды концентрациялаудың таңдалған әдісін негіздеу.

Осы мақсатқа жету үшін келесі міндеттер қойылды:

- МАҚ - нан метанды бөлу үшін өнеркәсіпте қолданылатын технологияларға талдау жасау;

- өндірісте МАҚ – нан метанды бөліп алу әдістерінің артықшылықтары мен кемшіліктерін салыстыра отырып, Қарағанды көмір кенішіне МАҚ – нан метанды концентрациялаудың экономикалық тиімді әдісін таңдау;

- таңдалған әдіс бойынша қондырғының технологиялық есебін жүргізу.

Жобаның нәтижелері: техникалық және экономикалық есептеулермен негізделген метанды Қарағанды көмір шахтасының метан-ауа қоспасынан бөлу әдісі ұсынылады.

РЕФЕРАТ

Работа содержит 28 страниц, 5 рисунков, 6 таблиц, 20 использованных источников, 3 приложения.

Ключевые слова: метан, метано-воздушная смесь, способы выделения, адсорбция, PSA, адсорбенты.

Цель работы: Выбрать из применяемых в промышленности способов выделения метана из метано-воздушной смеси (МВС) оптимальный вариант и обосновать выбранный способ для концентрирования метана из МВС Карагандинской угольной шахты технологическими расчетами в виде упрощенного технико-экономического обоснования.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

- проанализировать используемые в промышленности технологии выделения метана из МВС;

- исходя из сравнения преимуществ и недостатков существующих промышленных способов извлечения метана из МВС подземных угольных шахт, выбрать экономический эффективный способ концентрирования метана из МВС для Карагандинской угольной шахты;

- провести технологический расчет установки для выбранного метода.

Результаты проекта: будет предложен, обоснованный технико-экономическими расчетами способ для выделения метана из метано-воздушной смеси Карагандинской угольной шахты.

ESSAY

The work contains 28 pages, 5 figures, 6 tables, 20 sources used, 3 applications.

Key words: methane, methane-air mixture, separation methods, adsorption, PSA, adsorbents.

Purpose of work: Choose from the methods used in industry for the separation of methane from a methane-air mixture (MAM) the best method and justify the selected method for concentrating methane from the MAM of the Karaganda coal mine with technological calculations in the form of a simplified techno-economically study.

To achieve this goal, the following tasks were set:

- analyze the technologies used in industry for the separation of methane from the MAM;

- based on a comparison of the advantages and disadvantages of existing industrial methods of separating methane from the MAM of underground coal mines, choose an economically effective way to concentrate methane from the MAMS for the Karaganda coal mine;

- to carry out the technological calculation of the installation for the selected method.

Project results: a method will be proposed, justified by technical and economical calculations, for the separation of methane from a methane-air mixture of the Karaganda coal mine.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
1 Литературный обзор	7
1.1 Проблема, которую несет наличие метана в шахтном газе	7
1.2 Утилизация шахтного метана. Шахтный метан, как ценный продукт	8
1.3 Способы выделения метана из шахтного газа	9
2 Технологическая часть	12
2.1 Описание технологии процесса PSA	12
2.2 Основные параметры процесса	13
3 Технологические расчеты	15
3.1 Материальный баланс	15
3.2 Расчет адсорбера	16
4 Автоматизация технологии PSA	20
5 Категория безопасности	22
5.1 Расчет категории опасности предприятия	22
5.2 Техника безопасности	22
6 Экономическая часть	24
Заключение	26
Список использованной литературы	27
Приложение А Технологическая схема процесса PSA	29
Приложение Б Вертикальный адсорбер. Чертеж общего вида	30
Приложение В Схема автоматизации процесса PSA	31

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день одной из самых серьезных проблем с которым столкнулось человечество является вопрос экологии. Значительное большинство стран внесли в свои государственные политики стратегию борьбы за экологию. Основной экологической стратегией государств является задача уменьшения выброса вредных газов в атмосферу, возникших в итоге техногенной деятельности человека. Главная проблема выбросов заключается в том, что они способствуют уменьшению озонового слоя Земли, что в дальнейшем приводит к парниковому эффекту. Увеличение температуры на поверхности земли и изменение как частоты, так и интенсивности осадков в целом оказывает негативный эффект не только на качество жизни, но и на здоровье человека. Хотя по мнению многих основным парниковым газом является диоксид углерода, парниковый эффект метана в 23 раза больше, чем парниковый эффект диоксида углерода.

На сегодняшний день количество ежегодно выбрасываемого метана подземными угольными шахтами через свои системы вентиляции составляет 16 млрд. м³, что является большой экологической проблемой. К тому же наличие метана в шахтном газе представляет большую угрозу при эксплуатации угольных шахт, поскольку метан в определенных концентрациях может образовывать взрывоопасную смесь при взаимодействии с воздухом. Пределы взрываемости метана находятся от 4,4% до 17%. Как известно при горении метана образуется углекислый газ и вода, а в случае недостаточного количества кислорода образуется монооксид углерода, водород и вода. При 530°C смесь метана с воздухом, которая является взрывоопасной начинает воспламеняться через 10 с, при температуре 1000°C происходит мгновенное воспламенение, а при 1300° она взрывается [1]. Взрыв метана имеет наибольшую мощность, когда концентрация метана составляет 9,5%, поскольку на сжигание этой смеси затрачивается абсолютно весь объем кислорода в воздухе. Если взрыв метано-воздушной смеси происходит в замкнутом пространстве температура данного взрыва может достигать 2700°C, а в случае, когда взрыв происходит в открытом пространстве температура взрыва равна 1900°C. В связи с этим одной из основных задач при проведении горных работ, а в особенности при угледобыче, является обеспечение безопасных условия работы, то есть предотвращение возможности образования в любых зонах шахты метано-воздушной смеси, имеющую взрывоопасную концентрацию.

В Карагандинской угольной шахте утилизация шахтной метано-воздушной смеси (МВС) всасываемая вентиляторами из подземных выработок метано-воздушная смесь (с низким содержанием метана) выбрасывается в атмосферу. Учитывая экологическую стратегию Казахстана по уменьшению выброса вредных газов в атмосферу, извлечение метана из МВС Карагандинской угольной шахты утилизация шахтной метано-воздушной смеси является актуальной проблемой.

1 Литературный обзор

1.1 Проблема, которую несет наличие метана в шахтном газе

Для начала, сделаем небольшое пояснение, по поводу самого понятия шахтный газ, в состав которого, как нам известно наряду с метаном входят в различных соотношениях диоксид углерода, азот, кислород, водород и небольшие количества других примесей. В зависимости от стадийности освоения угольного месторождения, а также многих других условия и факторов пропорции указанных компонентов в шахтном газе сильно колеблются. Различают следующие виды шахтного газа угольных пластов: СВМ (coal bed methane), где не ведется разработка угля; АММ (abandoned mine methane), то есть газ закрытых угольных шахт; СММ (coal mine methane) газ работающих угольных шахт [2]. СВМ характеризуется высоким содержанием метана (90 % и более) и минимальным количеством примесей соответственно. Газы закрытых шахт АММ содержат от 50 % до 70% метана и являются взрывобезопасными. Что же касается газов работающих шахт СММ, здесь содержание метана колеблется от 25 % до 40 %, которое к тому же сопровождается присутствием кислорода, что в связи с возможными колебаниями состава может привести к взрывоопасным условиям переработки. Нам известно, что метан является горючим газом, который почти вдвое легче, чем воздух, из-за этого он накапливается в верхней части подземных выработок. Рассмотрим каким образом метан выделяется в шахтах. Существуют три возможных путей выделения метана: обычное, суффлярное и внезапное [3].

1. Обычное выделение осуществляется по всей поверхности угля из микротрещин и незаметных невооруженным глазом пор.

2. Суффлярное выделение осуществляется в местах сосредоточения газа в угольном пласте и осуществляется оно из видимых разломов и разрывов в угольном пласте. Такие выделения в большинстве случаев фиксируются в метлах, где имеются тектонические нарушения, и могут продолжаться от нескольких дней до полугода и более.

3. Внезапное выделение характеризуется совместным выделением (выбросом) большого количества газа, одновременно которому осуществляется выброс угольной мелочи в диапазоне от нескольких до сотен, иногда в редких случаях и до тысяч тонн.

Опасными по газу шахтами являются те, где имеется вероятность наличия метана, даже в одной из выработок. В случае подозрения на выделение метана в шахтах работники сразу же должны перейти на газовый режим. Газовые шахты подразделяются на пять категорий, исходя из объема выделяемого газа в шахте за сутки на 1 т угля.

- В шахтах 1 категории выделяется до 5 м³ метана в сутки на 1 т угля;
- В шахтах 2 категории выделяется 5-10 м³ метана в сутки на 1 т угля;
- В шахтах 3 категории выделяется 10-15 м³ метана в сутки на 1 т угля;

- Сверхкатегорными являются шахты, где осуществляется суфлярное выделение метана или количество выделяемого метана составляет более 15 м^3 в сутки на 1 т угля;
- Опасными по внезапным выбросам считаются шахты, где осуществляется внезапные выбросы большого количества газа, угля и также сопровождающегося с выбросом горных пород.

1.2 Утилизация шахтного метана. Шахтный метан, как ценный продукт

В основном во многих угольных шахтах мира утилизация шахтной метано-воздушной смеси происходит таким образом, что всасываемая вентиляторами из шахт метано-воздушная смесь поступает на дальнейшее центробежное разделение, где она разделяется на три потока – поток с содержанием метана (более 80%), то есть высоким, поток с содержанием метана (до 5%) и поток с низким содержанием метана (менее 0,005%) [4]. После чего раздельно компрессорами осуществляется сжатие потоков с высоким содержанием метана и потока обогащенного метаном под давлением 0,5-0,6 Мпа. Затем эти потоки отправляются в камеру сгорания газотурбинного двигателя, а поток с низким содержанием метана выбрасывается в атмосферу. На сегодняшний день количество ежегодно выбрасываемого метана подземными угольными шахтами через свои системы вентиляции составляет 16 млрд. м^3 , что является большой экологической проблемой, поскольку парниковый эффект метана в 23 раза больше, чем парниковый эффект диоксида углерода. Значительная часть метана (около 90%) выбрасывается из шахт 12 стран [5]. На первом месте находится Китай, который осуществляет 30% выбросов, далее идут США, Украина, Россия и Австралия соответственно. Учитывая вышесказанное, разумным будет организовать выделение метана из шахтной метано-воздушной смеси, что обеспечит получение ценного продукта – метана, а также минимизацию загрязнения окружающей среды.

Резервы метана в угольных пластах в переводе на условное топливо по различным оценкам находятся на третьем-четвертом месте среди существующих на Земле запасов горючих ископаемых после угля, нефти и природного газа и оцениваются в 260 трлн. м^3 . Большинство ресурсов шахтного газа находится на территориях таких стран, как Россия (примерно 80 трлн. м^3), США (60 трлн. м^3), Китай (28 трлн. м^3), Австралия (22 трлн. м^3) и в меньшей степени в других угледобывающих странах [2]. Путем извлечения метана из метано-воздушной смеси мы сможем пополнить топливно-энергетические ресурсы страны, поскольку метан является экологически чистым, высокоэнергичным топливом к тому же оно отличное химическое сырье, наряду с этим мы сможем повысить безопасность при угледобыче и улучшить экологию. В настоящее время исследуются и разрабатываются способы выделения метана из МВС с использованием мембранно-сепарационного, абсорбционного, адсорбционного, вихревого методов [6-7]. Целью данных

исследовании является организация эффективной утилизации шахтного метана с концентрацией 0,3 – 3,5 %; 4,0 – 25 %; 25 – 50%; 50% и более с дальнейшим его использованием по следующим назначениям:

- Шахтный метан с концентрацией 0,3 - 3,5 % направляется для сжигания в топках котлов;
- Шахтный метан с концентрацией 4,0 – 25 % направляется для сжигания в топках, также применяется в газодизелях и двигателях внутреннего сгорания;
- Шахтный метан с концентрацией 25 – 50 % имеет применение в энергетических и химических установках для получения энергии и химических продуктов, соответственно;
- Шахтный метан с концентрацией 50 % и более используется в быту, химии и энергетике.

Если взглянуть на зарубежный опыт [5], то в Австралии метан содержащийся в шахтном воздухе окисляют в термальном реакторе, после чего полученное тепло преобразовывают в форму электрической энергии путем использования воды или воздуха в качестве рабочего газа. Также в Австралии строятся пилотные установки, в которых генерация электрической энергии осуществляется методом комбинации шахтного газа и распыленного угля. Установки работают таким образом, что в реактор входят шахтный газ и распыленный уголь, тепло полученное путем сгорания угля зажигает метан. Далее тепло передается в теплообменник, в который поступает рабочий газ (воздух). Затем нагретый воздух поступает в силовую турбину, которая вырабатывает электроэнергию. Аналогичные исследования проводятся и в Украине.

Однако из-за того, что извлекаемый шахтный метан имеет нестабильные качества, такие как концентрация, давление и наличие примесей его не могут напрямую использовать в качестве химического сырья или энергоносителя. В силу этого следует осуществлять выделение метана из шахтного газа.

1.3 Способы выделения метана из шахтного газа

Выделение метана из метано-воздушной смеси может быть реализовано несколькими способами [6-7]:

1. Механическое разделение мембранными установками. Мембранный метод разделения газов или растворов характеризуется тем, что благодаря особым свойствам полупроницаемых мембран, вещества, прошедшие через них, обогащаются или обедняются некоторыми компонентами. Однако, по результатам исследования установки, которые работают на принципе молекулярных мембран теряют свою эффективность при разделении метана и кислорода. Данные установки могут быть хорошо эффективными лишь в том случае, если найдут свое применение, как дополнительное технологическое мероприятие к основному процессу.

2. Выделение метана можно осуществить таким образом, что метано-воздушную смесь предварительно прошедшую стадии водной пылеочистки и сушки подают на конверсию, которая осуществляется в присутствии водяного пара и катализатора конверсии, вследствие чего газ очищенный от кислорода, но содержащий монооксид углерода, диоксид углерода, водород проходя через теплообменники и сушильные аппараты идет на абсорбцию, после чего содержание диоксида углерода в газе уменьшается и затем газ подается в метанатор, где осуществляется образование бинарного газа, в состав которого входит метан и азот. Газ в составе которого остается азот и метан подается в ректификационную колонну, где осуществляется его разделение при низкой температуре. Из верхней части колонны выделяется азот, а снизу колонны получаем метан.

3. Абсорбционное разделение. Если говорить о том, что такое абсорбция, следует сказать, что это процесс избирательного поглощения газов или паров жидким поглотителем. В ходе этого процесса осуществляется переход из газовой или паровой фазы в жидкую фазу. Абсорбентами называются вещества, которые обладают способностью поглощать какое-либо другое вещество из газа или раствора всей своей массой. Поглощаемый газ называется абсорбтивом. Абсорбционный метод, осуществляется таким образом, что выветриваемая вентиляторами из шахт метано-воздушная смесь, проходит процесс водной пылеочистки, после чего поступает в абсорбер, в котором находится сорбент избирательно поглощающий метан. В ходе процесса абсорбции выделяется воздух, очищенный от пыли и метана, который возвращается в шахту или выбрасывается в атмосферу. Поглотивший метан адсорбент подается в теплообменник, где нагревается до температуры 60-80°C, вследствие чего выделяется метан, который в дальнейшем используется, как готовый продукт. Сорбент после регенерации возвращают в абсорбер.

4. Имеется способ получения газогидратов, который предусматривает выделение метана с высокой степенью чистоты и его безопасную транспортировку. Газогидраты — кристаллические соединения, образующиеся при определённых термобарических условиях из воды и газа. Недостатками данного способа являются высокие затраты энергии для создания термобарических условия, и высокие капитальные затраты.

5. Адсорбционное извлечение метана из МВС. Во многих угольных шахтах используется адсорбционное выделение, которое основано на технологии PSA (pressure swing adsorption), то есть короткоциклового безнагревной адсорбции при переменном давлении. Короткоцикловая адсорбция характеризуется тем, что при прохождении метано-воздушной смеси через слои адсорбента под высоким давлением осуществляется поглощение метана твердым адсорбентом, а при уменьшении давления осуществляется десорбция поглощенного метана. При прохождении метано-воздушной смеси через слои адсорбента при высоком давлении метан проникает в поры адсорбента и за счет сил адсорбции связывается им. Более адсорбируемые компоненты проходят через слои адсорбента медленнее, по сравнению с менее

адсорбируемыми из-за этого концентрация примесей по отношению к метану снижается во время прохождения газа через слои адсорбента. Для того чтобы получить непрерывный поток очищенного метана, поток исходной метано-воздушной смеси переключается на другой адсорбер, где находится регенерированный адсорбент. Процесс протекает в адсорберах с автоматической системой управления, которая позволяет им периодически переключаться. Основными адсорбентами, которые применяются для данной технологии является: активированные угли (углеродные материалы), силикагель и цеолиты.

Основные преимущества технологии PSA:

- за счет постоянства температуры в циклах адсорбции и десорбции, устраняются стадии нагрева адсорбера и его последующего охлаждения, которые требуют высоких энергетических затрат;
- короткоцикловые адсорбция и десорбция, которые осуществляются в течение нескольких минут позволяют разделять большой объем газов, что ведет к сравнительно высокой производительности;
- высокая избирательность по поглощаемым компонентам в зависимости от выбранного адсорбента;
- возможность изменения режима работы, производительности и чистоты в случае необходимости;
- процесс регулируется автоматически, что делает доступным дистанционное управление процессом;
- простота в аппаратном оформлении;
- низкие капитальные затраты.

Таким образом, исходя из анализа существующих технологии выделения метана из МВС, можно предположить, что более экономичным и экологичным способом является адсорбционный метод. Этот способ основан на технологии PSA (pressure swing adsorption), то есть короткоциклового безнагревной адсорбции при переменном давлении.

2 Технологическая часть

2.1 Описание технологии процесса PSA

Для данной технологии необходим каскад, состоящий из четырех адсорберов (рис 1). Адсорберы работают в шахтном порядке, то есть когда в одних адсорберах идет адсорбция метана в других происходит его десорбция. Метано-воздушная смесь проходя через компрессор, давление в котором составляет 2.5 МПа, автоматизированными клапанами распределяется между адсорберами в шахтном порядке. Метано-воздушная смесь проходит через адсорбер в направлении снизу-вверх. Адсорбция осуществляется при давлении 6 МПа, при этом легко адсорбируемый метан поглощается адсорбентом, а слабо адсорбируемые или не адсорбируемые газы проходят легко и быстро через аппарат, за счет чего и осуществляется разделение газовой смеси. После заполнения 1 и 3 адсорберов, подача исходной смеси переключается на 2 и 4 адсорберы. Десорбция метана осуществляется при давлении 0.3 МПа. Сверху адсорберов выходят примеси, которые выбрасываются в атмосферу, поскольку не содержат вредных веществ. А очищенный метан выходит снизу адсорбера и собирается в приемнике, после чего идет на дальнейшее использование в качестве готового продукта.

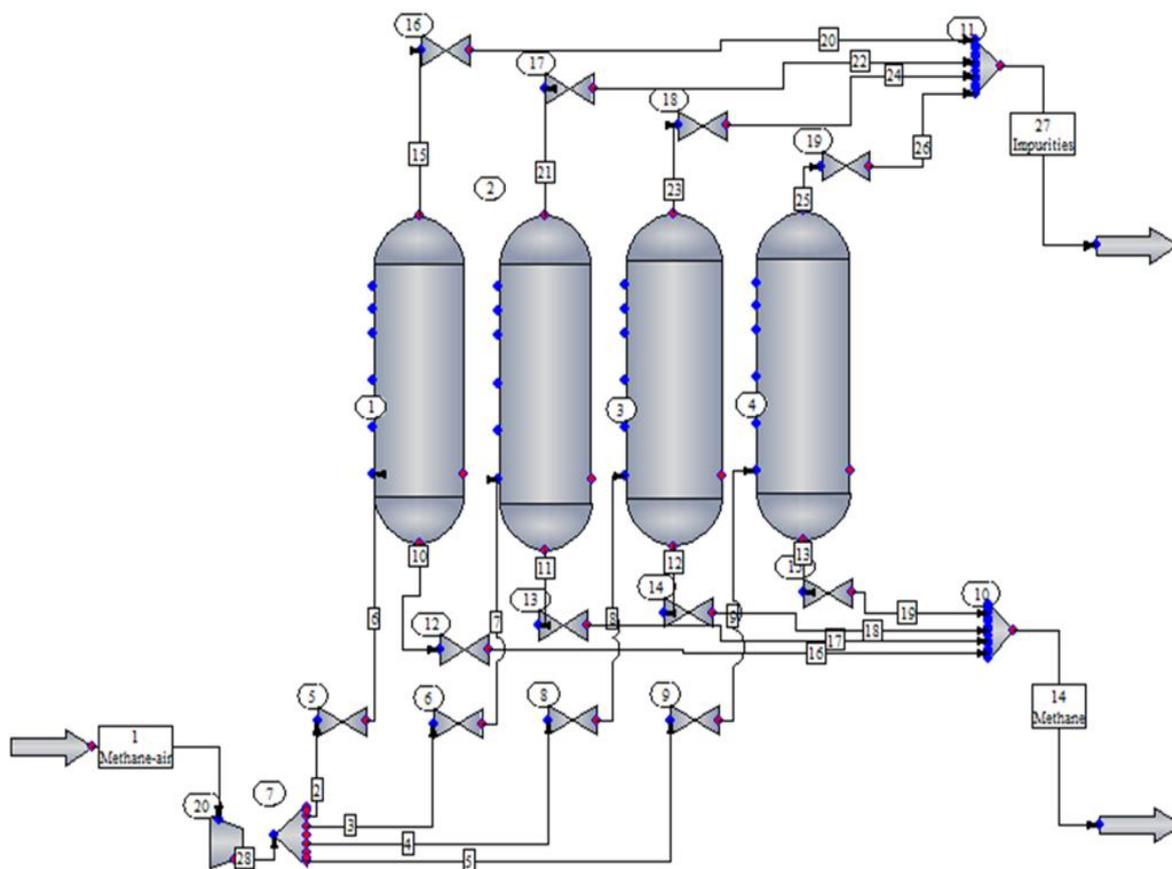


Рисунок 1 – Технологическая схема четырех-адсорберной установки выделения метана из метано-воздушной смеси методом PSA

2.2 Основные параметры процесса

Основными параметрами, которые влияют на процесс адсорбции являются: температура, давление и адсорбент.

Если говорить о температуре, то с увеличением температуры адсорбционная емкость адсорбента становится ниже. Исходя из этого, процесс проводят при низких температурах до 30°C.

Давление в данном процессе играет основополагающую роль поскольку, регулируя ее, то есть, увеличивая или уменьшая, мы контролируем весь процесс; адсорбция метана осуществляется при высоких давлениях, а регенерация адсорбента происходит при уменьшении ее. Процесс адсорбции ведем при давлении 6 МПа.

Адсорбенты - это тела с развитой поверхностью, которая хорошо поглощает вещества из газов и растворов. Развитая поверхность может создаваться, как капиллярами, так и кристаллическими решетками. Адсорбенты могут иметь природное и искусственное происхождение. Основными адсорбентами, которые имеют широкое применение для данной технологии в промышленности, является: активированные угли, силикагель и цеолиты [8].

Активированные угли имеют очень высокую удельную поверхность, которая находится в диапазоне от $6 \cdot 10^5 - 17 \cdot 10^5$ м²/кг. Насыпная плотность 200 – 900 кг/м³. Минусом активированных углей является их горючесть и низкая механическая прочность.

Силикагель. Удельная поверхность силикагеля находится в пределах $4 \cdot 10^5 - 7.7 \cdot 10^5$ м²/кг, и насыпная плотность 400 – 800 кг/м³. Силикагель обладает высокой механической прочностью и негорючестью в сравнении с активированными углями, однако помимо этого имеет низкую удельную поверхность и характеризуется снижением адсорбционной способности к парам органических веществ при наличии влаги.

Цеолиты. Цеолиты характеризуются регулярной структурой пор, размеры которых равны с размерами поглощаемых молекул и окнами определенного диаметра, которыми соединены поры, через которые могут проходить только молекулы имеющие меньший размер. На этом свойстве и основано разделение смесей, которые имеют молекулы разных размеров. Поэтому цеолиты иначе называют молекулярными ситами. Цеолиты являются более дорогими адсорбентами.

Среди выше перечисленных адсорбентов для предлагаемой технологии нами были выбран в качестве адсорбента активированный уголь. Поскольку активированные угли имеет следующие преимущества перед другими адсорбентами:

- активированные угли имеют очень высокую удельную поверхность;
- активированные угли имеют невысокую стоимость;
- поглощение органических веществ активированным углем не влечет за собой протекание неконтролируемых химических реакций, в ходе

которых могут образоваться химические вещества, отличающиеся от веществ, входящих в состав исходного газового потока;

- из-за того, что активированный уголь является как биологически, так и экологически инертным веществом, его применение не оказывает отрицательное воздействие на персонал предприятия и окружающую среду;

- отработанный активированный уголь легко регенерируется, что дает возможность его повторного использования.

3 Технологические расчёты

3.1 Материальный баланс

Исходные данные:

Количество шахтного газа, поступающего на адсорбцию 600000 м³/год.

Газ в своем составе помимо метана имеет примеси в следующих соотношениях (% об): азот – 36.0; углекислый газ – 14.0; кислород – 6.0; водород – 4.0.

После процесса адсорбции количество примесей должно уменьшиться до (% об): азот – 14.8; углекислый газ – 3.4; кислород – 0.8; водород – 1.0.

Имеем:

Шахтный газ	600000 м ³ /год – 100%;
СН ₄	240000 м ³ /год – 40.0%;
N ₂	216000 м ³ /год – 36.0%;
СО ₂	84000 м ³ /год – 14.0%;
O ₂	36000 м ³ /год – 6.0%;
H ₂	24000 м ³ /год – 4.0%.

Должно остаться:

Шахтный газ	600000 м ³ /год – 100%;
СН ₄	480000 м ³ /год – 80%;
N ₂	88800 м ³ /год – 14.8%;
СО ₂	20400 м ³ /год – 3.4%;
O ₂	4800 м ³ /год – 0.8%;
H ₂	6000 м ³ /год – 1.0%.

G – Количество шахтного газа, м³/ч;

R – Количество адсорбированного метана (с небольшими примесями), м³/ч;

D – Количество примесей от которых освобоился метан, м³/ч.

$$G = 600000/8760 = 68.5 \text{ м}^3/\text{ч}; \quad (1.1)$$

$$R = 600000 - [(216000 - 88800) + (84000 - 20400) + (36000 - 4800) + (24000 - 6000)] = 360000 \text{ м}^3/\text{год} = 41.1 \text{ м}^3/\text{ч}; \quad (1.2)$$

$$D = G - R = 68.5 - 41.1 = 27.4 \text{ м}^3/\text{ч} \quad (1.3)$$

Таблица 1 – Материальный баланс процесса

Поступает			Выходит		
Сырье	м ³ /ч	% об	Продукт	м ³ /ч	% об
Метано-воздушная смесь	68.5	100	1.Выделившиеся примеси		
			N ₂	14.5	21.16
			СО ₂	7.26	10.34

Продолжение таблицы 1

Поступает			Выходит		
Сырье	м ³ /ч	% об	Продукт	м ³ /ч	% об
			O ₂	3.56	5.6
			H ₂	2.05	2.9
			2.Адсорбированный метан	41.1	60
Всего	68.5	100	Всего	68.5	100

3.2 Расчет адсорбера

Исходные данные:

- Расход паровоздушной смеси $V = 0.818 \text{ м}^3/\text{с}$
- Начальная концентрация метано-воздушной смеси, подаваемой в адсорбер $C_0 = 10 \text{ г}/\text{м}^3$;
- Температура в адсорбере $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$;
- Давление в адсорбере $P = 6 \text{ МПа}$;
- Плотность метано-воздушной смеси $\rho_r = 1.2 \text{ кг}/\text{м}^3$;
- Вязкость метано-воздушной смеси $\nu = 0.15 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$;
- Диаметр гранул активированного угля $d = 2 \text{ мм}$;
- Длина гранул активированного угля $l = 4 \text{ мм}$;
- Насыпная плотность $\rho_n = 400 \text{ кг}/\text{м}^3$;
- Кажущаяся плотность $\rho_k = 750 \text{ кг}/\text{м}^3$;
- Эффективность процесса очистки $\eta = 0,99$;
- Статическая емкость сорбента $\alpha_0 = 160 \text{ г}/\text{кг}$.

1. Находим весовое количество очищаемого газа:

$$G = \rho_r \cdot V = 1.2 \cdot 0.818 = 0.982 \text{ кг}/\text{с} \quad (1.4)$$

2. Пересчитываем весовую статическую емкость сорбента α_0 в объёмную α'_0 :

$$\alpha'_0 = \frac{\alpha_0 \cdot \rho_n}{1000} = \frac{160 \cdot 400}{1000} = 64 \text{ кг}/\text{м}^3 \quad (1.5)$$

3. Находим массу сорбента:

$$M_c = \frac{K \cdot G \cdot C_0 \cdot \tau}{\alpha'_0} = \frac{1.1 \cdot 0.982 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 28800}{64} = 4.9 \text{ кг} \quad (1.6)$$

Где $K = 1.1 \dots\dots\dots 1.2$ – коэффициент запаса;

τ – продолжительность процесса адсорбции, $8 \text{ ч} = 28800 \text{ с}$

4. Фиктивная скорость паровоздушной смеси находится в пределах 0.01 - 0.25 м/с. Принимаем скорость потока газа в адсорбере $W = 0.24$ м/с. И вычисляем геометрические размеры адсорбера для выбранной конструктивной схемы (вертикального адсорбера). Определяем диаметр, площадь сечения, высоту адсорбера и высоту слоя адсорбента:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot \rho_r \cdot W}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.982}{3.14 \cdot 1.2 \cdot 0.24}} = 2.01 \text{ м}; \quad (1.7)$$

$$S_{\text{сеч}} = \frac{\pi \cdot D_A}{4} = \frac{3.14 \cdot 2.01^2}{4} = 3.4 \text{ м}^2; \quad (1.8)$$

$$H = \frac{S_{\text{сеч}}}{D} = \frac{3.4}{2.01} = 1.69 \text{ м} \quad (1.9)$$

$$H_A = \frac{M_C \cdot W}{G} = \frac{4.9 \cdot 0.24}{0.982} = 1.19 \text{ м} \quad (1.10)$$

5. Вычисляем пористость адсорбента:

$$\Pi = \frac{\rho_k - \rho_H}{\rho_k} = \frac{750 - 400}{750} = 0.47 \quad (1.11)$$

6. Вычисляем эквивалентный диаметр зерна адсорбента:

$$d_3 = \frac{\Pi \cdot d \cdot l}{(1 - \Pi) \cdot \left(\frac{d}{2} + l\right)} = \frac{0.47 \cdot 0.002 \cdot 0.004}{(1 - 0.47) \cdot \left(\frac{0.002}{2} + 0.004\right)} = 0.00142 \text{ м} \quad (1.12)$$

7. Исходя из характера движения паровоздушной смеси находим коэффициент трения λ [9]:

$$\text{при } Re < 50, \lambda = \frac{220}{Re}; \quad \text{при } Re > 50, \lambda = \frac{11.6}{Re^{0.25}} \quad (1.13)$$

где Re – критерии Рейнольдса,

$$Re = \frac{W \cdot d_3}{\nu \cdot \Pi} = \frac{0.24 \cdot 0.00142}{0.15 \cdot 10^{-4} \cdot 0.47} = 48.3 \quad (1.14)$$

$$\text{Откуда } \lambda = \frac{220}{Re} = \frac{220}{48.3} = 4.6 \quad (1.15)$$

8. Вычисляем коэффициент молекулярной диффузии паров метана в воздухе при следующих условиях: $D_0 = 0.101 \cdot 10^{-4}$ при $T_0 = 273 \text{ K}$ и $P_0 = 9.8 \cdot 10^4 \text{ Па}$

$$D = D_0 \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{P_0}{P} = 0.101 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{298}{273}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{0.098}{6} = 2.75 \cdot 10^{-6} \quad (1.16)$$

9. Вычисляем диффузионный критерий Прандтля:

$$Pr = \frac{\nu}{D} = \frac{0.15 \cdot 10^{-4}}{2.75 \cdot 10^{-6}} = 5.45 \quad (1.17)$$

10. Для вычисленного значения Re находим коэффициент массопередачи β для единичной удельной поверхности, м/с:

$$\text{При, } Re < 30, \beta = \frac{0.833 \cdot Re^{0.47} \cdot Pr^{0.35} \cdot D}{d_3} \quad (1.18)$$

$$\text{При, } Re > 30, \beta = \frac{0.53 \cdot Re^{0.64} \cdot Pr^{0.33} \cdot D}{d_3} \quad (1.19)$$

поскольку в наших расчетах $Re = 48.3$ то вычисляем по (1.19)

$$\beta = \frac{0.53 \cdot 48.3^{0.64} \cdot 5.45^{0.33} \cdot 2.75 \cdot 10^{-6}}{0.00142} = 0.021 \text{ м/с} \quad (1.20)$$

11. Принимаем количество вещества максимально поглощаемое адсорбентом при заданной температуре, $\alpha_0 = 160 \text{ г/кг}$ и концентрацию метано-воздушной смеси на входе в адсорбер $C_x = 2.5 \text{ г/м}^3$.

Вычисляем удельную поверхность адсорбента:

$$f = \frac{4 \cdot (1 - \Pi)}{d \cdot l} \cdot \left(\frac{d}{2} + 1\right) = \frac{4 \cdot (1 - 0.47)}{0.002 \cdot 0.004} \cdot \left(\frac{0.002}{2} + 0.004\right) = 1325 \frac{\text{м}^2}{\text{м}^3} \quad (1.21)$$

12. Вычислим концентрацию паров метана на выходе из аппарата:

$$C_k = C_0 \cdot (1 - \eta) = 10 \cdot (1 - 0.99) = 0.1 \frac{\text{г}}{\text{м}^3} \quad (1.22)$$

13. Вычислим длительность защитного действия адсорбента:

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{\alpha'_0}{W \cdot C_0} \cdot \left\{ H_A - \frac{W}{\beta \cdot f} \cdot \left[\frac{C_x}{C_0} \cdot \ln \left(\frac{C_0}{C_k} - 1 \right) + \ln \left(\frac{C_0}{C_k} - 1 \right) \right] \right\} = \\ &= \frac{64}{0.18 \cdot 0.01} \cdot \left\{ 1.19 - \frac{0.24}{0.021 \cdot 1325} \cdot \left[\frac{2.5 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-3}} \ln \left(\frac{10 \cdot 10^{-3}}{0.1 \cdot 10^{-3}} - 1 \right) + \ln \frac{10 \cdot 10^{-3}}{0.1 \cdot 10^{-3}} - 1 \right] \right\} = \\ &= 30693 \text{ с} = 8.5 \text{ ч} \end{aligned} \quad (1.23)$$

Полученные при расчетах параметры обеспечивают бесперебойный режим работы адсорбера. Для технологии PSA необходимы вертикальные адсорберы с неподвижным слоем адсорбента, в связи с небольшой производительностью процесса. Их выполняют из стали, толщина листа которого 8 – 10 мм. Крышка и днище конические. Адсорбенты в них располагаются на разборных решетках. На решетках располагается слой гравия для устранения проникновения адсорбента под решетку.



Рисунок 2 – Стандартные вертикальные адсорберы, применяющиеся в промышленности

4 Автоматизация технологии PSA

Комбинация программно-аппаратных средств и персонала с целью управления различными процессами в масштабе технологического процесса называется автоматизированной системой управления. Задачей АСУ является обеспечение высокого уровня контроля над протекающими процессами, за счет обеспечения оптимальных условий для проведения процесса [10]. Как нам известно, технология PSA также должна быть автоматизирована из-за того, что циклы адсорбции и десорбции протекают за короткое время и к тому же они осуществляются за счет изменения давления. Автоматизированная система управления способствует непрерывному и бесперебойному режиму работы технологии, поскольку при подаче метано-воздушной смеси в адсорберы будут стоять ротаметры, которые будут регулировать количество подаваемого газа и скорость его потока, адсорберы будут снабжены датчиками давления. Так же технология должна быть снабжена автоматизированными клапанами переключателями, которые будут направлять поток исходной смеси в адсорберы с регенерированным адсорбентом. Все результаты и показания будут отображаться на мониторе у оператора. Для осуществления автоматизации процесса можно использовать программный микропроцессорный контроллер Simatic S7-300. Данное семейство контроллеров обеспечивает ведение анализа процесса, отображение информации на панели и вывод результатов. Для автоматизации технологии PSA были выбраны следующие приборы:

- Датчики давления Метран – 55 [11]. Данный датчик предназначен для определения давления в газовой среде, имеет максимальный предел измерения 10 МПа, допустимая погрешность 0.25;
- Ротаметр FIP с диапазоном измерения 0.025 м³/ч до 200 м³/ч.



Рисунок 3 – Датчик давления Метран – 55

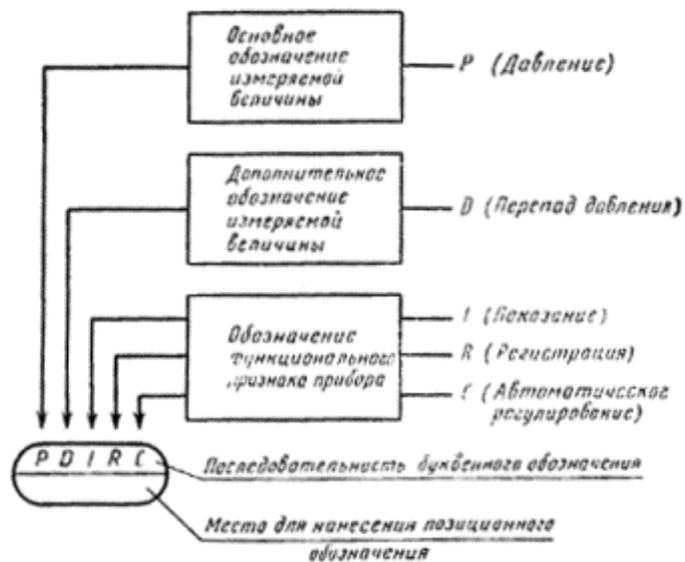


Рисунок 4 – Принцип построения условного обозначения датчика давления на щите управления

5. Категория безопасности

5.1 Расчет категории опасности предприятия

Категорию опасности предприятия (КОП) вычисляют по формуле [12]:

$$\text{КОП} = \sum (M_i / \text{ПДК}_i) C_i \quad (1.24)$$

где, M_i – осуществляемый выброс i -го вещества, т/год;

ПДК_i – суточная предельно допустимая концентрация i -го вещества, мг/м³;

Таблица 2 – Значения C_i для веществ различных классов опасности

	Класс опасности			
Константа	1	2	3	4
C_i	1.7	1.3	1.0	0.9

В ходе адсорбции в атмосферу выбрасываются азот, кислород, водород и углекислый газ. Вредным газом среди них является диоксид углерода. Объем углекислого газа, выбрасываемого в атмосферу при адсорбции 600000 м³/год, составляет 63600 м³/год. Учитывая плотность диоксида углерода, которая равна 1.97 кг/м³ найдем его массу:

$$M_{(\text{CO}_2)} = 1.97 \cdot 63600 = 125288 \text{ кг/год} = 125.288 \text{ т/год} \quad (1.25)$$

Таблица 3 – Характеристика диоксида углерода, выбрасываемого в атмосферу при адсорбции метана из МВС

Вещество	ПДК, мг/м ³	Класс опасности	C_i	Количество газа, т/год
CO ₂	0.152	4	0.9	125.288

$$\text{КОП} = (125.288/0.152)^{0.9} = 421.2 \quad (1.26)$$

Поскольку КОП не превышает 1000, считается, что осуществляемый выброс вредных веществ, не превышает экологически допустимых норм, и составляет до 1-5% от общих выбросов города [13].

5.2 Техника безопасности

При осуществлении технологических процессов в воздух рабочей зоны могут выделяться вредные вещества. Метан является бесцветным газом, ПДК которого составляет 7000 мг/м³. Если концентрация метана маленькая она не представляет опасности для здоровья человека, однако при высоких концентрациях может влиять на нервную систему человека, вызывать удушье и головную боль [14].

Для предотвращения профессиональных отравлений метаном при осуществлении процесса необходимо:

1. автоматизировать технологию;
2. аппараты и оборудования должны быть максимально герметичными и исключать выделение метана в воздух рабочей зоны;
3. правильно планировать площадки при строительстве производства;
4. контроль воздуха рабочей зоны и применение средств индивидуальной защиты;
5. строгое соблюдение правил техники безопасности сотрудниками производства.

Учитывая, что метан является взрывоопасным газом с пределами взрываемости 4.4% до 17% данное производство отнесется к категории А взрывопожароопасному производству, необходима организация противопожарной защиты производственного объекта, которая помимо наличия механических средств пожаротушения, подразумевает наличие автоматических средств пожаротушения. К автоматическим средствам пожаротушения относятся спринклерные и дренчерные установки [15]. Для данного производства необходима дренчерные установки, которые представляют собой групповые трубопроводы со спринклерами (рис 3). Также необходима установка автоматической пожарной системы (уапс), которая представляет собой пожарные датчики, передающие сигналы к приемным аппаратам, для своевременного автоматического обнаружения пожара и сообщения о нем профессиональным пожарным командам [16].



Рисунок 5 – Дренчерные установки для пожаротушения

6 Экономическая часть

Поскольку в технологии PSA адсорбция и десорбция осуществляются лишь при переменном давлении и не требуют температурных изменений процесс освобождается от стадии нагрева адсорбера, его последующего охлаждения. В связи с этим данная технология не требует высоких энергетических затрат. Аппаратурное оформление процесса довольно простое. В (таблице 4) приведена примерная стоимость аппаратов и устройств.

Таблица 4 – Стоимость аппаратов и устройств [17-19]

Название	Стоимость, тг	Количество	Всего
Адсорбер	2683000	4	10732000
Компрессор	680000	1	680000
Клапаны	545600	12	6547200
Приемники	892000	2	1784000

Тогда примерные общие капитальные затраты распределяются следующим образом (таблица 5):

Таблица 5 – Общие капитальные затраты

Название	Капитальные затраты, тг
Аппараты и устройства	19723200
Здания и сооружения	16108500
АСУ ТП	9632000
Итого	45463700

Необходимое для обслуживания работы технологической установки количество работников для одной смены составляет 12, из них 3 главных оператора, 6 операторов-технологов и 3 машиниста.

Объем ежегодно получаемого очищенного метана составляет 360036 м³/год. Стоимость 1м³ метана составляет 80 тенге. Ежегодная прибыль эквивалента 28802880 тенге. Основные технико-экономические показатели технологической установки приведены в таблице 6. Исходя из этих данных, можно рассчитывать рентабельность производства и срок окупаемости капиталовложения.

Рентабельность производства:

$$28802880 \cdot 100\% / 109913700 = 26.2\% \quad (1.27)$$

Срок окупаемости:

$$109913700 / 28802880 = 3 \text{ года } 8 \text{ месяцев} \quad (1.28)$$

Таблица 6 – Техничко-экономические показатели установки

Основные показатели, единица измерения	Значение
Мощность установки, м ³ /год	600000
Количество работников, человек	12
Заработная плата, тг/человека	1360000
Капитальные затраты, тг	45463700
Затраты на проектирование, тг	12310000
Строительно-монтажные работы, тг	52140000
Стоимость продукта, тг/м ³	80
Общая прибыль, тг	28802880
Рентабельность производства, %	26.2
Срок окупаемости, лет	3.8

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были изучены такие вопросы как: почему наличие метана в шахтном газе представляет угрозу для подземных работ, каким образом осуществляется выделение метана в шахтах, способы выделения метана из шахтного газа. И в результате был предложен адсорбционный способ выделения метана, основанный на технологии PSA. В работе приводятся описание данной технологии, ее преимущества над другими способами, технологические параметры для проведения процесса. В ходе работы были рассмотрены свойства основных промышленных адсорбентов и выбран адсорбент для данной технологии. Также в работе был воспроизведен расчет основного аппарата – адсорбера, который подразумевает определение необходимого количества сорбента, основные размеры адсорбционной установки и продолжительность защитного действия адсорбента.

По результатам исследования предложен способ адсорбционного выделения метана, который основан на технологии PSA (адсорбция при переменном давлении).

Применение выше предложенной технологии в Казахстане для реализации выделения метана из метано-воздушной смеси позволит не только снизить выброс метана в атмосферу и повысить степень безопасности при эксплуатации угольных шахт, но и обеспечит выделение метана, как товарного продукта. Ведь метан является одним из ценных газов, резервы которого в угольных пластах в переводе на условное топливо по различным оценкам находятся на третьем-четвертом месте среди существующих на Земле запасов горючих ископаемых после угля, нефти и природного газа.

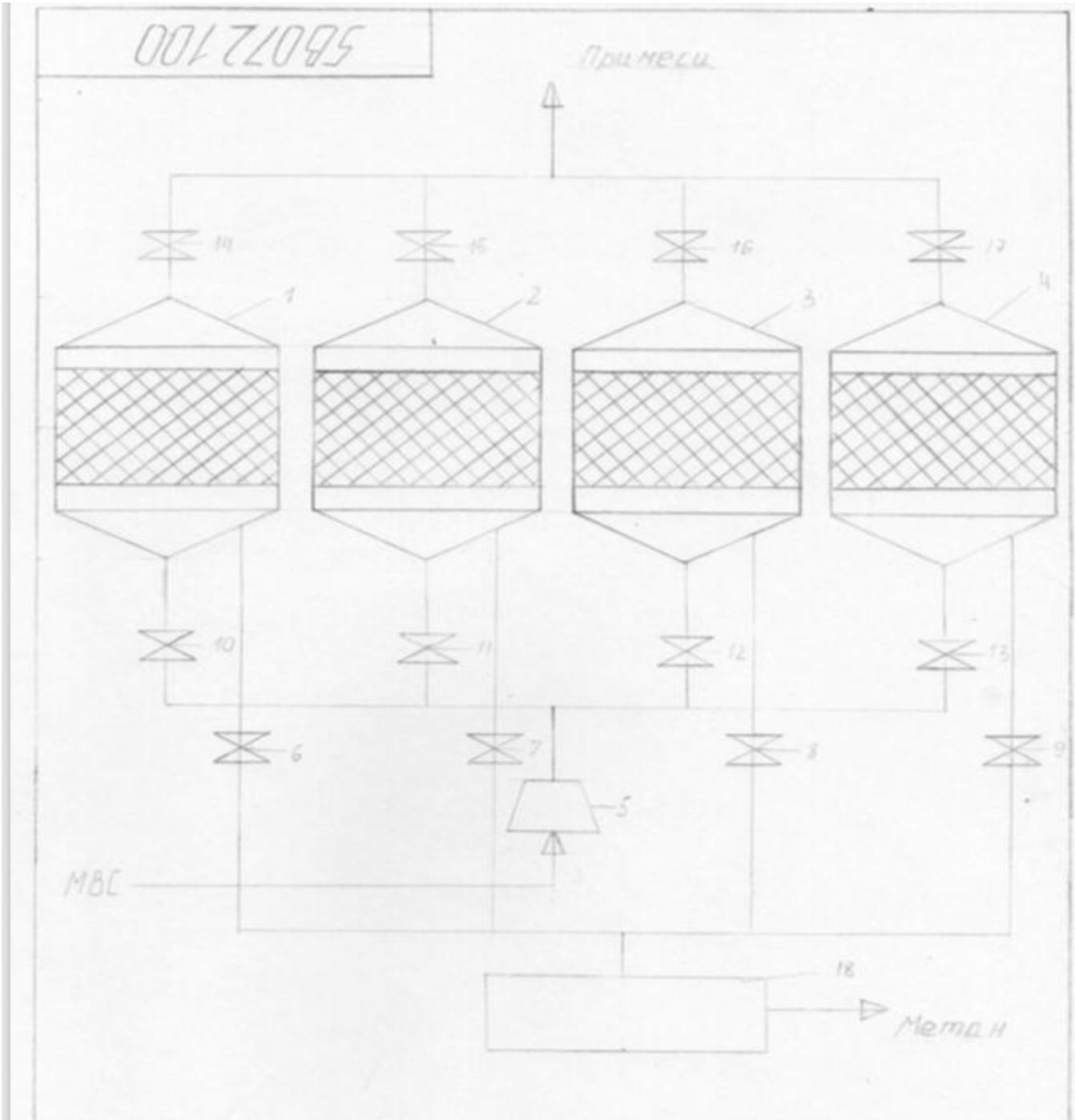
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Ушаков К.З., Каделина Н.О., Кирин Б.Ф., Ильин А.М. Безопасность ведения горных работ и горноспасательное дело/ Издательство «Горная книга» - 2008 - 480с.
- 2 Кузьменко И.Ф., Рубцов А.И., Добвиш А.Л., Мельниченко А.А. Технология комплексной переработки шахтного газа с получением товарного сжиженного метана/ Москва – 2010.
- 3 Портола В.А., Оценка опасности взрыва горючих газов/ Кемерово - 2015.
- 4 Патент RU №2096626, Кл. E21F 7/00, опубл. 20.11.2007, бюл. №32
- 5 Кауфман Л.Л., Лысиков Б.А., Лабинский К.Н. Зарубежный опыт использования метана исходящего воздуха шахт.
- 6 Ельчанинов Е.А., Удалова Н.П., Ельчанинова Е.А., Посеряева О.О. Обогащение метановоздушных смесей метаном до концентрации, требуемых промышленными установками. – 2012.
- 7 Астановский Д.Л. Способ выделения метана из шахтной метановоздушной смеси и установка для его осуществления. – 2010.
- 8 Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. – 1995. Часть 2, стр.190
- 9 Антонова С.А., Шильникова В.Н., Софьина С.Ю., Гасилов В.С. Промышленная экология. Расчет аппаратов для очистки газов. – 2007 - 246с.
- 10 Автоматизированная система управления https://spravochnick.ru/informacionnye_tehnologii/setevye_informacionnye_sistemy/avtomatizirovannye_sistemy_upravleniya/
- 11 Датчики давления <https://www.emerson.ru/documents/automation/%D0%B4%D0%B0%D1%82%D1%87%D0%B8%D0%BA-%D0%B4%D0%B0%D0%B2%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F-%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BD-55-ru-4848442.pdf>
- 12 Расчет категории опасности предприятия <https://studfile.net/preview/5908763/page:2/>
- 13 Быков А.П. Инженерная экология/ Новосибирск - 2014. Часть 2, стр. 111
- 14 Метан, влияние на организм <http://www.hot-adm.ru/article4607>
- 15 Кушелев В.П., Орлов Г.Г., Сорокин Г.Г. Охрана труда в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности/ Издательство «Химия» - 1983, стр. 447
- 16 Ахметов С.А., Ишмияров М.Х., Веревкин А.П. и др. Технология, экономика и автоматизация процессов переработки нефти и газа. - М.: Химия - 2005 - 683с.
- 17 Адсорберы <https://gas-cleaning.ru/article/promyshlennye-adsorbery>
- 18 Компрессоры <https://aerocompressors.ru/emarket/cart/>
- 19 Клапаны <https://skyprom.ru/shop/rezervuarnoe-oborudovanie/klapan-kds-1500/>

20 Касенов К.М. и др. Конспект лекций по промышленной экологии и производственной безопасности/ Алматы: КазННТУ, 2017.

Приложение А

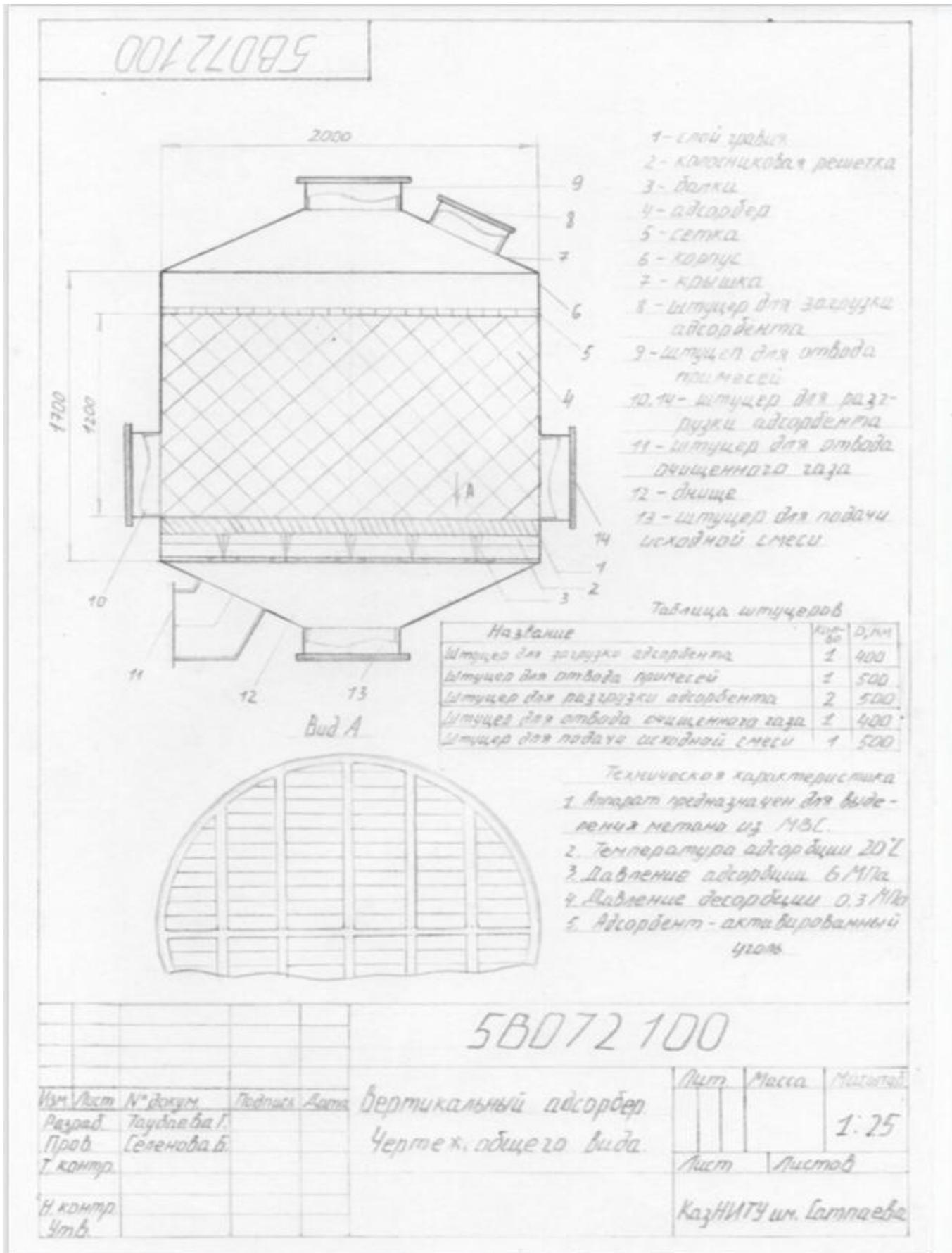
Технологическая схема процесса PSA



				5B072100			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Технологическая схема	Лист	Масштаб
					процесса PSA		1:50
Разраб.	Гаврилова А.					Лист	Листов
Проб.	Селезнева Б.						
Т. контрол.							
И. контрол.						КазНИТУ им. Ситникова	
Чтв.							

Приложение Б

Вертикальный адсорбер. Чертеж общего вида



Приложение В

Схема автоматизации процесса PSA

