



Е.В. Логвиненко

**ИМИТАЦИЯ РАБОТЫ УСТАНОВКИ
РАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА АЖК-0,02 НА
ПРОГРАММНОЙ МОДЕЛИ**

**Санкт-Петербург
2025**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Е.В. Логвиненко
ИМИТАЦИЯ РАБОТЫ УСТАНОВКИ
РАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА АЖК-0,02 НА
ПРОГРАММНОЙ МОДЕЛИ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлению подготовки 16.04.03 Холодильная, криогенная техника и
системы жизнеобеспечения

в качестве Учебно-методического пособия для реализации основных
профессиональных образовательных программ высшего образования
магистратуры

ИТМО

Санкт-Петербург
2025

Логвиненко Е.В., Имитация работы установки разделения воздуха АЖК-0,02 на программной модели— СПб: Университет ИТМО, 2025. – 37 с.

Рецензент(ы):

Баранов Александр Юрьевич, доктор технических наук, профессор, профессор (квалификационная категория "ординарный профессор") образовательного центра "Энергоэффективные инженерные системы", Университета ИТМО.

В данном учебно-методическом пособии представлены несколько лабораторных работ. Работы выполняются на программной модели воздухоразделительной установки, работающей в режиме производства жидкого азота или в режиме производства газообразного кислорода под давлением. При производстве жидкого азота установка работает по криогенному циклу высокого давления с расширением части воздуха в детандере, а при производстве газообразного кислорода – по циклу высокого давления с простым дросселированием.

Пособие предназначено для работы студентов направлений магистратуры 16.04.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения очной формы обучения по дисциплине «Проектирование машин, аппаратов и установок для производства и хранения сжиженного природного газа».



ИТМО (Санкт-Петербург) — национальный исследовательский университет, научно-образовательная корпорация. Альма-матер победителей международных соревнований по программированию. Приоритетные направления: IT и искусственный интеллект, фотоника, робототехника, квантовые коммуникации, трансляционная медицина, Life Sciences, Art&Science, Science Communication.

Лидер федеральной программы «Приоритет-2030», в рамках которой реализуется программа «Университет открытого кода». С 2022 ИТМО работает в рамках новой модели развития — научно-образовательной корпорации. В ее основе академическая свобода, поддержка начинаний студентов и сотрудников, распределенная система управления, приверженность открытому коду, бизнес-подходы к организации работы. Образование в университете основано на выборе индивидуальной траектории для каждого студента.

ИТМО пять лет подряд — в сотне лучших в области Automation & Control (кибернетика) Шанхайского рейтинга. По версии SuperJob занимает первое место в Петербурге и второе в России по уровню зарплат выпускников в сфере IT. Университет в топе международных рейтингов среди российских вузов. Входит в топ-5 российских университетов по качеству приема на бюджетные места. Рекордсмен по поступлению олимпиадников в Петербурге. С 2019 года ИТМО самостоятельно присуждает ученые степени кандидата и доктора наук.

© Университет ИТМО, 2025

© Логвиненко Е.В., 2025

Содержание

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 4 |
| Условные обозначения..... | 6 |
| 1.Воздухоразделительная установка АЖК-0,02..... | 8 |
| 1.1 Особенности процесса разделения воздуха..... | 8 |
| 1.2 Состав установки..... | 9 |
| 1.3 Описание схемы | 20 |
| 2. ОПИСАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ УЧЕБНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ВОЗДУХОРАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ АЖК-0,02..... | 21 |
| 2.1 Аннотация..... | 21 |
| 2.2 Состав программного обеспечения модели..... | 21 |
| 2.3 Запуск модели на исполнение..... | 21 |
| 2.4 Описание схемы модели установки..... | 22 |
| 2.5 Управление процессом моделирования..... | 23 |
| 3. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ | 28 |
| Лабораторная работа №1..... | 28 |
| Имитация работы установки в режиме получения жидкого азота.. | |
| Лабораторная работа №2..... | 32 |
| Имитация работы установки в режиме получения газообразного кислорода под давлением..... | |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | 35 |

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Проектирование машин, аппаратов и установок для производства и хранения сжиженного природного газа» включает в себя рассмотрение всех вопросов, связанных с производством и хранением сжиженного природного газа (СПГ). В связи с тем, что СПГ является криогенной жидкостью предлагается провести первое знакомство с таким нетипичным видом жидкостей с более простого примера, в качестве которого выбран воздух. Воздух, как и природный газ, является многокомпонентной смесью, а также примеси в воздухе и природном газе частично совпадают. В связи с этим установки ожижения природного газа и воздуха похожи. Идентичными являются блок очистки и осушки газа, компрессорные и детандерные блоки, более того, воздухоразделительная установка (ВРУ) АЖК-0,02 содержит в себе блок ректификации, который наглядно демонстрирует процесс разделения многокомпонентных смесей на составляющие.

При изучении курса «Проектирование машин, аппаратов и установок для производства и хранения сжиженного природного газа» студент обязан выполнить расчетную работу и ряд лабораторных работ. Выполнение лабораторных и расчетной работ производится в сроки, установленные учебным планом. После выполнения и защиты данных работ студент сдает зачет. В данном учебно-методическом пособии представлены несколько лабораторных работ. Эти работы направлены на обеспечение практической подготовки обучающегося на базе учебной компьютерной имитационной модели.

Это модель имитации работы воздухоразделительной установки, которая может работать в двух режимах: производства жидкого азота или производства газообразного кислорода под давлением. При производстве жидкого азота установка работает по криогенному циклу высокого давления с расширением части воздуха в детандере, а при производстве газообразного кислорода – по циклу высокого давления с простым дросселированием.

Имитационная модель позволяет реализовать следующие процедуры:

1. Начать с исходного состояния, запустить оборудование, накопить жидкость в колоннах, отладить производство жидкого азота. Далее можно либо остановить установку, либо перейти на режим получения газообразного кислорода под давлением и затем остановить.

2. Начать сразу с режима получения жидкого азота, а затем остановить установку или перейти на производство газообразного кислорода.

В результате выполнения и защиты лабораторных работ студенты закрепляют знания, приобретают умения и формируют новые навыки в соответствии с рабочей программой дисциплины «Проектирование машин, аппаратов и установок для производства и хранения сжиженного природного газа», целью освоения которой является формирование компетенций, напрямую отвечающих за способность к руководству проектным подразделением по проектированию систем промышленного производства сжиженного природного газа.

Работы выполняются в присутствии преподавателя. Для допуска к защите лабораторной работы студенту необходимо:

1. выполнить лабораторную работу без «аварий»;
2. по окончании лабораторной работы предоставить преподавателю отчет о проведенных действиях.

При защите отчетов по лабораторным работам студенты должны подтвердить достижение требуемых результатов обучения и формируемых компетенций выпускника. Для этого при получении зачета за выполнение лабораторных работ студент должен правильно ответить на контрольные вопросы, примеры которых приведены в конце каждой лабораторной работы.

Пособие предназначено для работы студентов направлений магистратуры 16.04.03 Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения очной формы обучения по дисциплине «Проектирование машин, аппаратов и установок для производства и хранения сжиженного природного газа».

Условные обозначения:

1. К – компрессор;
2. Д – детандер;
3. Н – насос;
4. ОВ – отделитель влаги;
5. БО – блок комплексной очистки и осушки воздуха;
6. ДТ – детандерный теплообменник;
7. ОТ – основной теплообменник;
8. ПК – переохладитель кислорода;
9. РК-1 – ректификационная колонна № 1;
10. РК-2 – ректификационная колонна № 2;
11. СА – сборник жидкого азота;
12. НР – наполнительная рампа;
13. Др-1, Др-2, Др-3, Др-4 – регулирующие вентили;
14. 3-1...3-13 – запорные вентили;
15. ДФ – детандерный фильтр.
16. А – степень открытия вентиля 3-1;
17. В – степень открытия дросселя Др-4;
18. С – отсечка наполнения детандера;
19. М – степень открытия вентиля 3-7;
20. Г – степень открытия дросселя Др-1.

Назначение вентиляей

- 3-1 – сброс воздуха в атмосферу;
- 3-2 – вход воздуха в блок очистки;
- 3-3 – выход воздуха из блока очистки;
- 3-4 – вход воздуха в детандер;
- 3-5 – воздух после детандера;
- 3-6 – слив жидкого азота;
- 3-7 – байпас теплообменника-ожижителя;
- 3-8 – выход газа из теплообменника-ожижителя;
- 3-9 – жидкий кислород;
- 3-10 – слив жидкого азота потребителю;
- 3-11 – сброс кислорода в атмосферу;
- 3-12 – кислород в рампу;
- 3-13 – кислород в левую рампу;
- 3-14 – кислород в правую рампу;
- 3-15 – продувка влагоотделителя;
- 3-16 – слив кубовой жидкости;
- 3-17 – слив жидкого кислорода;

- 3-18 – слив жидкого азота;
- 3-19 – утечка кислорода из насоса.

Основные параметры, измеряемые при работе установки
Температуры

- T1 – после компрессора;
- T2 – после теплообменника-ожижителя;
- T3 – после блока очистки;
- T4 – перед детандером ;
- T5 – после детандера;
- T6 – отбросной газ из теплообменника;
- T7 – кислород перед рампой;
- T3=T4.

Концентрации

- x1 – куб колонны №1;
- x2 – куб колонны №2;
- x3 – азот колонны №2;
- x4 – отбросной азот;
- x5 – кислород на рампу;
- x6 – кислород на насос.

Давления

- P1 – давление после компрессора;
- P2 – в адсорбционном блоке;
- P3 – после ТО2 и перед ДР-1;
- P4 – перед детандером;
- P5 – после детандера;
- P6 – в нижней колонне высокого давления;
- P7 – в верхней колонне низкого давления;
- P8 – в сборнике жидкого азота СА;
- P9 – давление в левой ветке рампы;
- P10 – в правой ветке рампы;
- P11 – на выходе в атмосферу.

Уровни жидкостей

- У1 – уровень кубовой жидкости;
- У2 – жидкости в межтрубном пространстве конденсатора-испарителя;
- У3 – жидкости в трубках конденсатора-испарителя;
- У4 – азота в сборнике азота СА.

1. Воздухоразделительная установка АЖК-0,02

1.1 Особенности процесса разделения воздуха

Из атмосферного воздуха можно получать целый спектр промышленных газов: кислород, азот, аргон, неон, криптон, ксенон. В современном мире кислород и азот остаются востребованными и незаменимыми продуктами, необходимыми для металлургической промышленности, медицины, народного хозяйства и так далее. Более того разработка новых ракетных двигателей на криптоне и ксеноне потребует новых промышленных мощностей по добыче этих газов [1]. Для промышленного производства таких газов применяются воздухоразделительные установки (ВРУ). ВРУ включают в себя несколько блоков [2]:

1. оборудование для сжатия атмосферного воздуха - (компрессорный блок);
2. блок очистки и осушки воздуха (удаляется влага, двуокись углерода, взрывоопасные примеси);
3. теплообменные аппараты для охлаждения воздуха до криогенных температур и нагрева продуктов его разделения;
4. ректификационные колонны и конденсаторы-испарители;
5. криогенные насосы.

Классификация ВРУ довольно разнообразна, но наиболее распространена классификация ВРУ по рабочему давлению. Установка АЖК-0,02, рассматриваемая в данном пособии, может работать в двух режимах:

1. с получением жидкого азота. Тогда установка работает по циклу высокого давления;
2. с получение газообразного кислорода. В этом случае используется для работы цикл среднего давления.

Существует некоторые различия при работе установки в этих режимах. Так при работе установки по циклу высокого давления с получением жидкого азота компрессор сжимает воздух до давления 18-20 МПа, далее после осушки часть потока воздуха будет направлена на детандер (около 80%), где произойдет его расширение до давления в нижней колонне (0,5-0,6 МПа). Для разделения воздуха и получения жидкого азота заданной концентрации будет достаточно использования только нижней колонны, полученный жидкий азот будет сливаться из конденсатора, установленного над колонной высокого давления. В отличие от такой работы установки при

получении газообразного кислорода происходят следующие изменения:

1. компрессор сжимает воздух до более низкого давления (7-8 МПа);
2. выключается детандер;
3. разделение происходит в двух колоннах – высокого и низкого давления;
4. для закачки кислорода в баллоны и газификации жидкого кислорода в схеме предусмотрен жидкостной насос.

1.2 Состав установки

В состав установки входят:

- поршневой компрессор КВ-100 (К);
- поршневой детандер ДВД-11 (Д);
- насос жидкого кислорода (Н);
- блок комплексной осушки и очистки воздуха (БО);
- блок разделения воздуха.

Рассмотрим последовательно эти узлы и агрегаты.

Зачастую в ВРУ для сжатия воздуха используют поршневые компрессорные установки. Данный случай не является исключением. Принцип работы компрессора заключается в том, что воздух, попадающий в цилиндр сжимается поршнем, который приводится в движение с помощью электродвигателя [3]. Независимо от производительности поршневого компрессора, его назначения и так далее он состоит из коленчатого вала, поршня, цилиндра, камеры, кривошипно-шатунного механизма, клапанов (для впуска и выпуска газа), а также привода, который может быть электрическим, бензиновым или дизельным. Поршневые компрессоры имеют простую, ремонтпригодную конструкцию.

Установка АжК-0,02 оснащена поршневым компрессором КВ-100: производительность такого компрессора $100 \text{ м}^3/\text{ч}$, максимальное давление 20 МПа, но может работать и в диапазоне 5-10 МПа (переход на такой режим работы компрессора осуществляется в момент перехода на получение установкой газообразного кислорода).

Данный компрессор обладает следующими особенностями [4]:

- одинарный (бескрейцкопфный);
- масляный, снабжен двумя системами смазки: система смазки механизма движения и смазка цилиндров и сальников;

- по расположению цилиндров: вертикальный. Причем ступень 1 расположена под цилиндром 3 ступени, ступень 2 - под 4 ступенью;
- по количеству ступеней – многоступенчатый, а именно четырехступенчатый.
- по типу привода относится к компрессорам с ременным приводом (демонстрируют меньшие динамические нагрузки при запуске благодаря проскальзыванию ременной передачи).

Стоит более внимательно ознакомиться с организацией системы смазки. Первое на что стоит обратить внимание - это наличие в циркуляционной системе перепускного клапана. Он необходим для регулирования давления масла, осуществляется оно по показаниям манометра, давление масла в системе должно лежать в пределах от 0,1 до 0,4 МПа. В данном компрессоре КВ-100 в качестве маслосборника используют поддон картера. Для экономии энергии можно осуществлять привод масляного шестеренчатого насоса от вала компрессора. Не стоит забывать, что перед пуском установки необходимо вручную провернуть этот насос. Для обеспечения безопасности пуска (только при наличии смазки в компрессоре) предусмотрено следующее: электрическая цепь для запуска главного двигателя замыкается лишь при наличии давления масла в системе. Для смазки шатунно-кривошипного механизма применяют индустриальные масла марок И-40А и О-50А (ГОСТ 20799-75).

Главное отличие системы смазки цилиндров и сальников поршневых компрессоров ВРУ — это использование других масел. Например, в таких случаях рекомендовано масло П-28, имеющее температуры вспышки не ниже 285 °С, а также масло марок: МК-22, КС19, КС19-П, К2-24, К3-20 и др. Подача масла для смазки цилиндров и сальников компрессора осуществляется непосредственно на рабочие поверхности цилиндров и сальников с помощью движения масла под давлением по трубкам. Так как для этой системы смазки необходимо строго регулировать подачу масла и при этом на цилиндрах ступеней разное давление, для смазки цилиндров применяют лубрикаторы (многоплунжерные насосы с отдельными элементами). Каждый элемент, действуя как отдельный насос, питает только один ввод и имеет индивидуальную регулировку подачи, которая контролируется каплеуказателем. Привод лубрикатора чаще всего осуществляется от шатунно-кривошипного механизма компрессора. В этом случае, для подачи масла до пуска компрессора в лубрикаторе предусмотрено устройство для проворачивания вручную.

На рисунке 1 показана принципиальная схема компрессора. Корпус компрессора выполняется из чугуна. Внутри него располагаются цилиндр, с движущимся внутри него поршнем, и картер. Внутри картера находится коленчатый вал, в нижнюю часть которого заливается масло для смазки деталей. Коренные шейки коленчатого вала расположены в подшипниках, а сальник предотвращает утечки сжимаемого газа из корпуса компрессора. Маховик соединен прессованием с шейкой вала. Для вращения маховика от электродвигателя используют ременную передачу.

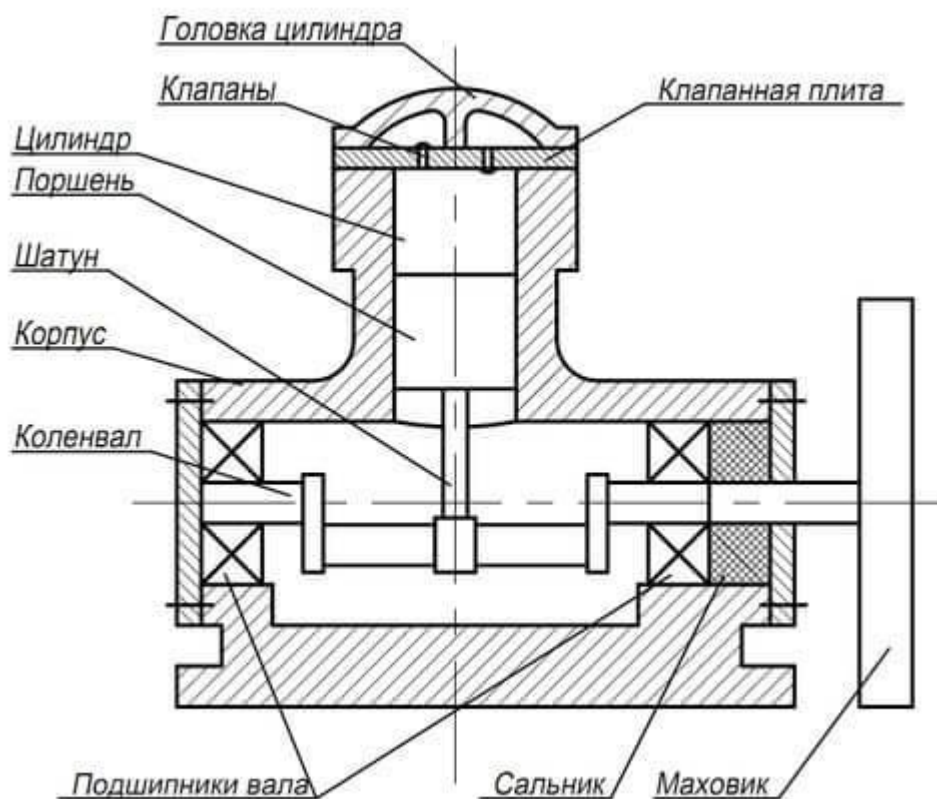


Рис. 1 Поршневой компрессор в разрезе

Для уплотнения поршня используют поршневые кольца. На головке цилиндра расположены всасывающий и нагнетательный клапаны в специальных камерах.

Компрессоры могут иметь водяное или воздушное охлаждение. Данный компрессор оснащен водяным охлаждением. Для контроля за процессом охлаждения на сливе воды установлен температурный датчик. По этой температуре осуществляется регулирование количества воды, подаваемой на компрессор. Следует следить не только за количеством, но и за качеством воды, а именно за чистотой и жесткостью воды (например, за содержанием крупных примесей и растворенных в ней солей). В данной компрессорной установке применяют проточную систему водоснабжения. При эксплуатации

компрессоров требуется постоянный контроль температуры охлаждающей воды. Во избежание усиленного выделения солей временной жесткости и оседания их на поверхностях теплообмена в виде накипи не следует допускать повышения температуры охлаждающей воды выше 35–40 °С. Считается нормальным, если разность между конечной температурой воздуха и начальной температурой воды не превышает 10 °С. Оценить работу холодильника можно, определив коэффициент его эффективности:

$$K = \frac{t_{\epsilon 1} - t_{\epsilon 2}}{t_{\epsilon 1} - t_{w1}}, \quad (1)$$

где $t_{\epsilon 1}$ и $t_{\epsilon 2}$ – температуры сжатого воздуха соответственно на входе и на выходе из холодильника, °С; t_{w1} – температура охлаждающей воды, поступающий в холодильник, °С.

Для удовлетворительно работающего холодильника $K = 0,85–0,9$. Если $K < 0,85$, это указывает на загрязненность холодильника или на недостаточную подачу воды.

При работе установки в режиме получения жидкого азота включается детандер – это машина, которая предназначена для охлаждения газа путём его расширения с отдачей внешней работы. Детандер относится к классу расширительных машин, в данной установке он является источником холодопроизводительности установки. Одним из эффективных способов охлаждения газа является его расширение в детандере.

Существует два вида детандерных агрегатов: поршневые детандеры (рис. 2) и турбодетандеры. Установка АЖК-0,02 оснащена поршневым детандером. В таком детандере потенциальная энергия сжатого газа преобразуется во внешнюю работу при расширении отдельных порций газа, перемещающих поршень. Торможение поршневого детандера в установке АЖК-0,02 осуществляется электрогенератором, который в момент пуска выполняет роль электродвигателя, а затем генератора.

В состав поршневого детандера входят следующие элементы: Картер, внутри которого размещен механизм движения, а также цилиндр и поршень, кроме того органы газораспределения, которые управляют рабочим процессом. Цикл поршневого детандера состоит из последовательных действий: наполнение цилиндра, расширение газа с совершением работы, выталкиванию и сжатию оставшегося газа. Эти процессы повторяются при каждом обороте вала.

На рисунке 2 показаны отдельные процессы цикла поршневого детандера. Когда поршень приближается к мертвой точке, происходит

открытие впускного клапана в точке 6, при этом газ высокого давления $p_{вх}$ заполняет мертвое пространство, и давления в цилиндре и трубопроводе выравниваются (процесс 6-1). Клапан впуска остается открытым на части хода поршня, и происходит наполнение цилиндра (процесс 1-2). В точке 2 закрывается впускной клапан и вследствие увеличения объема газа, заключенного в цилиндре, при движении поршня уменьшаются плотность, давление и температура газа. В точке 3 происходит открытие выпускного клапана, давления в цилиндре и выпускном трубопроводе выравниваются. Процесс 3-4 называется процессом выхлопа. Выпускной клапан остается открытым на части обратного хода поршня, и происходит выталкивание (процесс 4-5). В точке 5 закрывается выпускной клапан, и оставшийся в цилиндре газ сжимается до давления в точке 6.

Цикл поршневого детандера состоит из последовательности термодинамических процессов, протекающих с постоянной или переменной массой.

Управляют циклом поршневого детандера органы газораспределения, которые включают клапаны принудительного действия и механизм управления клапанами. Клапаны принудительного действия открываются при определенном положении поршня. Самодействующие клапаны, открываемые и закрываемые вследствие перепада давления газа, не используются в детандерах.

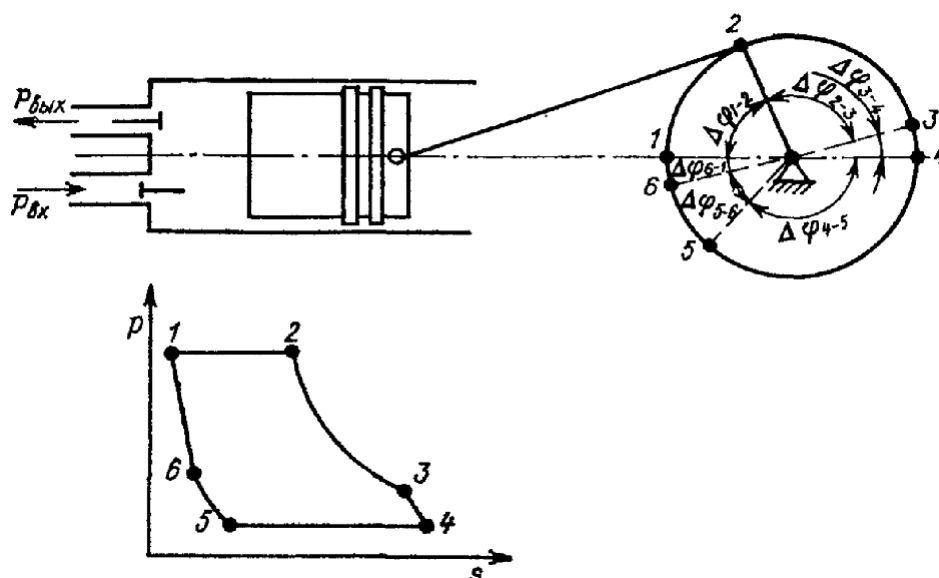


Рис. 2 Схема поршневого детандера и p - s диаграмма его работы

В криогенной технике используются два типа жидкостных насосов: поршневые и центробежные. [5]. Наиболее широкое распространение имеют поршневые насосы, так как использование центробежных насосов ограничивается производительностью и

давлением нагнетания, они используются для перекачки больших количеств жидкости и развивают давление не более 2 МПа [6]. И установка АЖК-0,02 не стала исключением, в ней тоже используется поршневой жидкостной насос.

Поршневые насосы предназначены для перекачки сравнительно небольших количеств жидкости (до 500 л/ч) и могут развивать конечное давление до 40 МПа (в отдельных случаях, по данным [6], до 100 МПа).

Насосы могут отличаться как по конструкции, так и по назначению. Основное конструктивное различие – это использование щелевого или сальникового уплотнения. Уплотнение плунжера насоса при его движении в цилиндре является сложной задачей, потому как сжимаемая или перекачиваемая жидкость имеет очень низкую температуру и малую вязкость, поэтому использование смазочных масел и поршневых колец невозможно.

В установке АЖК-0,02 насос используется для перекачки жидкого кислорода, поэтому используется сальниковое уплотнение. Для такого уплотнения используют материалы типа чешуйчатого графита. Особенностью данного материала является то, что на его поверхности при контакте с кислородом образуется окисная пленка, именно эта пленка и выполняет роль смазки. Но стоит обратить внимание, что такое уплотнение применимо только для кислородных насосов.

Другой вариант уплотнения – это щелевое уплотнение плунжера, в таком случае между плунжером и цилиндром имеется длинная кольцевая щель. При таком уплотнении роль смазки выполняет перекачиваемая жидкость.

Насосы могут иметь и разное назначение. Жидкостные насосы могут работать на насыщенной жидкости (тогда они используются в составе газификационной установки [5]) либо на ненасыщенной жидкости (такой вариант использования имеет место в ВРУ).

Ненасыщенном состоянии жидкости достигается за счет понижения температуры жидкости ниже температуры насыщения. Для этого в установке АЖК-0,02 используют холодный газообразный азот низкого давления. Необходимость в охлаждении жидкости связана с тем, что при работе насоса (в момент отхода плунжера от крайнего мертвого положения) давление в цилиндре насоса понижается, что приводит к вскипанию насыщенной жидкости. Образующиеся пары препятствуют равномерной подаче жидкости после сжатия, вызывают перебои в работе.

Конструктивные особенности насосов различных типов достаточно подробно описаны в [7].

Следующий блок, который необходимо рассмотреть – это блок очистки и осушки воздуха. Очищают воздух в основном от двуокиси углерода и различных углеводородов. Осушка воздуха выполняется в несколько этапов. Первым является сжатие воздуха в компрессоре, так как содержание влаги в воздухе заметно уменьшается по мере повышения давления и снижения температуры. Так, например, при атмосферном давлении и температуре 20 °С 1 кг воздуха содержит примерно 15 г воды. После сжатия в компрессоре до 10 МПа и охлаждении вновь до 20 °С воды остается уже 0,2 г, а в случае охлаждения до 5 °С воды в 1 кг воздуха будет всего около 0,07 г. та влага удаляется с помощью влагомаслоотделителей, установленных после каждой ступени компрессора. Среднее объемное содержание диоксида углерода CO_2 в атмосферном воздухе составляет 0,03 %, т. е. примерно 0,45 г на 1 кг воздуха и практически не зависит от температуры и давления воздуха [4].

Осушка и очистка воздуха необходима в первую очередь для осуществления непрерывной работы установки (без остановок на отогрев и продувку). Дело в том, что температура замерзания воды 0°С, CO_2 – около минус 80°С, а значит, кристаллы H_2O и CO_2 будут вымораживаться при охлаждении воздуха и забивать трубки теплообменных аппаратов и других блоках разделения воздуха. Наиболее распространен адсорбционный способ осушки и очистки воздуха от CO_2 , в качестве адсорбента рекомендуется синтетический цеолит марки NaX.

В таблице 1 показана зависимость величины динамической ёмкости цеолита NaX по парам воды при разных давления [8]:

Таблица 1

| Давление Р, МПа | % от массы адсорбента |
|-----------------|-----------------------|
| 20 | 2,5 |
| 7 | 3,0 |
| 2,5 | 5,5 |

Согласно таблице 2 величина динамической ёмкости цеолита NaX по CO_2 находится в пределах от 2,5 до 3,5 % к собственной массе. При это ацетилен и другие углеводороды адсорбируются почти полностью и практически не оказывают влияния на осушку и очистку воздуха от CO_2 . В таблице 2 показаны основные показатели степени осушки и очистки воздуха в промышленных цеолитовых блоках:

Таблица 2

| Показатель | Значение |
|---|--|
| Точка росы при рабочем давлении | до -75°C |
| Остаточное содержание: CO_2 | до $1,5 \text{ см}^3/\text{м}^3$ |
| C_2H_4 | до $5 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3/\text{м}^3$ |

Следует обратить внимание, что такие параметры могут достигаться при объёмной скорости воздуха не более $0,05 \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ (скорость отнесена к рабочим условиям адсорбции и всему живому сечению адсорбера, без учета объёма, занятого цеолитом. Для обеспечения непрерывности процесса адсорбции в установке АЖК-0,02 установлено два адсорбера, которые работают попеременно. Дело в том, что адсорбент необходимо регенерировать, так как насыщение цеолита парами воды, углекислого газа и C_2H_4 может происходить только до определенного предела, а затем необходимо восстановить адсорбционную ёмкость адсорбента.

Если поглотительная способность адсорбента не восстанавливается регенерацией, то необходимо заменить адсорбент на новый.

Для определения времени защитного действия адсорбера в часах используют следующую формулу:

$$\tau = \frac{M_a \cdot a_d}{V \cdot (c_n - c_k)}, \quad (2)$$

где M_a – масса цеолита в адсорбере, кг;

$a_d = 0,015$ да $\text{нм}^3/\text{кг}$ – динамическая адсорбционная способность цеолита NaX по CO_2 ;

V – объёмный расход очищаемого воздуха $\text{нм}^3/\text{ч}$;

$c_n = 0,0003$ – объёмная доля CO_2 в воздухе до адсорбера;

$c_k = 3 \cdot 10^{-6}$ – объёмная доля CO_2 в воздухе после адсорбера.

Для определения продолжительности процесса регенерации адсорбера в часах используется следующая формула:

$$\tau_p = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5}{\rho \cdot V_1 \cdot c_p (T_2 - T_3)}, \quad (3)$$

где сумма Q_1 , Q_2 и Q_3 – количество теплоты, идущей на нагревание металлического баллона адсорбера, адсорбента и изоляции соответственно;

Q_4 – теплота десорбции;

Q_5 – потери теплоты в окружающую среду;

ρ , c_p – плотность и удельная теплоёмкость регенерирующего газа;

T_2 – температура греющего газа на входе в адсорбер;

T_3 – средняя температура газа на выходе из адсорбера;

V_I – расход греющего газа, м³/ч.

При проектировании блока адсорберов надо учитывать, что время защитного действия адсорбента всегда должно превышать время, которое необходимо для проведения регенерации и охлаждения сорбента в параллельной ветке блока очистки.

Эффективность работы блока разделения зависит не только от совершенства аппаратов, но и от условий их эксплуатации. Грамотная эксплуатация оборудования подразумевает наибольший выход продукции необходимого качества при минимальных затратах энергии и вспомогательных материалов. Самым ответственным периодом эксплуатации воздухоразделительных установок (ВРУ) является их пуск и отладка рабочего режима. Это объясняется тем, что в течение пускового периода в установке происходит непрерывное изменение давлений, температур и перераспределение потоков газа и жидкости в колоннах разделения. В конце пускового периода необходимо постепенно перевести аппараты и машины в рабочий режим [4].

Весь пусковой период установки разделяется на три этапа:

- 1 – охлаждение аппаратов и изоляции до появления жидкости;
- 2 – накопление жидкости в разделительном аппарате;
- 3 – переход от пускового режима к рабочему.

На первом этапе пускового периода холодопроизводительность криогенного цикла расходуется на охлаждение до рабочих температур внутриблочных аппаратов, коммуникаций и изоляции, а также на компенсацию нарастающих по мере охлаждения потерь холода, обусловленных теплопритоком через изоляцию, потерь от недорекуперации выводимых из блока разделения потоков и потерь в блоке осушки и очистки воздуха. После того, как охлаждение аппаратов закончится, начинается накопление определенного для конкретной установки запаса жидкости. При этом продолжается охлаждение изоляции.

Этот период пуска установки является наиболее длительным и требует максимальной холодопроизводительности криогенного цикла. Поскольку в течение первого и второго этапов пускового периода продукт в установке не вырабатывается, а расход энергии максимальный, то необходимо, по возможности, сокращать продолжительность этих этапов. Для выполнения этого требования каждая установка, вырабатывающая продукты разделения воздуха в газообразном состоянии, должна иметь пусковой резерв холодопроизводительности.

Пусковой резерв

холодопроизводительности создается повышением давления сжатого воздуха и увеличением доли воздуха, расширяемого в детандере. После выполнения двух первых этапов пускового периода наступает переходный период, во время которого осуществляется перевод установки в рабочий режим. Чтобы избежать дальнейшего накопления жидкости в аппаратах, снижают холодопроизводительность криогенного цикла путем уменьшения доли воздуха, подаваемого на детандер, и снижения давления воздуха после компрессора. Вместе с тем необходимо иметь в виду, что на третьем этапе пускового периода может появиться дополнительная статья расхода энергии, связанная с работой жидкостного насоса, если некоторые продукты разделения воздуха предполагается выводить из установки под давлением. Таким образом, задачей переходного периода является постепенное уменьшение холодопроизводительности установки до величины, обеспечивающей стабильность рабочих параметров процессов теплообмена и ректификации, правильное распределение жидкости между колоннами низкого и высокого давления, регулирование состава жидкости в аппаратах.

1.3 Описание схемы

Монтажно-технологическая схемы воздухоразделительной установки АЖК-0,02 показана на рисунке 4.

Воздух после сжатия в компрессоре К до давления 10-20 МПа поступает в теплообменник-ожижитель ТО, где охлаждается отбросным азотом до температуры примерно 278 К. При этом содержащиеся в воздухе пары влаги конденсируются и собираются во влагоотделителе ОВ, из которого периодически удаляются.

Затем воздух очищается от CO_2 и остатков влаги в адсорбере блока очистки БО.

При получении газообразного кислорода весь поток воздуха охлаждается в теплообменном аппарате ОТ, обратным потоком азота, а при получении жидкого азота воздух делится на два потока: 44% воздуха охлаждается в теплообменном аппарате ОТ, а 56% – расширяется в детандере Д.

Из теплообменного аппарата воздух поступает в змеевик куба ректификационной колонны №1 РК-1 и затем дросселируется до давления 0,6 МПа. Жидкость куба, обогащенная кислородом, дросселируется до давления 0,06 МПа в вентилях Др-2 и Др-3 и поступает в межтрубное пространство конденсатора колонны РК-1 и на 18 тарелку колонны РК-2. Пары азота, конденсирующиеся в трубках

конденсатора колонны РК-1 за счет подпаривания кубовой жидкости, стекают с трубок, попадают в колонну, образуя флегму, а газообразный азот отводится в трубное пространство конденсатора колонны РК-2, где конденсируется за счет отвода теплоты к кипящему жидкому кислороду, находящемуся в межтрубном пространстве.

Пары обогащенного воздуха из межтрубного пространства конденсатора колонны РК-1 направляется на 16 тарелку колонны РК-2, в которой происходит окончательное разделение воздуха. Жидкий кислород отводится из приемного кармана нижней тарелки колонны РК-2, проходит через переохладитель кислорода ПК, а затем направляется в насос жидкого кислорода Н. В переохладителе он охлаждается за счет отбросного газа из колонны РК-2. Насос Н подает кислород в трубки теплообменника ОТ, где он испаряется, нагревается, и под давлением 16,5 МПа поступает на рампу НР с баллонами.

При получении жидкого азота воздух после детандера дополнительно охлаждается в детандерном теплообменнике ДТ отбросным азотом и затем направляется в куб колонны РК-1. Жидкий азот отбирается из трубного пространства конденсатора колонны РК-2 и дросселируется через вентиль 3-6 в сборник жидкого азота СА, откуда под давлением 0,06 МПа периодически сливается в сосуды Дьюара.

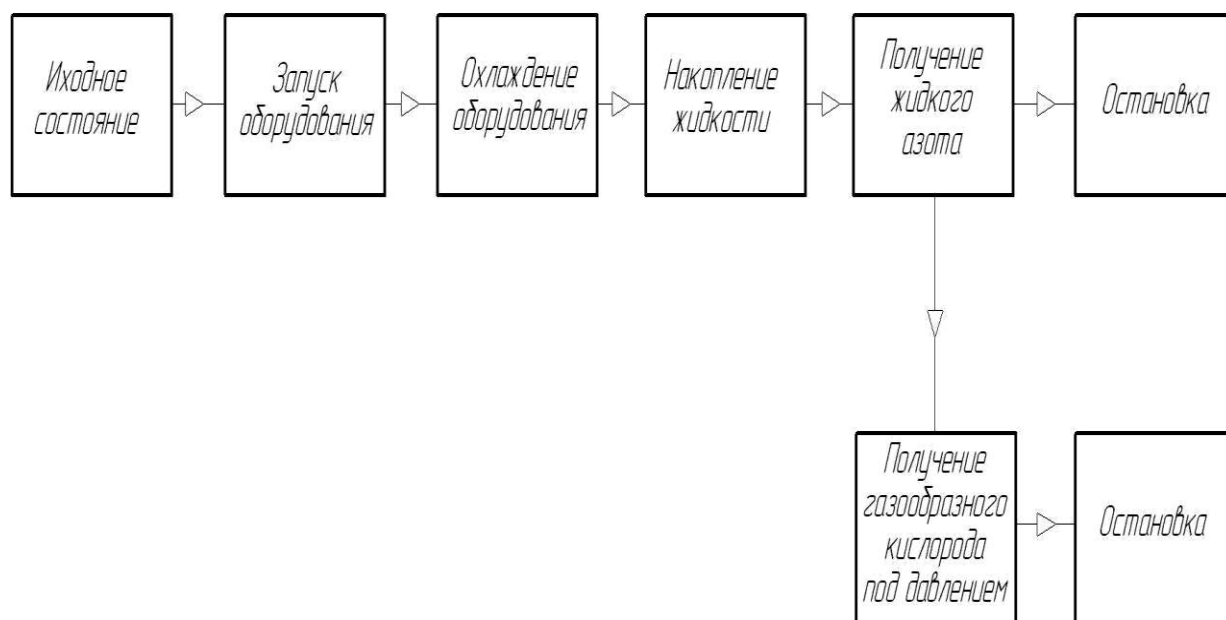


Рис. 3 Блок-схема имитационной модели

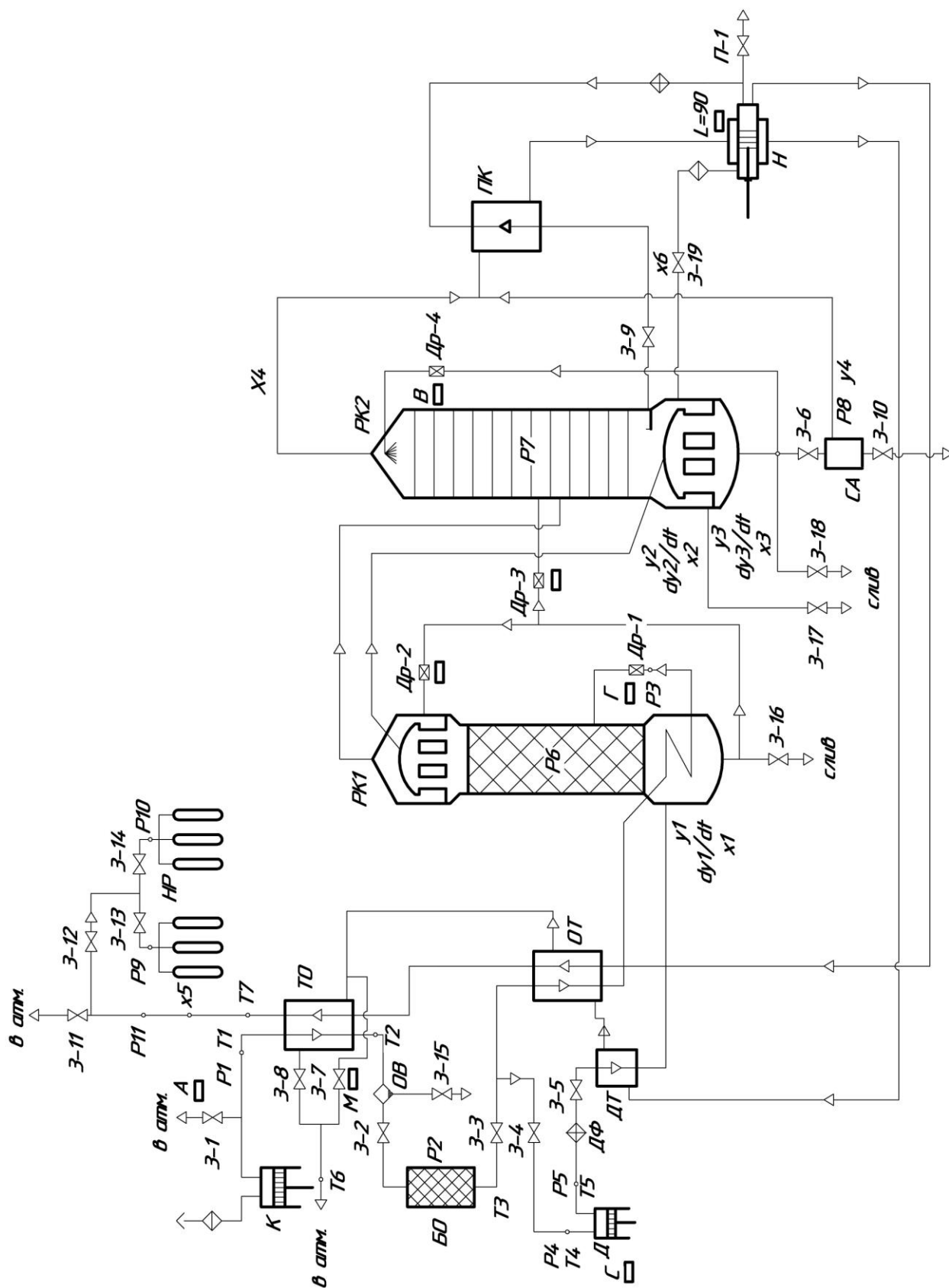


Рис.4 Монтажно-технологическая схемы ВРУ АжК-0,02

2. ОПИСАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ УЧЕБНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ВОЗДУХОРАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ АЖК-0,02

В описании приведены основные сведения по проведению имитационного моделирования функционирования воздухоразделительной установки АжК-0,02, которая может работать в режимах производства жидкого азота и газообразного кислорода. Основное назначение модели – закрепление знаний учащихся о физике процессов разделения воздуха и приобретение ими знаний и навыков управления реальной промышленной установкой.

Модель позволяет имитировать следующие протекающие в реальной установке процессы:

- пуск и захлаживание установки;
- производство жидкого азота;
- остановка установки в режиме получения азота;
- процесс перехода на производство газообразного кислорода;
- получение газообразного кислорода;
- остановка из режима получения кислорода.

В состав программного обеспечения модели входят следующие файлы:

1. Исполняемый файл среды моделирования EnviCon – **VRU_AgK.exe**.
2. Директорий с файлами спецификации модели в исходном состоянии – **ВРУ ИС**
3. Директорий с файлами спецификации модели в режиме производства азота – **ВРУ Азот**.
4. Файл, содержащий фото установки ВРУ АжК-0,02, – **ВРУ.BMP**.

Для работы модели эти файлы должны находиться в одном директории. При установке модели файлы находятся в директории **ИМ-1 ВРУ АжК-0,02**.

Запуск модели на исполнение

Запуск производится двойным щелчком мыши на имени исполняемого файла **VRU_AgK.exe** в окне программы "Проводник" или "Мой компьютер". Появляется экранная форма среды моделирования, содержащая головное меню. Выбор щелчком мыши пункта меню "**Модель**" приводит к появлению выпадающего меню с

одним активным пунктом **"Выбор модели"**. Щелчок на этом пункте меню вызывает появление окна с частью структуры файловой системы компьютера, содержащей директории спецификации моделей (**ВРУ ИС** и **ВРУ Азот**). Выбор модели производится двойным щелчком мыши на одном из этих имен директорий. После выбора модели необходимо нажать кнопку с идентификатором **"Загр."**, что запускает процесс загрузки информации о модели из файлов в оперативную память компьютера. После загрузки модели на форме появляется имя загруженной модели. Далее нужно выбрать в головном меню пункт **"Моделирование"**, что вызывает появление формы с кнопкой **"Пуск"**. Вид формы среды моделирования в одном из промежуточных состояний представлен на рисунке 5. Щелчок мыши на кнопке **"Пуск"** приводит к появлению на экране мнемосхемы установки в состоянии, соответствующем выбранной модели. Запуск процесса моделирования производится щелчком мыши на ярлыке **"Process"**. Процесс моделирования может останавливаться и возобновляться щелчком на ярлыке **"Stop"** или нажатием клавиши пробел. При остановке процесса моделирования цвет ярлыка **"Stop"** становится красным.

Моделирование производится в реальном ускоренном масштабе времени. Предусмотрены масштабные коэффициенты 10 и 20. По умолчанию установлен масштабный коэффициент, равный 10. Переключение коэффициентов производится щелчком мыши на ярлыке **"Реальное время"** в левом верхнем углу формы.

Описание схемы модели установки

Схема модели установки содержит графические представления всех основных элементов, составляющих установку. К ним относятся компрессор, детандер, насос, две ректификационные колонны, теплообменники, фильтры, блок очистки, запирающие и регулирующие вентили, дроссели, ёмкости для сбора жидкого азота и газообразного кислорода. На схеме представлены соединения между элементами, а также показания датчиков давлений, температур, концентраций и уровней жидкостей. Вид экранной формы с реализованной в модели схемой установки в исходном состоянии приведен на рисунке 6. Форма, кроме схемы, содержит две панели, одна из которых, озаглавленная **"Предаварийные ситуации"**, предназначена для информирования пользователя о возникновении предаварийных ситуаций, а другая – для представления инструкций пользователю о необходимых действиях по управлению процессами. В левой нижней части формы имеются три кнопки, предназначенные для

переключения режимов работы. Кнопка "Пуск" инициирует начало процесса захлаживания и получения жидкого азота. Кнопка "Кислород" инициирует переход модели установки в режим производства газообразного кислорода, а кнопка "Останов" – в режим останова установки.

Управление процессом моделирования

При запуске модели установки в исходном состоянии (**ВРУ ИС**) на экранной форме в активном состоянии находится только кнопка "Пуск", а кнопки "Кислород" и "Останов" находятся в пассивном состоянии. Нажатие кнопки "Пуск" инициирует запуск процесса захлаживания, который в дальнейшем переходит в процесс производства жидкого азота. Нажатие этой кнопки приводит к появлению первой инструкции пользователю. Инструкции представляют собой сообщения оператору о возникшей в данной ситуации необходимости произвести определенные действия по управлению процессами.

Управление процессами производится путем изменения состояния элементов установки. Такие элементы установки как компрессор, детандер, насос и запирающие вентили имеют два возможных дискретных состояния: включен/выключен и открыт/закрыт, соответственно. Изменение состояния таких устройств производится щелчком левой кнопки мыши на графическом изображении устройства. При включении машины начинается имитация движения ее поршня. Вентили в закрытом состоянии имеют красный цвет. При открытии вентиля его цвет становится зеленым.

Состояние регулирующего вентиля или дросселя определяется степенью его открытия, которая представляется числом процентов от полного открытия. Состояния таких элементов может изменяться только непрерывно с заданной скоростью. Около каждого из таких устройств на схеме имеются две кнопочки, маркированные символами "о" и "з". Нажатие (не щелчок) левой кнопки мыши на одну из этих кнопочек вызывает, соответственно, процесс увеличения или уменьшения степени открытия данного устройства.

При окончании режима захлаживания установки модель переходит в режим производства жидкого азота. При этом становятся активными кнопки "Кислород" и "Останов". Это значит, что из режима производства жидкого азота можно перейти или в режим производства газообразного кислорода, или в режим останова установки. Переход производится при помощи щелчка левой кнопки мыши на

соответствующей кнопке. При переходе в режим производства кислорода в активном состоянии остается только кнопка "*Останов*". Щелчок на этой кнопке инициирует в данном случае процесс остановки установки из режима производства кислорода.

На схеме модели установки имеются идентификаторы измеряемых параметров процессов: давлений (Р), температур (Т), концентраций (Х) и уровней (У). Рядом с идентификаторами параметров выводятся их текущие значения, имитирующие изменения реальных физических параметров процессов, протекающих в установке.

В случае нарушения параметром ограничения, указанного в окне "*Предаварийные ситуации*", фон идентификатора этого ограничения становится желтым. Это является предупреждением пользователю о необходимости срочного уменьшения данного параметра. В модели установлены ограничения параметров, соответствующие возникновению аварийных ситуаций. В случае выхода параметров за эти ограничения в окне появляется идентификатор аварийного ограничения на красном фоне и появляется ярлык с надписью АВАРИЯ. При этом процесс моделирования прекращается. Возможна только перезагрузка модели. Значения аварийных ограничений приведены в таблице 3.

Таблица 3

| | | | |
|-------------|------------|-------------|-------------|
| $P1 > 22$ | $P9 > 18$ | $Y3 > 20$ | $X3 < 79,1$ |
| $P5 > 0,8$ | $P10 > 18$ | $X1 < 40$ | $X4 < 70$ |
| $P6 > 0,8$ | $Y1 > 22$ | $X1 > 79,4$ | $X5 > 79,4$ |
| $P7 > 0,08$ | $Y2 > 30$ | $X2 > 79,4$ | $X6 > 79,4$ |

При визуализации возникновения и перемещения веществ по установке используется идентификация этих веществ с помощью цвета. При этом воздух представляется красным цветом, кубовая жидкость и её пары – различными оттенками зелёного цвета, жидкий и газообразный азот – оттенками желтого цвета, а кислород – голубого.

При запуске модели **ВРУ Азот** на экране появляется схема, на которой распределение веществ и значения параметров соответствуют режиму производства жидкого азота (рис. 7). Модель позволяет имитировать режимы останова установки и процесс перевода установки на режим производства газообразного кислорода. Эту модель можно запустить, если режим захолаживания прошел корректно, но возникла авария уже при получении жидкого азота.



Рис.5 Исходная форма среды моделирования

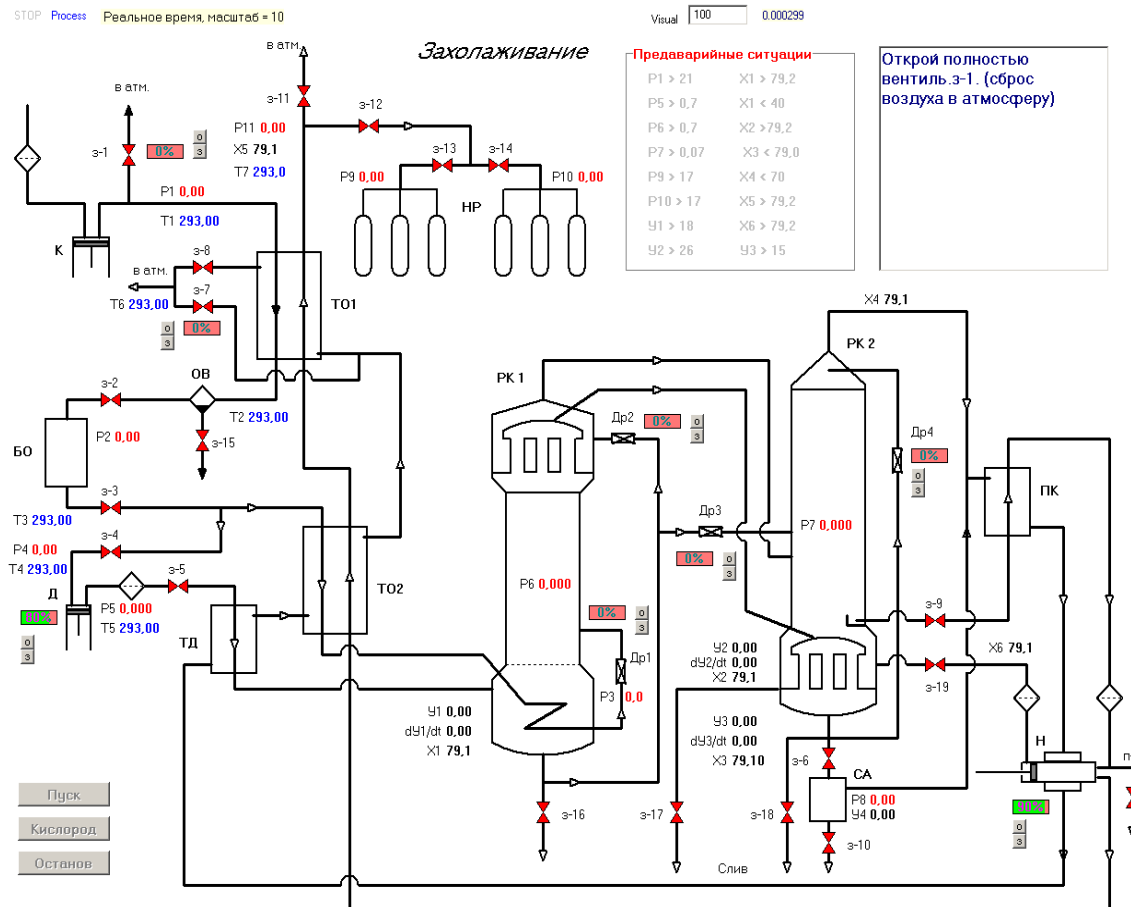


Рис. 6 Экранная форма модели ВРУ в начале режима захолаживания

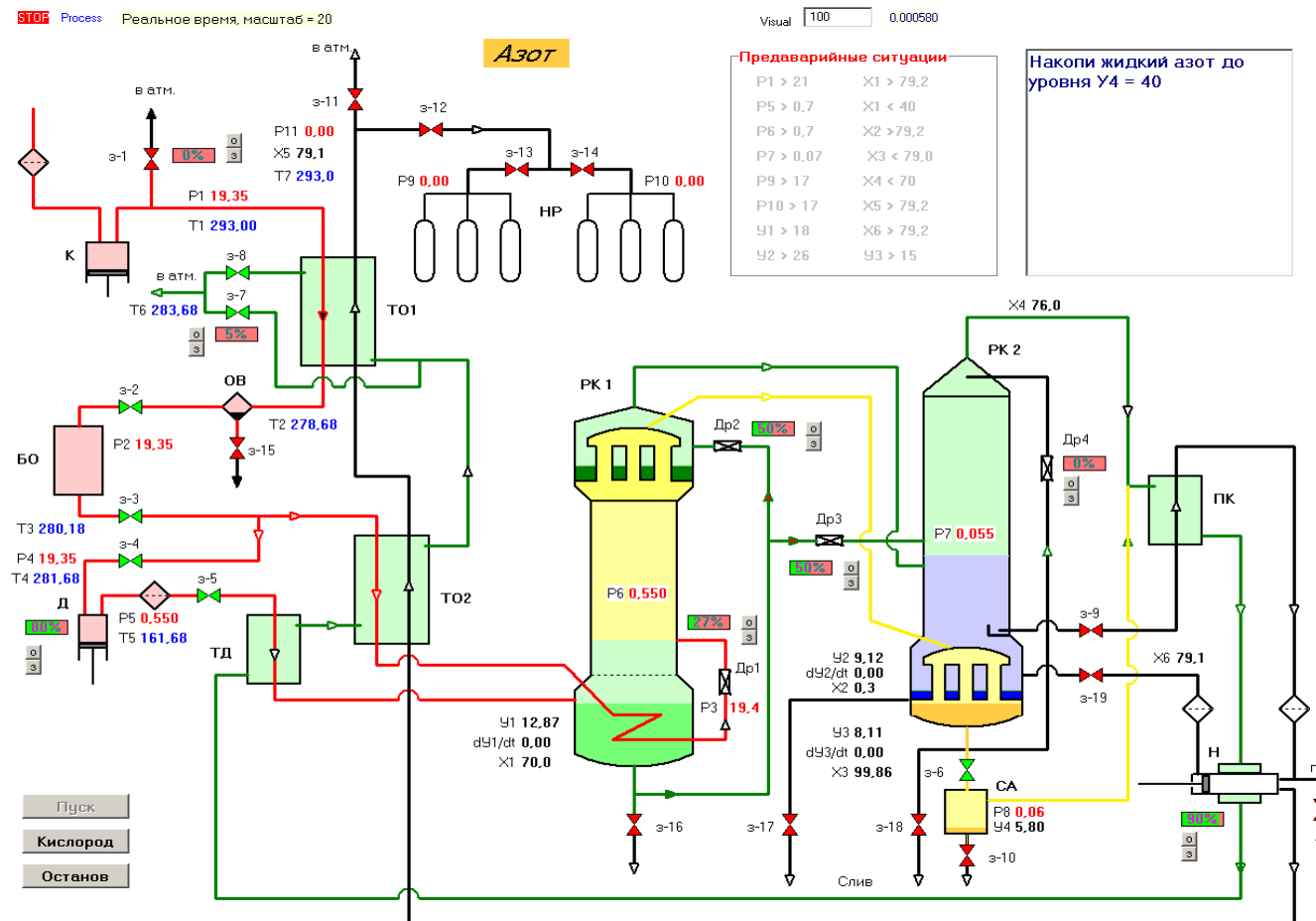


Рис. 7 Вид экранной формы модели ВРУ в режиме получения жидкого азота

3. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

Лабораторная работа №1

Имитация работы установки в режиме получения жидкого азота

Задачи работы

В процессе выполнения работы студент должен ознакомиться:

- с составом оборудования ВРУ;
- с логикой и последовательностью процессов пуска, захлаживания, накопления жидкости, регулирования ректификации воздуха и остановки, в том числе с органами регулирования установки;
- с наиболее типичным набором аварийных ситуаций и с их последствиями.

Студент должен уметь объяснить:

- причины изменения параметров установки в процессе захлаживания и влияние на их изменение регулирующих органов: байпасного вентиля (3-7), отсечки впуска детандера (С), дроссельных вентилях.

Студент должен научиться самостоятельно пускать установку в ручном режиме управления без создания аварийных ситуаций.

Подготовка к пуску

Исходное состояние

1. Все вентили запорные и дроссельные закрыты;
2. Исходное давление во всех точках $P=0,01$ МПа;
3. Температура во всех точках $T=293$ К;
4. Уровни жидкости $y=0,0$ см;
5. Концентрации $x=70,1\%$ N_2 (езде).

Пуск установки

Все время пуска разбито на несколько временных периодов, в которых могут быть разные функциональные связи отдельных параметров. Продолжительность пуска составляет около 360 минут. В модели реализуется масштаб времени 1:10 и 1:20.

Независимо от того, в каком режиме будет работать установка в будущем, пуск ее осуществляется при возможно максимальной холодопроизводительности цикла, т.е. давление после компрессора $P_1=18-20$ МПа, а отсечка наполнения детандера $C=100\%$.

Последовательность операций пуска:

1. Открыть полностью вентиль 3-1 сброса воздуха в атмосферу;
2. Запустить компрессор К (щелчок мыши по нему);
3. Открыть вентиль 3-2 перед блоком очистки;
4. Открывая вентиль 3-1, довести давление в блоке P2=18 МПа (открытие примерно на 50-52%);
5. Открыть вентиль 3-3 выход воздуха из блока очистки;
6. Подготовить к приему воздуха блок разделения, для чего открыть следующие вентили:
 - 3-5 – после детандерного фильтра ДФ;
 - 3-6 – слив жидкого азота в сборник СА;
 - 3-8 – выход обратного потока из теплообменника ТО;
 - 3-7 – открыть на 10% (M=10);
 - Др-4 – дроссель азотный открыть на 50% (B=50);
7. Установить отсечку наполнения детандера C=100%;
8. Пустить двигатель детандера.

После пуска начинается долгий период захлаживания установки, в результате которого снизятся температуры, измеряемые в реперных точках установки, давление после компрессора установится на значении 19 МПа (при закрытом вентиле 3-1), начнется наполнение воздушных ректификационных колонн и отсечка детандера снизится.

Последовательность операций в период захлаживания:

1. Открыть вентиль 3-4 подачи воздуха на детандер;
2. Прикрывая вентиль сброса воздуха в атмосферу 3-1, поддерживать давление после компрессора P1≈19 МПа;
3. Начать открытие дросселя ДР1, доведя степень открытия до 20% (Г=20) и при этом периодически прикрывать вентиль 3-1 вплоть до полного закрытия, поддерживая давление за компрессором около 19 МПа;
4. Когда температура воздуха после ТО снизится до значения T=278 К, прикрыть вентиль 3-7 до 5% (M=50), а отсечку детандера снизить до 80% (C=80);
5. Приоткрыть воздушный дроссель ДР-1 (Г≈27) чтобы поднять давления в колоннах до рабочих (P6≈0,6 МПа, P7≈0,057 МПа).

На этом период захлаживания заканчивается и необходимо начинать накапливать первую жидкость в аппаратах, на этом этапе установка выходит на получения жидкого азота, который уже можно отгружать потребителю.

Последовательность операций при накоплении жидкости и выходе на режим получения жидкого азота

1. Накопить в кубе колонны РК-1 жидкость до $y_1=5$ см;
2. Открыть вентиль 3-16 и слить первую порцию жидкость до значения $y_1=1$ см;
3. Закрыть вентиль 3-16 и снова накопить жидкость в кубе до $y_1=12$ см;
4. Открыть дроссель Др-2 на 50%;
5. Открыть дроссель Др-3 на 50%;
6. Накопить жидкость в межтрубном пространстве конденсатора-испарителя колонны РК-2 до $y=8$ см;
7. Закрыть дроссель Др-4 ($B=0\%$), при этом начинает расти уровень жидкого азота в трубном пространстве конденсатора-испарителя второй колонны У3;
8. Довести уровень жидкого азота до 8 см ($y_3=8$) и открыть вентиль 3-6 слива жидкого азота в сборник СА;
9. При накапливании в сборнике СА жидкого азота ($y_4 \approx 40$ см) его периодически сливать, открывая на некоторое время вентиль 3-10.

После выхода установки на режим получения жидкого азота она может быть либо остановлена, либо переведена на режим получения газообразного кислорода под давлением.

Остановка ВРУ из режима получения жидкого азота

1. Прекратить слив жидкого азота в сборник СА, закрыв вентиль 3-6;
2. Открыть вентиль 3-10 и слить весь жидкий азот из сборника. Вентиль 3-10 закрыть;
3. Полностью открыть вентиль 3-7 ($M=100\%$) сброса обратного потока в атмосферу;
4. Сбросить давление после компрессора, открыв вентиль 3-1 до $A=60\%$;
5. Перекрыть подачу воздуха в детандер, закрыв вентиль 3-4 и остановить двигатель детандера;
6. Закрыть вентиль 3-5 после детандерного фильтра;
7. Слить весь кислород из конденсатора колонны РК-2, открыв вентиль 3-17. Вентиль 3-17 закрыть;
8. Слить весь жидкий азот из конденсатора колонны РК-2, открыв вентиль 3-18. Вентиль 3-18 закрыть;
9. Открыть дроссель Др-4 до $B=50\%$;

10. Закрыть дроссели Др-3 и Др-2;
11. Слить жидкость из куба колонны РК-1, открыв вентиль 3-16. Вентиль 3-16 закрыть;
12. Закрыть дроссель Др-1 ($\Gamma=0\%$);
13. Открыть вентиль 3-1 до $A=100\%$;
14. Закрыть вентили на блоке очистки 3-2 и 3-3;
15. Остановить компрессор.

Для получения зачета по лабораторной работе необходимо ответить на контрольные вопросы по разделу:

1. Для чего в начальный момент времени устанавливается отсечка детандера на 100 %?
2. Какой процент потока воздуха идет на теплообменный аппарат, а какой на детандер в установившемся режиме работы установки?
3. Для чего сливаются первые порции жидкости из куба колонны и конденсатора?

Лабораторная работа №2

Имитация работы установки в режиме получения газообразного кислорода под давлением

Задачи работы

В процессе выполнения работы студент должен ознакомиться:

- с логикой и последовательностью процесса перехода на работу установки в режиме получения газообразного кислорода под давлением;
- с наиболее типичным набором аварийных ситуаций и с их последствиями.

Студент должен уметь объяснить:

- какие изменения происходят в схеме при работе установке в данном режиме.

Студент должен научиться самостоятельно переключать установку в ручном режиме управления без создания аварийных ситуаций, а затем выполнять остановку.

Последовательность операций при переходе с режима получения жидкого азота на режим получения газообразного кислорода под давлением

Исходное состояние установки пред переходом на режим получения газообразного кислорода под давлением показано в таблице 4.

Таблица 4

| | | |
|-----------|--------------------|-----------|
| A=0 % | P1=P2=P3=P4=20 МПа | x1=70 % |
| B=0 % | P5=0,55 МПа | x2=0,2 % |
| C=80 % | P6=0,54 МПа | x3=99,8 % |
| Г=27 % | P7=0,05 МПа | x4=76 % |
| Др-2=50 % | T4=279 К | x5=79,1 % |
| Др3=50 % | T5=159 К | x6=79,1 % |
| M=5 % | y1=12 | |
| | y2=8 | |
| | y3=8 | |

1. Закрыть вентиль 3-4 подачи воздуха на детандер;
2. Приоткрыть дроссель Др-1 до значения $\Gamma \approx 52\%$;
3. Остановить детандер;
4. Закрыть вентиль 3-5 после детандерного фильтра;
5. Закрыть вентиль 3-6 слива жидкого азота из конденсатора второй колонны;
6. Открыть дроссель Др-4 ($B \approx 40\%$);
7. Закрыть дроссель Др-2, а дроссель Др-3 открыть примерно на 90%;

8. При достижении уровня жидкого кислорода $y_2=20$ см открыть продувочный вентиль 3-9 отбора кислорода из кармана второй колонны;
9. Открыть вентиль 3-11 сброса кислорода в атмосферу;
10. Открыть вентиль 3-19 возврата утечки кислорода из насоса;
11. Закрыть продувку насоса П-1 и пустить насос;
12. Установить производительность насоса $L=90\%$;
13. Закрыть сброс кислорода в атмосферу 3-11 и открыть на рампу 3-12 и 3-13;
14. При достижении в наполняемой ветке ramпы давления 16,5 МПа, перейти на соседнюю и т.д.
15. Открыть вентиль 3-10 и слить остаток жидкого азота из сборника СА.

Примечание: концентрация получаемого кислорода $x_2=x_5=x_6$ зависит от производительности насоса L.

Остановка ВРУ при получении кислорода под давлением

1. Закрыть отбор кислорода В-9;
2. Остановить насос;
3. Закрыть вентили на ramпе 3-13 (3-14);
4. Открыть продувку насоса П-1;
5. Открыть сброс кислорода в атмосферу 3-11;
6. Закрыть вентили на ramпе 3-12 и на линии утечки 3-19;
7. Открыть вентиль 3-17 и слить весь кислород из конденсатора второй колонны;
8. Открыть вентиль 3-1 настолько, чтобы давление P1, P2 и P3 снизились до 8 МПа;
9. Открыть вентиль Др-4 до $B=60\%$;
10. Открыть вентиль 3-7 до $M=30\%$;
11. Закрыть дроссель Др-3;
12. Открыть вентиль 3-16 и слить жидкость из куба первой колонны;
13. Открыть вентиль 3-18 и слить жидкий азот из конденсатора второй колонны;
14. Закрыть дроссель Др-1;
15. Остановить компрессор К;
16. Закрыть вентили на блоке очистки 3-2 и 3-3;
17. Открыть полностью 3-1 ($A=100\%$).

Работа на этом считается выполненной.

Для получения зачета по лабораторной работе необходимо ответить на контрольные вопросы по разделу:

1. Почему при переходе в режим получения газообразного кислорода останавливается детандер?

2. Для чего в схему включается насос?

3. Какие изменения происходят в узле ректификации при работе установке в данном режиме?

Список литературы

1. Российская газета — Федеральный выпуск, №224, с.11
2. Криогенные системы.Т. 2. /А.М. Архаров, В.П. Беляков,Е.И. Микулин и др. —М.: Машиностроение. 1999.- 720 с.
3. Молодова Ю.И. Компрессоры объемного действия. Типы и механизмы движения - Санкт-Петербург: СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2014. - 41 с
4. Иванов В.И. Эксплуатация воздухоразделительных установок: Учеб. пособие. СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2012. 93 с.
5. Баранов А.Ю., Соколова Е.В. Хранение и транспортировка криогенных жидкостей. Часть 2: учебно-методическое пособие.— СПб: Университет ИТМО, 2018. – 60 с
6. Справочник по физико-техническим основам криогеники. Под ред.Малкова М.П. М.: Энергия, 1973
7. Разделение воздуха методом глубокого охлаждения. Том 2. Под ред. Елифанцевой В.И. и Аксельрода Л.С. М.: Машиностроение, 1973.
8. Головкин Г.А. Криогенное производство инертных газов. – Л.: Машиностроение, 1983. – 416 с.

Логвиненко Екатерина Владимировна

**Имитация работы установки разделения воздуха
АжК-0,02 на программной модели**

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, литер А