



АТОМЭНЕРГОПРОЕКТ
РОСАТОМ

Отраслевой центр компетенций
«ИНЖЕНЕРНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ»

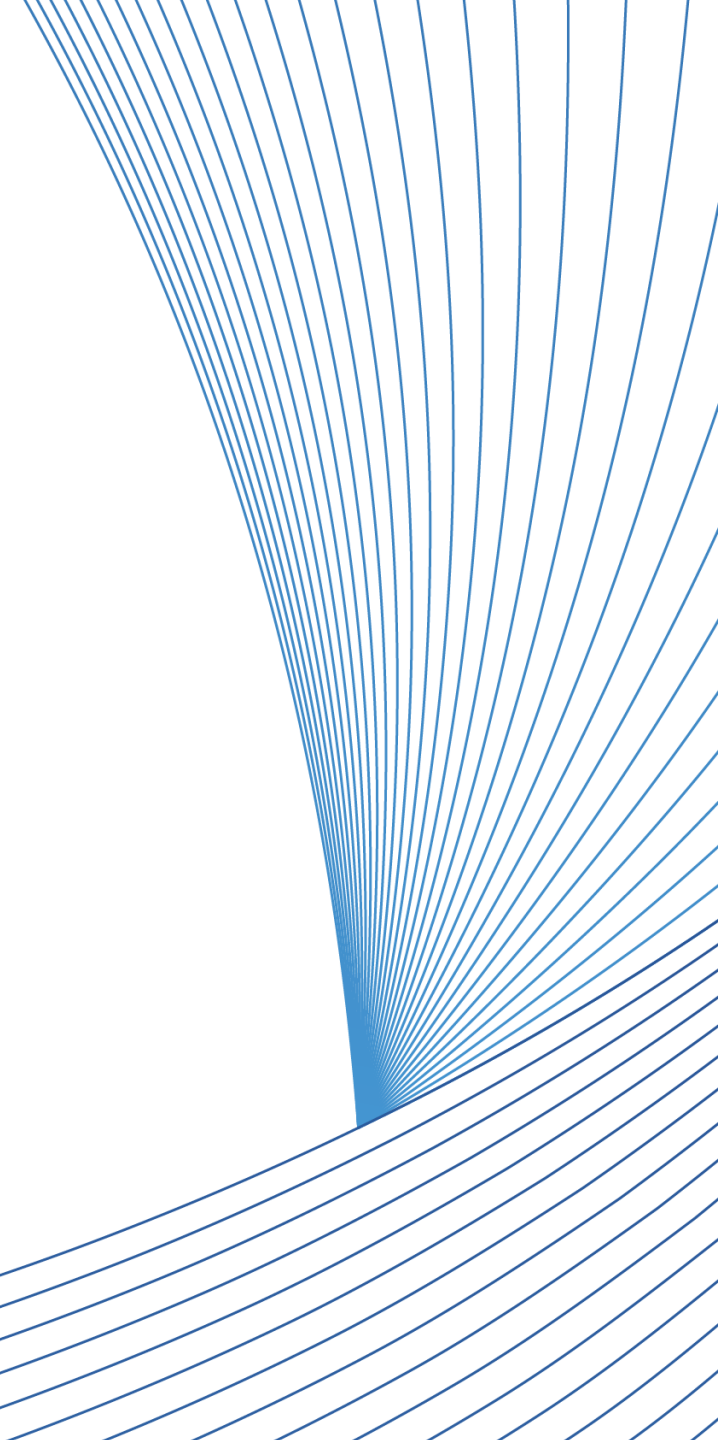
Типовые технологические решения по обвязке насосных агрегатов

Занятие 4

ШКОЛА ПРОЕКТИРОВЩИКОВ

Филиппов А.А.
Ведущий инженер-проектировщик
АО «Атомэнергопроект» — СПбАЭП

Составил: **Селезнев Н.А.**
Ведущий специалист
АО АСЭ Венгерский филиал

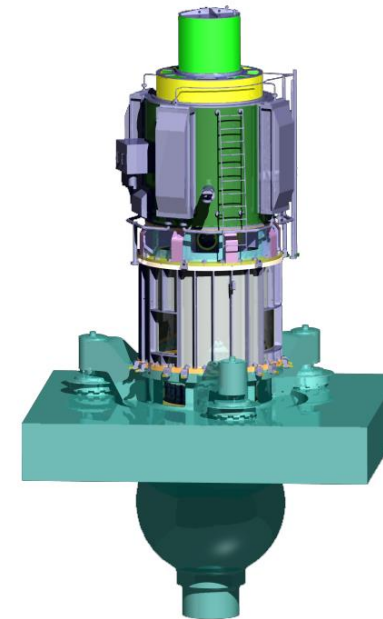


Введение

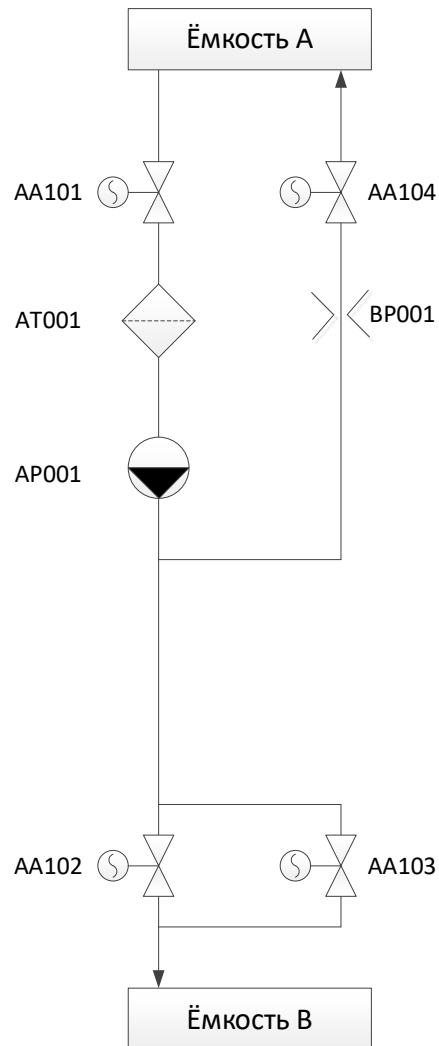


Насосные агрегаты используются в общем смысле для сообщения рабочей среде энергии, необходимой для перемещения этой жидкости из точки А в точку Б

Для установления граничных условий рассматриваемых схем, предположим, что жидкость перекачивается всегда из одного сосуда в другой, причем объем данных сосудов значительно больше объема системы между ними, а также допустим, что все рассматриваемые насосы – центробежные (ввиду их большинства на АЭС)



Базовая схема



В качестве базовой схемы рассмотрим элементарный случай перекачивания рабочей среды из емкости А в емкость В по условно прямому контуру

Условные обозначения и коды согласно ККС:

AA101, AA102, AA103, AA104 – электроприводная запорная арматура

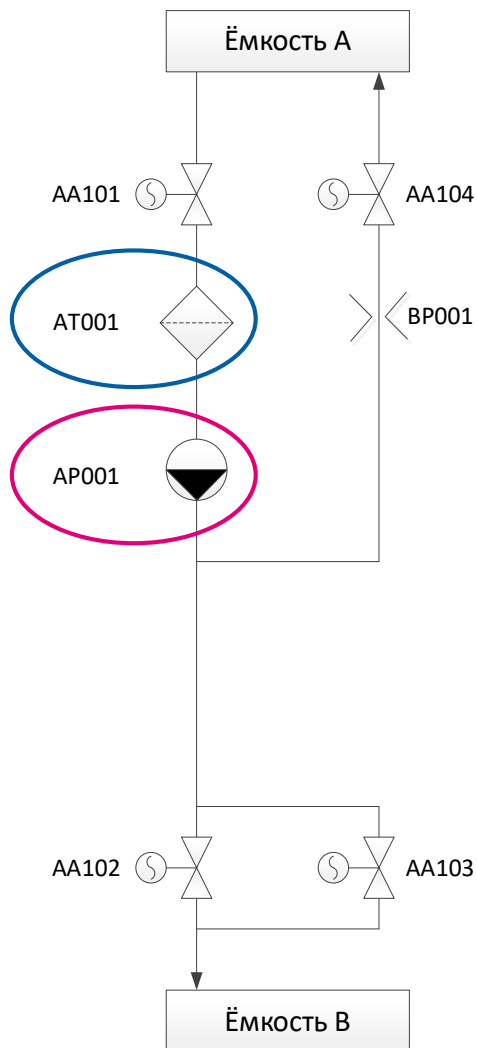
AT001 – фильтр

BP001 – дроссельная шайба

AP001 – насосный агрегат

Стрелками показано направление течения жидкости

Базовая схема

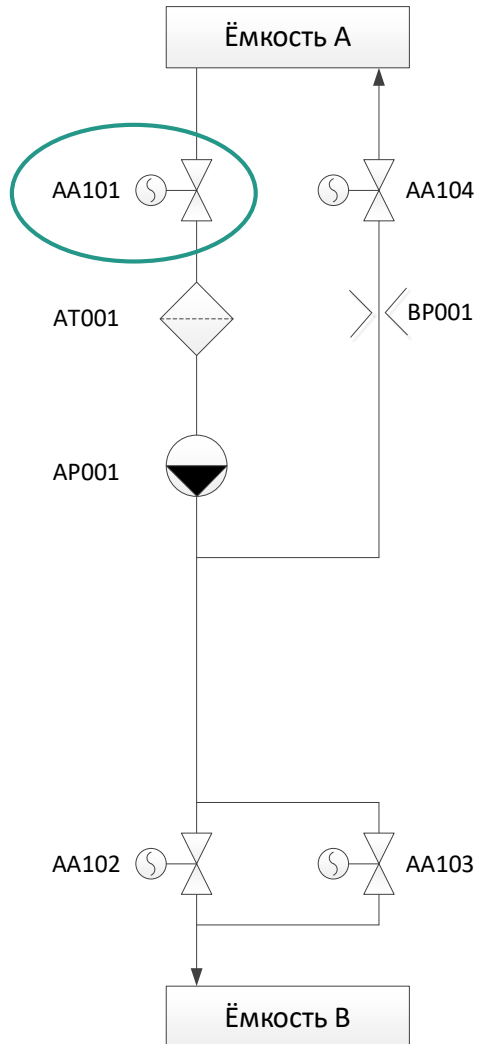


Рассмотрим отдельно роль каждого элемента на данной схеме

Основным элементом является **насосный агрегат AP001**.
Основная функция данного насоса на уровне физических процессов – преодоление разницы давлений между емкостью В и емкостью А, а также гидравлического сопротивления контура

На всасе насосов обычно устанавливаются **механические фильтры AT001** для защиты насоса от попадания в него инородных элементов, к которым могут относиться детали оборудования (попавшие в поток в результате разрушений, дефектов) или материалы после ПНР

Базовая схема

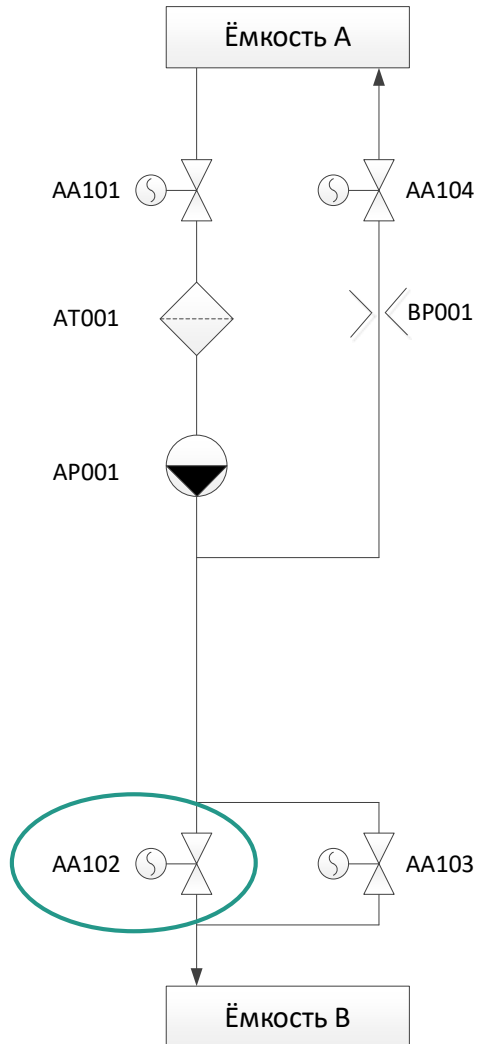


Запорная арматура AA101, расположенная на всасе насоса, предназначена для отключения системы от емкости А. Можно выделить две основные цели отключения:

- Останов выполняемой функции перекачки среды по технологической необходимости
- Отсечение системы для дренирования и вывода в ремонт емкости А или самой системы

Необходимость оснащения данной арматуры электрическим приводом и дистанционным управлением зависит от технологической функции системы

Базовая схема

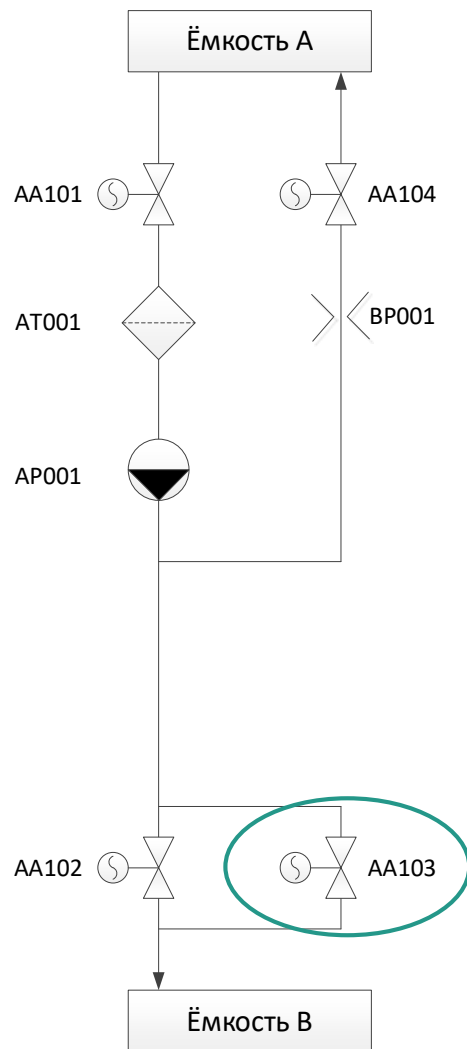


Запорная арматура AA102 выполняет несколько функций:

- Отсечение системы от емкости В (по аналогии с арматурой AA101)
- Помощь в пуске насосного агрегата AP001*

* Центробежные насосы пускаются на закрытую задвижку на напоре для снижения пускового тока и увеличения срока службы насосного агрегата. При пуске насоса на открытую задвижку, так как напорный трубопровод не заполнен, насос работает без сопротивления и уходит по рабочей кривой максимально вправо, поэтому двигатель агрегата может сгореть

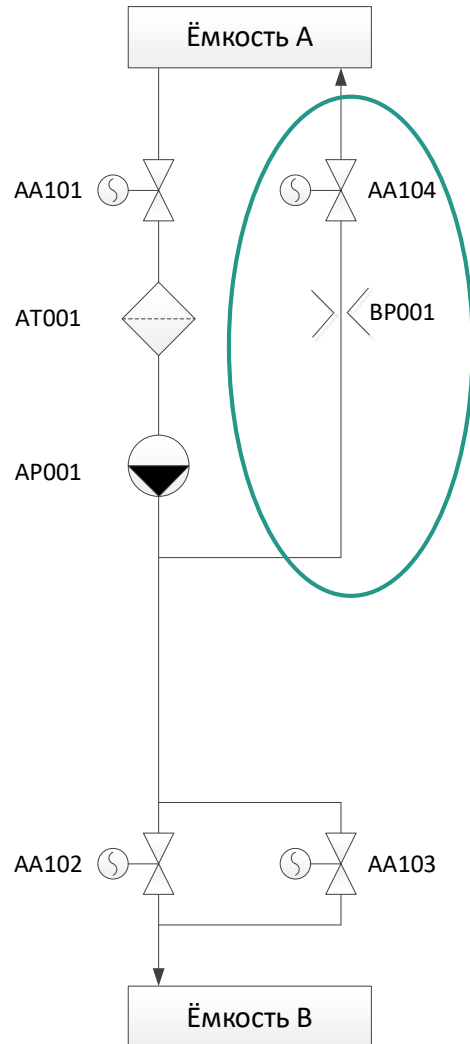
Базовая схема



Запорная арматура AA103 на байпасе арматуры AA102, как и сам байпасный трубопровод малого диаметра, необходимы для систем, где после пуска насоса на закрытую задвижку AA102 на ней возникает значительный перепад давления

Открытие арматуры малого диаметра AA103 с перепадом давлений на ней выполнить легче, после чего давление по обе стороны арматуры AA102 выравнивается, что позволяет открыть ее без переклинивания

Базовая схема



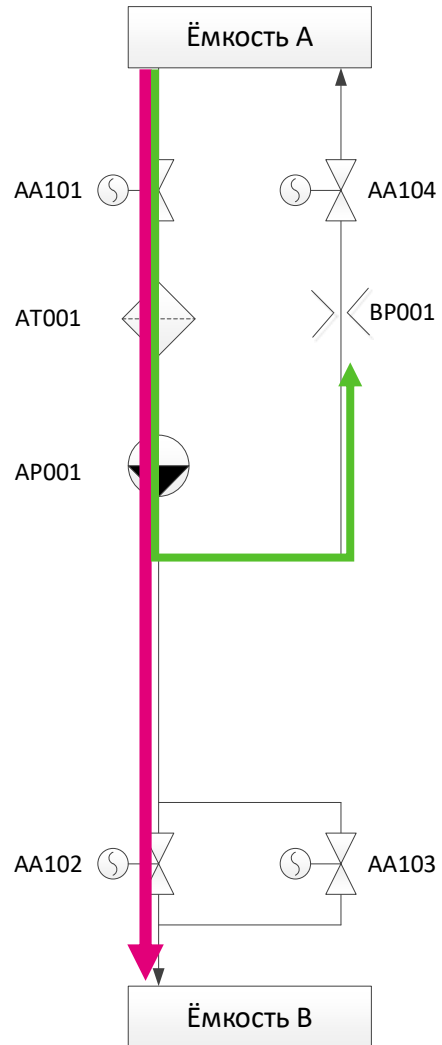
Возвратная линия с арматурой AA104 является линией рециркуляции насоса. Линия рециркуляции предназначена для

- Испытаний насоса (периодических или после ремонта)
- Пусковых режимов с малым расходом

Арматура AA104 предназначена для управления направлением потока среды – в емкость В либо по линии рециркуляции обратно в емкость А

Дроссель BP001 предназначен для получения необходимого значения расхода по линии рециркуляции, исходя из рабочей характеристики насоса

Базовая схема



Режимы работы базовой схемы:

- Подача среды из емкости А в емкость В (розовая линия) – основной режим
- Рециркуляция из емкости А в емкость А (зеленая линия)

Параллельные потоки

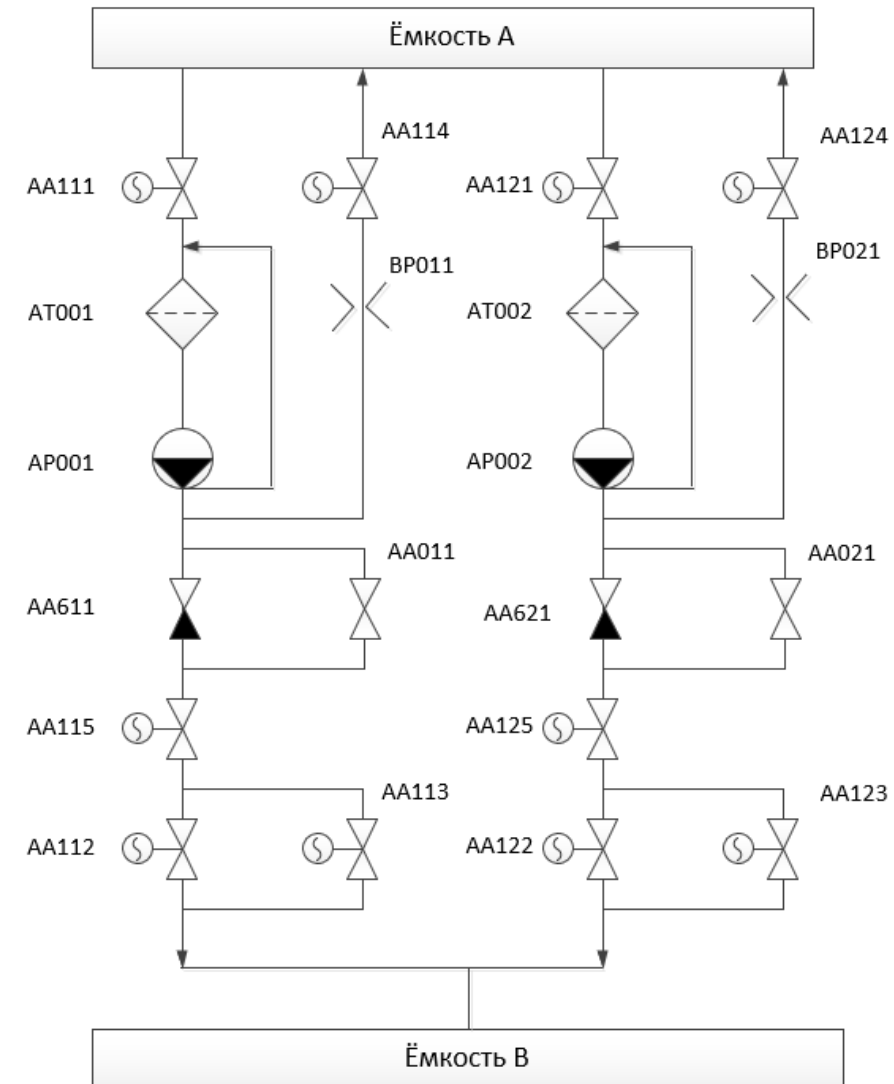


Усложнением базовой схемы является установка нескольких насосных агрегатов в параллель

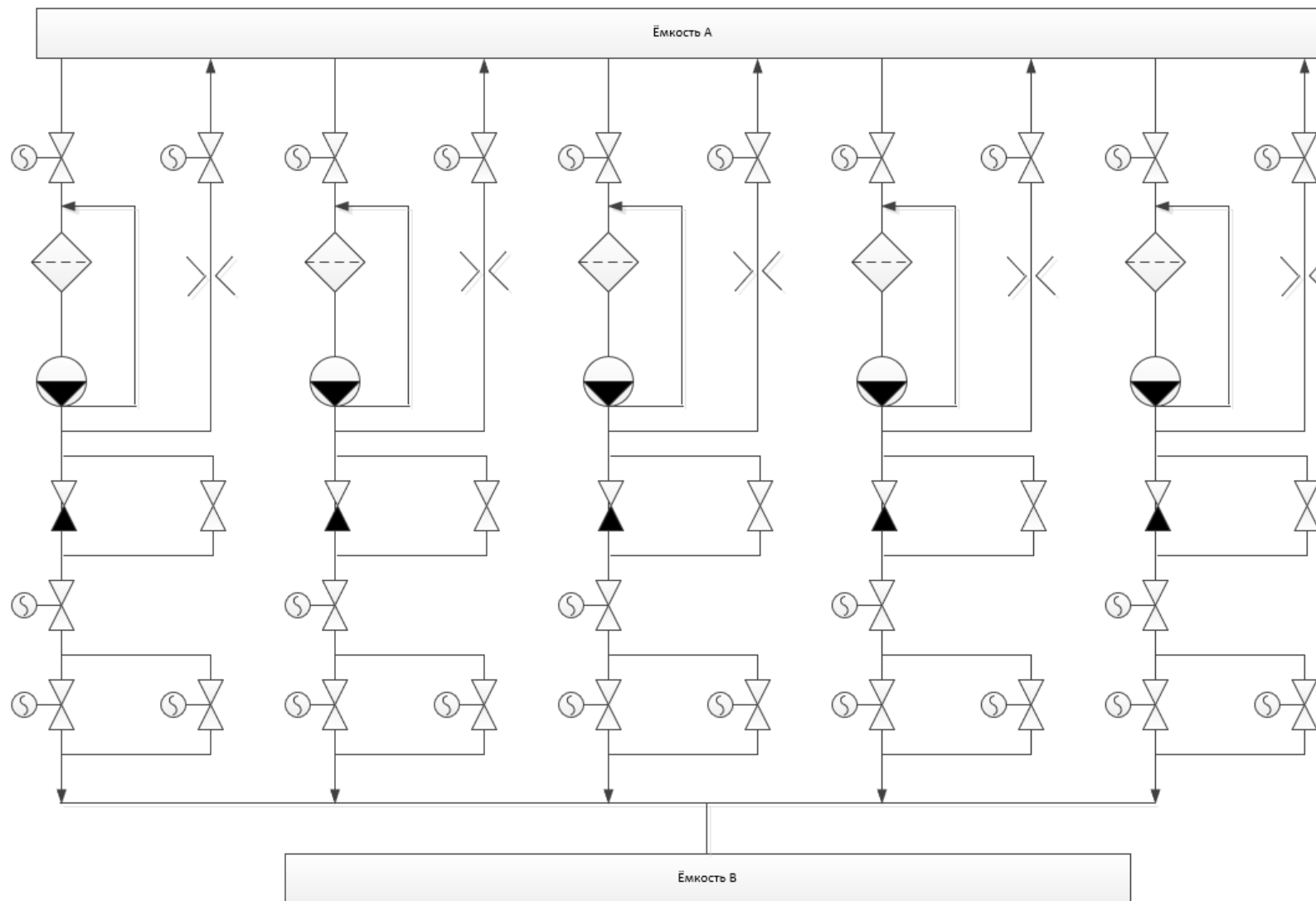
Данное решение может применяться для обеспечения большого расхода, который физически невозможно обеспечить одним насосом, при резервировании оборудования, а также с этими двумя целями одновременно

На схеме на следующем слайде изображен пример участка схемы системы LAC – питательных электронасосов (ПЭН) второго контура.

Далее будем рассматривать часть этой системы с двумя параллельными ветками, изображенную справа



Параллельные потоки



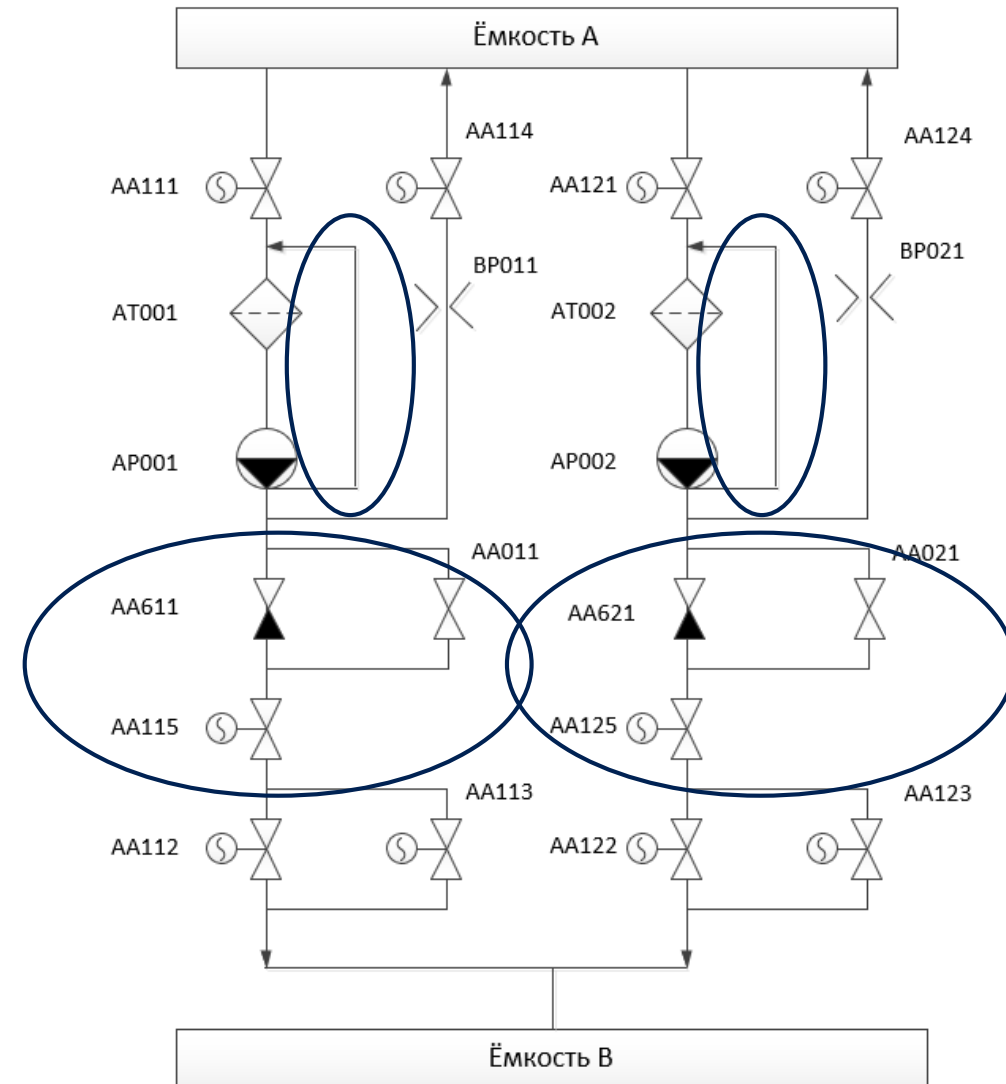
Параллельные потоки



Арматуры AA111(121), AA112(122), AA113(123), линия рециркуляции с запорными арматурами AA114(124) и дроссельными шайбами BP011(021), а также основное оборудование – насосные агрегаты AP001 и AP002, фильтры AT001 и AT002 – выполняют аналогичные функции, как и на базовой схеме

Новое оборудование:

- Обратный клапан AA611(621) с байпасом с ручной арматурой AA011(021)
- Запорная арматура на напоре насоса с электроприводом AA115(125)
- Линия разгрузки от напора насоса в участок перед фильтром AT001(002)

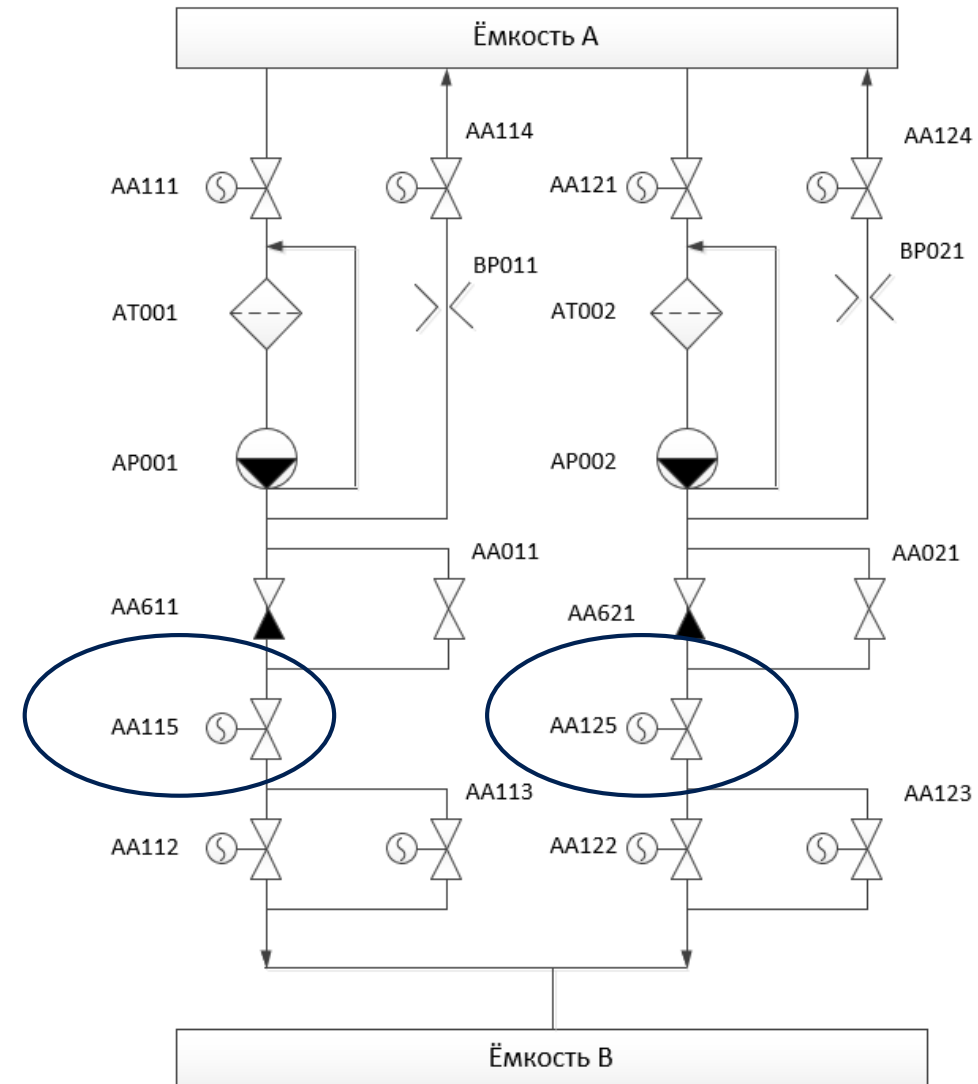


Параллельные потоки



Запорная арматура AA115(125) устанавливается в схеме системы LAC по требованиям НП-089-15 на границе высокого и низкого давления (требование выполняется при наличии двух арматур – AA112(122) и AA115(125))

* Необходимость данной арматуры определяется не наличием параллельного потока, а значениями давлений до и после насосных агрегатов

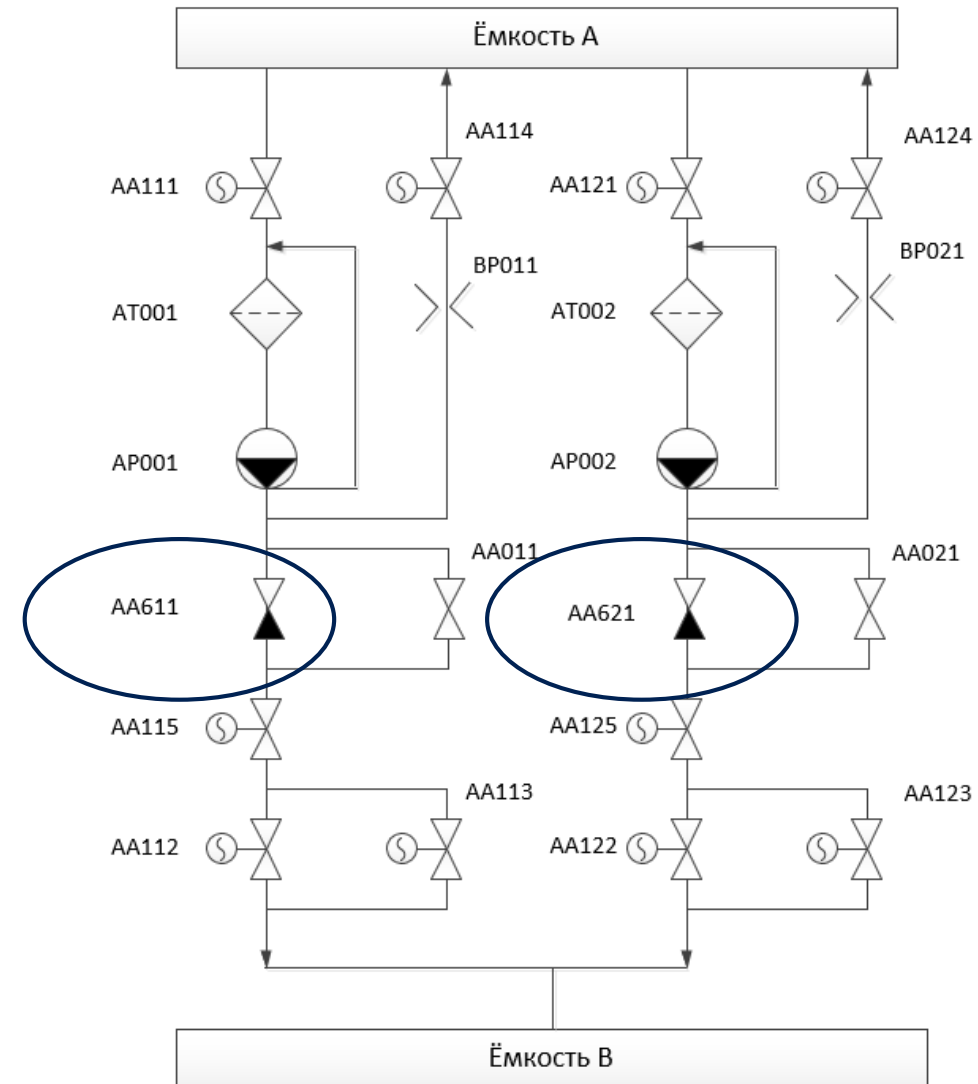


Параллельные потоки



Обратный клапан AA611(621) предназначен для защиты от перетока через неработающие параллельные линии

Например, при работе насоса AP001 и остановленном насосе AP002, давление в линии 1 будет выше давления в линии 2. Это приведет к перетоку жидкости с напора AP001 в напорный трубопровод насоса AP002. Автоматическое пассивное закрытие обратного клапана AA621 в данном случае защитит насос AP002 от обратного хода

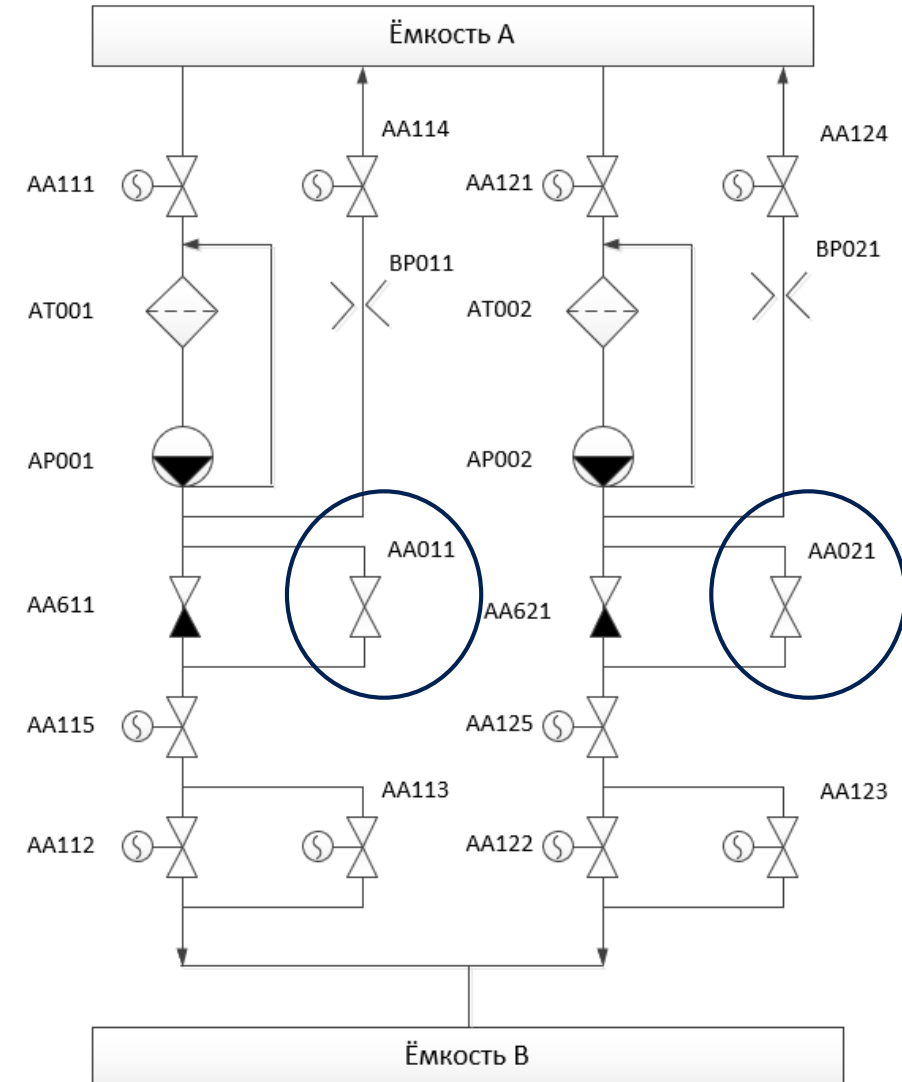


Параллельные потоки



Ручная арматура AA011(021) на байпасе обратных клапанов AA611(621) предназначена для выполнения следующих функций:

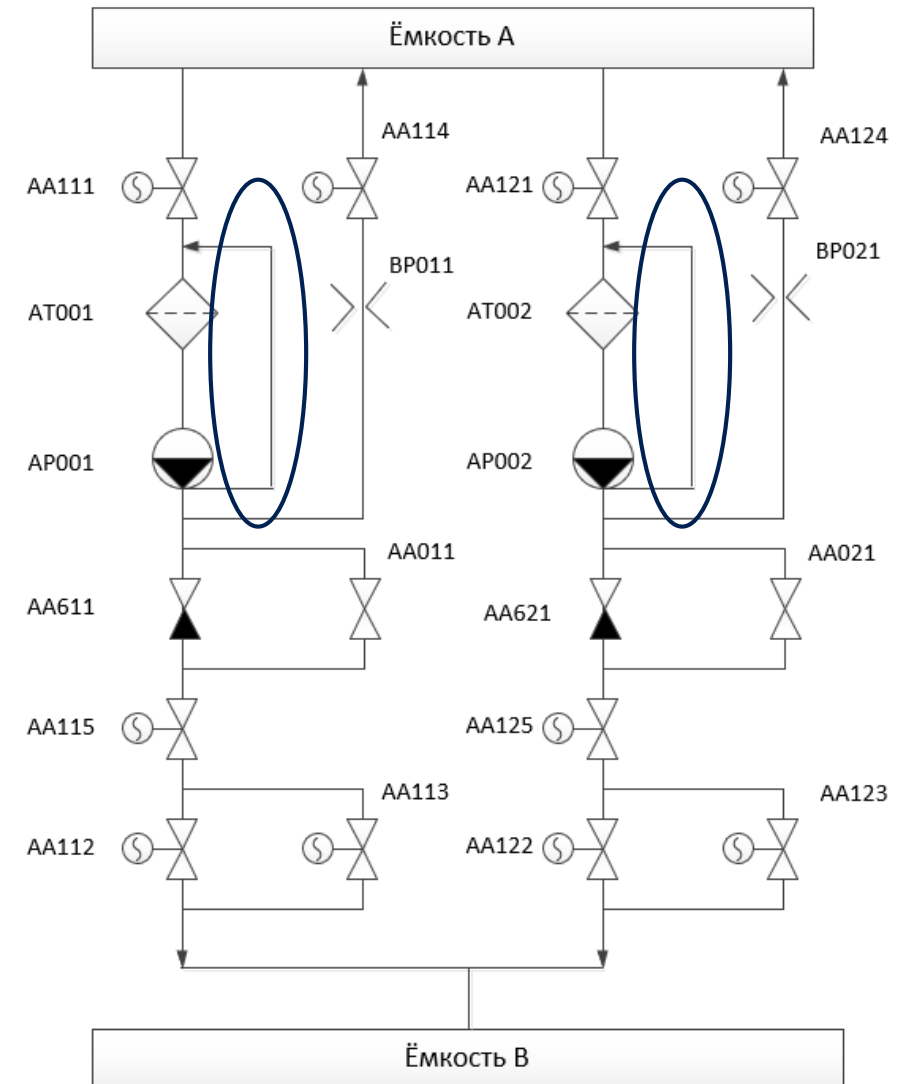
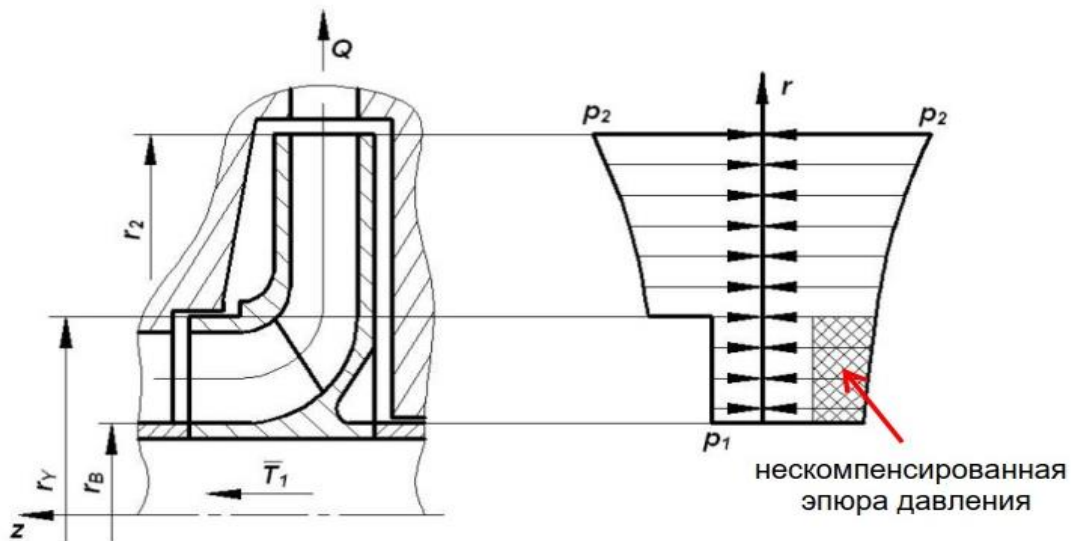
- Дренаживание напорных участков до обратного клапана при неудобной компоновке данных участков
- Поддержание рабочей температуры для резервных насосов организацией перепуска через них малого расхода среды
- Прогрев резервного насоса перед пуском организацией перепуска через них малого расхода среды



Параллельные потоки



Линии разгрузки являются конструктивным решением и предназначены для компенсации усилий на вал насоса, возникающих в ходе его работы (см. рис. ниже). Наиболее чувствительны к таким усилиям горизонтальные многоступенчатые насосы, где давления на каждом колесе складываются и действуют на вал вместе



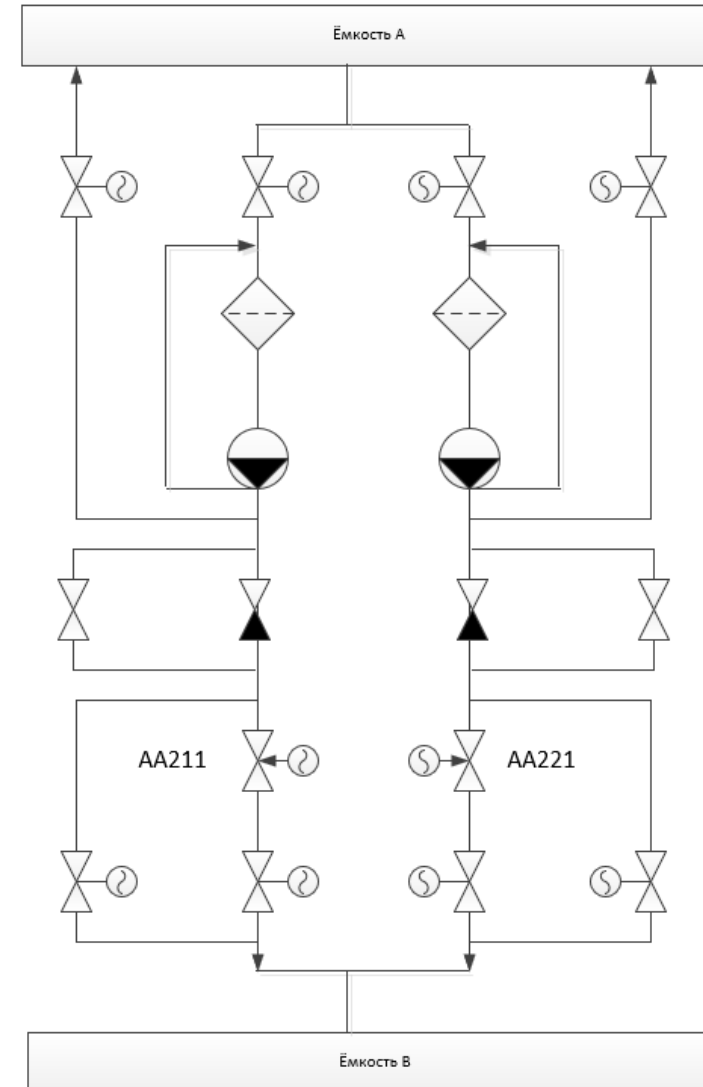
Параллельные потоки — ВПЭН



На схеме справа представлена часть системы вспомогательных питательных насосов (ВПЭН) ЛАН

Основное отличие от ПЭН – установка на напоре регулирующего клапана AA211(221)

Данные регуляторы необходимы для поддержания уровня в парогенераторах на пусковых режимах, когда работают ВПЭНы



Параллельные потоки — КЭН

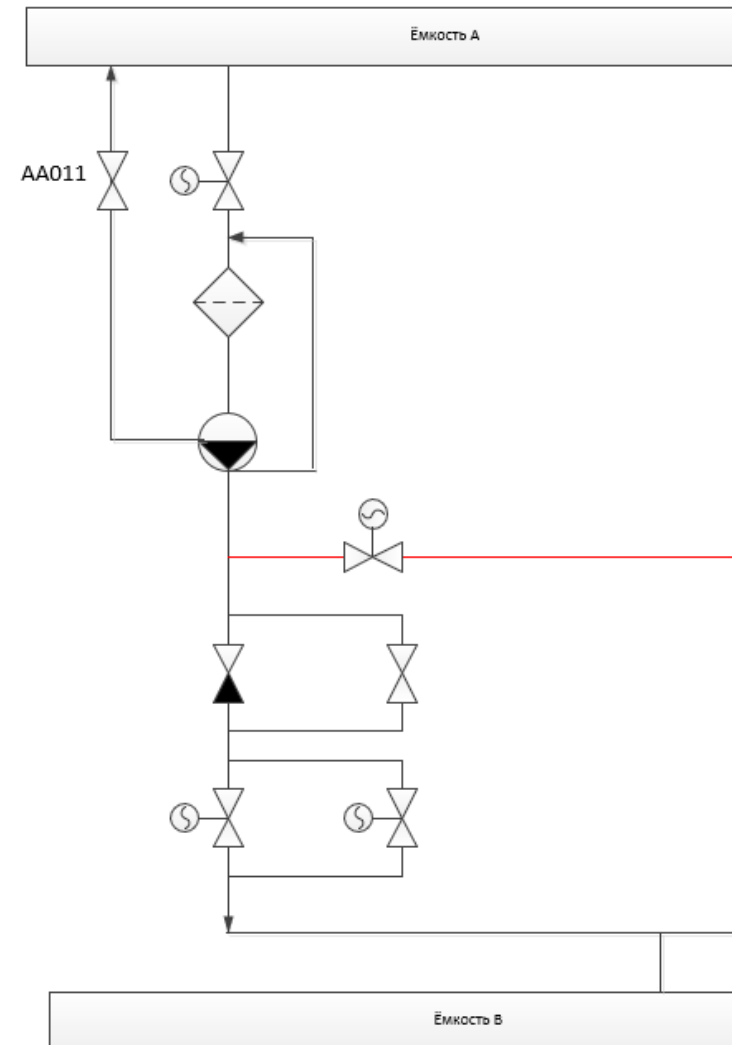


Еще одним интересным примером, иллюстрирующим особенности обвязки насосных агрегатов, является система конденсатных насосов LCB

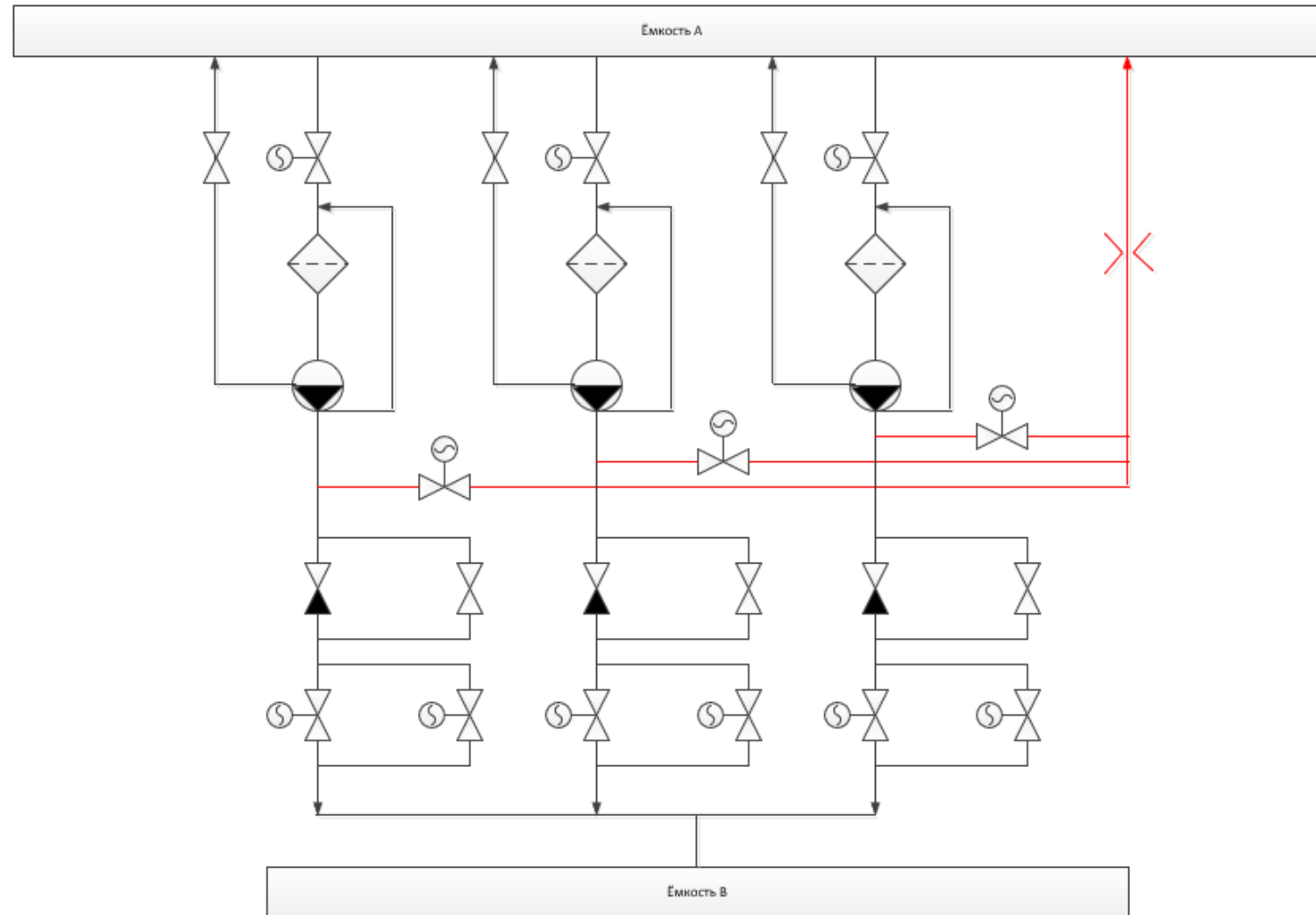
Полный вид схемы представлен на следующем слайде, на данном слайде представлена одна из веток системы

Красная линия является линией рециркуляции первой ветки, объединенной в общий коллектор. Данное решение обусловлено в основном компоновочными решениями

Рассмотрим линию с арматурой AA011



Параллельные потоки — КЭН



Параллельные потоки - КЭН

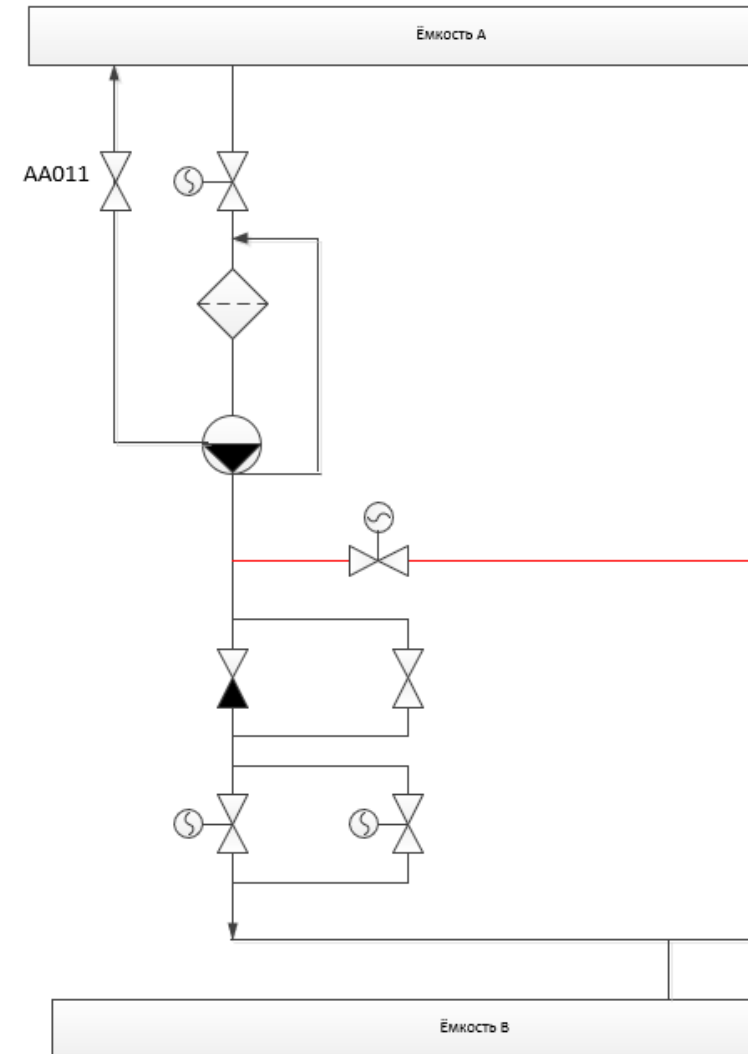


Линия с арматурой AA011 (и аналогичные линии на остальных каналах) связывает верхнюю (геометрически) точку насосного агрегата с емкостью А, которой для КЭНов является конденсатор турбины МАГ

Давление в конденсаторе и в корпусе насоса составляет порядка 5 кПа при атмосферном давлении порядка 101 кПа. При нахождении насоса в резерве, происходит завоздушивание насоса через уплотнения – воздух подсасывается из атмосферы в полость насоса с низким давлением

По линии развоздушивания данный воздух удаляется в конденсатор

По аналогичной схеме выполнены насосы слива сепарата системы ЛСТ



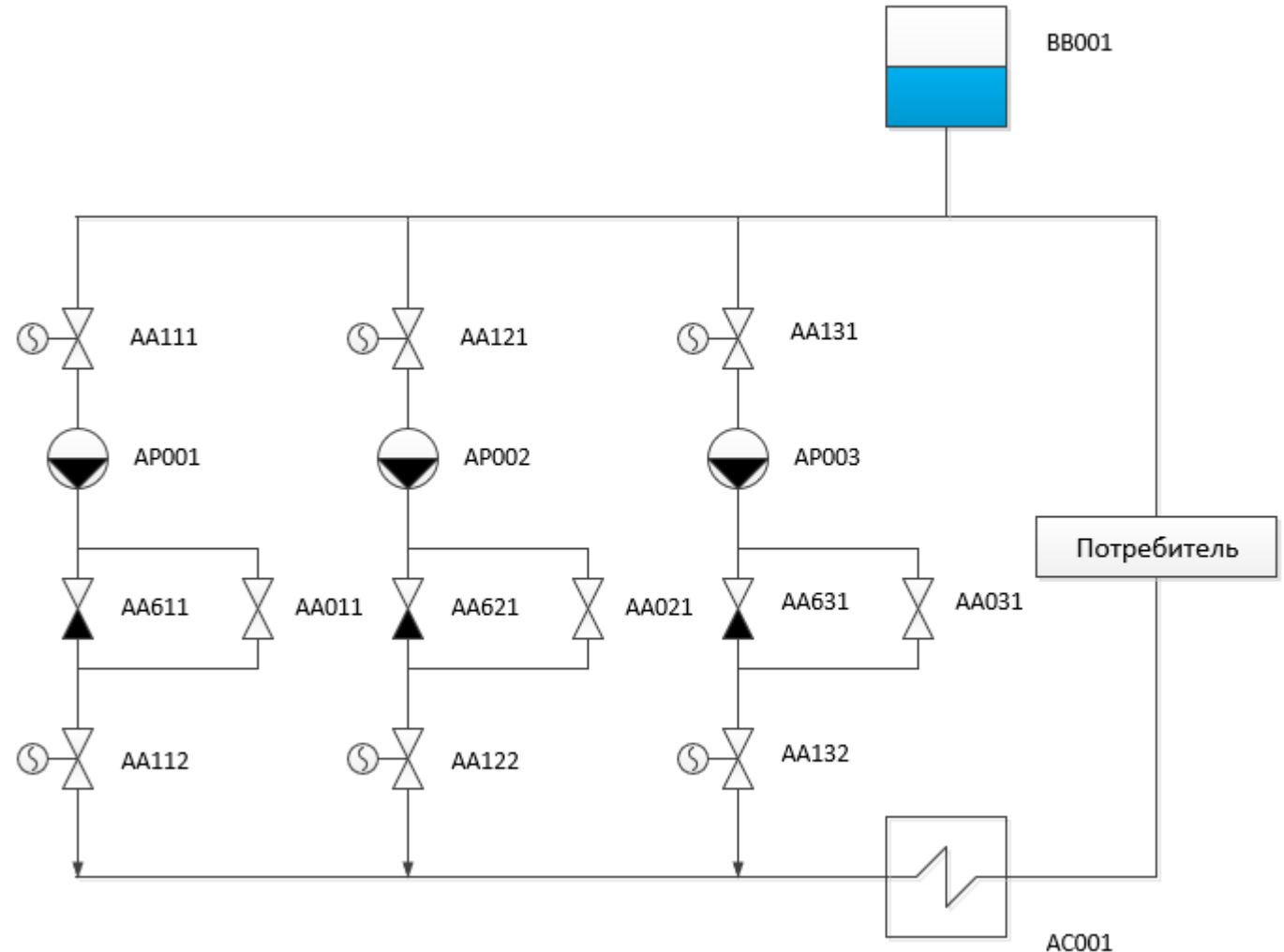
Замкнутый контур



Замкнутый контур является одним из случаев базовой схемы, когда емкости А и В фактически объединены

В данном случае насос работает на преодоление исключительно полного сопротивления данного контура

На схеме справа представлена конфигурация замкнутого контура циркуляции с тремя параллельными ветками (насосные агрегаты AP001, AP002 и AP003), неким потребителем, теплообменником AC001 на общем коллекторе и дыхательным баком BB001



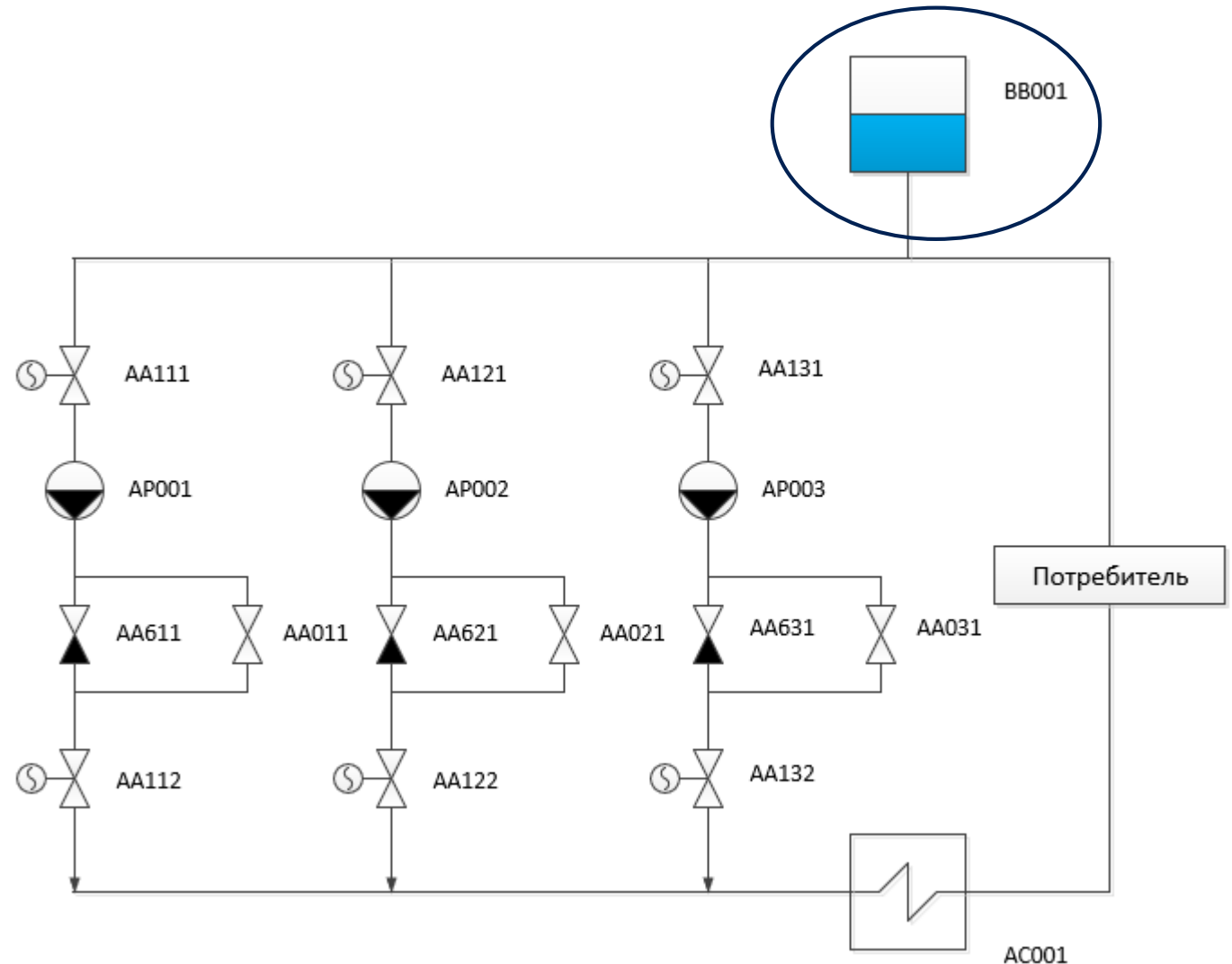
Замкнутый контур



Бак ВВ001 предназначен для:

- компенсации утечек из системы
- создания подпора на всасе насоса
- компенсации температурных расширений и сжатий рабочей среды в контуре при изменении температуры

Функции запорных арматур и обратных клапанов аналогичны базовой схеме и схеме с параллельными линиями



Кавитация



Рассмотрим более подробно такую характеристику насоса как **кавитационный запас**

Физическая природа кавитации заключается в локальном вскипании потока жидкости при падении давления (при понижении давления значение рабочей температуры потока может оказаться выше значения температуры насыщения при новом значении давления). Схлопывание пузырьков пара при дальнейшем повышении давления, в особенности на внутренней поверхности трубопроводов и оборудования, вызывает эрозионное разрушение конструкционных материалов, а также усиливает коррозию за счет непрерывного удаления пассивирующей оксидной пленки



Кавитация



Энергию потока жидкости описывает уравнение Бернулли:

$$p + \rho gh + \frac{\rho w^2}{2} = const$$

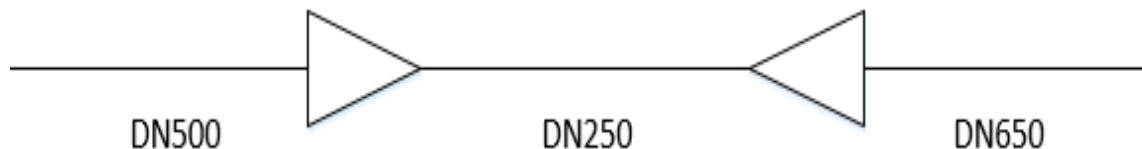
Выводом из этого уравнения является обратная зависимость скорости течения жидкости от ее давления при прочих неизменных параметрах. Разделим на произведение ρg , чтобы получить измерение в чаще используемых метрах, м:

$$\frac{p}{\rho g} + h + \frac{w^2}{2g} = const1$$

Кавитация



Рассмотрим пример потока жидкости, текущей в горизонтальном трубопроводе переменного сечения.



Диаметр трубопровода последовательно меняется, например, на первом участке он равен 500 мм, на втором – 250 мм, на третьем – 600 мм. Запишем уравнение Бернулли для такого потока:

$$p_1 + \frac{\rho w_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho w_2^2}{2} = p_3 + \frac{\rho w_3^2}{2}$$

По уравнению неразрывности:

$$w_1 D_1^2 = w_2 D_2^2 = w_3 D_3^2$$

Следовательно, относительно составляющих энергии на первом участке:

$$p_1 + \frac{\rho w_1^2}{2} = p_2 \downarrow + \frac{\rho w_2^2}{2} \uparrow = p_3 \uparrow\uparrow + \frac{\rho w_3^2}{2} \downarrow\downarrow$$

Кавитация



$$p_1 + \frac{\rho w_1^2}{2} = p_2 \downarrow + \frac{\rho w_2^2}{2} \uparrow = p_3 \uparrow\uparrow + \frac{\rho w_3^2}{2} \downarrow\downarrow$$

При значении $p_2 < p_s$ для рабочей температуре потока на участке трубопровода №2 произойдет вскипание среды, а на участке №3 схлопывание данных пузырьков с множественными гидравлическими ударами

Описанные процессы соответствуют происходящему с потоком жидкости в центробежном насосе, где сначала происходит ускорение потока за счет центробежных сил, а затем его замедление в напорном патрубке

Кавитация



ГОСТ 6134-2017 определяет несколько понятий, связанных с кавитационными характеристиками, а именно имеющийся и требуемый **NPSH** (Net Positive Suction Head, «чистый положительный напор на всасывании»)

(3.1.27) $NPSH_a$: Имеющийся NPSH определяется для заданной подачи условиями установки

(3.1.28) $NPSH_r$: Требуемый NPSH - выдаваемое изготовителем насоса потребителю минимальное значение NPSH для номинальной подачи перекачиваемой жидкости, обеспечивающее работу насоса без падения напора при заданной подаче, т.е. допускаемый кавитационный запас

Кавитация



Фактически, имеющийся $NPSH_a$ определяется конфигурацией технологической системы и его определяет проектировщик. Требуемый $NPSH_r$ зависит от конструкции насоса, т.е. находится в зоне ответственности организации, конструирующей и изготавливающей оборудование. При выборе конкретного насосного агрегата необходимо строго выполнять условие:

$$NPSH_a > NPSH_r$$

Кавитация



Рассмотрим изображенную справа схему установки, состоящей из насосного агрегата и источника среды в виде поднятого на высоту H (с учетом уровня жидкости) бака.

Для данной установки в соответствии с ГОСТ 6134-2017 располагаемый кавитационный запас будет рассчитываться следующим образом:

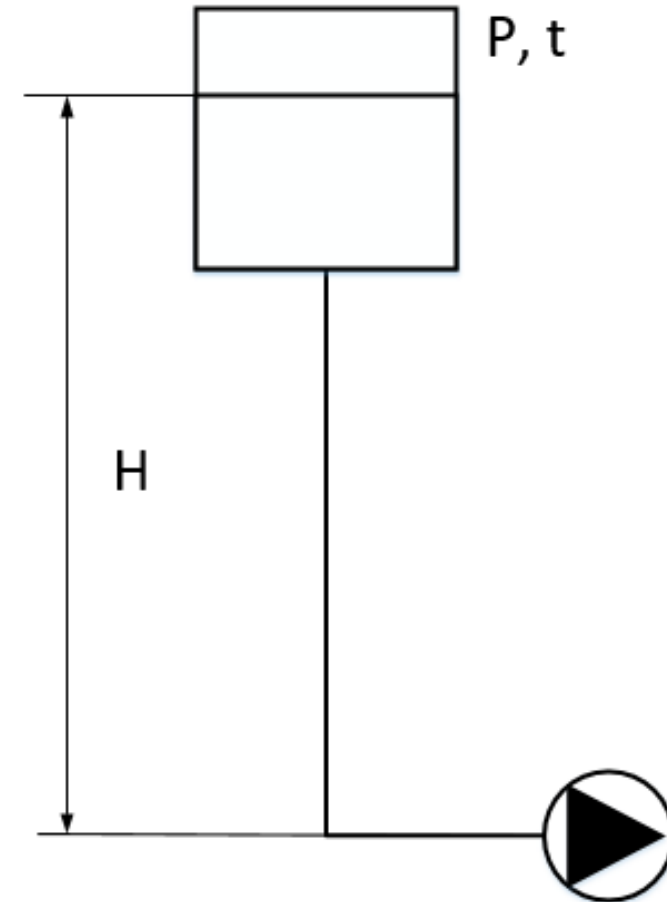
$$NPSH_a = H + \frac{p - p_s}{\rho g},$$

где p – давление в баке, p_s – давление насыщения при температуре t в баке

При $p = 1$ атм (атмосферный бак), $t = 20$ °С ($p_s = 2340$ Па), получаем $NPSH_{a1} = H + 10$ м

При $p = 2$ атм (бак под давлением), $t = 20$ °С ($p_s = 2340$ Па), получаем $NPSH_{a2} = H + 19.8$ м

При $p = 1$ атм (атмосферный бак), $t = t_s$ (жидкость на линии насыщения), получаем $NPSH_{a3} = H$



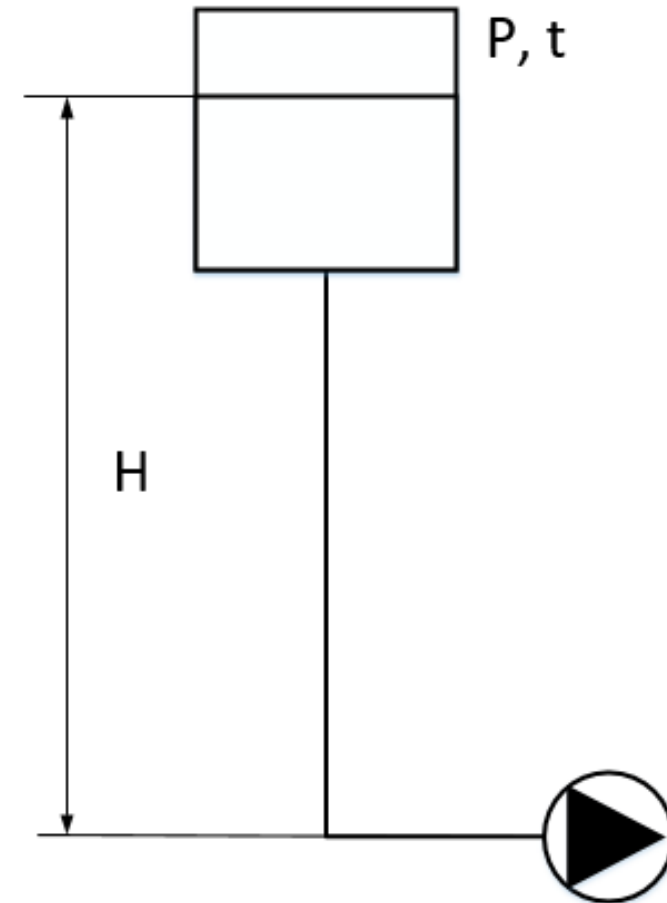
Кавитация



Таким образом, к увеличению располагаемого кавитационного запаса (а, следовательно, улучшению условия работы насосного агрегата) ведет

- увеличение статического давления жидкости на всасе в насос
- уменьшение температуры жидкости на всасе в насос, а также
- увеличение геометрического подпора H

Характеристики давления и температуры в технологических системах АЭС чаще всего условно неизменны, так как определяются технологическим процессом, зачастую единственным способом влиять на располагаемый кавитационный запас можно изменяя геометрическую составляющую H

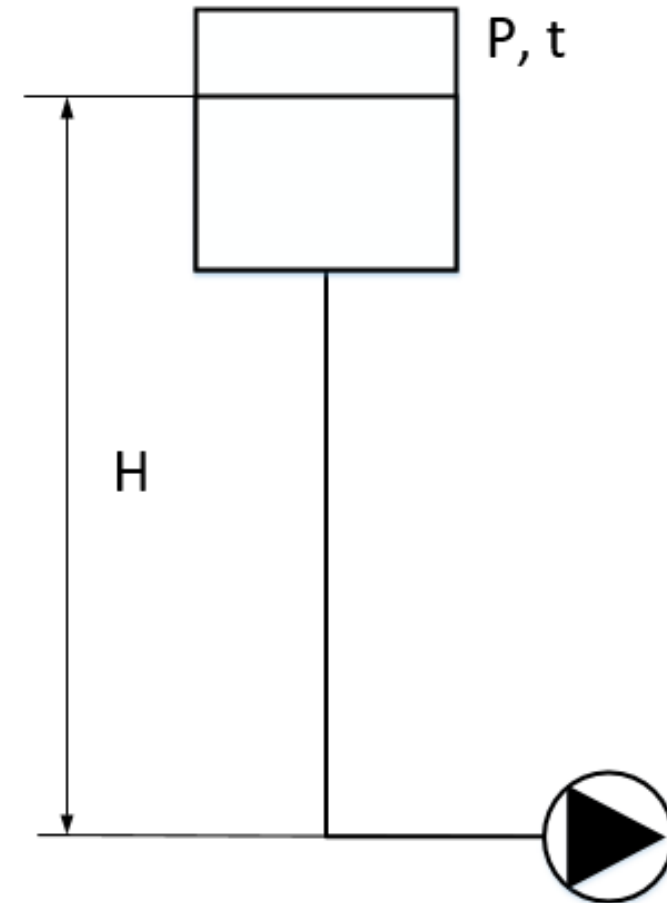


Кавитация



В этом контексте наиболее интересен третий случай, когда жидкость в баке находится на линии насыщения, таким баком является, например, деаэратор второго контура

В данном случае располагаемый кавитационный запас минимален и определяется исключительно разницей высот установки питательного электронасоса (ПЭН) и собственно деаэратора. Именно поэтому ПЭН устанавливаются на нижних отметках здания турбины, а деаэратор вынесен на верхние отметки



Кавитация

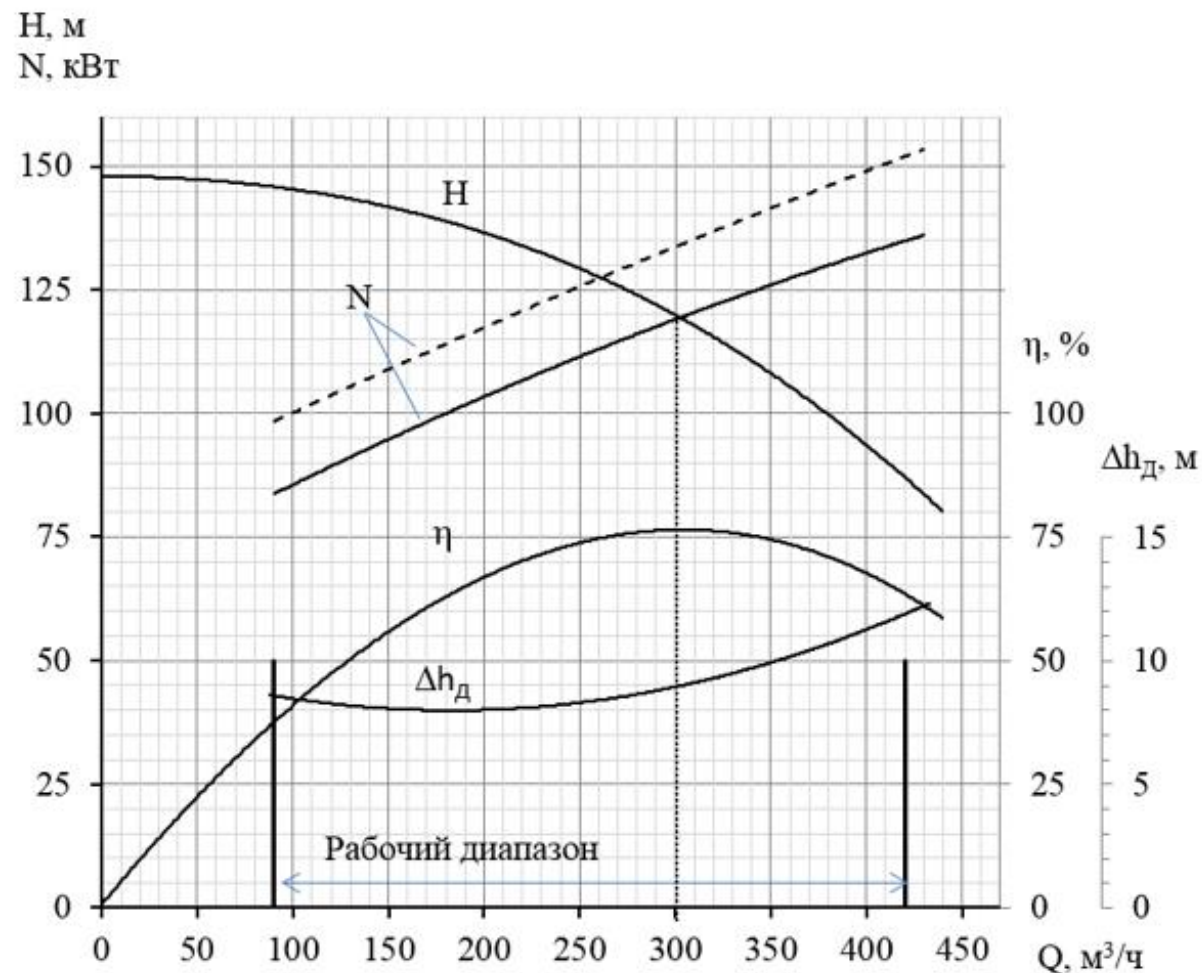


Требуемый кавитационный запас $NPSH_r$ в большинстве случаев отображают на графиках расходно-напорных характеристик.

При невыполнении условия:

$$NPSH_a > NPSH_r$$

и практической невозможности еще более уменьшить требуемый кавитационный запас $NPSH_r$, проектировщик может увеличить располагаемый кавитационный запас $NPSH_a$. Место для уравнения. в соответствии с указанными выше зависимостями (увеличивая давление, подпор или уменьшая температуру на всасе насосного агрегата)



Вопросы для повторения материала



- Зачем необходимы запорные арматуры на напоре центробежных насосов?
- Какой нормативный документ регламентирует установку двух арматур на границе высокого и низкого давления?
- Зачем необходим обратный клапан на напоре насосов?
- Что такое линия развоздушивания насоса, зачем она нужна?
- Чем принципиально отличаются схемные решения для ПЭН и КЭН? Почему?

Спасибо за внимание

Филиппов А.А.

Ведущий инженер-проектировщик
АО «Атомэнергопроект» — СПбАЭП

Санкт-Петербург, Россия – Пакш, Венгрия

